



Universidad de Valladolid

Facultad de Ciencias

TRABAJO FIN DE GRADO

Grado en Física

Fotoluminiscencia en obleas de Silicio con iluminación LED

Autor: Víctor Almendros Abad

Tutor/es: Sofía Rodríguez Conde y Óscar Martínez Sacristán

Índice general

1. Resumen y palabras clave	1
2. Abstract	2
3. Introducción	3
4. Fundamento teórico	4
4.1. Conceptos fundamentales de la teoría de los Semiconductores	4
4.1.1. Teoría de las bandas de energía	4
4.1.2. Dopaje de un semiconductor	6
4.1.3. Generación y recombinación de portadores	9
4.1.4. Coeficiente de absorción (α)	11
4.2. Silicio Solar	12
4.2.1. Silicio de uso solar	12
4.2.2. Obleas de Silicio	15
4.2.3. Células solares de Silicio	15
4.3. Propiedades ópticas de los semiconductores. Luminiscencia.	18
4.4. Fuentes de excitación	19
4.4.1. Diodo LED	20
4.4.2. Láser	23
4.5. Sistemas de detección de luminiscencia. Cámaras CCD	24
4.5.1. Funcionamiento de los dispositivos CCD	24
4.5.2. Cámaras CCD empleadas	26
5. Desarrollo experimental	28
5.1. Fotoluminiscencia con fuente de iluminación Láser	28
5.1.1. Descripción del sistema de iluminación láser	28
5.1.2. Obtención de imágenes	30
5.2. Fotoluminiscencia con fuente de iluminación LED	31
5.2.1. Descripción del LED empleado	31
5.2.2. Soldadura de los LEDs	34
5.2.3. Caracterización de un LED	36
5.2.4. Montaje con ocho LED	39

Índice general]

5.2.5. Montaje con veinte LED	42
5.2.6. Montaje con lente acoplada	45
6. Conclusiones	50

Índice de figuras

4.1. Estructura de bandas de los tres tipos de materiales: aislantes, semiconductores y conductores	4
4.2. Estructura de bandas de un material semiconductor	5
4.3. Estructura de bandas con GAP directo (derecha) e indirecto (izquierda) [6]	6
4.4. Distribución de ocupación de los niveles de energía para diferentes temperaturas. Para $T \approx 0$ (curva azul) se observa que la probabilidad de ocupación sólo puede tomar los valores 1 ó 0 [7]	7
4.5. Dopado con Fósforo (izquierda) y con Boro (derecha) en Silicio	8
4.6. Comportamiento de los pseudoniveles según el exceso de portadores en un semiconductor tipo P, donde p es la concentración de huecos y se define como $p = p_0 + \Delta p$ y n es la concentración de electrones y se define como $n = n_0 + \Delta n$. E_i es el nivel de Fermi del semiconductor intrínseco [7].	9
4.7. Espectros de emisión banda-banda y vía impureza, r_{sp} es el ratio de emisión espontánea. Se observa que la recombinación vía impureza se produce con una energía máxima de E_g , mientras que en la recombinación banda-banda la energía mínima es E_g [7]	10
4.8. Coeficientes de absorción de distintos materiales	12
4.9. Imagen del proceso de fabricación de una célula solar a partir de Silicio monocristalino y de Silicio multicristalino	13
4.10. Espectro de emisión banda-banda del Silicio	14
4.11. Los tres tipos de oblea según su modo de cristalización: a la izquierda monocristalina, en medio cuasi-cristalina y a la derecha multicristalina	15
4.12. Característica I-V típica de una célula fotovoltaica	16
4.13. Curva I-V típica de una célula solar y parámetros característicos	17
4.14. Célula solar (izquierda) y estructura básica de de la misma (derecha)	17
4.15. Imagen típica de una oblea de mc-Si (izquierda) e imagen típica de PL de una oblea mc-Si (derecha), las zonas oscuras indican la presencia de defectos [15]	19
4.16. Bandas de un LED polarizado en directa, a la izquierda la zona P y a la derecha la zona N [7]	20
4.17. Curva I-V típica de un diodo	21
4.18. Proceso de lectura de una imagen en una cámara CCD	25

4.19. Representación de la eficiencia cuántica interna de una CCD de Silicio y una de InGaAs y el espectro de emisión del Silicio en función de la longitud de onda	26
4.20. Cámara de InGaAs de Hamamatsu C12741-03	27
5.1. Hoja de características y diodo láser	28
5.2. Equipo de caracterización PL, donde (1) es el sistema láser, (2) es el cajón donde se colocan las obleas, en (3) se encuentra el cajón en el que se coloca la cámara en transmisión, para las medidas en reflexión la cámara se coloca en (4).	29
5.3. Imagen de una oblea típica utilizada (izquierda) e imagen de fotoluminiscencia obtenida con sistema de iluminación láser (derecha) en transmisión .	30
5.4. Imagen del LED utilizado	31
5.5. Respuesta angular del LED	33
5.6. Característica I-V del LED	34
5.7. A la izquierda la placa empleada para la soldadura de los LEDs, a la derecha el flux empleado en las soldaduras (BJC FL-15)	34
5.8. Imagen del equipo de soldadura empleado	35
5.9. Colocación de los pines en la placa	35
5.10. Curva I-V sin ventilación (izquierda) y con ventilación (derecha)	36
5.11. Equipo de espectroscopía Raman/PL que posee el grupo GdS-Optronlab .	37
5.12. Espectro del LED que ofrece la hoja de características (izquierda) y espectro obtenido experimentalmente (derecha)	37
5.13. Imagen de la cámara termográfica FLIR TG-165 (izquierda) e imagen termográfica típica obtenida (derecha)	38
5.14. Imagen termográfica de un LED en funcionamiento a máxima corriente (0,5 A) por delante (izquierda) y por detrás (derecha) del mismo.	38
5.15. Disposición del montaje en 3D (izquierda) y la disposición vista desde arriba (derecha)	39
5.16. Montaje realizado con ocho LEDs (izquierda) y placa protoboard empleada para su realización (derecha)	40
5.17. Montaje experimental (izquierda) e imagen de PL obtenida con la cámara de InGaAs (derecha) con el sistema de iluminación a 10 <i>cm</i> de la oblea . .	41
5.18. Imagen termográfica del montaje de ocho LEDs en funcionamiento, a máxima corriente	41
5.19. Imagen de PL obtenida con iluminación láser	42
5.20. Montaje realizado con 20 LEDs, a la izquierda la parte anterior y a la derecha la posterior	43
5.21. Montaje experimental (izquierda) e imagen de PL obtenida (derecha) con el sistema de iluminación a 40 <i>cm</i> de la oblea	43

5.22. Disposición angular del sistema de iluminación con LEDs. Se emplea la cámara de InGaAs con un tiempo de exposición de 80 <i>ms</i> (izquierda) y curvas de eficiencia del filtro pasa-banda, cámara de InGaAs y espectro de emisión banda-banda del Silicio.	44
5.23. Imágenes obtenidas sin y con filtro pasa-banda con la disposición angular del sistema de iluminación con LEDs	44
5.24. Montaje realizado con la lente	45
5.25. Distribución de la luz sobre la oblea con el montaje de veinte LEDs con la lente (la luz que emiten los LEDs se ve de color morado)	46
5.26. Imagen termográfica en funcionamiento de la parte anterior (izquierda) y la parte posterior (derecha)	46
5.27. Esquema del montaje realizado (izquierda) e imagen de PL obtenida con este montaje (derecha)	47
5.28. Esquema del montaje realizado (izquierda) e imagen de PL obtenida con este montaje (derecha)	47
5.29. Imagen del montaje con la oblea a 10 cm de la lente (izquierda) e imagen de PL obtenida (derecha)	48
5.30. Imagen de PL obtenida sin la lente	48
5.31. A la izquierda montaje realizado con la lente a 10 cm de la oblea usando la cámara de InGaAs con la óptica swir, a la derecha imagen de PL obtenida	49

Índice de Tablas

4.1. Mayores valores de eficiencia registrada en condiciones estándar (1000 W/m^2 y 25°C) en células c-Si y mc-Si	14
5.1. Hoja de características del LED con los valores máximos a $T_A = 25 \text{ }^\circ\text{C}$	32

Capítulo 1

Resumen y palabras clave

Actualmente, la técnica de fotoluminiscencia se usa cada vez más para observar defectos en estados iniciales de la fabricación de obleas de Silicio (fase inicial del proceso de fabricación de una célula solar), aunque también se emplea para observar defectos en las células solares finales.

La iluminación externa de una oblea o célula solar produce una emisión de fotones los cuales son recogidos con un sistema de detección. Normalmente la fuente de iluminación es láser, pero presenta ciertas desventajas. Una de las alternativas es el uso de iluminación LED.

En este trabajo se desarrolla un sistema de iluminación LED para obtener imágenes de fotoluminiscencia en obleas de Silicio multicristalino.

Palabras clave: Fotoluminiscencia, Silicio, LED, CCD de InGaAs, oblea de Silicio.

Capítulo 2

Abstract

Nowadays, the photoluminescence technique is being used more and more to observe defects in the early steps of the fabrication of Silicon wafers (early phase of the fabrication of solar cells), as well as in final solar cells.

The external illumination of a wafer or a solar cell produces an emission of photons, collected by a detection system. Commonly, the source of illumination is a laser device, but it presents certain drawbacks. One of the alternatives is the use of LED illumination.

In this essay a LED illumination source is developed in order to obtain photoluminescence images of multicrystalline Silicon wafers.

Capítulo 3

Introducción

La fuerte crisis del petróleo producida durante los años 70, generó un fuerte desarrollo del sector de las energías renovables, con el fin de encontrar otras fuentes de energía. Desde este momento, el uso de la energía solar fotovoltaica se encuentra en continuo crecimiento [1]. Concretamente, en el año 2015, el porcentaje de uso de energía solar fotovoltaica en España fue del 3,1 % del total de la energía gastada [2] y a principios de 2017, la producción global de energía solar fotovoltaica ha sido de alrededor de 300 GW [3].

Debido al aumento en el interés de esta energía, surge la necesidad de incrementar la producción de módulos solares, construidos a partir de células solares y estas a su vez de obleas de Silicio, siendo éste el material matriz. Como en la mayoría de procesos industriales, resulta muy interesante desarrollar mecanismos de inspección de los materiales con el fin de asegurar la calidad de los mismos en los diferentes puntos de su proceso de construcción. En este sentido, la fotoluminiscencia es una de las herramientas más empleadas para la caracterización óptica de las obleas de Silicio, ya que no requiere contacto con el material y su inserción en la cadena de proceso es muy sencilla. El principio de funcionamiento consiste en excitar la muestra de silicio con luz y recoger la luminiscencia que genera el material.

El grupo de Semiconductores Optronlab del Departamento de Física de la Materia Condensada de la Universidad de Valladolid posee en sus instalaciones un equipo de obtención de imágenes de fotoluminiscencia, en el que el sistema de iluminación que usan es un láser. Sin embargo, dicha fuente de luz presenta algunas desventajas que se describirán más adelante. El presente trabajo tiene como objetivo el desarrollo de una alternativa muy interesante a dicho sistema láser como es una fuente de iluminación LED [4], cuyas principales ventajas son su bajo coste y su fácil adquisición entre otras.

Capítulo 4

Fundamento teórico

4.1. Conceptos fundamentales de la teoría de los Semiconductores

Los semiconductores son materiales que pueden ser conductores o aislantes según la magnitud de distintas propiedades (temperatura, dopaje, corriente,...). La caracterización energética de los materiales se realiza mediante bandas de energía.

4.1.1. Teoría de las bandas de energía

En la Figura 4.1 se observan las diferencias entre los tres tipos de materiales según la disposición de sus bandas de energía.

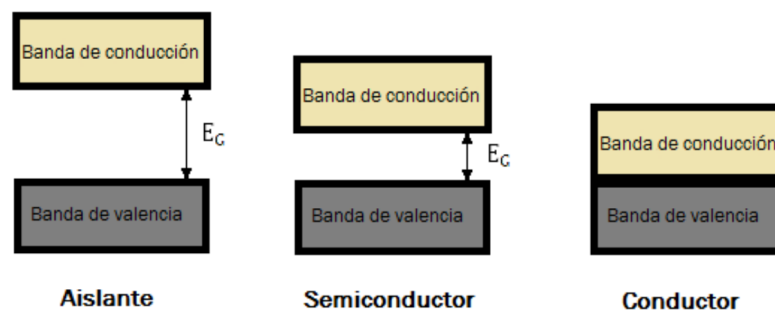


Figura 4.1: Estructura de bandas de los tres tipos de materiales: aislantes, semiconductores y conductores

En el caso de los materiales semiconductores, se denomina banda de conducción (E_C) al

4.1. Conceptos fundamentales de la teoría de los Semiconductores]

límite inferior de la banda de mayor energía y banda de valencia (E_V) al límite superior de la banda de menor energía, como se muestra en la Figura 4.2. En estas bandas se aglutinan los portadores y según estén llenas, vacías o semillenas se considerarán los portadores como libres o no. En un material semiconductor a temperatura ambiente, la banda de valencia se encuentra llena de electrones y en la banda de conducción hay algún electrón libre.

Entre los materiales semiconductores se encuentran el Silicio, el Germanio, el Arseniuro de Galio (GaAs), etc.

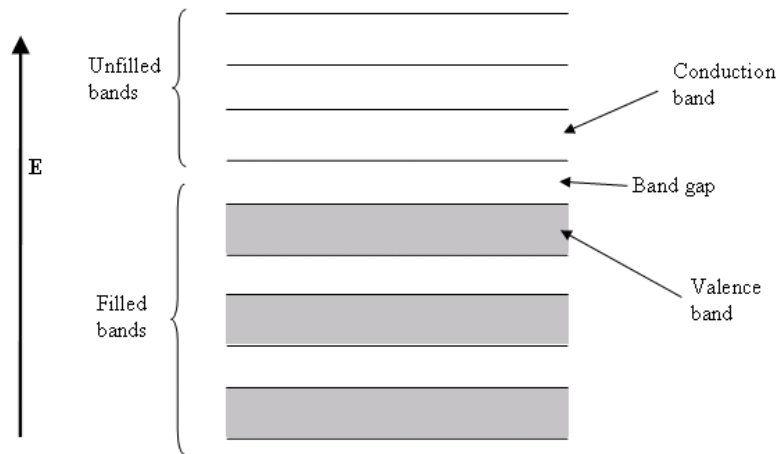


Figura 4.2: Estructura de bandas de un material semiconductor

En un material semiconductor, las partículas portadoras de carga son los electrones y los huecos, con carga negativa y positiva respectivamente. Se denomina hueco a la ausencia de electrón y se caracteriza como una carga más, teniendo masa propia.

Las bandas de energía de un material semiconductor se caracterizan por el GAP, que es la diferencia de energía entre las bandas de conducción y de valencia, pudiendo ser de tipo directo o indirecto según si el mínimo de la banda de conducción y el máximo de la banda de valencia se encuentren en el mismo punto de la celda de Brillouin o no (mismo momento k) (Figura 4.3). En los semiconductores de GAP indirecto, los procesos radiativos son mucho menos probables al tratarse de un proceso a dos partículas [5].

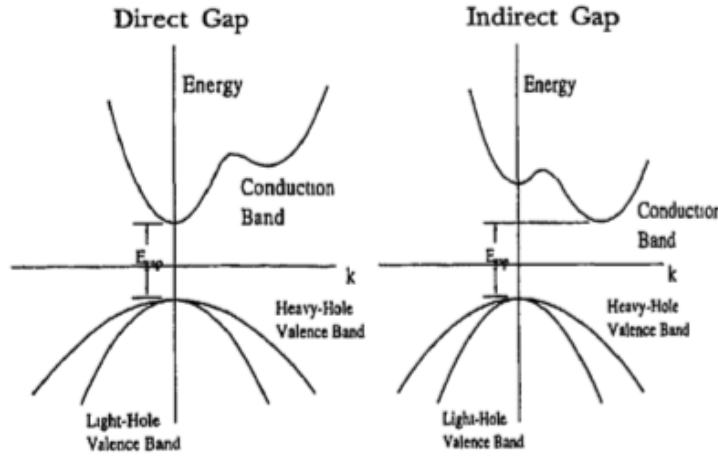


Figura 4.3: Estructura de bandas con GAP directo (derecha) e indirecto (izquierda) [6]

4.1.2. Dopaje de un semiconductor

Se denomina dopaje de un semiconductor al proceso por el cual se consigue que un material semiconductor tenga una concentración diferente de electrones y de huecos.

Cuando a un semiconductor no se le ha practicado ningún dopaje y tiene la misma concentración de electrones y de huecos se le denomina semiconductor intrínseco. Este se caracteriza porque tiene el nivel de energía de Fermi (E_F , nivel de energía que tiene probabilidad de ocupación 1/2) cae aproximadamente en la mitad de las bandas.

La probabilidad de ocupación de una banda energética se representa mediante la estadística de Maxwell-Boltzmann para semiconductores no degenerados y de Fermi-Dirac (Figura 4.4) para los degenerados. Se tiene que un semiconductor es no degenerado si $E_c - F_n > 3K_B T$, $F_p - E_v > 3K_B T$, donde F_n y F_p son los pseudoniveles de Fermi (explicados más adelante) y K_B es la constante de Boltzmann. La probabilidad de ocupación ($f(E)$) en la estadística de Fermi-Dirac viene dada por la expresión:

$$f(E) = \frac{1}{1 + \exp \frac{E - E_F}{K_B T}} \quad (4.1)$$

En el caso de semiconductores no degenerados, esto es en la aproximación de Maxwell-Boltzmann, la expresión anterior se puede simplificar en:

$$f(E) \approx \exp \frac{E_F - E}{K_B T} \quad (4.2)$$

Cuando la concentración de electrones es mayor que la de huecos, el nivel de Fermi se encontrará más cerca de la banda de conducción, este tipo de semiconductores se les

denomina de tipo N. Por otro lado, el nivel de Fermi se encontrará más cerca de la banda de valencia si la concentración de electrones es menor que la de huecos y a este tipo de semiconductores se les denomina de tipo P.

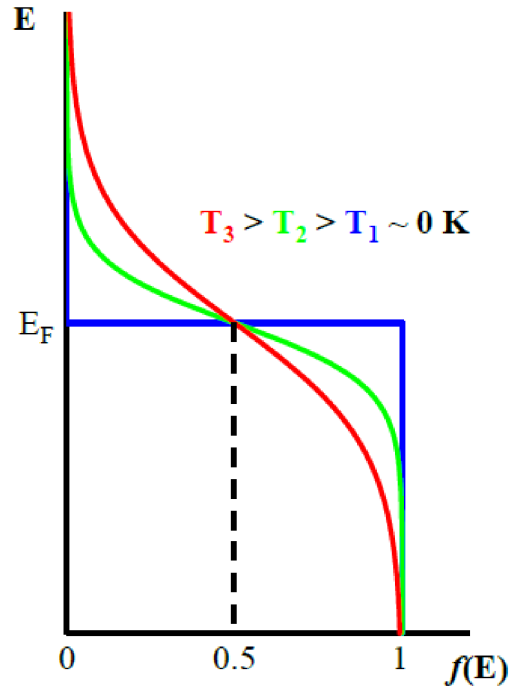


Figura 4.4: Distribución de ocupación de los niveles de energía para diferentes temperaturas. Para $T \approx 0$ (curva azul) se observa que la probabilidad de ocupación sólo puede tomar los valores 1 ó 0 [7]

El dopaje de un material semiconductor consiste en la introducción de átomos con diferente número de electrones de valencia. Esta característica la cumplen elementos de diferentes grupos de la tabla periódica.

Si el dopado se realiza con un átomo que tiene un electrón de valencia más que los átomos del material que se está dopando, habrá un electrón libre. A este tipo de dopado se le denomina donador/donador. Un dopado de este tipo da lugar a un semiconductor de tipo N. Este es el ejemplo de un dopado que se realiza sobre un cristal de Silicio (cuatro electrones de valencia) con Fósforo (cinco electrones de valencia). En la Figura 4.5 se ilustra el dopado del Silicio con Fósforo y con Boro.

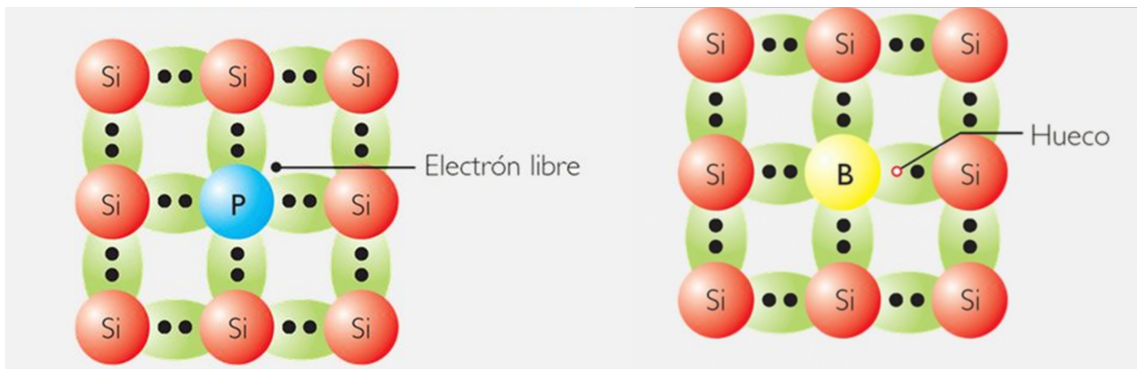


Figura 4.5: Dopado con Fósforo (izquierda) y con Boro (derecha) en Silicio

Si el dopado se realiza con un átomo que tiene un electrón de valencia menos entonces habrá un hueco libre y se denomina dopado aceptor. Un dopado de este tipo da lugar a un semiconductor de tipo P. Este es el ejemplo de un dopado que se realiza sobre un cristal de Silicio con Boro (tres electrones de valencia).

Los dopados se suelen realizar con átomos que tengan diferencias de un único electrón de valencia para que no se creen defectos en el material [14].

Según el nivel de dopado se clasifican los niveles de dopado en baja y alta inyección.

Cuando se realiza un dopado, la concentración de portadores de la banda de conducción y de valencia se expresan de forma separada. Así, se introducen los pseudoniveles de Fermi, que son los equivalentes al nivel de Fermi en el caso de existencia de dopaje, es decir, dan cuenta de la probabilidad de ocupación de los niveles energéticos. Esta distribución es similar para de un semiconductor intrínseco explicada anteriormente (Figura 4.4), pero ahora la probabilidad de ocupación $1/2$ se encuentra el pseudonivel correspondiente.

En el caso de un semiconductor de tipo N, el pseudonivel (F_n) se encontrará más cerca de la banda de conducción. En el caso del semiconductor de tipo P, el pseudonivel (F_p) se encuentra más cerca de la banda de valencia.

El pseudonivel del tipo que no se ha dopado se encontrará en el nivel de Fermi. Si se inyectan portadores del tipo que no se había dopado, el pseudonivel correspondiente irá desplazándose hasta que se encuentre a la misma distancia del nivel de Fermi que el otro pseudonivel, a partir de este momento ambos pseudoniveles se moverán parejos. El comportamiento de los pseudoniveles descrito se representa en la Figura 4.6.

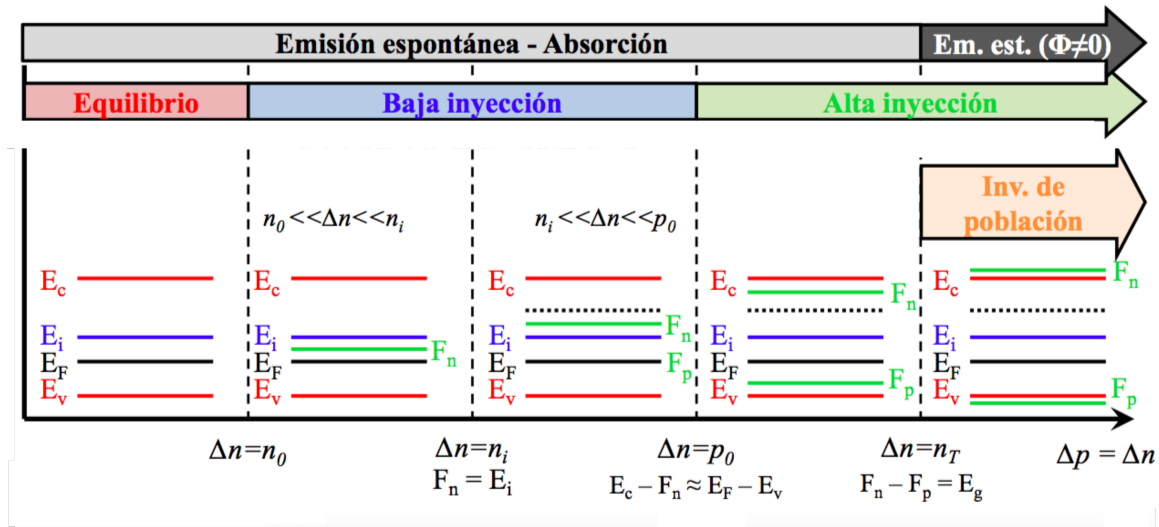


Figura 4.6: Comportamiento de los pseudoniveles según el exceso de portadores en un semiconductor tipo P, donde p es la concentración de huecos y se define como $p = p_0 + \Delta p$ y n es la concentración de electrones y se define como $n = n_0 + \Delta n$. E_i es el nivel de Fermi del semiconductor intrínseco [7].

4.1.3. Generación y recombinación de portadores

Dos procesos importantes que se pueden dar en un material semiconductor son la generación de portadores (y su posterior absorción) y la recombinación de pares electrón-hueco, con o sin emisión posterior de un fotón [14].

- Generación de portadores

La generación de portadores que se va a desarrollar, consiste en la creación de pares electrón-hueco. Esta generación de portadores se produce por la absorción de un fotón en el material semiconductor.

Si la energía de este fotón es igual o mayor que el ancho de la banda prohibida del material semiconductor, se absorberá y excitará a un electrón a la banda de conducción, dejando un hueco en la banda de valencia.

- Recombinación de pares electrón-hueco

La recombinación de un par electrón-hueco se produce cuando hay un electrón excitado en la banda de conducción y un hueco en la banda de valencia. La recombinación consiste en la relajación de un electrón a la banda de valencia y de un hueco a la banda de conducción. A la recombinación del par le puede acompañar o no la emisión de un fotón.

El proceso de recombinación se clasifica en dos tipos según cual sea la partícula que se emite.

La recombinación de un par electrón-hueco se denomina radiativa si la partícula emitida es un fotón, que tiene mucha energía pero poco momento. Esta recombinación se puede producir banda-banda o mediante niveles donador-aceptor. Una recombinación banda-banda se trata de una recombinación de un electrón en el borde de la banda de conducción y un hueco del borde de la banda de valencia. Una recombinación vía impureza se trata de una recombinación entre niveles de energía de impurezas (que se encuentran un poco por debajo de la de conducción y un poco por encima de la de valencia). Estos niveles de energía de impurezas aparecen con los dopajes de los materiales semiconductores.

En la Figura 4.7 se observan los espectros de energía de los dos tipos de recombinaciones radiativas comentados.

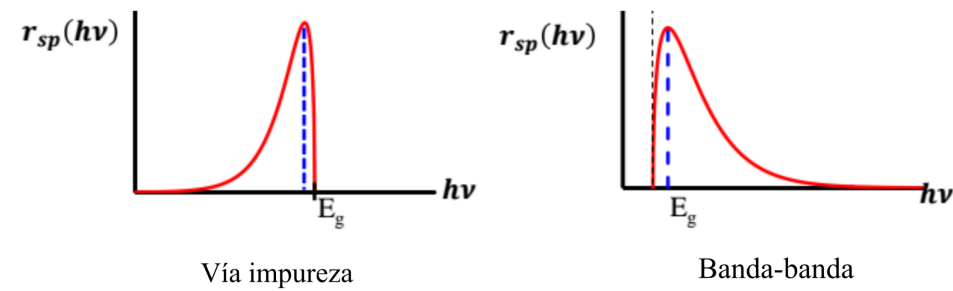


Figura 4.7: Espectros de emisión banda-banda y vía impureza, r_{sp} es el ratio de emisión espontánea. Se observa que la recombinación vía impureza se produce con una energía máxima de E_g , mientras que en la recombinación banda-banda la energía mínima es E_g [7]

La recombinación electrón-hueco también puede ser no radiativa. Se denomina así cuando la partícula emitida es un fonón, que tiene poca energía (su energía es $K_B T$) pero mucho momento. Un fonón es una partícula que está asociada a las vibraciones reticulares. La energía es emitida en forma de calor.

Las recombinaciones no radiativas se pueden producir por recombinaciones vía centros profundos (defectos del material) o por recombinaciones Auger. Este tipo de recombinación no da lugar a fotones (luz) por tanto.

Un proceso de recombinación Auger afecta a dos electrones y un hueco o a dos huecos y un electrón. Este proceso consiste en la recombinación de un electrón y un hueco. La energía sobrante se transmite en forma de calor al electrón o hueco que queda, después este electrón o hueco caliente emitirá el calor en forma de fonones.

En base a esto, se puede entender de manera sencilla qué ocurre cuando un material semiconductor de GAP indirecto emite luz. Para que un material de GAP indirecto

pueda emitir luz necesita un fotón y un fonón, siendo por tanto un proceso poco probable [8].

■ Emisión de luz

La emisión de luz se puede clasificar en dos tipos: emisión espontánea y emisión estimulada.

La emisión espontánea de luz es debida a un electrón que se encuentra en la banda de conducción que se recombina con un hueco situado en la banda de valencia.

La emisión estimulada de luz se produce cuando hay inversión de población. Esta emisión se produce cuando el material semiconductor se encuentra en alta inyección y $F_n - F_p > E_g$. Este tipo de emisión es el que se produce en los diodos láser.

Cuando un material semiconductor se encuentra en inversión de población, el pseudonivel F_n se encuentra por encima de la banda de conducción y el pseudonivel F_p se encuentra por debajo de la banda de valencia. En esta configuración de las bandas, se tiene que por debajo del pseudonivel tipo N la probabilidad de ocupación de un electrón es distinta de cero y por tanto habrá electrones libres. Ocurre lo mismo con el pseudonivel F_p . La recombinación de un electrón y un hueco y la emisión de un fotón ocurrirán de forma espontánea. Para mantener esta emisión tiene que haber un flujo incidente de fotones (bombeo óptico) o una cavidad óptica que produzca las condiciones necesarias para que haya emisión mantenida.

4.1.4. Coeficiente de absorción (α)

El coeficiente de absorción de un material semiconductor da cuenta de la distancia que puede penetrar un fotón en el mismo. El flujo de fotones (Φ) se puede expresar en función de la distancia recorrida como:

$$\Phi(x) = \Phi(0) \exp -\alpha x \tag{4.3}$$

donde $\Phi(x)$ es el flujo de fotones a una distancia x, $\Phi(0)$ es el flujo inicial de fotones, α es el coeficiente de absorción y x es la distancia que penetra el fotón.

Al inverso del coeficiente de absorción se le denomina longitud de penetración (L). Este da cuenta de la distancia media recorrida por un fotón antes de ser absorbido por el material.

En la Figura 4.8 se puede observar el coeficiente de absorción para distintos materiales en función de la longitud de onda.

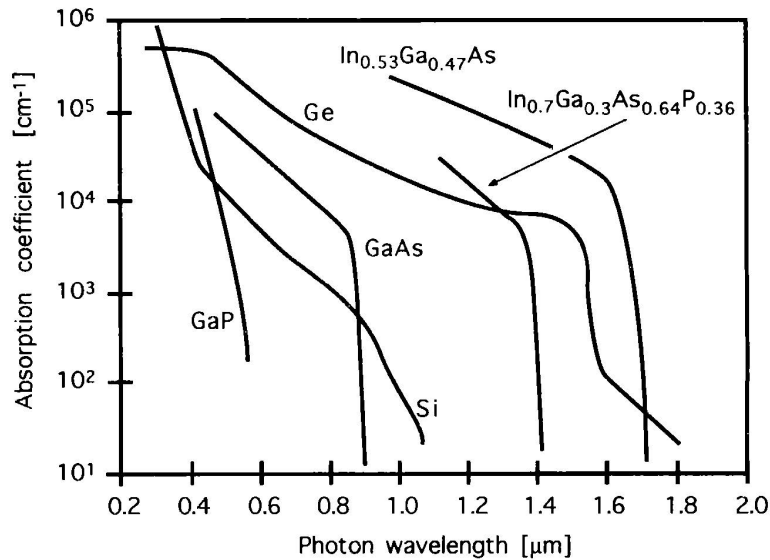


Figura 4.8: Coeficientes de absorción de distintos materiales

4.2. Silicio Solar

El Silicio es el material de mayor uso para la fabricación de células solares a nivel terrestre. A continuación se desarrollan algunas características del mismo.

4.2.1. Silicio de uso solar

El Silicio es un material semiconductor muy abundante en el planeta, constituye un 28 % de la corteza terrestre.

El Silicio posee muchas aplicaciones, una de ellas es la fabricación de células solares. Más del 80 % de las células solares son de Silicio [10].

El Silicio se encuentra en la corteza terrestre en forma de dióxidos de Silicio y de silicatos complejos, de forma que para poder utilizarlo primero hay que purificarlo. Este proceso de purificación está muy controlado por lo que su coste en el mercado es relativamente bajo. Por estas razones, el Silicio es el material más empleado en la fabricación de las células solares comerciales a nivel terrestre.

El primer proceso que se lleva a cabo para purificar el Silicio es calentar el Cuarzo (óxido de Silicio) a 1800 °C aproximadamente. Con esto se obtiene Silicio de grado metalúrgico, es decir, Silicio empleado en la industria metalúrgica, con una pureza de más del 99 % (1000 ppm). Dicha pureza no es suficiente para usarse en la industria fotovoltaica ni en la electrónica ya que se requiere una pureza del orden de 10 ppm.

Para conseguir una pureza mayor se hace reaccionar el Silicio de grado metalúrgico con ácido clorhídrico para obtener triclorosilano. Este se destila y se hace reaccionar con hidrógeno para obtener polisilicio o Silicio de uso solar [9].

Dependiendo del modo de cristalización de este polisilicio se puede obtener Silicio multicristalino (mc-Si) o monocristalino (c-Si) (Figura 4.9):

- El c-Si se obtiene básicamente mediante el denominado proceso Czochralski. Las piedras de polisilicio se funden en un crisol y se introduce una varilla con una semilla de cristal en su extremo, de forma que se va solidificando el Silicio en forma de monocristal. Del proceso de cristalización del Si se obtiene un lingote de material cilíndrico macizo (su diámetro puede variar entre 100 *mm* y 150 *mm* y su longitud entre 40 *cm* y 150 *cm*) que posteriormente se mecaniza en forma cuadrangular y finalmente se corta para obtener obleas de 200 - 500 μm de espesor.
- Para la fabricación de mc-Si se utiliza generalmente el proceso de block-casting. En este se usa un crisol donde se depositan las piedras de polisilicio, fundiéndolas a continuación en un horno a elevada temperatura y dejando enfriar a continuación el fundido. De la cristalización del mc-Si se obtiene un lingote de grandes dimensiones (70 *cm* x 70 *cm*) que se divide en bricks (prismas rectangulares con un tamaño acorde a la célula que se quiere fabricar después) y este, a su vez, se lamina en cientos de obleas [9, 11].

El enfriamiento del fundido en el proceso de fabricación del mc-Si provoca que el material se fragmente, formándose multitud de cristales orientados aleatoriamente. Esto provoca que las propiedades de las obleas mc-Si no sean tan homogéneas como en el caso de las c-Si, que presentan un grano único con características uniformes. Sin embargo, la simplicidad en el proceso de fabricación del mc-Si implica un menor coste.



Figura 4.9: Imagen del proceso de fabricación de una célula solar a partir de Silicio monocristalino y de Silicio multicristalino

La eficiencia de las células solares fabricadas a partir de Silicio multicristalino presentan una eficiencia algo menor a las monocristalinas. En la Tabla 4.1 se observan los valores máximos de eficiencia de células solares con los dos tipos de obleas, así como parámetros característicos de las mismas, que se explican a continuación [12].

Material	Eficiencia (%)	Área (cm^2)	V_{OC} (V)	FF (%)	J_{SC} (mA/m^2)
c-Si	$26,3 \pm 0,5$	180,43	0,7438	83,8	42,25
mc-Si	$21,3 \pm 0,4$	242,74	0,6678	80,0	39,8

Tabla 4.1: Mayores valores de eficiencia registrada en condiciones estándar ($1000 W/m^2$ y $25^\circ C$) en células c-Si y mc-Si

A pesar de la menor eficiencia, el balance entre coste y pérdida de eficiencia es favorable en el mc-Si [10], de forma que actualmente el mc-Si es el material más utilizado en la fabricación de células solares a nivel global. Las obleas que se pretenden caracterizar en este trabajo son preferentemente de mc-Si. El dopado de las obleas fabricadas suele ser tipo P (dopado con Boro). Como ya se ha comentado y se verá de nuevo más adelante, los defectos creados en el proceso de fabricación de las obleas de mc-Si producen una disminución de la eficiencia de las células solares.

El ancho de la banda prohibida del Silicio es $E_g = 1,11 eV$ a $300 K$ [13]. Mediante la ley de Planck se calcula la longitud de onda a la que se asocia:

$$\lambda[\mu m] = \frac{1,24}{E(eV)} = 1,107 \mu m \quad (4.4)$$

La Figura 4.10 muestra el espectro de emisión banda-banda del Silicio.

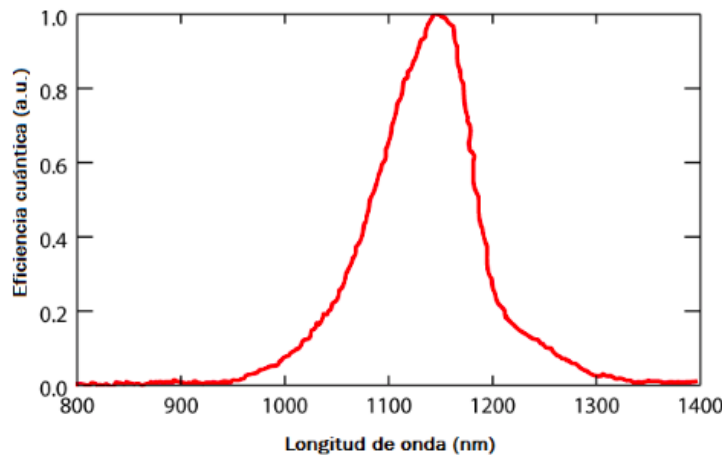


Figura 4.10: Espectro de emisión banda-banda del Silicio

4.2.2. Obleas de Silicio

Las obleas empleadas en este trabajo son obleas de mc-Si tipo P cuyas dimensiones son $156 \times 156 \text{ mm}^2$ y tienen un espesor del orden de $200 \mu\text{m}$.

En general, las obleas de Silicio se pueden clasificar en: monocristalinas, cuasicristalinas y multicristalinas. Estas pueden distinguirse a simple vista por su aspecto, Figura 4.11.

En una oblea monocristalina se puede apreciar un solo grano cristalino mientras que en una oblea multicristalina se aprecian múltiples direcciones de grano. Las obleas cuasicristalinas se encuentran en un estado intermedio en las que habitualmente predomina una sola dirección de grano (como en las monocristalinas) y teniendo alguna zona más pequeña con múltiples direcciones (como en las multicristalinas).



Figura 4.11: Los tres tipos de oblea según su modo de cristalización: a la izquierda monocristalina, en medio cuasi-cristalina y a la derecha multicristalina

4.2.3. Células solares de Silicio

Una célula solar de Silicio consiste en una unión P-N (unión de dos semiconductores, uno de tipo P y otro de tipo N) que absorbe los fotones incidentes. Esta absorción da lugar a una generación de electrones y huecos. Los electrones generados irán hacia el lado N y los huecos hacia el lado P, de forma que la concentración de huecos en el lado N será despreciable frente a la de electrones, generando una tensión entre ambos denominada tensión fotogenerada.

El comportamiento de una célula solar se describe mediante la expresión:

$$I = I_0 \left(\exp \frac{V}{\eta V_T} - 1 \right) - I_{Ph} \quad (4.5)$$

donde V_T es el voltaje térmico equivalente al valor $K_B T$ y η es el factor de idealidad que puede tomar los valores 1 ó 2.

En la Figura 4.12 se observa la curva I-V característica, representada en dos casos: ausencia de flujo incidente de fotones ($\Phi = 0$) y con flujo incidente de fotones ($\Phi > 0$) [14].

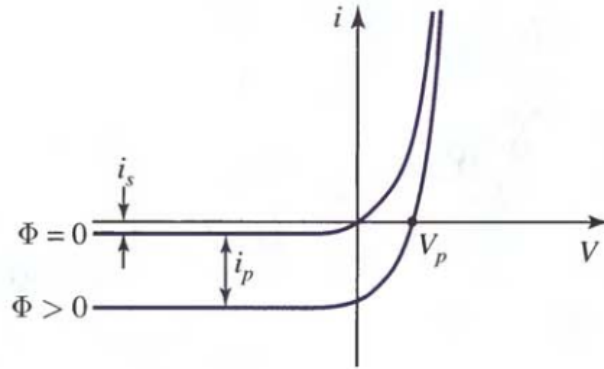


Figura 4.12: Característica I-V típica de una célula fotovoltaica

Parámetros fundamentales de una célula solar

- La corriente de cortocircuito (I_{SC}), es el mayor valor de corriente que se puede obtener, corresponde a $V = 0$.
- La tensión de circuito abierto (V_{OC}), es el mayor valor de la tensión que se obtiene, corresponde a $I = 0$.
- El punto de máxima potencia (P_M), es el punto en que la potencia entregada por la célula es máxima.
- El factor de forma (FF) da cuenta de la relación entre el área bajo el rectángulo dado por la potencia máxima y el área total dada por I_{SC} y V_{OC} .

$$FF = \frac{P_M}{I_{SC}V_{OC}} \quad (4.6)$$

Este factor siempre es menor que uno.

- La eficiencia de conversión de potencia (η) es la relación entre la potencia máxima y la potencia incidente (procedente del sol):

$$\eta = \frac{P_M}{P_{in}} = \frac{FF \cdot V_{OC} \cdot I_{SC}}{P_{in}} \quad (4.7)$$

En la Figura 4.13 se observa la curva característica I-V típica de una célula solar con los parámetros fundamentales representados.

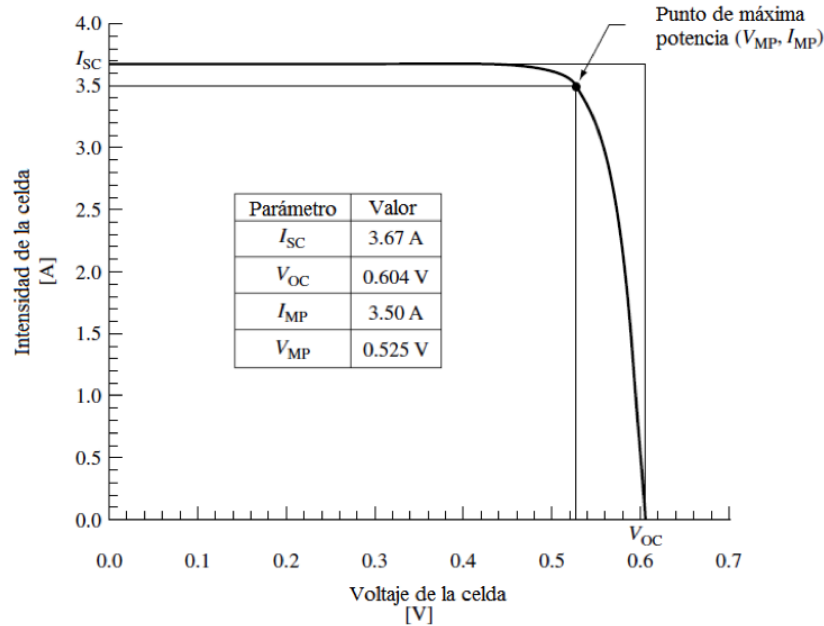


Figura 4.13: Curva I-V típica de una célula solar y parámetros característicos

Estructura de una célula solar

El diseño de las células solares está desarrollado de tal manera que se obtenga la mejor conversión de energía. Un esquema general de su estructura así como su aspecto real se representan en la Figura 4.14.

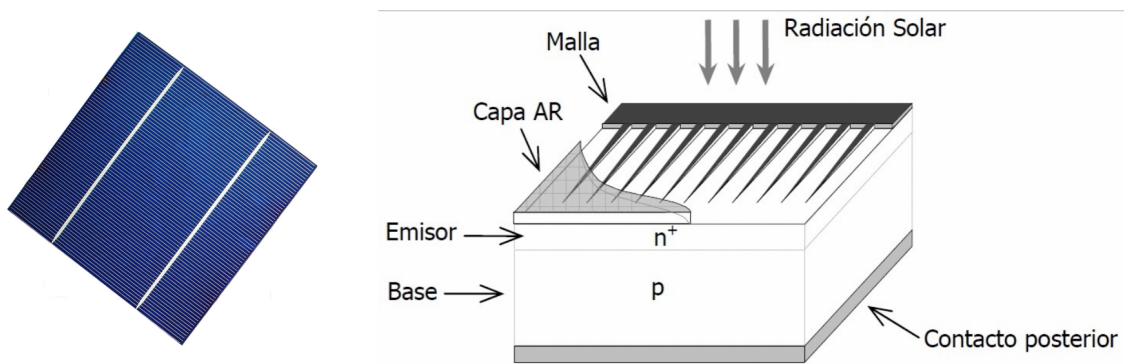


Figura 4.14: Célula solar (izquierda) y estructura básica de de la misma (derecha)

Las partes de una célula solar de Silicio son:

- Capa antirreflexiva (AR): impide que se refleje gran parte de la luz que le llega a la célula solar. Esto se consigue con una capa de cierto espesor e índice de refracción,

4.3. Propiedades ópticas de los semiconductores. Luminiscencia.]

de forma que para cierto intervalo de longitudes de onda la reflectancia sea mínima.

- Rejilla metálica: su objetivo es recoger la carga generada sin introducir una resistencia elevada pero a su vez dejando pasar la máxima cantidad de luz. El factor de sombra es la relación entre el área ocupada por la rejilla y el área total.
- Unión P-N: como ya se ha comentado, la estructura básica de la célula es una unión P-N. Más adelante se exponen sus características (apartado 4.4.1).
- Contacto posterior: suele ser una metalización total de la superficie trasera.

Fabricación de una célula solar de Silicio

Para obtener una célula solar de Silicio se parte de las obleas de Silicio ya mencionadas y se realizan los siguientes procesos [10]:

- a. Limpieza y texturización de las obleas mediante inmersión en solución ácida.
- b. Dopado mediante fósforo (dopante tipo-n).
- c. Aislamiento de la región tipo N.
- d. Aplicación de la capa antirreflejante.
- e. Aplicación del contacto de la cara delantera mediante serigrafiado y secado en horno de infrarrojos.
- f. Cocción a alta temperatura de los contactos metálicos.
- g. Pruebas y clasificación mediante la curva I-V obtenida con luz artificial.

4.3. Propiedades ópticas de los semiconductores. Luminiscencia.

La luminiscencia es el fenómeno por el cuál un material semiconductor emite fotones. Se produce por la recombinación radiativa de un electrón y un hueco previamente excitados con una fuente externa.

Existen múltiples formas para obtener la luminiscencia de una estructura semiconductor a según la fuente de excitación que se emplee (luz, electricidad, temperatura, etc).

En particular, en el presente trabajo, se han empleado distintas fuentes de iluminación para excitar el material semiconductor, proceso denominado fotoluminiscencia (PL).

La PL consiste en la excitación de pares electrón-hueco con fotones de energía igual o mayor que el ancho de la banda prohibida del material semiconductor que se esté excitando.

Los fotones emitidos por el material semiconductor son recogidos por un sistema de detección. En este proyecto la detección de los fotones se realiza con una cámara CCD, dando lugar a una imagen de fotoluminiscencia de toda la oblea [6].

En el fenómeno de la luminiscencia de un material semiconductor van a competir los dos tipos de recombinaciones ya explicadas, las recombinaciones radiativas y las no radiativas.

Las recombinaciones no radiativas aumentan en gran medida debido a la presencia de defectos en el material semiconductor. Si se tiene una imagen de la luminiscencia de un material semiconductor que presenta defectos localizados, esas partes no estarán iluminadas en la imagen de luminiscencia y se podrán detectar fácilmente.

Una imagen típica de luminiscencia de una oblea de Silicio se observa en la Figura 4.15, donde se pueden observar zonas oscuras, asociadas a la presencia de distintos tipos de defectos.

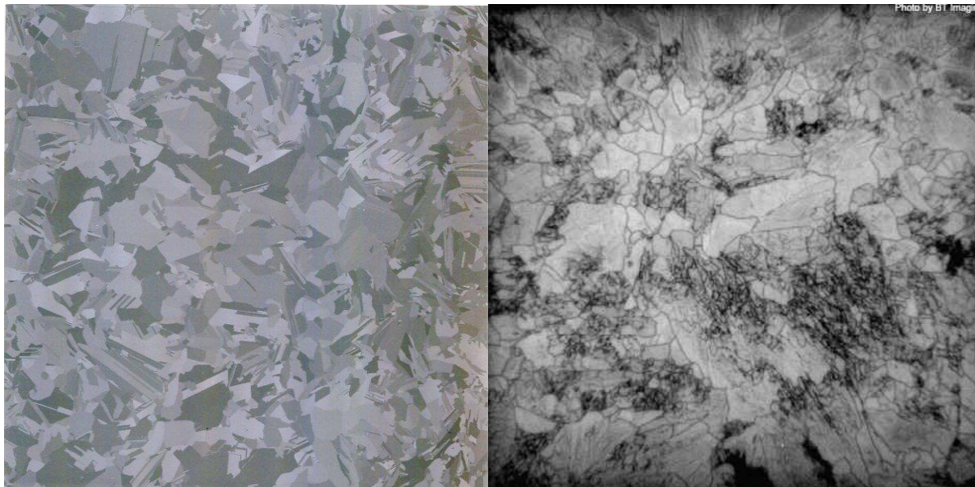


Figura 4.15: Imagen típica de una oblea de mc-Si (izquierda) e imagen típica de PL de una oblea mc-Si (derecha), las zonas oscuras indican la presencia de defectos [15]

Como el Silicio es de GAP indirecto, la luminiscencia es un proceso de 2º orden y se necesita una gran potencia de excitación [17].

4.4. Fuentes de excitación

Se pueden considerar dos tipos de fuentes de excitación interesantes para obtener fotoluminiscencia de materiales semiconductores: iluminación LED e iluminación láser.

4.4.1. Diodo LED

Un diodo LED (Light Emitting Diode) es una unión P-N que emite luz. Cuando se realiza la unión, aparece una zona de vaciamiento de portadores denominada Zona de Carga Espacial (ZCE), generando un campo eléctrico entre los lados P y N. La aparición de este campo se corresponde con el primer fenómeno de los dos que rigen el movimiento de los portadores, denominado arrastre.

Por otro lado, el segundo fenómeno que se manifiesta es la difusión. Esta surge cuando existe un gradiente de portadores y consiste en la difusión de los portadores de donde son mayoritarios a donde son minoritarios, de forma que hay un flujo de electrones del lado N al lado P y un flujo de huecos del lado P al lado N. Una vez los portadores hayan pasado al lado de la unión donde su concentración es minoritaria, recorrerán una longitud media L_n y L_p antes de ser absorbidos (Figura 4.16).

La polarización de una unión P-N se puede realizar en directa o en inversa. Se trata de una polarización directa cuando el potencial en el lado P es mayor que en el lado N, mientras que en la polarización inversa ocurre al contrario.

Cuando se polariza un LED en directa, las bandas se acercan y hay un exceso de portadores. Para volver al estado de equilibrio, se recombinan los portadores y emite luz, (Figura 4.16).

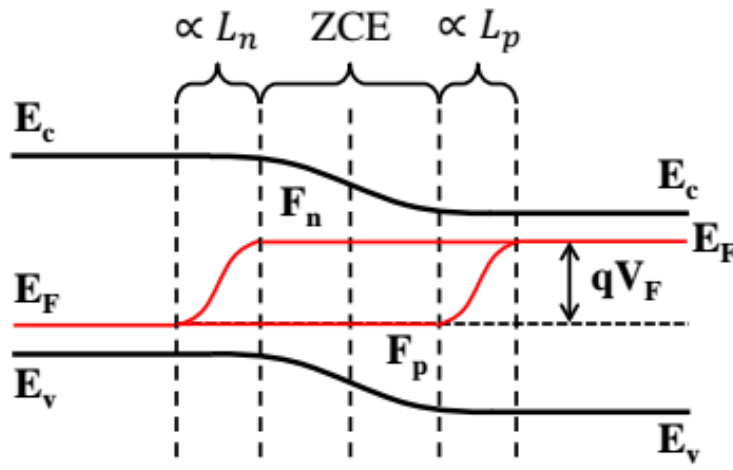


Figura 4.16: Bandas de un LED polarizado en directa, a la izquierda la zona P y a la derecha la zona N [7]

Fabricación de un diodo LED

La unión P-N de un diodo LED se suele crecer sobre una superficie denominada sustrato. Dicha superficie tiene que cumplir que su parámetro de red (a , distancia que hay entre

los átomos del material) sea parecido al de la unión a crecer para evitar la aparición de dislocaciones (se tiene que cumplir que $\Delta a \div a \leq 1\%$).

En el caso de los LEDs, si el GAP del sustrato es menor que el de la zona activa (de la ZCE) entonces el sustrato podrá absorber los fotones que emite. El sustrato suele cumplir que su GAP sea mayor que el de la zona activa para evitar estas absorciones, a esta característica se le denomina sustrato transparente.

Curva I-V de un LED

El comportamiento de una unión P-N en polarización directa y en inversa se observa mediante la curva característica I-V (Figura 4.17).

En polarización directa el diodo posee una magnitud denominada tensión de disparo (V_γ) a partir de la cuál tendrá comportamiento lineal entre la corriente y el voltaje inducido. Si no se alcanza esta tensión el diodo no dará respuesta. Por otro lado, si se polariza el LED en inversa no dará respuesta, pero aparece una tensión de ruptura (alta) que si se supera se puede romper el diodo. Además, existe una pequeña corriente denominada de fuga que es negativa [16].

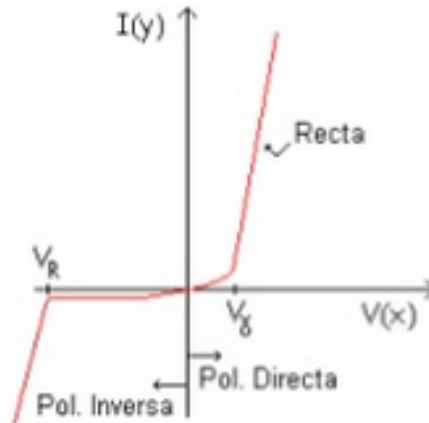


Figura 4.17: Curva I-V típica de un diodo

Parámetros característicos del LED

Para poder caracterizar un LED, hay que tener en cuenta los siguientes parámetros:

- Eficiencia cuántica externa (η_{ext}) :

Da cuenta de la eficiencia de emisión del dispositivo. Se da en porcentaje y se define como el cociente entre el número de fotones emitidos y el número de portadores in-

yectados. El número de fotones emitidos se expresa como la potencia óptica emitida entre la energía de estos fotones y el número de portadores inyectados se expresa como la corriente de trabajo por unidad de carga. De esta forma, se puede expresar la eficiencia cuántica externa como:

$$\eta_{ext} = \frac{P_{opt}/h\nu}{I_F/q} = \frac{q}{h\nu} \frac{P_{opt}}{I_F} \quad (4.8)$$

donde I_F es la corriente de trabajo en polarización directa y $\frac{h\nu}{q}$ se puede escribir como $\frac{1,24}{\lambda[\mu m]}$ aplicando la ecuación de Planck .

- Potencia óptica (P_{opt}):

Da cuenta de la potencia óptica emitida. Despejando en (8) se tiene:

$$P_{opt} = \frac{1,24}{\lambda[\mu m]} \eta_{ext} I_F \quad (4.9)$$

- Responsividad (\mathfrak{R}):

Da cuenta de la relación entre la potencia óptica y la corriente de trabajo:

$$P_{opt} = \mathfrak{R} I_F \quad (4.10)$$

Aplicando (9) y (10) se tiene:

$$\eta_{ext} \frac{\lambda[\mu m]}{1,24} = \mathfrak{R} \quad (4.11)$$

En esta expresión se observa que la responsividad da cuenta de la ganancia input-output, es decir, de lo buena que es la respuesta del LED.

- Tensión de disparo (V_γ):

La tensión de disparo está relacionada con el GAP del material con el que está fabricado mediante la relación experimental: $V_\gamma \sim E_g + [0,3 - 0,4]eV$. También está relacionada con la tensión de trabajo (V_F) y la corriente de trabajo mediante:

$$V_F = V_\gamma + I_F r_s \quad (4.12)$$

donde r_s es la resistencia parásita en serie, que se podría estimar mediante el inverso de la pendiente de la curva característica I-V.

- Temperatura de la unión (T_J):

La temperatura de la unión se puede expresar mediante:

$$T_J = T_A + R_{ThJS}(V_F - \mathfrak{R})I_F \quad (4.13)$$

Donde T_A es la temperatura ambiente y R_{ThJS} es la resistencia entre la unión y la soldadura.

Ventajas y desventajas del uso de LED en fotoluminiscencia

Entre las desventajas que tiene usar iluminación LED como fuente de iluminación están:

- El ancho espectral de un LED es grande (del orden de las decenas de nanómetros).
- El ancho del haz de un LED es muy grande (su ángulo medio es del orden de las decenas de grados), de forma que pierde homogeneidad.
- No existen sistemas de iluminación LED comerciales de alta potencia para aplicaciones de luminiscencia.

Por otro lado, entre las ventajas se encuentra:

- Se puede construir un sistema de iluminación LED de forma barata y acomodado a las necesidades particulares de la aplicación.

4.4.2. Láser

El diodo láser se compone de nuevo de una unión P-N que emite luz pero muestra algunas diferencias en comparación con el diodo LED descrito anteriormente.

Funcionamiento de un diodo láser

Un diodo láser emite con emisión estimulada. Para que emita de forma continuada tiene que mantener siempre una alta inyección de portadores, de forma que necesita una cavidad óptica que mantenga un bucle de realimentación de portadores. La zona activa (ZCE descrita en el apartado 4.4.1) en este caso es muy pequeña ya que ambas partes de la unión están altamente dopadas.

Esta cavidad óptica actúa como guía de ondas de los fotones y por tanto hace que salgan ciertas longitudes de onda y no permite que salgan todos los fotones. Los fotones que permanecen en la cavidad permiten la realimentación del diodo [8].

Ventajas y desventajas del uso de iluminación láser en la fotoluminiscencia

Entre las desventajas que tiene usar iluminación láser como fuente de iluminación para aplicaciones de luminiscencia están:

- El haz que sale de un láser es muy estrecho por lo que hay que difundirlo y homogeneizarlo para poder acomodarlo a las necesidades de iluminación
- Su precio es muy alto

Por otro lado, entre las ventajas se encuentra:

- Su haz es muy homogéneo.
- Existen sistemas comerciales que se ajustan a las necesidades del problema.

4.5. Sistemas de detección de luminiscencia. Cámaras CCD

Para la detección de la luminiscencia del Silicio se han empleado en este trabajo cámaras CCD (Charged Coupled Device).

Una cámara CCD es una superficie sensible a la luz capaz de detectar y almacenar electrónicamente las imágenes proyectadas sobre ellas. Al poder almacenar la imagen digitalmente, se pueden hacer tratamientos sobre ella para poder corregirla y procesarla.

Cuando se fabricaron por primera vez se idearon como una forma nueva de memoria para ordenadores, pero pronto se descubrieron sus aplicaciones actuales.

4.5.1. Funcionamiento de los dispositivos CCD

Un dispositivo CCD está hecho de un material semiconductor. Contiene mosaicos o teselas también llamados píxeles. La incidencia de luz en los mosaicos provoca la excitación de electrones, los cuales son capturados y acumulados mediante un electrodo. Estos electrones capturados son evaluados mediante el llamado canal de lectura que es una fila en la que no incide luz.

Para la lectura de la imagen se procede a traspasar los electrones almacenados en los electrodos a sus vecinos inmediatos mediante la alteración del voltaje de los electrodos de forma simultánea. Cuando llegan al canal de lectura, se pasan a un amplificador de salida de la señal y se procede al recuento de los electrones. De esta forma se tiene la imagen codificada en la memoria del ordenador. El funcionamiento de estos dispositivos se representa en la Figura 4.18.

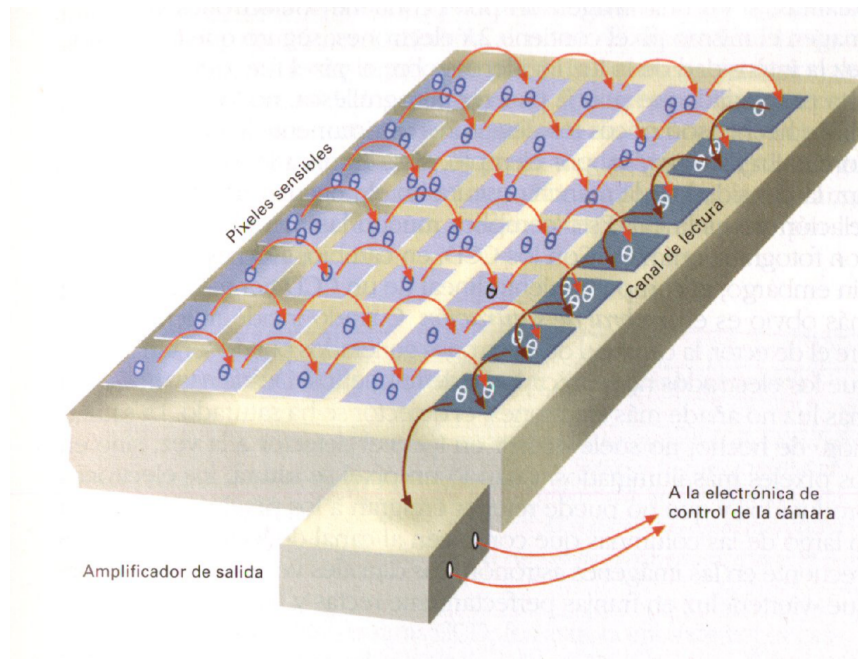


Figura 4.18: Proceso de lectura de una imagen en una cámara CCD

La sensibilidad de la CCD depende de la capacidad de almacenamiento que tenga cada píxel. Si se sobrepasa este límite se saturarán los píxeles. Así se caracteriza la linealidad y la saturación de los dispositivos CCD, así como su eficiencia [18]:

Saturación

Los dispositivos CCD presentan un carácter lineal con la luz incidente, pero tienen un límite de linealidad denominado saturación.

Cuando un píxel no puede almacenar más electrones y sigue generando más se produce la saturación del píxel. Los electrones que ya no se pueden almacenar en ese píxel se depositarán en los píxeles contiguos, viendo así en la imagen saturada una línea muy brillante.

Eficiencia

La eficiencia de los detectores CCD da cuenta de lo buena que es la respuesta del detector y es función de la longitud de onda. Esta se suele representar en porcentaje. La representación de la eficiencia en función de la longitud de onda se denomina curva de sensibilidad. Se busca que el espectro de emisión del material que se está excitando se encuentre dentro del rango de eficiencia de la cámara.

4.5.2. Cámaras CCD empleadas

En este trabajo se va a detectar la luminiscencia del Silicio, de forma que se necesita un dispositivo CCD cuya curva de eficiencia contenga el espectro de emisión del Silicio. El grupo GdS-Optronlab cuenta con dos cámaras CCD, una de Silicio y otra de InGaAs. En la Figura 4.19 se observa el espectro del Silicio junto con la curva de eficiencia de estas dos cámaras CCD.

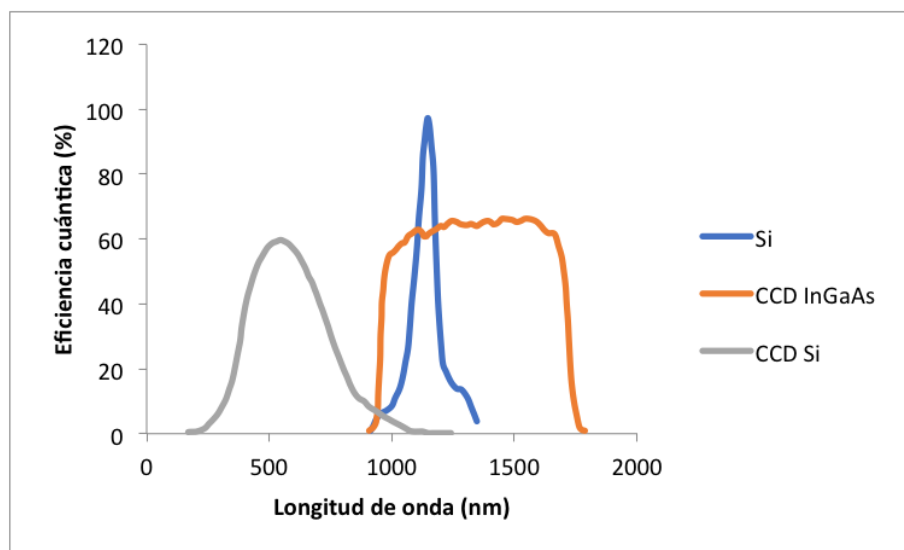


Figura 4.19: Representación de la eficiencia cuántica interna de una CCD de Silicio y una de InGaAs y el espectro de emisión del Silicio en función de la longitud de onda

A continuación se exponen las características principales de ambas cámaras CCD:

- Cámara de Silicio:

Las cámaras basadas en sensores de Silicio presentan como ventaja su elevada resolución de imagen. Sin embargo, como se aprecia en la Figura 4.19, la curva de eficiencia de la cámara de Silicio sólo contiene la cola del espectro de emisión del Silicio.

- Cámara de InGaAs:

La principal ventaja de este tipo de cámaras es su alta eficiencia en el rango espectral del Silicio. Como desventaja, estos dispositivos tienen una resolución menor que los equipados con sensores de silicio.

La cámara con sensor de InGaAs usada en este trabajo, está fabricada por Hamamatsu Photonics, el modelo C12741-03, Figura 4.20. Esta tiene sensibilidad en un rango espectral que va de los 950 nm a los 1700 nm, por lo que es capaz de captar el

pico de emisión del silicio en su rango de máxima eficiencia cuántica. La resolución que ofrece es de 640 x 512 pixels.

Esta cámara posee dos ópticas diferentes: una visible y otra swir. La óptica swir está diseñada para obtener imágenes en el infrarrojo cercano, pero presenta una menor calidad que la óptica visible. Por lo que la óptica que se ha empleado generalmente en este trabajo, va a ser la óptica visible.



Figura 4.20: Cámara de InGaAs de Hamamatsu C12741-03

Capítulo 5

Desarrollo experimental

Como ya se ha indicado en apartados anteriores, en este trabajo se desarrolla un sistema de iluminación LED para la obtención de fotoluminiscencia (PL), tratando de ofrecer una alternativa al sistema de iluminación láser del grupo GdS-Optronlab.

5.1. Fotoluminiscencia con fuente de iluminación Láser

5.1.1. Descripción del sistema de iluminación láser

El sistema de iluminación láser se realiza en base a cuatro láseres de diodo de AlGaAs montados en configuración cs-mount. Su longitud de onda es de 808 nm y la potencia de cada uno de los diodos es de 20 W . La hoja de características de los diodos láser se puede observar en la Figura 5.1, así como una imagen de los mismos.

Empaquetamiento	CS-MOUNT
Potencia óptica de salida en continuo	20 W
Anchura de las barras	1 cm
Área de emisor	$150 \times 1\ \mu\text{m}$
Número de emisores	19
Longitud de onda central	$808 \pm 3\text{ nm}$
Anchura espectral	$< 3\text{ nm}$
Pendiente de eficiencia	$> 0.9\text{ W/A}$
Corriente umbral	$< 10\text{ A}$
Corriente de operación	$< 32\text{ A}$
Temperatura de funcionamiento	$+10\dots+40\text{ }^\circ\text{C}$



Figura 5.1: Hoja de características y diodo láser

El sistema de iluminación láser necesita un sistema de alimentación. Este sistema consta de dos fuentes de alimentación: una VANTEC modelo VAN420A y otra Thermaltake Purepower-560APD. También consta de unos drivers electrónicos para poder controlar la

5.1. Fotoluminiscencia con fuente de iluminación Láser]

corriente que circula en los diodos láser, estos se sitúan entre la fuente de alimentación y los diodos, adaptando el voltaje y controlando la corriente que se les suministra. En concreto, en este caso, adapta 5 V de salida de la fuente de alimentación al voltaje del láser, 1.8 V aproximadamente. El modelo de driver empleado es el modelo LDP-C 40-05 de PICOLAS.

A través de los láseres circula una corriente de 25 A, por lo que es necesario un sistema de refrigeración para evitar que se sobrecalienten y dejen de funcionar correctamente. El sistema de ventilación es un Artic Freezer 13 formado por un disipador y un ventilador para cada diodo láser.

El grupo GdS-Optronlab posee el sistema de iluminación láser implementado en una estructura para obtener imágenes de PL diseñado por un alumno en su Trabajo de Fin de Grado [19], Figura 5.2.

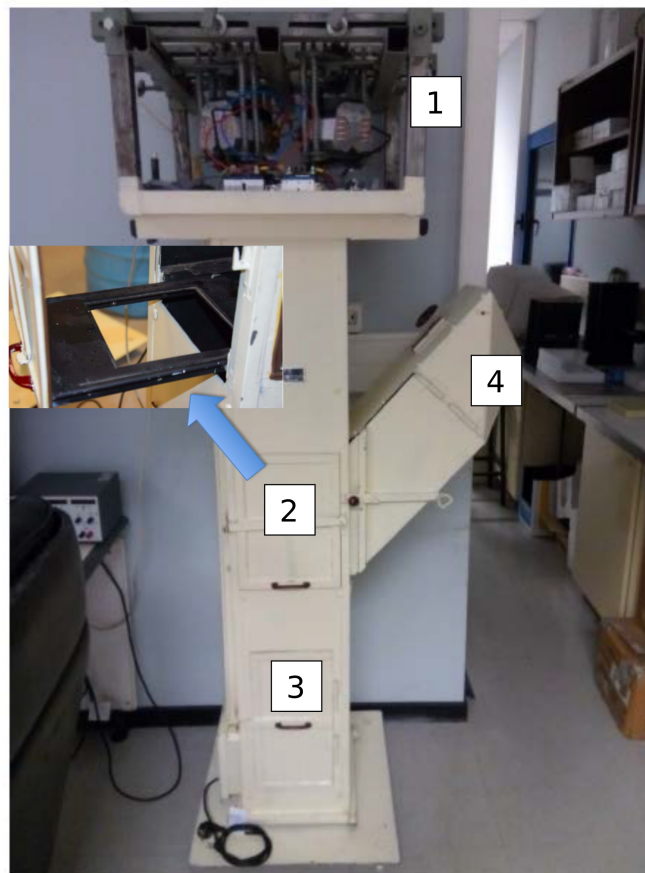


Figura 5.2: Equipo de caracterización PL, donde (1) es el sistema láser, (2) es el cajón donde se colocan las obleas, en (3) se encuentra el cajón en el que se coloca la cámara en transmisión, para las medidas en reflexión la cámara se coloca en (4).

5.1.2. Obtención de imágenes

Para obtener imágenes con este sistema de iluminación se emplea una cámara de InGaAs. Según la disposición de la cámara en el montaje experimental, puede haber dos formas de detectar la luminiscencia de un material semiconductor:

- Detección en transmisión:

Este método es el más usado en el caso de la detección de la luminiscencia de las obleas. Si se colocase el sistema de detección delante de la oblea (en reflexión), mucha luz se refleja y llega directamente al sistema de detección.

En transmisión, la cámara se encuentra detrás de la oblea, iluminándose la oblea por delante.

- Detección en reflexión:

Este método se puede emplear en la detección de luminiscencia de una oblea y de una célula solar.

Este es el único método para la detección de PL de células solares, ya que estas poseen un contacto posterior metálico que no deja pasar la luz, de forma que no se puede medir en transmisión. Además las células poseen una capa antirreflectante que hace que la luz reflejada sea menor que en el caso de las obleas.

En reflexión la cámara se sitúa en por delante de la oblea.

Para llevar a cabo una medida, se coloca la oblea en el soporte correspondiente y la cámara en la disposición para obtener imágenes en transmisión. A continuación, se enfoca la cámara y se fija el tiempo de exposición para realizar una medida óptima, Figura 5.3.

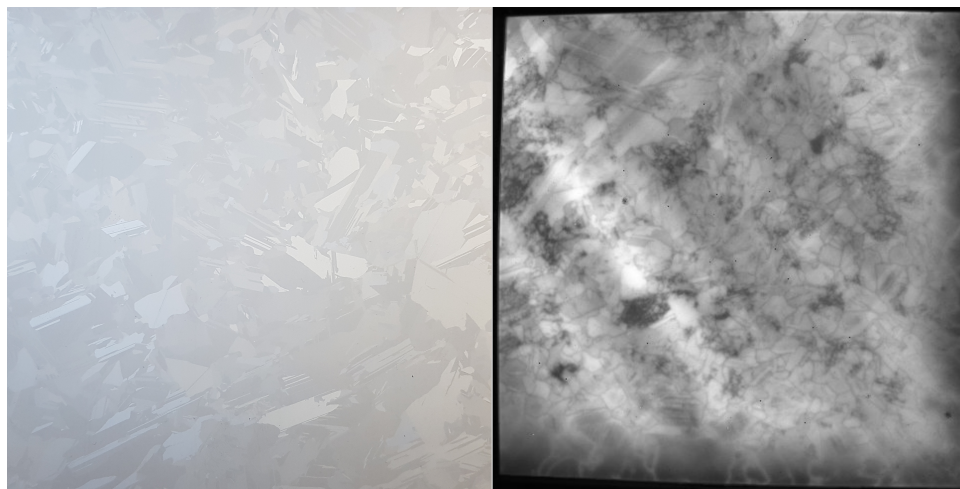


Figura 5.3: Imagen de una oblea típica utilizada (izquierda) e imagen de fotoluminiscencia obtenida con sistema de iluminación láser (derecha) en transmisión

Para obtener una imagen de fotoluminiscencia, primero se toma una imagen del background. Así se denomina a la toma de una imagen sin iluminación láser, es decir, sólo con la luz residual que pueda existir de fondo. A continuación, se toma una imagen con el sistema de luz láser activado y se procede a hacer la resta de ambas imágenes.

5.2. Fotoluminiscencia con fuente de iluminación LED

A continuación se describen los pasos seguidos para fabricar un montaje con iluminación LED, con el fin de intentar conseguir imágenes de fotoluminiscencia de las obleas de Silicio. Primero se describe y caracteriza el diodo que ha sido empleado, pasando luego a la fabricación de los distintos montajes y realización de diferentes pruebas de fotoluminiscencia.

5.2.1. Descripción del LED empleado

El diodo LED con el que se ha trabajado emite en el infrarrojo cercano (810 nm) y es el modelo IR OSLUX SFH 4780S (Figura 5.4), está compuesto de AlGaAs con sustrato de GaAs.

El coeficiente de absorción del Silicio para esta longitud de onda se encuentra entre $0,7 \times 10^3\text{ cm}^{-1}$ y $0,9 \times 10^3\text{ cm}^{-1}$, de forma que la longitud de penetración para ese rango de longitudes de onda es del orden de las decenas de micras [20-22].

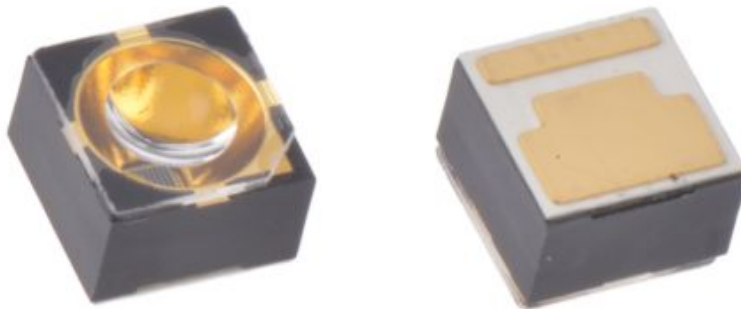


Figura 5.4: Imagen del LED utilizado

La hoja de características que presenta este LED se observa en la Tabla 5.1.

Parámetro	Símbolo	Valores	Unidad
Temperatura de operación	T_{op}	-40 ... 85	$^{\circ}C$
Temperatura de la unión	T_J	145	$^{\circ}C$
Corriente de trabajo	I_F	500	mA
Consumo de potencia	P_{tot}	1,8	W
Resistencia térmica	R_{thJS}	24	K/W
Longitud de onda	λ	810	nm
Ángulo medio	$\theta_{1/2}$	10	$^{\circ}$
Tensión de trabajo	V_F	3,3	V
Potencia óptica	P_{opt}	680	mW

Tabla 5.1: Hoja de características del LED con los valores máximos a $T_A = 25^{\circ}C$

A continuación se presentan algunos parámetros de interés para el posterior desarrollo experimental. Para la obtención de los mismos se ha hecho uso de los datos presentados en la Tabla 25:

- Ancho de la banda prohibida (E_g):

Se aplica la ley de Planck:

$$E_g = \frac{1,24}{\lambda[\mu m]} = \frac{1,24}{0,81 \mu m} = 1,53 \text{ eV} \quad (5.1)$$

- Tensión de disparo (V_γ):

La tensión de disparo se estima observando la curva característica I-V (Figura 5.6), para ello hay que observar el punto de corte de la recta con el eje X. Se observa que $V_\gamma \approx 3,1 \text{ V}$.

- Responsividad (\mathfrak{R}):

Se calcula mediante (10):

$$\mathfrak{R} = \frac{P_{opt}}{I_F} = \frac{0,68 \text{ W}}{1 \text{ A}} = 0,68 \frac{\text{W}}{\text{A}} \quad (5.2)$$

- Eficiencia cuántica externa (μ_{ext}):

Se aplica (8):

$$\mu_{ext} = \frac{\lambda[\mu m]}{1,24} \mathfrak{R} = 44,4 \% \quad (5.3)$$

La eficiencia cuántica externa calculada es alta para un LED, de forma que posiblemente tenga sustrato transparente y quizá algún tipo de tallado en el encapsulado.

- Eficiencia de conversión de potencia (μ_p):

Este parámetro da cuenta del cociente entre la potencia emitida y la potencia inyectada:

$$\mu_p = \frac{P_{opt}}{P_{ele}} = \frac{0,68 \text{ W}}{V_F I_F} = \frac{0,68 \text{ W}}{3,3 \text{ V} \cdot 1 \text{ A}} = 18,9\% \quad (5.4)$$

Este valor difiere bastante de la eficiencia cuántica externa porque se trabaja con corrientes muy grandes.

- Resistencia parásita en serie (r_s):

Se estima mediante el inverso de la pendiente de la parte lineal de la característica I-V (Figura 5.6). Se ajusta la parte lineal a una recta y se ve que la pendiente es 2,067 y por tanto $r_s \approx 0,5 \Omega$.

- Temperatura de la unión a temperatura ambiente (T_J):

Se puede obtener aplicando (4.13):

$$T_J = T_A + 25 \frac{K}{W} (3,3 \text{ V} - 0,68 \frac{W}{A}) 1 \text{ A} = T_A + 33,75^\circ \text{C} \quad (5.5)$$

- Respuesta angular:

En la Figura 5.5 se observa la respuesta angular del LED que proporciona la hoja de características. Estos LEDs poseen un ángulo medio de 10° (la intensidad relativa es del 50 % en el ángulo medio). Con el fin de tener un mayor conocimiento de la dispersión de la luz de este LED, se calcula el área relativa bajo la curva hasta el ángulo medio aplicando el método de los trapecios. Se obtiene que un 70 % del total de la luz que se emite se encuentra dentro del ángulo medio de iluminación.

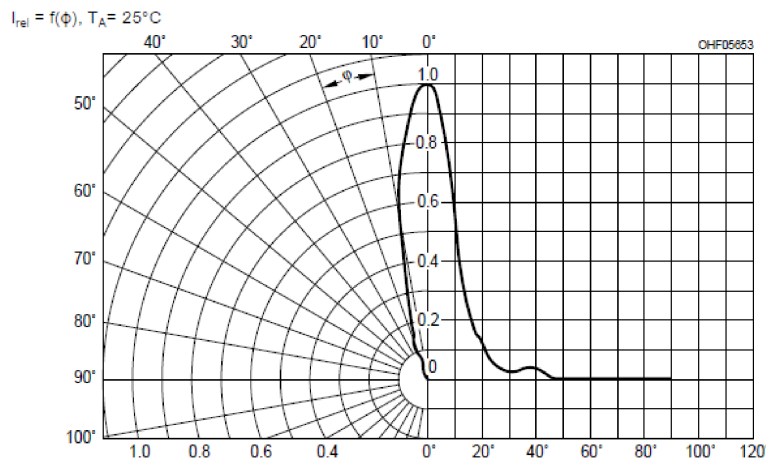


Figura 5.5: Respuesta angular del LED

En la Figura 5.6 se expone la curva característica I-V del LED que proporciona la ficha técnica del dispositivo.

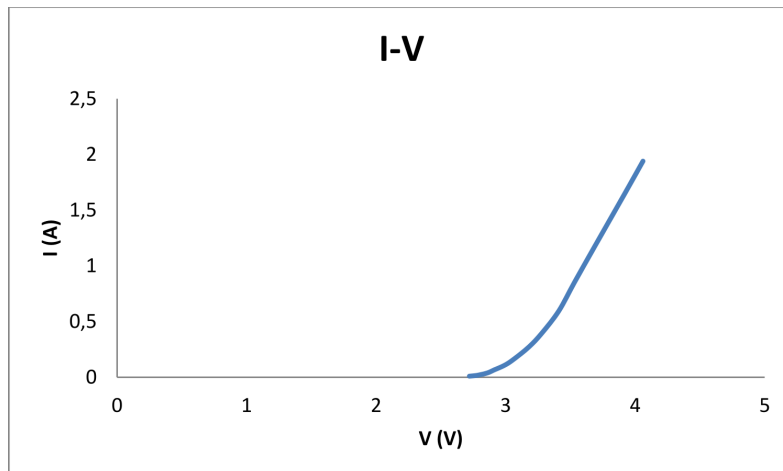


Figura 5.6: Característica I-V del LED

5.2.2. Soldadura de los LEDs

Antes de caracterizar un LED y empezar a realizar el montaje, hay que buscar un método de soldadura de los LEDs que sea sencillo y útil. En la parte derecha de la Figura 5.4 se puede observar que los contactos del LED son planos. Además, son bastante frágiles y pequeños, de forma que la soldadura se ha de realizar en una superficie plana para que no se desprendan.

Para ello se han utilizado unas placas (parte izquierda Figura 5.7) que permiten soldar los LEDs en los contactos que posee la propia placa.

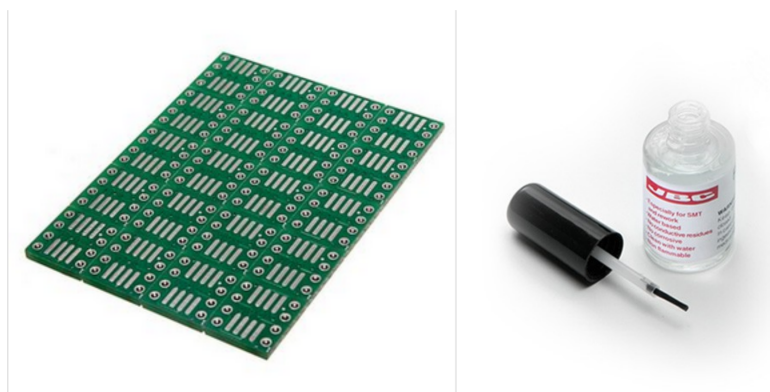


Figura 5.7: A la izquierda la placa empleada para la soldadura de los LEDs, a la derecha el flux empleado en las soldaduras (BJC FL-15)

5.2. Fotoluminiscencia con fuente de iluminación LED

Se ha empleado también estaño fino (de 0,5 mm de diámetro) y flux (un líquido que mejora la unión del estaño con la superficie y la desoxida, ver parte derecha Figura 5.7).

El soldador que se ha utilizado es el modelo Solder-desolder station Unit ST 504 05 (ver Figura 5.8). La temperatura es controlable, así que se emplea a un máximo de 240 °C ya que la hoja de características del LED así lo indica.



Figura 5.8: Imagen del equipo de soldadura empleado

Para conseguir una soldadura homogénea, es conveniente calentar primero la superficie a soldar. Se sueldan dos pines a los dos contactos correspondientes de la placa, Figura 5.9, de forma que quede el pin por el lado por el que no está el LED para evitar obstáculos en el camino que recorre la luz. Una vez realizada la soldadura se debe comprobar que no haya cortocircuito en el LED, ya que los contactos son de tamaño muy pequeño y son difíciles de soldar.

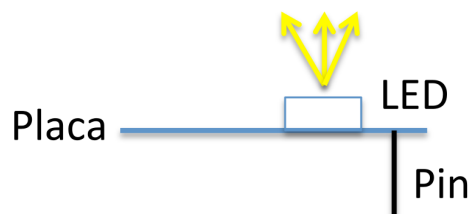


Figura 5.9: Colocación de los pines en la placa

Si se suelda el LED sin ayuda de una placa, es posible que se use mucho estaño y se cortocircuiten los contactos. Otra opción de soldadura podría ser desde el mismo contacto a un cable, pero no es aconsejable ya que se ha comprobado la facilidad con la que se desprenden en ese caso.

5.2.3. Caracterización de un LED

Caracterización I-V

Para la caracterización eléctrica de un LED se obtiene su curva característica I-V con una fuente y un multímetro. Para ello se ha aumentado el voltaje y corriente de la fuente manualmente y se han apuntado los valores registrados, representados en la Figura 5.10. Como se observa, a partir de cierto valor de corriente la tensión deja de aumentar y empieza a disminuir. La razón de esto puede ser porque se calienta el diodo.

Para comprobar esto, se ha añadido al sistema un ventilador, tomando de nuevo la curva I-V. Como se puede observar en la parte derecha de la Figura 5.10, el valor de tensión máximo alcanzado es mayor que en el caso anterior, pero sigue dejando de aumentar a partir de cierto voltaje.

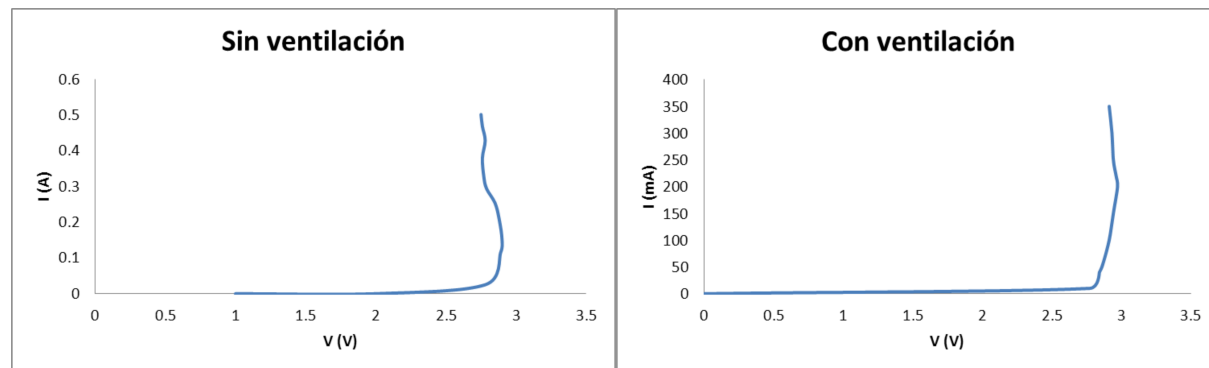


Figura 5.10: Curva I-V sin ventilación (izquierda) y con ventilación (derecha)

Se observa que con ventilación mejora la curva obtenida.

Caracterización espectral

Dado que el grupo GdS-Optronlab cuenta en su laboratorio con un espectrómetro Raman/PL (Figura 5.11), también se ha llevado a cabo la medida del espectro de emisión del LED, comparándolo con el espectro que ofrece la hoja técnica, Figura 5.12.

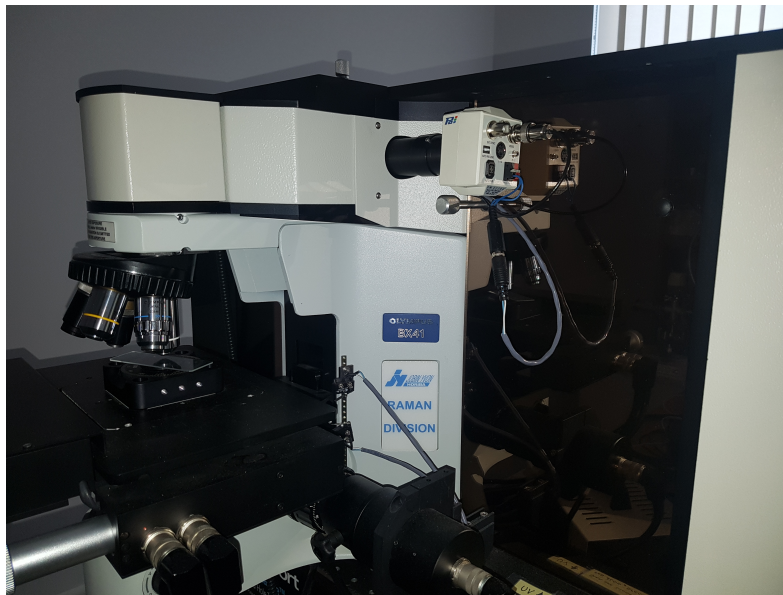


Figura 5.11: Equipo de espectroscopía Raman/PL que posee el grupo GdS-Optronlab

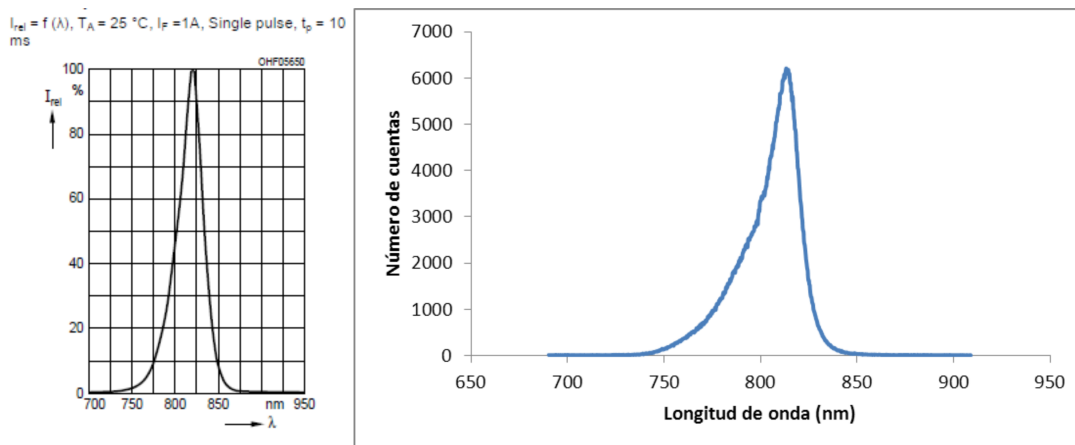


Figura 5.12: Espectro del LED que ofrece la hoja de características (izquierda) y espectro obtenido experimentalmente (derecha)

Se puede observar que el pico de emisión es bastante estrecho.

Caracterización termográfica

El grupo GdS-Optronlab cuenta con una cámara termográfica modelo FLIR TG-165 (parte izquierda Figura 5.13). Esta se empleará para caracterizar térmicamente los diodos LED, es decir, para poder observar cómo y cuánto se calientan en los montajes realizados.

En una imagen termográfica típica (parte derecha Figura 5.13) se observa en la parte superior izquierda de la pantalla la temperatura medida por el sensor, en la parte superior derecha la responsividad empleada (la típica es 0,95) y en la parte central la imagen obtenida.

Esta temperatura medida con el sensor no se corresponde con la temperatura real de los componentes, ya que estos son muy pequeños y no los puede detectar el sensor, pero sirve para hacer una estimación de cuánto se calientan.

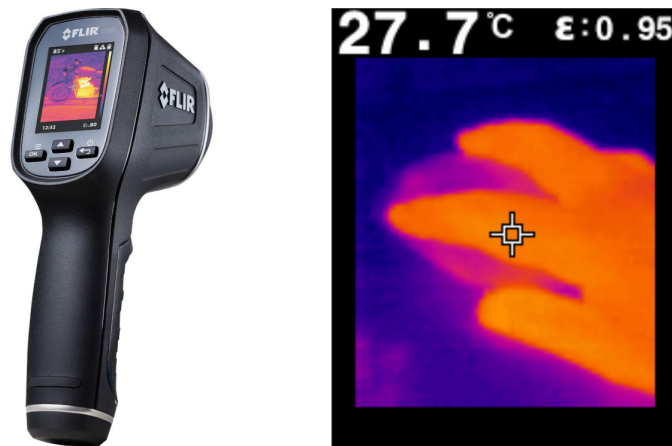


Figura 5.13: Imagen de la cámara termográfica FLIR TG-165 (izquierda) e imagen termográfica típica obtenida (derecha)

La Figura 5.14 muestra una imagen termográfica de un LED en funcionamiento, observando cómo es la distribución de la temperatura por la parte anterior y posterior del mismo.

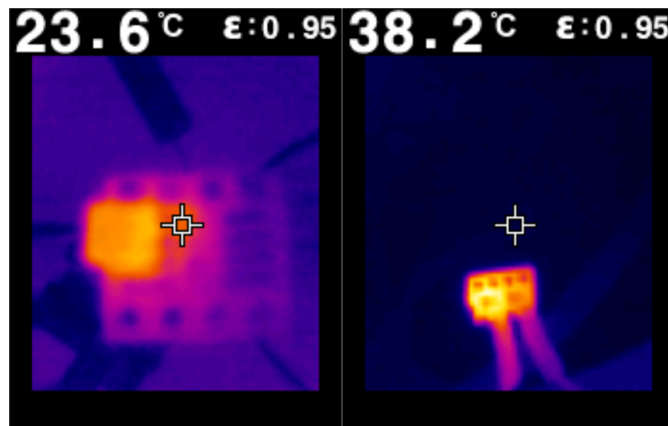


Figura 5.14: Imagen termográfica de un LED en funcionamiento a máxima corriente (0,5 A) por delante (izquierda) y por detrás (derecha) del mismo.

5.2.4. Montaje con ocho LED

Fabricación del montaje

El primer montaje que se ha realizado consta de ocho LEDs. Antes de proceder a la realización del mismo hay que optimizarlo para que la iluminación en la oblea sea lo más homogénea posible. Para ello se ha utilizado la disposición de los LEDs que se muestra en la Figura 5.15, donde R corresponde a mitad de la diagonal de un cuadrado de lado d.

De esta forma, la distancia D mínima necesaria entre la oblea y el sistema de iluminación LED se puede expresar como:

$$D \tan \theta_{1/2} = \frac{d/2}{\sin 45} \quad (5.6)$$

Este mismo criterio se ha aplicado en cada uno de los montajes posteriores.

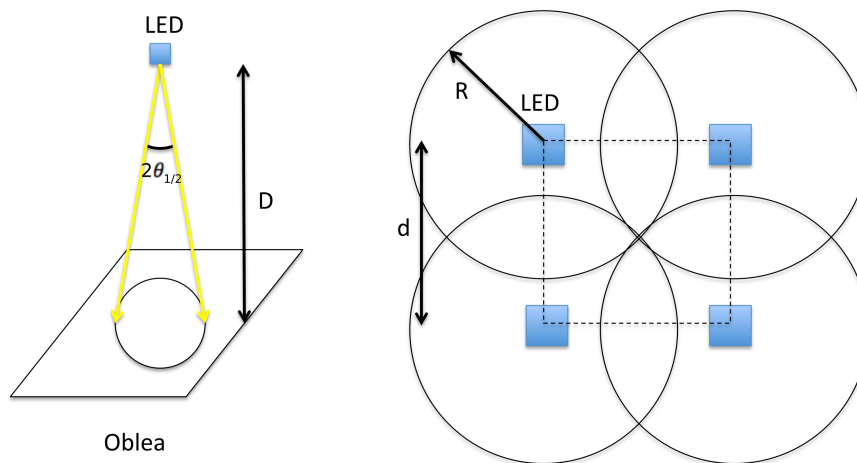


Figura 5.15: Disposición del montaje en 3D (izquierda) y la disposición vista desde arriba (derecha)

Además, hay que buscar una superficie en la que colocar los LEDs. Los criterios para la elección de la superficie que se han seguido son: la facilidad con la que se pueden colocar los mismos y la versatilidad que presenta.

Las configuraciones de LEDs que se han usado son montajes serie-paralelo sencillos. La razón por la que se han realizado estos montajes es que se busca que la tensión y la corriente necesarias para su funcionamiento no sean demasiado grandes.

El primer montaje realizado contiene ocho LEDs organizados en dos tiras en paralelo de cuatro LEDs en serie (parte izquierda Figura 5.16). Se han montado en una placa

protoboard (parte derecha Figura 5.16), de forma que se tiene un sistema fácilmente modulable.

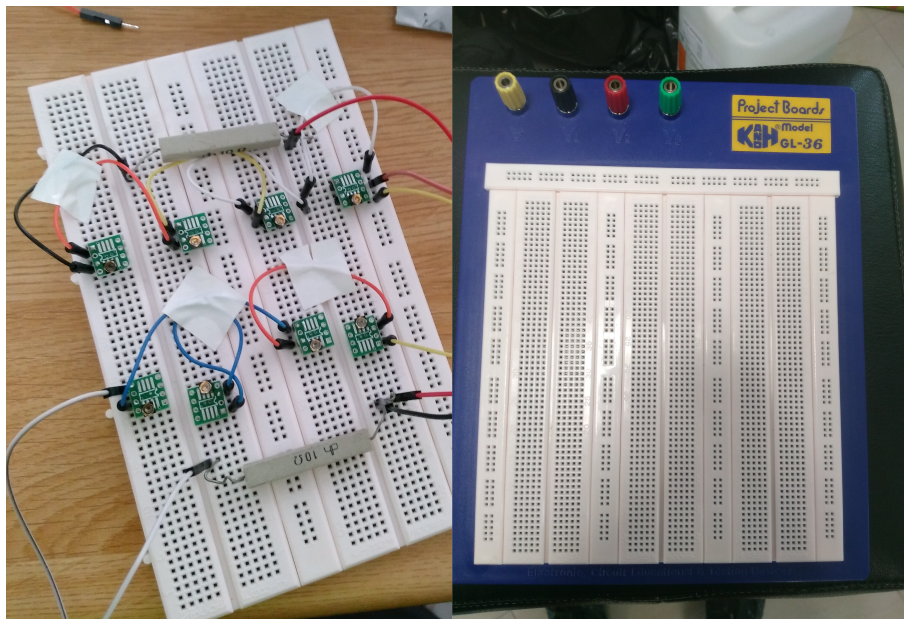


Figura 5.16: Montaje realizado con ocho LEDs (izquierda) y placa protoboard empleada para su realización (derecha)

Para la realización del montaje también se han empleado dos resistencias de 10Ω con disipador térmico, una para cada tira de LEDs en serie.

Obtención de imágenes de PL

Para obtener imágenes de PL se emplea el equipo descrito anteriormente (apartado 5.1.1). Los elementos que componen el montaje experimental (LEDs, oblea y cámara), se sitúan en el interior de la estructura como se muestra en el esquema de la Figura 5.17 izquierda.

Las imágenes de PL que se realizan con la cámara de InGaAs, empleando un tiempo de exposición de 600 ms . La Figura 5.17 derecha muestra la imagen de PL recogida en una oblea de mc-Si.

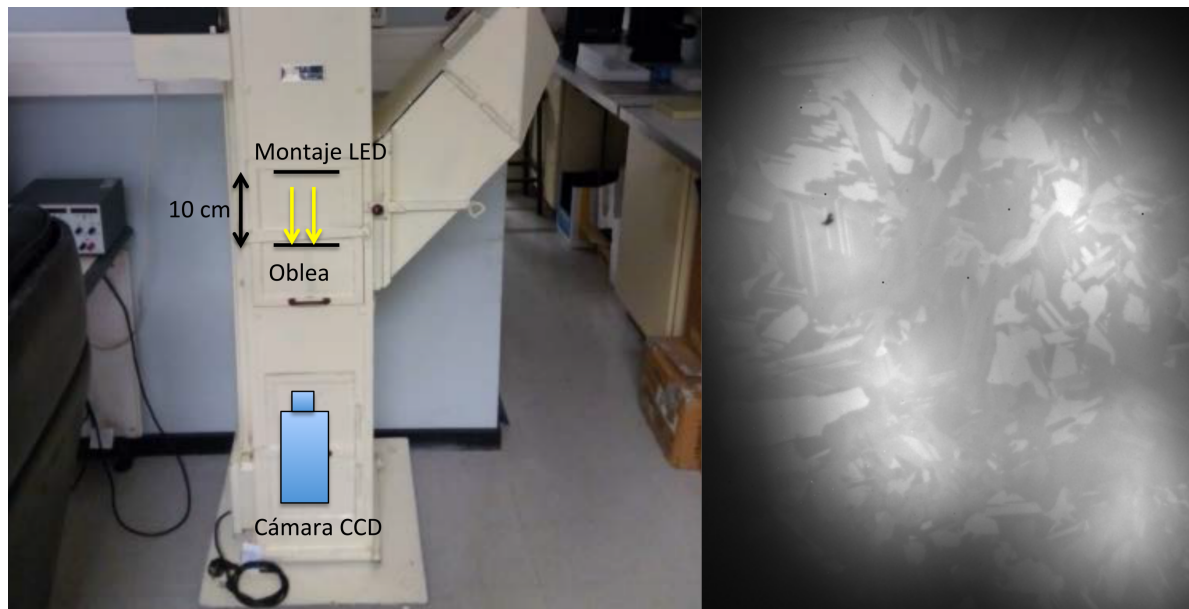


Figura 5.17: Montaje experimental (izquierda) e imagen de PL obtenida con la cámara de InGaAs (derecha) con el sistema de iluminación a 10 *cm* de la oblea

La Figura 5.18 muestra una imagen termográfica del montaje de ocho LEDs en funcionamiento, observando las zonas de mayor temperatura.

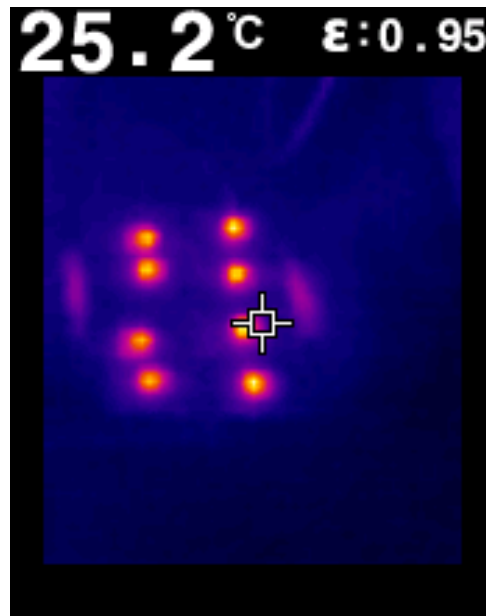


Figura 5.18: Imagen termográfica del montaje de ocho LEDs en funcionamiento, a máxima corriente

A continuación, se toma una imagen de PL de la oblea con el sistema de iluminación láser para poder comparar después ambos métodos. Para ello, se emplea de nuevo la cámara de InGaAs con un tiempo de exposición de 600 *ms*, Figura 5.19.

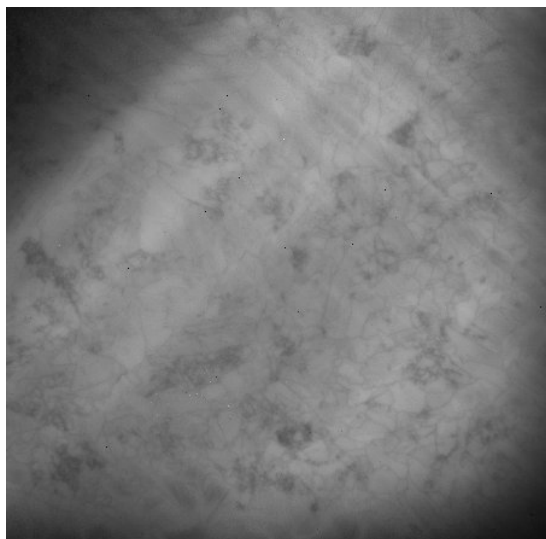


Figura 5.19: Imagen de PL obtenida con iluminación láser

En la Figura 5.19 se observa que la luminiscencia de la oblea de Silicio no se corresponde en absoluto con las imágenes obtenidas con la iluminación LED. En estas, en vez de luminiscencia se están observando únicamente los granos de la oblea, lo que indica que la luz que atraviesa la oblea es más intensa que la luminiscencia del Silicio.

Las razones por las que no se aprecia la luminiscencia pueden ser:

- Falta de potencia.
- El sistema de iluminación se encuentra muy cerca de la oblea.
- El sistema de iluminación se encuentra en incidencia normal con la oblea y llega a la cámara toda la luz que se transmite.

Dada la ausencia de luminiscencia en este montaje de ocho LEDs, se han realizado otros montajes alternativos, descritos a continuación.

5.2.5. Montaje con veinte LED

En base a la idea de que la potencia de luz puede ser insuficiente, se ha realizado un nuevo montaje con 20 LEDs distribuidos en cuatro tiras en paralelo de cinco LEDs en serie, Figura 5.20.

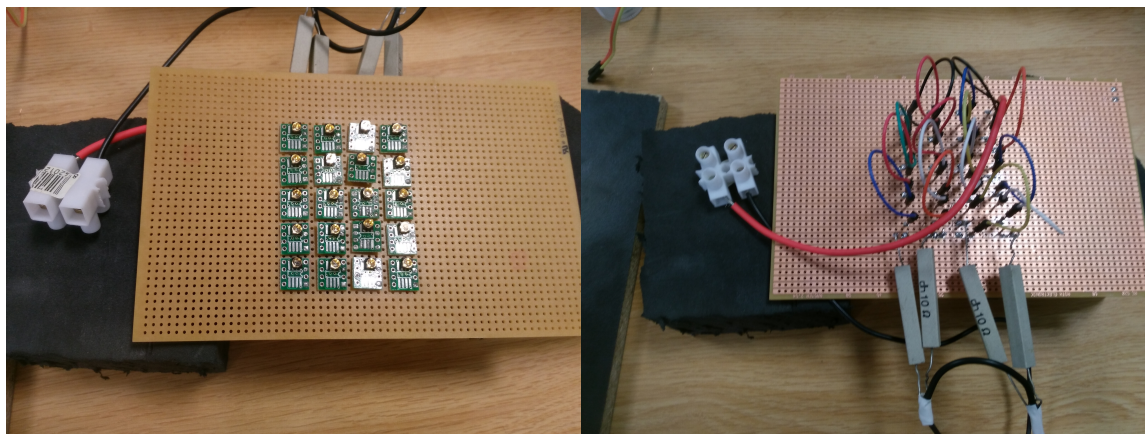


Figura 5.20: Montaje realizado con 20 LEDs, a la izquierda la parte anterior y a la derecha la posterior

En este caso, el montaje realizado es más compacto y cerrado. Se ha empleado para ello una placa con contactos longitudinales de cobre, rallando con un cúter en aquellas partes en las que sea necesaria una zona aislante. Por otro lado, se han empleado cuatro resistencias de $10\ \Omega$, una para cada tira de LEDs en serie. En este caso, la distancia entre LEDs era de $1\ \text{cm}$ aproximadamente.

Obtención de imágenes de PL

La Figura 5.21 izquierda muestra la disposición de los elementos para este caso. Se observa como la distancia entre los LEDs y la oblea era de $40\ \text{cm}$.

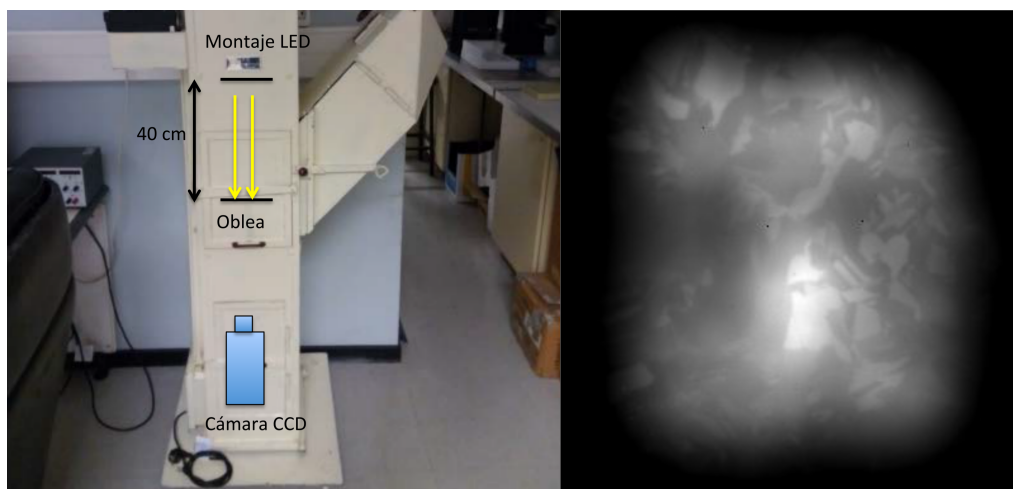


Figura 5.21: Montaje experimental (izquierda) e imagen de PL obtenida (derecha) con el sistema de iluminación a $40\ \text{cm}$ de la oblea

5.2. Fotoluminiscencia con fuente de iluminación LED

Se ha utilizado una distancia mayor que en el caso anterior para comprobar si el problema residía en la magnitud de este parámetro. La Figura 5.21 derecha muestra la imagen obtenida con la cámara de InGaAs con un tiempo de exposición de 40 *ms*. Se observa que la iluminación es más homogénea, pero sin embargo, no se aprecia PL, sino la estructura de granos propia de una oblea de mc-Si.

Para comprobar si fuera de la incidencia normal se observa luminiscencia, se realiza otra prueba con los elementos dispuestos como se muestra en la Figura 5.22.

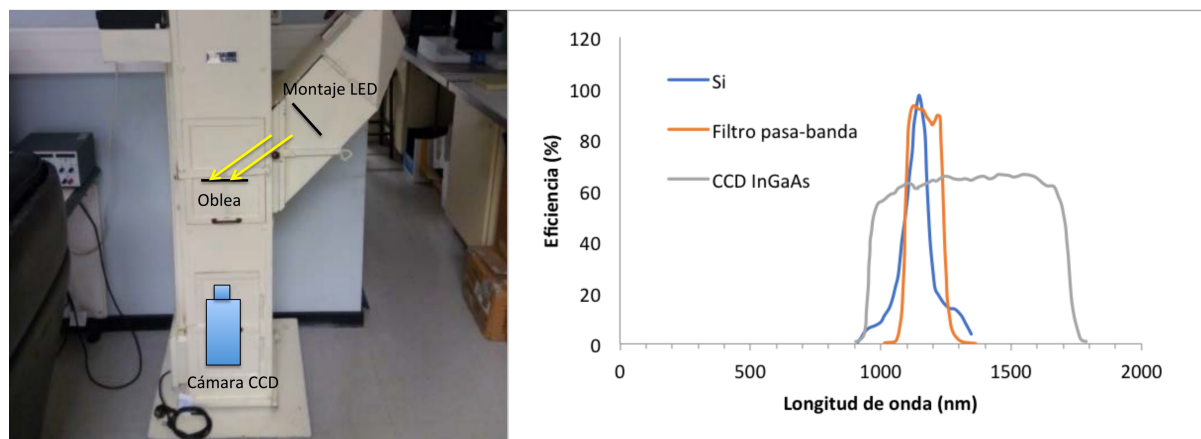


Figura 5.22: Disposición angular del sistema de iluminación con LEDs. Se emplea la cámara de InGaAs con un tiempo de exposición de 80 *ms* (izquierda) y curvas de eficiencia del filtro pasa-banda, cámara de InGaAs y espectro de emisión banda-banda del Silicio.

Además, se hacen algunas comprobaciones usando un filtro pasa-banda en la óptica de la cámara. La curva de eficiencia de este filtro se puede observar en la Figura 5.22 derecha, donde se aprecia que ofrece una alta eficiencia para longitudes de onda comprendidas entre 1100 *nm* y 1250 *nm*. La Figura 5.23 muestra las imágenes de PL obtenidas sin filtro (izquierda) y con filtro (derecha).



Figura 5.23: Imágenes obtenidas sin y con filtro pasa-banda con la disposición angular del sistema de iluminación con LEDs

De nuevo, aún con las modificaciones angulares del sistema, se observa ausencia de emisión de luminiscencia.

5.2.6. Montaje con lente acoplada

El último montaje realizado emplea una lente convergente, con el fin de conseguir mayor densidad superficial de potencia. Esta se coloca entre la oblea y la fuente de luz.

En este caso, se ha empleado el mismo montaje de 20 LEDs.

El modelo de lente que se ha utilizado es el 01 LPX 281, que tiene 200 mm de focal y 130 mm de diámetro.

Obtención de imágenes de PL

Para mayor comodidad se coloca el experimento en horizontal, ya que surgen algunas dificultades en la colocación de la lente. Las medidas se han realizando de nuevo en transmisión con la cámara de InGaAs y con diferentes disposiciones de la lente y la oblea. Se ha empleado una sujeción adecuada que permitiera levantar la lente (Figura 5.24).



Figura 5.24: Montaje realizado con la lente

La Figura 5.25 muestra la distribución de la luz sobre la oblea cuando los LEDs están encendidos. Como se observa, la zona central de la oblea recibe mayor intensidad de luz que el resto.



Figura 5.25: Distribución de la luz sobre la oblea con el montaje de veinte LEDs con la lente (la luz que emiten los LEDs se ve de color morado)

La Figura 5.26 muestra la caracterización térmica del montaje en funcionamiento.

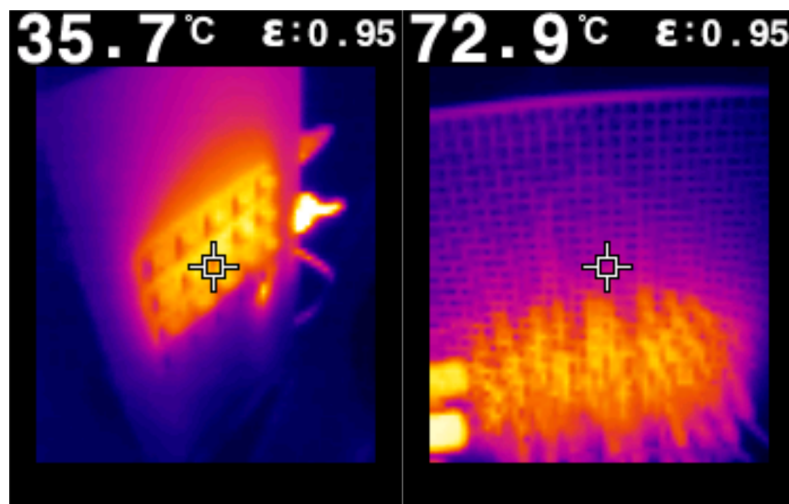


Figura 5.26: Imagen termográfica en funcionamiento de la parte anterior (izquierda) y la parte posterior (derecha)

5.2. Fotoluminiscencia con fuente de iluminación LED

La obtención de imágenes de PL se ha realizado en diferentes disposiciones de este montaje:

- En la primera disposición se ha colocado la lente a 35 cm de la oblea y se ha empleado un tiempo de exposición de 300 ms . En este proceso se quemó una resistencia, de forma que se han realizado las imágenes a partir de ahora con quince diodos en vez de con veinte, Figura 5.27.

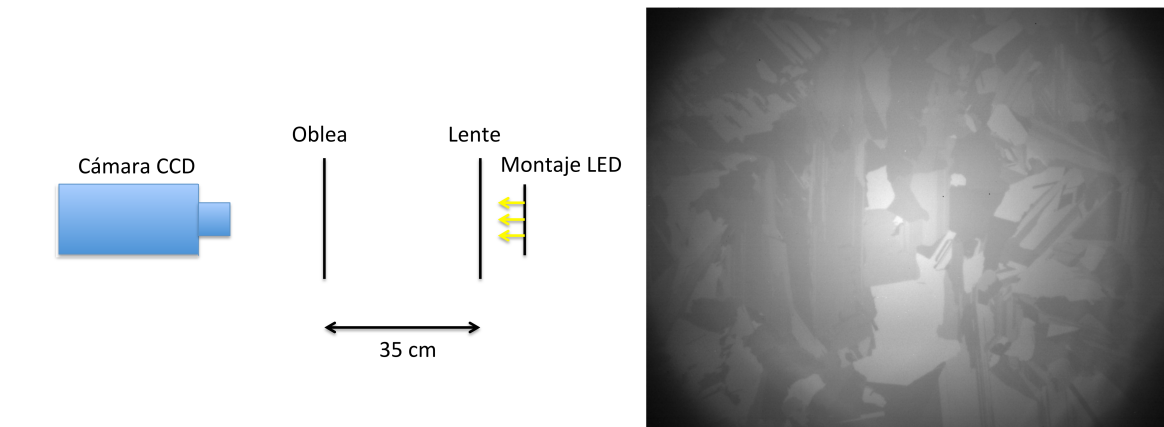


Figura 5.27: Esquema del montaje realizado (izquierda) e imagen de PL obtenida con este montaje (derecha)

- A continuación, se acercó la lente a la oblea. En este caso, la distancia entre ambas fue de 20 cm y el tiempo de exposición de la cámara fue de 300 ms , Figura 5.28.

Se aprecia que no hay grandes cambios en la imagen obtenida en comparación con la experiencia anterior.

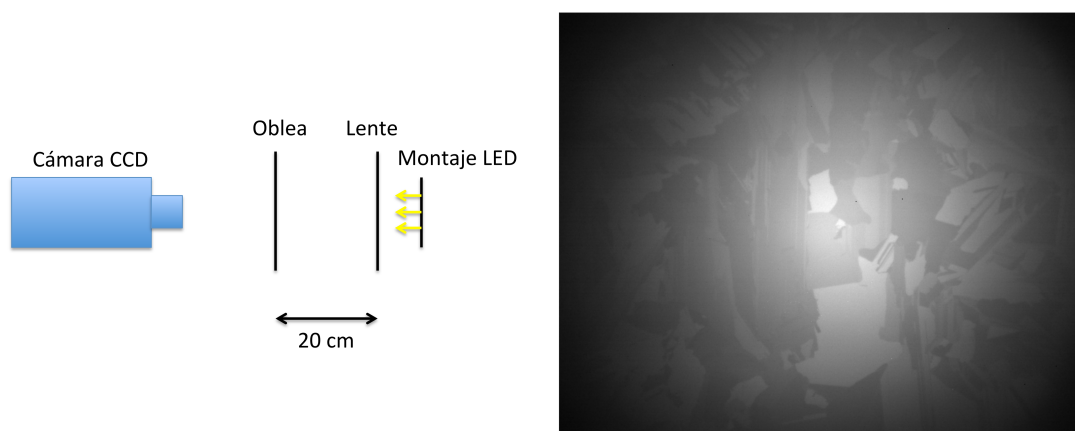


Figura 5.28: Esquema del montaje realizado (izquierda) e imagen de PL obtenida con este montaje (derecha)

- En este caso, se acercó de nuevo la lente a la oblea, teniendo una distancia de 10 *cm* entre ambas. El tiempo de exposición fue de 400 *ms*, Figura 5.29.

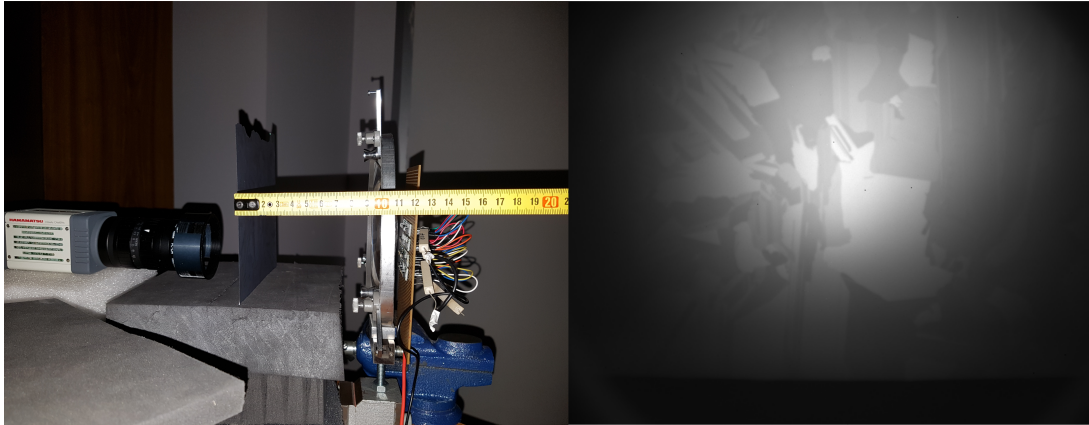


Figura 5.29: Imagen del montaje con la oblea a 10 *cm* de la lente (izquierda) e imagen de PL obtenida (derecha)

- Con la misma disposición de elementos, se retiró la lente y se tomó una imagen, Figura 5.30. La diferencia que se encuentra entre este caso sin lente y el anterior con lente, es que la zona de concentración de luz es más grande, con lo que se puede concluir que la lente sirve para focalizar mejor la luz en una zona.



Figura 5.30: Imagen de PL obtenida sin la lente

- Por último, se volvió a introducir la lente en la misma posición (a 10 *cm* de la oblea) y se sustituyó la óptica visible por la óptica swir. La medida en este caso se tomó con

5.2. Fotoluminiscencia con fuente de iluminación LED

tiempo de exposición de 300 *ms* y la imagen de luminiscencia resultado se observa en la Figura 5.31.

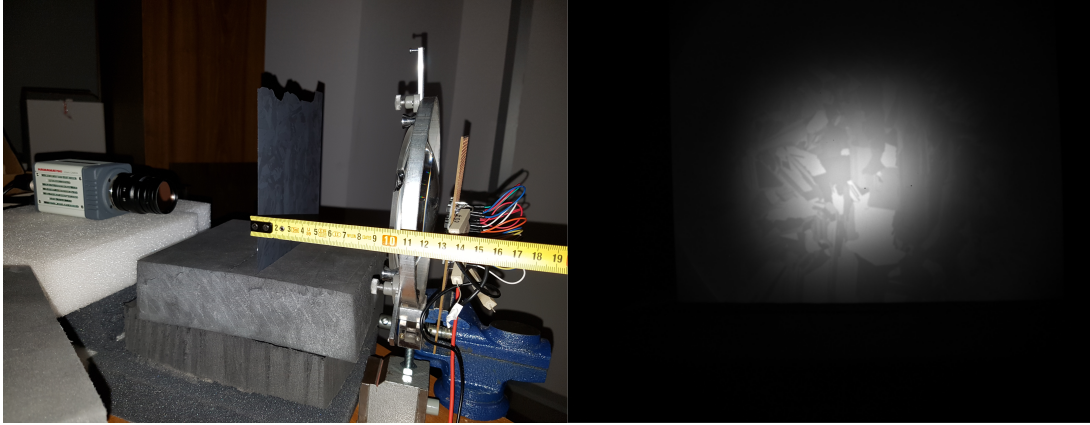


Figura 5.31: A la izquierda montaje realizado con la lente a 10 cm de la oblea usando la cámara de InGaAs con la óptica swir, a la derecha imagen de PL obtenida

Se concluye que en ninguna de las pruebas realizadas con la lente se obtiene imágenes de la luminiscencia del Silicio.

Capítulo 6

Conclusiones

En ninguno de los montajes que se han realizado se ha observado la luminiscencia del Silicio.

Las posibles razones por las que no se ha observado la luminiscencia se exponen a continuación:

- Falta de densidad de potencia: El LED que se ha empleado presenta unas características que han provocado que se tenga que soldar en unas placas. El uso de estas placas ha restringido la distancia a la que se ha podido tener separados los LEDs, de forma que la densidad de potencia obtenida ha sido menor que la necesaria.
- Las superficies de las obleas de Silicio multicristalinas poseen una densidad de defectos muy alta. Cuando se ilumina la oblea, existe un elevado número de recombinaciones no radiativas.

Para obtener una imagen de luminiscencia hay que conseguir que los portadores generados en la oblea se recombinen radiativamente. Es necesario tener una potencia de luz que sature los defectos que hay en la superficie para que se empiecen a recombinar los portadores radiativamente en el interior de la oblea.

Como se aumenta la potencia con la que se ilumina la oblea, la cantidad de luz que atraviesa la oblea es mayor, pero la eficiencia de la cámara de InGaAs en el rango de emisión del Silicio es mucho mayor que en el rango de emisión del LED y además la cámara posee un filtro que atenúa aún más la luz de los LEDs. Por lo que cuando se alcanza este límite, la luminiscencia del Silicio se observará en las imágenes de fotoluminiscencia mucho más que los granos de la oblea.

- Homogeneidad de los rayos: Debido a las restricciones que se han tenido en la soldadura, ha sido muy complicado tener todos los LEDs enfocados en la misma dirección. No se tiene una emisión de luz homogénea, de forma que no se consigue excitar de forma homogénea la oblea.

Si se hubiese obtenido una iluminación homogénea, el uso de la lente para focalizar los rayos habría provocado un efecto mayor.

Por todo esto, se han pensado las siguientes mejoras a los montajes realizados para intentar obtener imágenes de fotoluminiscencia con iluminación LED:

- Emplear un dispositivo LED comercial de mayor potencia, de forma que la luz se emita de forma más homogénea.

En este contexto se encontró el LED LZ4-40R400 con emisión en 850 *nm* y una potencia de 10 W. Habría que volver a resolver el problema de la realización de la soldadura.

- Uso de obleas pasivadas mediante ataques químicos. De esta manera los defectos superficiales disminuyen y disminuyen las recombinaciones no radiativas en superficie, de forma que aumentase la tasa de recombinaciones radiativas frente a las no radiativas.
- Uso de otro LED distinto. Este otro LED podría tener los contactos de patilla, de forma que su soldadura fuese más sencilla. Además se podrían soldar los LEDs mucho más cerca uno de otro para así conseguir una mayor densidad de potencia.

Bibliografía

- [1] ROPER D. L. <http://www.roperld.com/science/worldphotovoltaicenergy.htm>.
- [2] MAUGARD J., <http://www.killmybill.es/mix-energetico-espana/>.
- [3] INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY, *Renewable capacity statistics 2017*.
- [4] LAUER K., BLECH M., LAADES A. Y ZENTGRAF M., *Photoluminescence lifetime imaging using LED arrays as excitation source*, 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 2010.
- [5] WILSON J., HAWKES J.F.B, *Optoelectronics: An introduction*, tercera edición, Prentice Hall, 1998.
- [6] GILLILAND G. D. *Photoluminescence Spectroscopy of crystalline semiconductors*, Emoty university, 1997.
- [7] IVÁN SANTOS, *Apuntes de la asignatura Dispositivos Optoelectrónicos*, Universidad de Valladolid, Curso 2016/2017.
- [8] SINGH J., *Electronic an Optoelectronic properties of semiconductor structures*, primera edición, Cambridge, 2003.
- [9] ANTA FERNÁNDEZ J. *El Silicio Solar*, Asociación de la energía fotovoltaica, 2005.
- [10] PONCE ALCÁNTARA S. *Células solares de Silicio: Fundamentos y aplicaciones*, 2008.
- [11] MORALEJO OCHOA B. *Desarrollo y optimización de sistemas de corrientes inducidas ópticamente e imagen de luminiscencia para la caracterización de células fotovoltaicas*, Tesis doctoral, Universidad de Valladolid, 2013.
- [12] GREEN M. A. , ET. AL. *Solar cell efficiency tables*, Progress in Photovoltaics Vol.25, pp. 3-13, 2017.
- [13] <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Tables/Semgap.html>.
- [14] SALEH E. A. y TEICH M. C., *Fundamentals of Photonics*, segunda edición, Wiley and sons, 2007.
- [15] http://www.interpv.net/market/market_view.asp?idc=310&part_code=05&page=2.

- [16] SCHUBERT E. F. *Light Emitting Diodes*, segunda edición, Cambridge, 2006.
- [17] SCHRODER D. K. *Semiconductor material and device characterization*, tercera edición, Wiley and sons, 2006.
- [18] POZO MOLINA A. M. *Caracterización óptica de dispositivos CCD y aplicaciones*, Tesis doctoral, Universidad de Granada, 2008.
- [19] MARTÍNEZ GONZÁLEZ M. *Puesta en práctica y elaboración de un sistema de caracterización de células fotovoltaicas mediante electro y fotoluminiscencia*, Trabajo de Fin de Grado, Universidad de Valladolid, 2015.
- [20] RAJAKANAN K., SINGH R. Y SHEWCHUN J. *Absorption coefficient of Silicon for solar cells calculation*, Solid-State Electronics, Vol.22-9, pp. 793-795, 1979.
- [21] <http://www.cleanroom.byu.edu/OpticalCalc.phtml>, Brigham Young University.
- [22] [https://www2.pvlighthouse.com.au/Resources/Photovoltaic materials/Refractive index/Refractive index.aspx](https://www2.pvlighthouse.com.au/Resources/Photovoltaic%20materials/Refractive%20index/Refractive%20index.aspx).