



Escola Tècnica Superior d'Enginyeria  
de Telecomunicació de Barcelona

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

## TESIS DE MÁSTER

# Espectroscopia de impedancias aplicada al análisis de células solares

HIGH EFFICIENCY SOLAR CELL  
IMPEDANCE SPECTROSCOPY ANALYSIS

*Estudios: Máster en Electrónica (2009)*

*Autor: Daniel Carlos Sinde Carbajo*

*Director: Albert Orpella García*

*Octubre 2015*



Departament  
d'Enginyeria  
Electrònica





## **Agradecimientos**

Durante la elaboración del presente trabajo he recibido el soporte de varias personas. Quiero agradecer especialmente el principal soporte, ayuda y paciencia de Albert Orpella para la realización de la presente Tesis. Agradezco el gran soporte de mis padres, hermana y familia para dar alientos y ánimos a pesar de los problemas que afloran en el día a día. Gracias también al apoyo de mis amigos que me han reforzado aún más en continuar cuando sólo se veían problemas por delante.

## **Colaboraciones**

Agradezco la colaboración del Departamento de Electrónica de la universidad por el acceso a su Laboratorio y el ceder la oblea con células solares para su medición.

## **Resumen del proyecto**

En el presente proyecto se ha realizado la medición de células solares mediante espectroscopia de impedancias. El principal aporte realizado en el proyecto es la fabricación de placas de circuito impreso que permiten contactar las células solares directamente con la máquina de medidas sin necesidad de cables. De esta forma, la capacidad y la inductancia parásitas se reducen drásticamente consiguiendo medidas sin distorsión a altas frecuencias (hasta 15 MHz). Además, mediante la espectroscopia de impedancias se consigue obtener la respuesta frecuencial de los dispositivos y separar la contribución en la resistencia de cada una de las capas físicas que forman la estructura de la célula solar, obteniendo parámetros que modelan el comportamiento como son el factor de idealidad, el tiempo de vida efectivo o el radio del contacto de base.

## **Resum del projecte**

Al present projecte s'ha realitzat la mesura de cèl·lules solars mitjançant l'espectroscòpia d'impedàncies. La principal aportació realitzada al projecte és la fabricació de plaques de circuit imprès que permeten contactar cèl·lules solars directament amb la màquina de mesures sense necessitat de cables. D'aquesta forma, la capacitat i la inductància paràsites es redueixen dràsticament aconseguint mesures sense distorsió a altes freqüències (fins a 15 MHz). A més, mitjançant l'espectroscòpia d'impedàncies s'aconsegueix obtenir la resposta freqüencial dels dispositius i separar la contribució a la resistència de cadascuna de les capes físiques que formen l'estructura de la cèl·lula solar, obtenint paràmetres que modelen el comportament com el factor d'idealitat, el temps de vida efectiu o el radi del contacte de base.

## **Abstract**

At the present project a set of measurements of solar cells have been done with the use of Impedance Spectroscopy. The main fact of the project is the fabrication of printed circuit boards that allowed the direct contact of the solar cells with the measurement machine without the necessity of cables. In this way, the parasitic capacity and inductance are considerably reduced allowing measurements without distortion at high frequencies (until 15 MHz). In addition, with impedance spectroscopy it is possible to get the frequency response of the devices and separate the contribution in the resistance of each one of the physical layers that forms the solar cell structure, obtaining parameters that models the behavior like the ideality factor, the effective life time or the radius of the base contact.

**Índice**

<b>Agradecimientos</b> .....	<b>3</b>
<b>Colaboraciones</b> .....	<b>3</b>
<b>Resumen del proyecto</b> .....	<b>3</b>
<b>Resum del projecte</b> .....	<b>3</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>4</b>
<b>Índice</b> .....	<b>5</b>
<b>Índice de figuras</b> .....	<b>7</b>
<b>1- Introducción</b> .....	<b>9</b>
<b>2- Estado del arte. Teoría detrás de las mediciones</b> .....	<b>10</b>
2.1- Espectro solar .....	10
2.2- Célula solar .....	12
2.3- Evolución y desarrollo de las células solares.....	17
2.4- Tecnologías de fabricación.....	19
2.5- Espectroscopia de impedancias .....	25
2.5.1- Modelo 1. Modelo básico R-C.....	26
2.5.2- Modelo 2. Célula solar con base contactada a través de MIS .....	27
<b>3- Diseño de la placa de medida</b> .....	<b>29</b>
3.1- Placa de test inicial.....	30
3.2- Placa de test directa. 2ª versión .....	31
3.3- Placa de test directa mejorada. 3ª versión.....	32
3.4- Montaje de periféricos, cables y otros útiles requeridos.....	33
<b>4- Medición de células solares</b> .....	<b>35</b>
4.1- Definición del modelo .....	38
4.2- Definición de medida para modelo .....	38
4.3- Medición con máquina de impedancias .....	40
4.4- Ajustes de resultados .....	43
<b>5- Extracción de la resistencia de base a partir de medidas de impedancia</b> .....	<b>54</b>
5.1- Célula solar con base SiO <sub>2</sub> y resistencia de sustrato .....	54
5.2- Dependencia de R <sub>base</sub> respecto a la resistividad. ....	58
5.3- Dependencia de R <sub>base</sub> según el pitch .....	61
5.4- Resultados con modelo avanzado incluyendo R <sub>2</sub> .....	62
<b>6- Conclusiones y líneas futuras</b> .....	<b>65</b>

<b>7- Bibliografía</b> .....	<b>67</b>
<b>8- Apéndices</b> .....	<b>71</b>
8.1- Diseño primera placa.....	71
8.1.1- Diseño .....	71
8.1.2- Fabricación .....	76
8.1.3- Montaje.....	77
8.1.4- Cableado .....	79
8.1.5- Fabricación útil iluminación por led de alta potencia .....	81
8.1.6- Resultados.....	82
8.2- Diseño de segunda placa .....	82
8.2.1- Diseño .....	82
8.2.2- Fabricación .....	83
8.2.3- Resultados.....	83
8.3- Diseño de tercera placa.....	84
8.3.1- Diseño .....	84
8.3.2- Fabricación .....	84
8.3.3- Resultados.....	85
<b>Glosario</b> .....	<b>86</b>

## Índice de figuras

Fig. 2.1: Gráfica de Espectros solares sobre la Tierra [1].	11
Fig. 2.2: Espectro Solar con afectaciones por gases de la atmósfera [2].	12
Fig. 2.3: Gráficos con esquemas de bandas prohibidas de semiconductor directo e indirecto [4].	13
Fig. 2.4: Gráfico i-v de una célula solar en iluminación y en sombra [52].	14
Fig. 2.5: Eficiencia según la banda prohibida para diferentes materiales [5, 6].	16
Fig. 2.6: Producción de células solares mundial de la década anterior [7].	17
Fig. 2.7: Evolución del coste de células según Ley de Swanson en las últimas cuatro décadas [7, 5].	18
Fig. 2.8: Coste por vatio de la producción de células solares [7].	18
Fig. 2.9: Desarrollo de diferentes tecnologías de células solares [7].	20
Fig. 2.10: Imágenes de microscopio de acabados superficiales [5].	21
Fig. 2.11: Estructura de célula con contactos enterrados [8].	22
Fig. 2.12: Célula solar con BSF de boro [8].	23
Fig. 2.13: Célula solar de heterounión con capa interior intrínseca [8].	23
Fig. 2.14: Célula solar interdigitada en parte posterior [8].	24
Fig. 2.15: Modelo eléctrico de célula solar.	25
Fig. 2.16: Modelo circuital de célula solar básico.	27
Fig. 2.17: Modelo circuital de Célula solar con BSF.	28
Fig. 3.1: Oblea con células a medir.	29
Fig. 3.2: Primer diseño de circuito impreso capaz de medir dos tipos diferentes de células.	30
Fig. 3.3: Placa prototipo de conexión directa a máquina de medición.	31
Fig. 3.4: Placa de conexión directa a máquina de medición mejorada para sujetar oblea completa y con punta retráctil que ejerce menor fuerza sobre oblea.	32
Fig. 3.5: Fotos de las terminaciones del cable de conexión máquina-placa de pruebas.	33
Fig. 4.1: Distribución de las células solares sobre la oblea de pruebas. (Tamaño real)	37
Fig. 4.2: Gráfico de impedancias Imaginarias-Reales.	39
Fig. 4.3: Foto de máquina de medición Agilent 4294A realizando mediciones.	41
Fig. 4.4: Captura de formato de datos grabados por máquina de medición de impedancias.	42
Fig. 4.5: Diagrama Bode el módulo de la impedancia 650mV de célula A.	42
Fig. 4.6: Diagrama de Bode de Impedancia Imaginaria a 650mV de célula A.	42
Fig. 4.7: Simulaciones con los parámetros del modelo circuital (azul) respecto medidas reales (rojo).	44
Fig. 4.8: Gráfico de Nyquist de Resistencia Imag.-Real vs. Pitch a 650mV de polarización.	45
Fig. 4.9: Gráfico con valores de impedancia Imaginaria respecto Real para polarización baja.	46
Fig. 4.10: Gráfico Nyquist para la célula A de 600 $\mu$ m para $V_{pol}$ de 700, 650, 600mV.	47
Fig. 4.11: Resistencia dinámica $R_1$ versus pitch.	48
Fig. 4.12: Resistencia dinámica $R_1$ versus $V_{pol}$ .	48
Fig. 4.13: Resistencia dinámica vs. Tensión de polarización en zona umbral.	49

Fig. 4.14: Resistencia base medida según tensión de polarización para diferentes pitch.	50
Fig. 4.15: Rbase de célula A en función de tensión de polarización.	50
Fig. 4.16: Resistencia de base respecto Pitch para tensión de polarización a 650mV.	51
Fig. 4.17: Condensador C2 modelando la capacidad del BSF.	51
Fig. 4.18: Tau 1 correspondiente a respuesta dinámica de las células según su pitch.	52
Fig. 4.19: Tau 2 correspondiente a tiempo de vida de portadores en la base en el BSF.	52
Fig. 4.20: Capacidades respecto de pitch.	53
Fig. 4.21: Tiempo de vida respecto pitch.	53
Fig. 5.1: Modelo de célula solar con BSF y resistencia de sustrato.	55
Fig. 5.2: Gráficos de impedancias Real-Imaginario para modelo con Rbase y modelo con Rbase y BSF [26].	56
Fig. 5.3: Sección de célula solar con BSF y esquema eléctrico sobreimpreso [26].	57
Fig. 5.4: Gráfico de impedancias según tensión de polarización [26].	58
Fig. 5.5: Diferencia de flujo de corriente en contactos separados y juntos [35].	59
Fig. 5.6: Gráfica de resistencia de base según tensión de polarización [26].	61
Fig. 5.7: Gráfico comparativo entre resistencia de base y pitch de base [26].	62
Fig. 5.8: Medidas experimentales ajustadas con nuevo modelo circuital [26].	63
Fig. 5.9: Dependencia experimental de resistencia de base respecto la tensión de polarización [26].	63
Fig. 8.1: Medidas de célula solar bifacial (UPC – MNT).	72
Fig. 8.2: Medidas de célula solar interdigitada (UPC- MNT).	72
Fig. 8.3: Captura del Esquema eléctrico del diseño de la placa de circuito impreso.	73
Fig. 8.4: Plantillas de componentes de diseño.	74
Fig. 8.5: Cara Top del diseño de la placa.	74
Fig. 8.6: Cara Bottom del diseño de la placa.	75
Fig. 8.7: Contornos de posición de las células solares en placa.	75
Fig. 8.8: Cara top de placa primer prototipo.	76
Fig. 8.9: Cara bottom de placa primer prototipo.	76
Fig. 8.10: Fotos de placa primer prototipo con conexiones.	77
Fig. 8.11: Detalle de útil para sujeción de células interdigitadas en placa primer prototipo.	78
Fig. 8.12: Detalle de 2 placas de primer prototipo funcionales.	78
Fig. 8.13: Fotos con referencia de tamaño de placa de primer prototipo.	79
Fig. 8.14: Fotos de detalle de unión tornillo-palomilla.	79
Fig. 8.15: Fotos montaje de extremo terminación de cable de conexión.	80
Fig. 8.16: Detalle soldadura de terminación de cable de conexión.	80
Fig. 8.17: Detalle de montaje conexión BNC del cable de conexión.	81
Fig. 8.18: Led de alta potencia con disipador montado.	82
Fig. 8.19: Foto de zona de la oblea para el tercer diseño.	83
Fig. 8.20: Comparación de tamaño entre primer y tercer diseño.	84
Fig. 8.21: Tercer diseño con punta de prueba sin soporte.	85



# 1- Introducción

Durante los últimos años se han realizado múltiples investigaciones para crear estructuras cada vez más complejas que disminuyan el coste de fabricación de las células solares y a su vez aumenten su rendimiento. La optimización de los elementos o capas físicas que conforman estas estructuras es de vital importancia para conseguir este propósito.

Utilizando métodos habituales de medida en continua se consigue obtener los factores de mérito de funcionamiento de la célula solar (rendimiento, fill-factor, tensión en circuito abierto y corriente de cortocircuito) y parámetros globales de comportamiento (resistencia serie, resistencia de fugas, factor de idealidad) sin poder conocer como contribuye por separado cada uno de estos elementos.

Una técnica alternativa consiste en realizar medidas de espectroscopia de impedancias que permiten estudiar el comportamiento frecuencial y de esta forma discernir como afectan por separado las capas físicas en que se divide la estructura de un dispositivo y poder así optimizar su funcionamiento.

El trabajo experimental de este proyecto está basado en la fabricación de circuitos impresos que permiten contactar los dispositivos directamente a la máquina de medidas sin necesidad de cables que son los responsables de interferencias parásitas. De esta forma se han realizado medidas de impedancias en células solares y a partir del ajuste de dichas medidas con modelos eléctricos RC, se han obtenido dichos parámetros para las diferentes contribuciones de cada una de las partes de la célula solar en estudio.

La presente memoria está estructurada en cinco apartados, siendo el último apartado donde se extraen las conclusiones obtenidas en los estudios realizados, bibliografía y un apéndice que detalla la fabricación de las diferentes placas utilizadas. En el primer apartado se presenta un pequeño estudio del estado del arte de las células solares, sobre su evolución, materiales utilizados en su fabricación así como sus estructuras, finalizando con una breve introducción a las medidas de impedancia. A continuación, en el segundo, se describen las diferentes placas utilizadas en las medidas. En el tercer apartado se realiza la medición de las células y se obtienen los resultados a partir de los ajustes. El cuarto apartado es una aplicación particular donde se extrae la resistencia de base que permite obtener el tamaño de los contactos laser, factor clave en la optimización de las células solares.

## 2- Estado del arte. Teoría detrás de las mediciones

El campo del diseño de células solares hoy día ha evolucionado considerablemente desde su invención y primeros usos, principalmente en la industria aeroespacial en sondas y satélites. Las primeras células solares creadas con base en Silicio o Germanio tenían un coste considerable debido principalmente a los costes de fabricación. Estos costes se han logrado disminuir tras un largo desarrollo en las últimas décadas y parte de esta reducción es gracias a diversos factores como la creación de obleas de silicio de mayor tamaño que permiten tener más rendimiento por área, capacidad de fabricar obleas más finas, mejoras en los procesos de fabricación y dopado, etc.

A pesar de estas mejoras, el rendimiento energético se ha mantenido bastante estable durante varios años (o incluso décadas) con pequeños incrementos. Ha sido en la última década donde se han realizado más estudios sobre diferentes materiales y métodos de fabricación en que el rendimiento y aprovechamiento del material está llegando a nuevas cotas manteniendo el coste bajo.

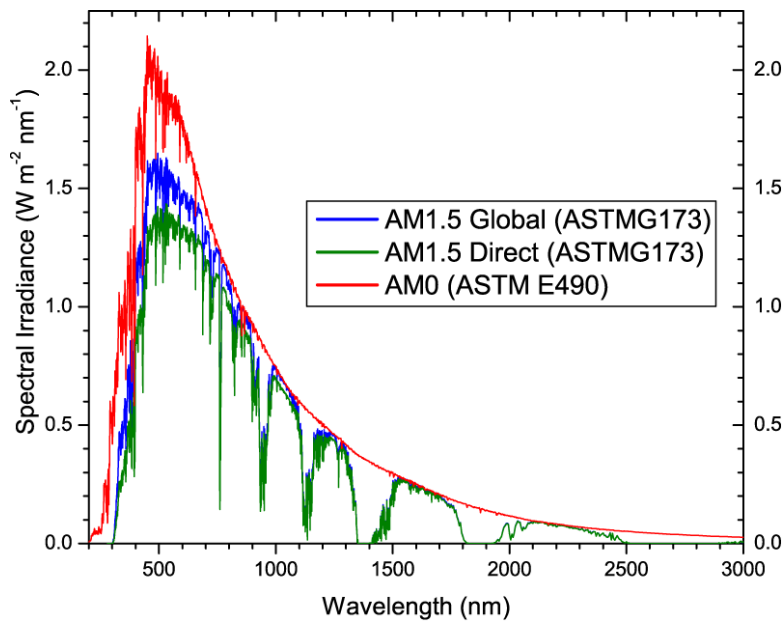
Uno de los principales hándicaps es la realización de pruebas "in cell" una vez fabricadas para comprobar que se ha fabricado correctamente, como se realiza por ejemplo en circuitos electrónicos fabricados hoy día aplicando un In Circuit Test. La realización de este tipo de prueba en una célula solar es compleja y determinante para el rendimiento final del panel solar en el que se monte.

### 2.1-Espectro solar

La iluminación solar es el tipo de luz que principalmente alimentará de energía lumínica a la célula solar para que ésta a su vez la transforme en energía eléctrica. Es a través de la incidencia de rayos solares sobre las células solares y la conversión en su interior de fotones en corriente eléctrica donde se genera energía. Para lograr esto hay un desarrollo considerable en la composición, fabricación y acabado de las células solares que permitan la máxima captación de energía. El primer punto a tener en cuenta es el espectro solar y su distribución espectral ya que éste no es constante y además se ve afectado por la atmósfera del planeta ya que todas las frecuencias no atraviesan la atmósfera con la misma intensidad.

El espectro solar se divide en diferentes tipos según si se analiza antes de la atmósfera o después de atravesarla. El primer tipo es el AM0 (Air Mass 0) que es el que se recibiría en el espacio, por ejemplo por los satélites sin apenas ninguna atenuación en potencia ni frecuencia. El segundo tipo AM1.5 Global corresponde al espectro recibido a través de la atmósfera que reduce la potencia de todo el espectro llegando a atenuar considerablemente algunas frecuencias. Esto se produce por la atenuación causada por los gases presentes en la atmósfera y a la propia humedad de la misma (partículas de agua contenidas en el aire). El último espectro establecido se corresponde al AM1.5 Direct + Circumsolar que

incluye reflexiones en la propia atmósfera. En la Fig. 2.1 se muestran los espectros explicados en función de su irradiación espectral y su longitud de onda.



**Fig. 2.1: Gráfica de Espectros solares sobre la Tierra [1].**

La atenuación causada por la atmósfera sobre la irradiación solar no es constante en todo el espectro y hay frecuencias o longitudes de onda que se ven afectadas especialmente. Esta afectación de los gases sobre la intensidad de la luz recibida hace que en el diseño de las células solares se tenga que considerar el espectro de frecuencias sobre el cuál se quiere diseñar la célula solar. Para el caso de uso en el espacio se diseñará que abarque el máximo del espectro visible y parte del infrarrojo seleccionando materiales y usando la fabricación apropiada para conseguirlo. En cambio para células que se planteen usar sobre la Tierra se debe considerar la reducción de iluminación acaecida por la atmósfera y el hecho de que a determinadas frecuencias la atenuación es tan grande que no compensa diseñar la célula solar para la misma.

En la Fig. 2.2 se pueden observar estas atenuaciones causadas por gases como el oxígeno en el espectro de los 750nm. y el dióxido de carbono CO<sub>2</sub> en el espectro de los 2000nm. Es sin embargo la presencia del agua en forma de humedad ambiental o bien nubes la que propicia las mayores atenuaciones en los 1400nm. y 1850nm. Para el rango de espectro de diseño de captación de energía solar el más óptimo sería el que comprende el rango de espectro visible continuando por los infrarrojos hasta la atenuación más pronunciada debida al agua y omitiendo las posibles pérdidas por el oxígeno alrededor de los 750nm.

## Spectrum of Solar Radiation (Earth)

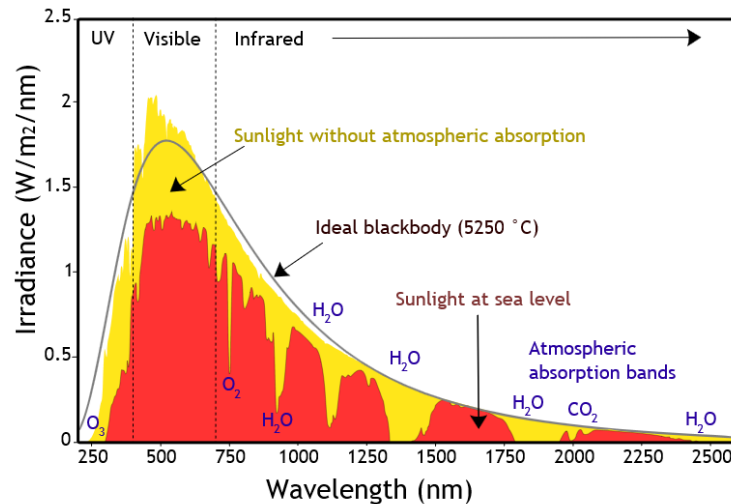


Fig. 2.2: Espectro Solar con afectaciones por gases de la atmósfera [2].

Aunque la distribución del espectro es importante, el rendimiento de las células solares depende de la tecnología utilizada en su fabricación, la estructura de la propia célula solar y el acabado de la misma. Estos aspectos se considerarán en los siguientes puntos.

### 2.2-Célula solar

Para la fabricación de células solares se suele emplear el silicio como material de base, aunque no es el único que puede utilizarse para tal efecto. En el pasado se han barajado otros materiales como el binomio telurio y cadmio (CdTe) y el compuesto de seleniuro de cobre-indio (CIS) aparte del silicio amorfo a-Si [3]. El mayor inconveniente de los materiales como el telurio, cadmio o indio es la poca abundancia que hay en la Tierra de estos materiales además de la complejidad para su uso en la fabricación en las células solares. Se debe considerar que el cadmio es considerado nocivo en la normativa ROHS de materiales peligrosos y no favorece mucho su uso en células solares.

Estos materiales no serían capaces de mantener los requerimientos de producción de energía mediante células solares por no haber suficiente cantidad según las estimaciones realizadas [3]. Es por estos motivos por los que el silicio se ha convertido en un referente como material para la fabricación de células solares aparte de: ser un material muy estudiado y probado en el campo de los semiconductores, abundancia como elemento en la Tierra y proceso de obtención listo para fabricar completamente industrializado para gran volumen. A pesar de estas ventajas el silicio no es el elemento más propicio para su uso ya que es un material de gap indirecto.

El silicio tiene una energía de Banda prohibida  $E_g$  de 1,12eV que es la energía que separa la banda de valencia de la banda de conducción del propio átomo. Para que un electrón y un hueco dentro del semiconductor se recombinen requieren de cierta energía en forma de fotón (luz). Esto en un semiconductor de tipo directo sucede directamente con las

condiciones adecuadas. En el caso de un semiconductor indirecto, la recombinación requiere de un fotón y además un fonón para compensar la diferencia espacial entre las dos bandas más próximas entre sí de la banda de valencia y la banda de conducción. En la Fig. 2.3 se puede observar gráficamente la anterior explicación.

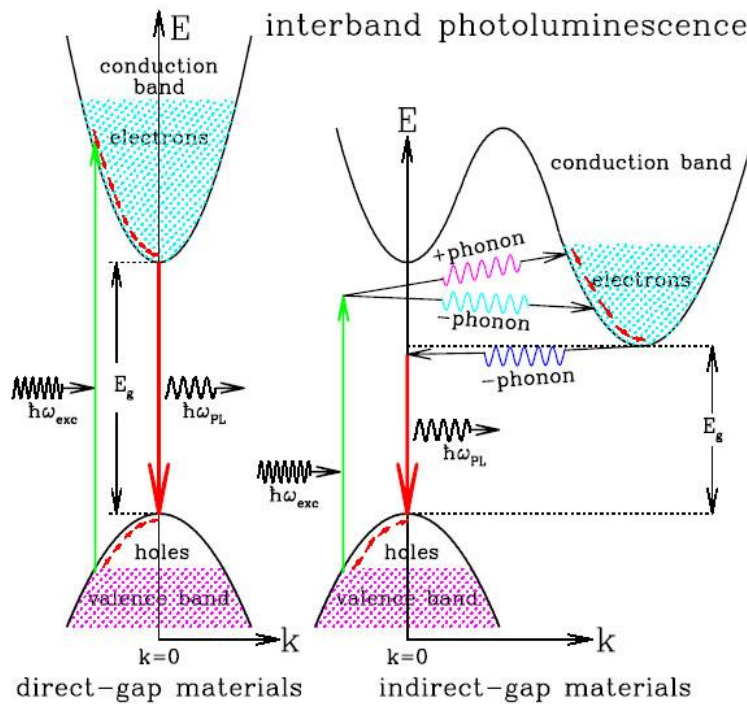


Fig. 2.3: Gráficos con esquemas de bandas prohibidas de semiconductor directo e indirecto [4].

Una célula solar tiene dos comportamientos claramente diferentes, en oscuridad y bajo iluminación. La célula solar es un diodo rectificador pero con una geometría y características diferentes que le otorgan las cualidades para ser un generador de electricidad en corriente continua a partir de iluminación. Partiendo de la ecuación del diodo y en situación de oscuridad para una célula solar podemos describir su flujo de corriente según la Ec. 2.1.

$$J_{osc} = J_0 \left( e^{V/n \cdot V_T} - 1 \right) \tag{Ec. 2.1}$$

Donde la densidad de corriente que circula por la célula en oscuridad es  $J_{osc}$ ,  $J_0$  es la densidad de corriente en inversa del diodo,  $n$  es el factor de idealidad, y  $V_T$  es la tensión térmica siendo ésta a su vez calculada según Ec. 2.2.

$$V_T = \frac{K_B \cdot T}{q} \tag{Ec. 2.2}$$

Donde  $K_B$  es la constante de Boltzmann,  $T$  la temperatura en grados Kelvin y  $q$  la carga básica del electrón.

El factor de idealidad del diodo  $n$  es un factor de mérito que indica la aproximación respecto a un diodo ideal. Su valor óptimo es 1, y toma valores superiores a éste cuando la respuesta no es la ideal. Se puede obtener a partir de la pendiente de la corriente en directa en función

de la tensión de polarización, que suele nombrarse como resistencia dinámica del diodo ( $R_1$ ). En la Ec. 2.3 se representa la expresión obtenida:

$$n = \frac{R_1 * I_{pol}}{V_T} \quad \text{Ec. 2.3}$$

Con la medición de impedancias de la célula solar se puede determinar este parámetro de gran interés para la evaluación de la calidad de la célula solar.

Al iluminarse la célula, la característica de la densidad de corriente cambia ya que se crea una corriente por el efecto de la iluminación que se suma a la fórmula anterior resultando en la Ec. 2.4.

$$J_{cell} = J_0 \left( e^{V/n \cdot V_T} - 1 \right) - J_L \quad \text{Ec. 2.4}$$

Donde  $J_{cell}$  es la densidad de corriente total de la célula con iluminación y  $J_L$  de densidad de corriente generada por la iluminación. En la Fig. 2.4 se dibujan las respuestas de una célula solar en el caso de estar en sombra con un comportamiento similar al de un diodo rectificador y bajo iluminación en el que se representa su punto de máxima potencia de funcionamiento.

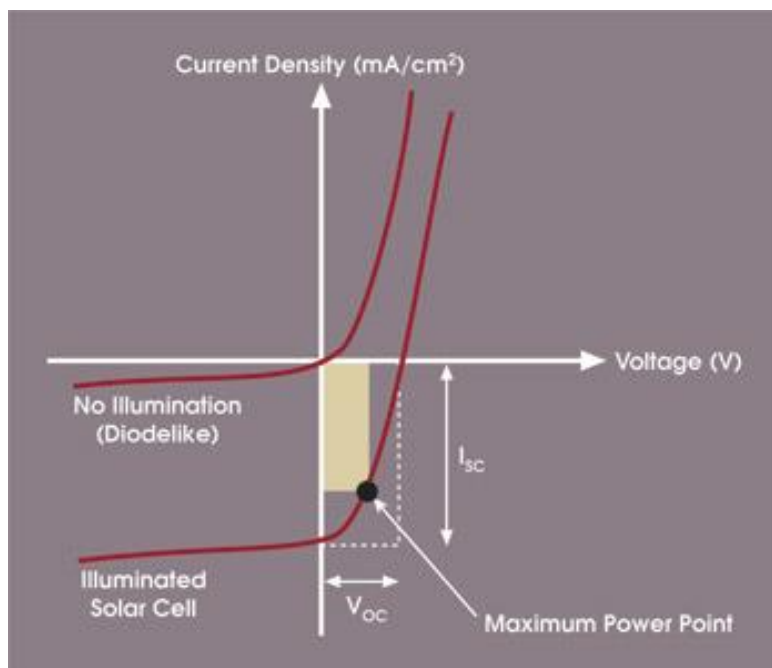


Fig. 2.4: Gráfico i-v de una célula solar en iluminación y en sombra [52].

El punto de máximo rendimiento energético de la célula solar está acotado entre la corriente de cortocircuito y la tensión de circuito abierto siendo estos los máximos valores eléctricos que caracterizan la célula. El producto de estos dos últimos representa la máxima potencia teórica de la célula solar en una consideración ideal. Llegar a este punto de máxima potencia teórica (fuera de la línea de la característica de iluminación) sería el mejor



rendimiento para el funcionamiento de la célula solar pero no es alcanzable debido a la no idealidad real de la célula solar.

En la realidad el comportamiento de una célula solar es similar a la de un diodo (o célula solar en sombra) pero con un offset hacia el cuarto cuadrante en donde la corriente se invierte de signo indicando que se genera energía en vez de consumirla según el convenio de signos. Dentro de esta característica desplazada se halla el punto de máxima potencia (MPP) compuesto por el producto de la corriente en máxima potencia  $I_M$  y la tensión en máxima potencia  $V_M$  de la célula solar. Para relacionar este comportamiento real de máximos valores con el ideal se usa una relación conocida como Fill Factor (factor de relleno) que indica el nivel de eficiencia conseguido respecto al punto de máxima potencia teórica que sería el ideal de la célula solar. En la Ec. 2.5 se expresa la ecuación de esta relación.

$$FF = \frac{I_M \cdot V_M}{I_{sh} \cdot V_{oc}} \quad \text{Ec. 2.5}$$

Donde  $V_{oc}$  es la tensión de circuito abierto y  $I_{sh}$  es la corriente de cortocircuito. Para representar la eficiencia de captación lumínica  $\eta_{eff}$  que relaciona la potencia eléctrica generada y la potencia solar recibida se utiliza la ecuación Ec. 2.6.

$$\eta_{eff} = \frac{V_{oc} \cdot I_{sh} \cdot FF}{I_{sun} \cdot A_L} = \frac{P_{célula}}{P_{sun}} \quad \text{Ec. 2.6}$$

Dónde se añaden los parámetros de irradiación solar  $I_{sun}$  [ $W/m^2$ ] y el área de la célula  $A_L$  [ $m^2$ ] donde es radiada. Con el producto de estos dos parámetros se obtiene la potencia lumínica proporcionada por el sol  $P_{sun}$ , lo que permite a la vez relacionarla con la potencia obtenida por la célula  $P_{célula}$  y obtener el rendimiento de captación de energía de la célula solar.

En la fórmula de eficiencia es evidente que el parámetro Fill Factor tiene una importancia sustancial junto con la tensión en circuito abierto y corriente en cortocircuito que caracterizan habitualmente los parámetros de las células solares en corriente continua. Las anteriores ecuaciones ilustran la eficiencia en el funcionamiento de la célula en continua pero no indica el nivel de exactitud conseguida con su fabricación.

Hay varios motivos por los que una célula pierde eficiencia respecto a su rendimiento ideal. Una de ellas es por la propia reflexión de luz en su superficie o porque el espectro de luz recibida no es la más óptimo para el semiconductor utilizado en su construcción. También el material con el que está fabricada afecta al rendimiento y con ello al Fill Factor. El espectro de la luz que ilumina la célula solar tiene un efecto sustancial en cuanto al rendimiento cuántico pues incrementa o disminuye la cantidad de recombinaciones que se producen en su interior (electrón-hueco) y con ello la corriente neta generada en la célula solar.

Según el material utilizado se puede llegar a un límite de rendimiento de captura de iluminación y con ello de energía. En la Fig. 2.5 se muestra un gráfico que relaciona la eficiencia de diferentes materiales utilizados en la fabricación de células respecto su

energía de banda prohibida (Bandgap). El gráfico se ha editado sobre el de referencia para indicar la progresión en la eficiencia de algunos de los principales materiales utilizados en la construcción de células solares. Se puede ver que los materiales más desarrollados son el arseniuro de galio y fosforo de indio a la par que el silicio tanto en su forma cristalina como monocristalina. La línea superior sobre los diferentes puntos de eficiencia de los materiales representa el límite de eficiencia alcanzable con un AM1.5 Global de espectro solar.

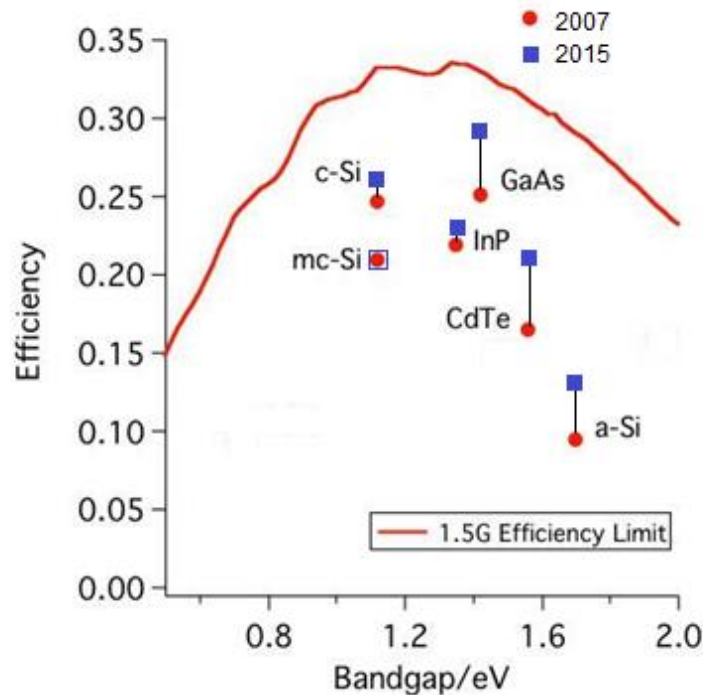


Fig. 2.5: Eficiencia según la banda prohibida para diferentes materiales [5, 6].

En la Fig. 2.5 también se puede observar que el silicio multicristalino no ha evolucionado mucho en cuanto a eficiencia en los últimos años (se mantiene). Al contrario, la eficiencia del silicio cristalino y el amorfo utilizados en fabricación de células solares han sufrido un incremento considerable.

El rendimiento del funcionamiento de las células solares se puede ver afectado también por la recombinación de electrones-huecos por diferentes causas. Entre estas causas está la recombinación Shockley-Read-Hall debida a las imperfecciones del propio material de fabricación, generando diferentes niveles de bandas prohibidas en el interior. En el caso del silicio tiene una importancia considerable ya que además es un semiconductor de gap indirecto, que agrava este efecto. Una forma de paliarlo es crear estructuras lo más cristalinas posibles (c-Si; silicio cristalino) evitando imperfecciones en el interior de la oblea.

Otra recombinación que afecta al rendimiento es la recombinación superficial en la superficie de la oblea donde podemos encontrar una capa de protección de óxido o una capa metálica para realizar los contactos metálicos y conducir la electricidad generada. Para evitar este efecto se suele utilizar la técnica BSF (Back Surface Field) creando pasivación superficial que crea un campo que mitiga este efecto (explicado en punto 2.4).



## 2.3-Evolución y desarrollo de las células solares

Las células solares han estado desarrollándose constantemente desde su creación. Es sin embargo en los últimos años en que han experimentado un crecimiento más abrupto. Ya hace algunos años e incluso décadas se lograron fabricar células con una eficiencia de más de un 20% en laboratorios y a pequeña escala de fabricación, hoy en día se pueden encontrar comercialmente paneles solares con células agrupadas que rinden el 20% o más. La previsión es que con las nuevas tecnologías se pueda aumentar más la eficiencia de las mismas. En la Fig. 2.6 se muestra la evolución de fabricación de las células solares en la primera década del siglo. La evolución se aprecia casi exponencial en China con mayor capacidad de producción en serie. No obstante en el resto de fabricantes del mundo se distingue una clara tendencia en aumento, aunque menos pronunciada, de potencia producida por células solares.

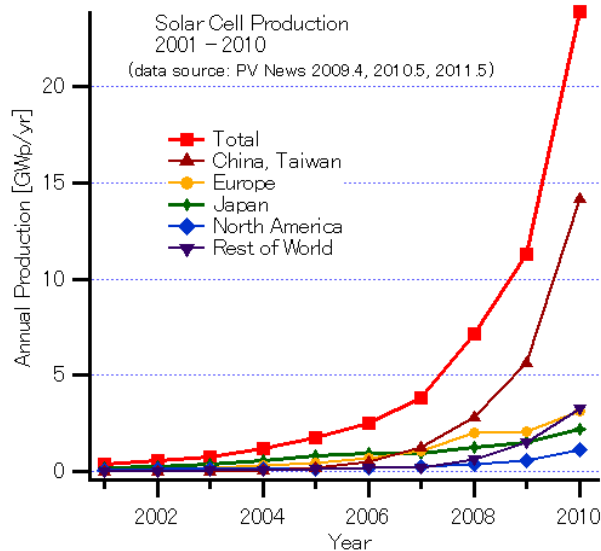
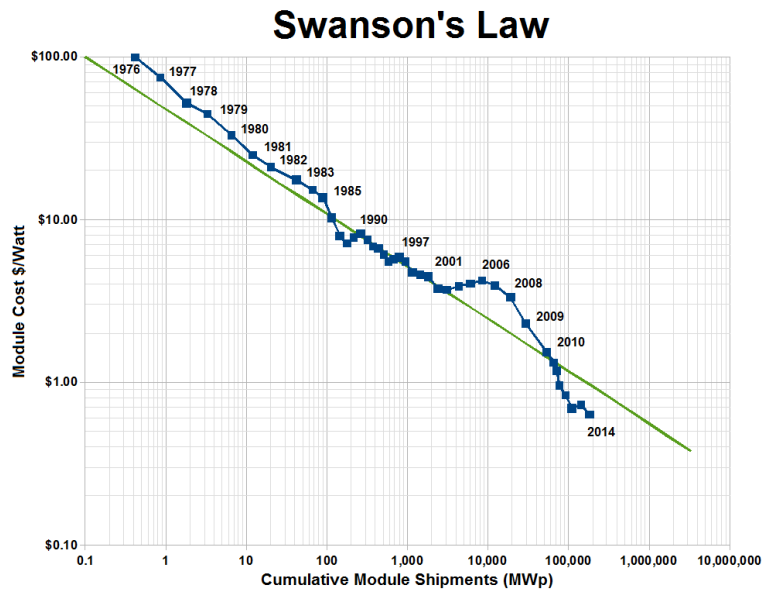


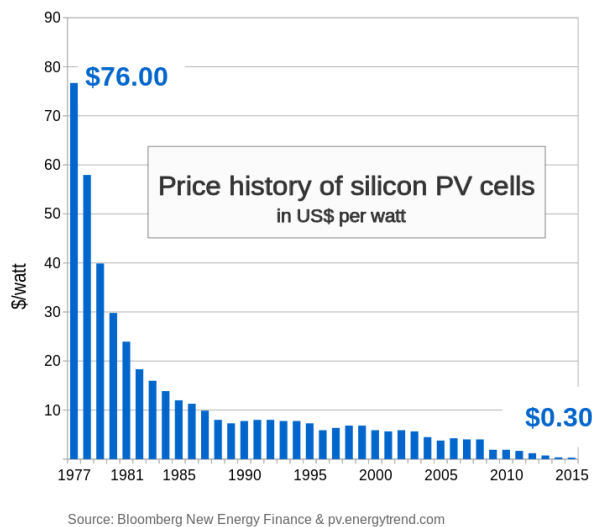
Fig. 2.6: Producción de células solares mundial de la década anterior [7].

Este desarrollo tiene mucho que ver la reducción de los costes de producción y la mejora de la tecnología de la propia célula solar fabricada como de la maquinaria capaz de fabricarlas. Respecto al coste la tendencia a la baja se puede observar en la Fig. 2.7 que muestra gráficamente la Ley de Swanson relacionando el coste de módulos solares respecto módulos fabricados y cómo ésta relación se ha ido reduciendo con el paso de los años.



**Fig. 2.7: Evolución del coste de células según Ley de Swanson en las últimas cuatro décadas [7, 5].**

Otra manera de apreciar la reducción del coste de las células solares es mirando la Fig. 2.8 que contiene un histórico de precio en dólares por watt de potencia pico (US\$/Watt) de la célula solar. En este gráfico se puede observar que en los primeros años el coste se fue abaratando de forma significativa respecto a los anteriores pero que a partir de entonces no se ha ido abaratando con tanta velocidad pero si con una tendencia clara.



**Fig. 2.8: Coste por vatio de la producción de células solares [7].**

En el futuro cabe esperar que se siga disminuyendo el coste hasta llegar a un coste cercano al propio coste del transporte y refinado del propio silicio para la fabricación de células solares. También con los estudios en diferentes materiales y tecnologías que se están realizando hoy día cabe esperar que el coste se abarate con el tiempo respecto la potencia pico producida.

## 2.4-Tecnologías de fabricación

La fabricación de células solares ha evolucionado considerablemente en las últimas cuatro décadas. Se han realizado pruebas con diferentes materiales aparte de con el silicio para buscar la máxima eficiencia. A pesar de las pruebas realizadas se sigue probando hoy día con diferentes combinaciones de materiales semiconductores para lograr una base para la fabricación de células solares lo más óptima posible. Una de las consideraciones es la cantidad de ese material que se puede encontrar en la naturaleza y su procesamiento y purificación para poder llegar a usarlo. Es precisamente uno de los puntos fuertes del silicio, sin ser el material más eficiente para realizar la conversión de energía luz-electricidad es un material que se encuentra en cantidad suficiente en la naturaleza y se ha mejorado su procesamiento considerablemente ya que se utiliza en la electrónica de gran consumo.

El otro factor que afecta al desarrollo de las células solares aparte del material o materiales de las que están compuestas es la tecnología utilizada en su fabricación y la forma o estructura con la que se ha fabricado. Este punto es vital tanto para el acabado y posterior rendimiento como para la mejora de su funcionamiento.

El gráfico de la Fig. 2.9 muestra una gráfica con las tecnologías existentes de diferentes estudios y células ya comercializadas de los últimos 40 años. En el mismo se puede observar la tendencia a mejorar la eficiencia de las células solares independientemente del material o estructura utilizada en su fabricación. Algunas tecnologías se han dejado de utilizar y otras en cambio han aparecido hace unos años y están evolucionando considerablemente en poco tiempo.

La tecnología de fabricación de células solares que más ha evolucionado hacia rendimientos más altos según Fig. 2.9 es la de células multiunión con hasta cuatro uniones de capas de semiconductor. Este conjunto de semiconductores permite obtener eficiencias del 44% hace unos meses habiendo empezado su desarrollo con eficiencias del 32% a principios de siglo. Las células de silicio HIT consiguen un 25% actualmente cuando también a principios de siglo se situaban alrededor del 20%. Para otras células como las fabricadas a partir de sustrato orgánico actualmente con un rendimiento más bajo que el resto, también han sufrido una evolución de valores del 4% al 11% de rendimiento que se ha llegado a conseguir hace tres años. Es evidente que la fabricación de células solares es un campo de desarrollo vivo con nuevas mejoras cada pocos meses.

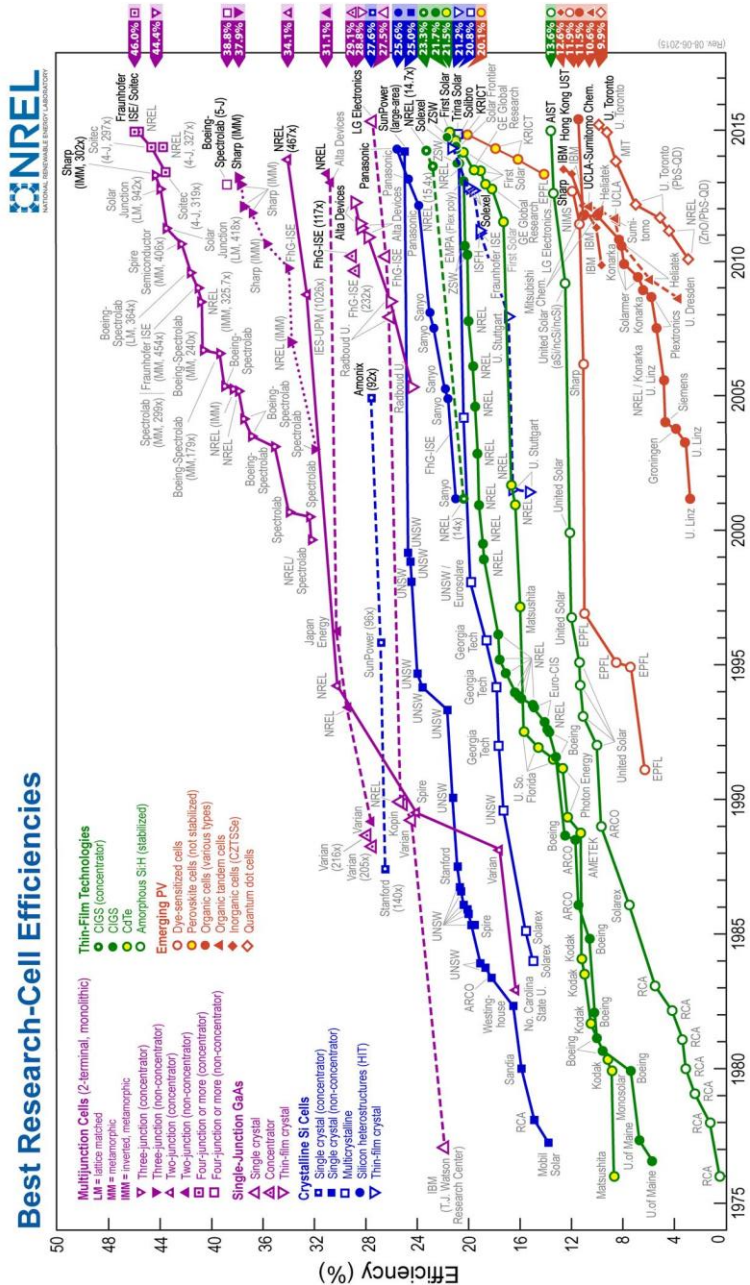


Fig. 2.9: Desarrollo de diferentes tecnologías de células solares [7].

La estructura de las células solares juega un factor importante. Los acabados de la capa superficial que capta la luz debe ser capaz de dejar pasar la máxima cantidad de luz sin reflejar nada hacia afuera de la célula solar, porque de ser así se considerarían como pérdidas que reducen la eficiencia de la célula.

Otro punto importante es la realización de las vías de recogida de energía de la célula solar. Se realiza habitualmente con fingers sobre la superficie que recibe luz y contactos reflejantes en la base para reflejar de nuevo hacia el interior de la oblea la luz que no se ha recombinado, manteniéndose en el interior por el propio efecto antirreflejante de la capa superficial de la parte frontal que recibe la luz. La idea es que la luz quede atrapada en el interior hasta que se recombine y pase de ser un conjunto de fotones a una corriente de

electrones que es el objetivo de la célula.

El hecho de que los fingers estén en la capa frontal crea sombras que disminuye la eficiencia al reducirse ligeramente la superficie de captación de luz. Sin embargo hay métodos de fabricación que evitan este hándicap.

El corte de la oblea deja la superficie rugosa y requiere un pulido habitualmente químico para lograr una superficie lo más lisa posible. Para lograr mejorar este efecto se suele texturizar la superficie mediante un acabado con forma piramidal que optimiza la captura de luz hacia el interior de la célula impidiendo que ésta salga. Se muestra un ejemplo de este acabado en la Fig. 2.10.

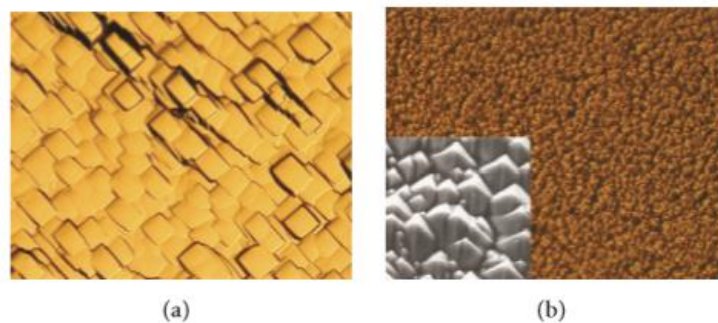


FIGURE 5: (a) Surface topography after alkaline damage etch and (b) random pyramid texturing. Both photos are taken by an optical microscope. The inset in (b) is a scanning microscope picture to show the pyramid geometry more clearly.

**Fig. 2.10: Imágenes de microscopio de acabados superficiales [5].**

El acabado superficial en el otro lado de la célula, en la base, debe ser reflejante hacia el interior de la célula evitando que la luz se escape atravesando la célula por completo (aunque depende del uso o tecnología utilizada). Este acabado es realmente un contacto metálico con el semiconductor de la base de la célula pero a la vez crea una transición entre los materiales que genera un campo eléctrico que reduce la recombinación superficial.

Este problema se ha resuelto aplicando lo que se conoce como campo superficial trasero o Back Surface Field (BSF). Este campo compensa la recombinación de portadores en la superficie de la parte posterior de la célula gracias a la creación de una capa aislante entre el semiconductor y el metal usado en la base para la conducción de electricidad generada. Por su forma de sándwich del inglés se le da el nombre de MIS, Metal Insulator Semiconductor, quedando definido como un método de fabricación de bases de células solares.

Para realizar los contactos que necesariamente atravesarán la capa de aislante ( $\text{SiO}_2$  generalmente) se suelen utilizar técnicas de fotolitografía y más recientemente en los últimos años el disparo por láser de los propios puntos de contacto fundiendo el metal exterior (Aluminio entre otras posibilidades) y el semiconductor. Las células solares creadas por contactos en la base entre semiconductor y metal reciben el nombre de PC (Point Contacted). Si además se les añade el método de acabado superficial en la base con el efecto BSF tienen el nombre de PC + MIS.



Para conseguir células solares de alta eficiencia se realiza el pasivado de las superficies mejorando el acabado superficial de la misma y con ello el rendimiento. El pasivado consiste habitualmente en aplicar una capa de aislante muy fina ( $\text{SiO}_2$ ) aunque existen más tipos de pasivado en estudio y uso en la actualidad como son utilizando capas de Nitruro o de Carburo de Silicio.

Habitualmente se suele aplicar el proceso de pasivado mediante el método Passivated Emitter Rear Locally Contacted (PERC), que realiza el pasivado de la superficie frontal y también la parte posterior. Una vez pasivada la superficie mediante fotolitografía se dibujan los fingers en la capa superficial frontal del emisor para aplicar posteriormente el metal conductor (con aleaciones de Titanio, Paladio, Plata,...). En la parte posterior se aplica una capa de metal, habitualmente aluminio, que se contacta con el semiconductor mediante puntos creados por fotolitografía o más recientemente mediante pulsos de láser. La unión por pulsos de láser se realiza contactando el semiconductor y el metal directamente tras desintegrar el aislante de la zona donde se aplica el pulso dejando el espacio para la unión.

Otra de las tecnologías utilizadas para la fabricación de células solares es la impresión sobre la oblea ya procesada de los contactos mediante pasta conductora con alto contenido en plata. Este método de fabricación aunque efectivo y comercializado desde hace décadas no resulta óptimo para evitar sombras y no menguar el rendimiento.

Las soluciones adaptadas en los últimos años para evitar el efecto de sombra en la parte frontal es la creación de células solares que tienen las ramificaciones recolectoras de electricidad parcialmente enterradas en el mismo emisor o parte frontal. El proceso de fabricación empieza con el corte de la oblea y realización del dopado del emisor. Después se crean unos surcos donde irán las ramificaciones con un láser Nd-YAG y por pulsos. Se vuelve a dopar la superficie rebajada para mejorar el contacto con el semiconductor tras la operación con el láser. Se procede con el rellenado de metal conductor, en este caso níquel, del hueco creado y se le da un acabado con cobre para mejorar la conductividad eléctrica (mejor conductor) y plata finalmente por su buena conductividad eléctrica que además realiza la función de proteger el cobre contra la oxidación. Se muestra un ejemplo de la estructura de este tipo de célula en la Fig. 2.11.

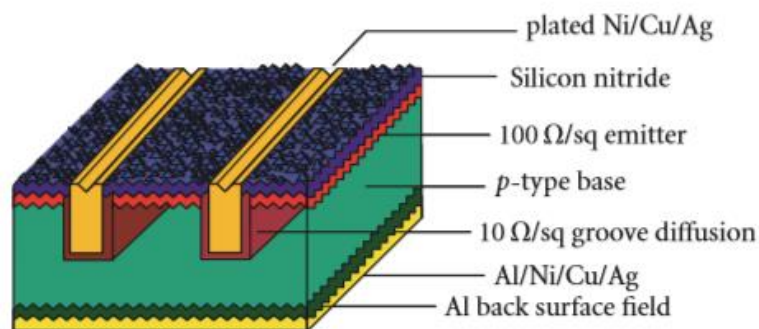


Fig. 2.11: Estructura de célula con contactos enterrados [8].

Existen más estructuras de fabricación de células solares de las que se muestran unos ejemplos a continuación.

La célula con Back Surface Field dopada con boro se puede considerar una célula típica con una malla de recogida de electricidad en la parte frontal y un BSF fabricado a partir de dopado con boro que mejora la transición entre el semiconductor de tipo p y los contactos de la base [8] [9]. Se muestra un ejemplo de la estructura en la Fig. 2.12.

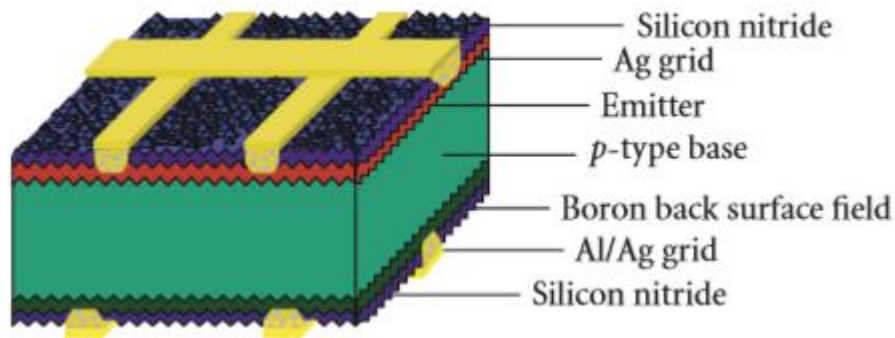


Fig. 2.12: Célula solar con BSF de boro [8].

Otra de las estructuras más utilizadas en los últimos años es la heterounión de varios tipos de semiconductores. Partiendo de un sustrato tipo p se le añade en las dos superficies una pequeña capa de semiconductor en base de silicio de tipo intrínseco (sin dopado). Acto seguido se le aplica el dopado de tipo p a la base sobre el semiconductor intrínseco de la base. Se procede de forma similar en el emisor aplicando el dopado de tipo  $n^+$ . Por último se realizan los contactos mediante TCO (Transparent Conductive Oxide) en ambas caras. El hecho de haber añadido el semiconductor intrínseco a modo de sándwich en ambas caras crea un BSF en la base y de forma análoga crea otro en el emisor reduciendo la recombinación superficial en ambas superficies [5] [8] [9]. Se muestra la estructura en la Fig. 2.13. Este tipo de células tienen la ventaja de poderse iluminar por ambas caras lo que abre una ventana considerable de aplicaciones.

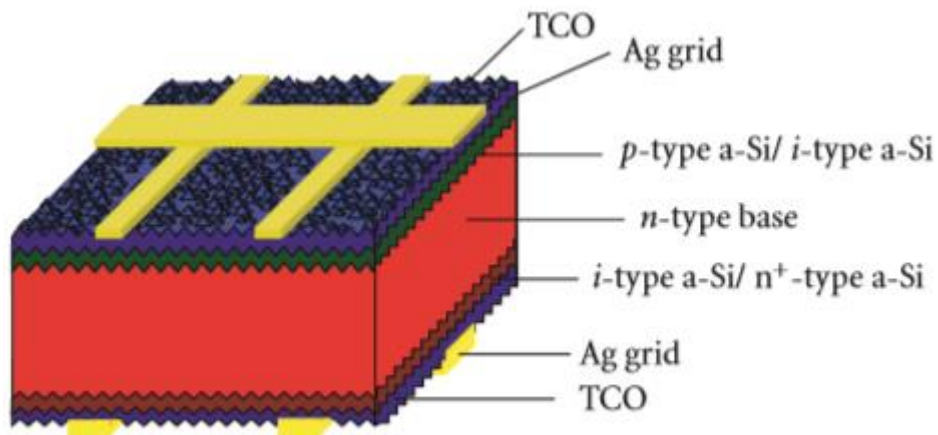
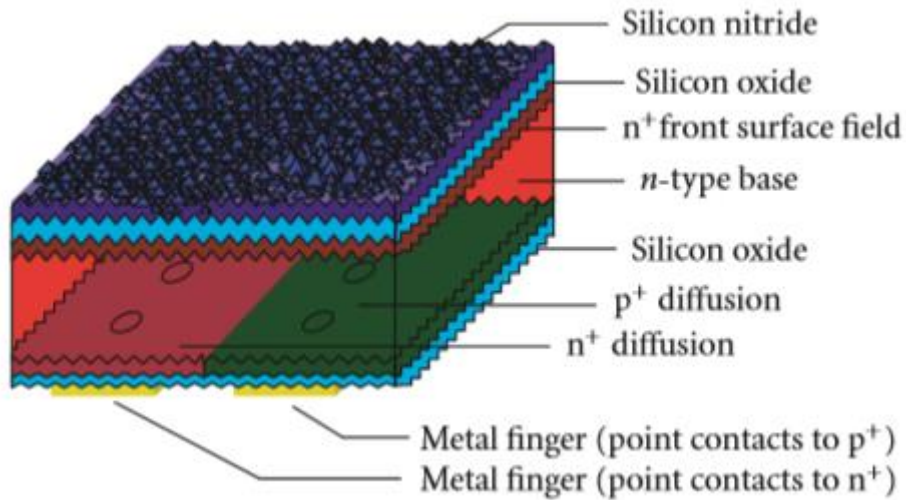


Fig. 2.13: Célula solar de heterounión con capa interior intrínseca [8].

Hay una estructura creada a partir de la premisa de evitar el viaje de la corriente fotogenerada a través de la resistencia del propio sustrato. Esta estructura se basa en la idea de tener los contactos de base y emisor en la parte posterior de la célula solar dejando despejada la parte frontal y con ello evitando las sombras que se crean por los colectores del emisor. Se fabrica entrelazando el dopado sobre el sustrato de difusión de tipo  $p^+$  para

la base y de tipo  $n^+$  para el emisor, todos ellos en la parte posterior de la célula. En la Fig. 2.14 se muestra un esquema de este tipo de célula. Este método de fabricación [5] [8] [9] conlleva otra ventaja interesante como es el hecho de que ambos contactos estén en el mismo lado de la célula facilitando así la interconexión entre células para crear módulos más grandes de forma más sencilla sin tener que conectar parte frontal con parte posterior.



**Fig. 2.14: Célula solar interdigitada en parte posterior [8].**

Existe también una variante de células solares similares a las interdigitadas en cuanto a que los contactos se encuentran en la parte posterior pero los dopados se realizan en ambas caras de la oblea y se realizan los contactos eléctricos entre las dos caras con perforaciones en la oblea y metalizado del agujero.

En la línea de nuevos desarrollos para las células solares se confirma una tendencia a la fabricación de células solares cada vez más finas, "Thin-film", que permiten un mejor rendimiento al tener menores pérdidas para atrapar la luz. Por su finura evita que se refleje la luz en su interior perdiendo intensidad y además al tener menor grosor la resistencia del propio sustrato es menor al paso de corriente fotogenerada.



## 2.5-Espectroscopia de impedancias

La medición de impedancia realizando un barrido en frecuencia mediante Espectroscopia de Impedancias se lleva aplicando desde hace tiempo en diferentes campos como en sistemas químicos, materiales electrónicos y dispositivos en áreas como la biomedicina o aplicaciones espaciales [10, 11, 12, 13], reportando buenos resultados. Al realizar este tipo de medición se consigue la respuesta del dispositivo bajo estudio a diferentes frecuencias. Al analizar los datos obtenidos de la medición asociándolo a un modelo teórico que defina el comportamiento del dispositivo se puede validar el modelo teórico inicial respaldado con los resultados.

En el campo fotovoltaico, se han realizado estudios en células solares orgánicas y de Graetzel [14, 15], pero hasta el momento hay pocos estudios publicados para células solares de silicio con alto rendimiento [16, 17]. En la literatura se ha comprobado que esta técnica permite obtener parámetros importantes relacionados con la estructura física de las células como son las resistencias serie y paralelo, el tiempo de vida efectivo o el factor de idealidad [18, 19, 20].

Esta técnica consiste en realizar la medida inyectando una señal alterna de corriente de amplitud pequeña (menor que  $V_T$ ) al dispositivo midiendo la respuesta en tensión. Para ello se suelen utilizar 4 conexiones, 2 para la inyección de corriente y 2 más para la medida en tensión. También se puede realizar la medición de impedancia a 2 puntas inyectando corriente y midiendo la tensión que genera ésta. En el caso de medición a 2 puntas se calcula la impedancia a partir del cociente entre la tensión medida por la corriente inyectada, pero no es tan precisa como la medición a 4 puntas, ya que introduce en la medida la resistencia de contacto entre las puntas y el dispositivo. Con la medición a 4 puntas se evita considerablemente la inclusión de las resistencias de contacto con la célula solar en la medida.

Para entender el resultado de la medición es necesario tener un modelo teórico del dispositivo a medir que permita analizarlo. En el caso del presente trabajo en el que se realiza la medición de células solares se requiere de un modelo eléctrico o modelo circuital que lo represente. En la Fig. 2.15 se puede ver dicho modelo teórico inicial incluyendo varios efectos que afectan a la medición.

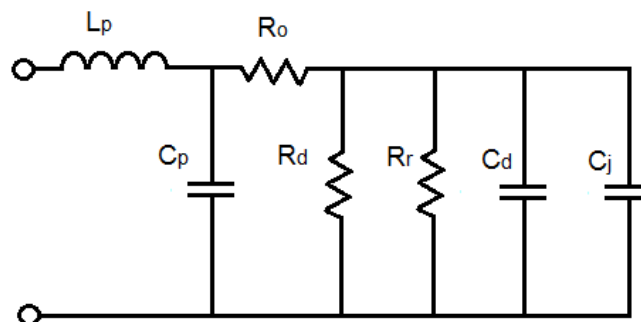


Fig. 2.15: Modelo eléctrico de célula solar.

Donde  $L_p$  y  $C_p$  son inductancias y capacidades parásitas que se encuentran en la célula solar y en las conexiones y cables de la medición. Si se consigue realizar la medida evitando interferencias y otros efectos no deseados se pueden omitir del modelo teórico.

La resistencia  $R_0$  hace referencia a las pérdidas debidas a las conexiones, colectores de corriente en el emisor (fingers), bus de conjunto de colectores de corriente y zonas de semiconductor que forma la célula solar donde los portadores mayoritarios introduzcan cierta resistencia extra al flujo de corriente.

La resistencia en reversa/inversa  $R_r$  hace referencia a la resistencia que tiene la célula solar si se polariza o conecta en inversa para tensiones negativas. La otra resistencia  $R_d$  representa la resistencia dinámica en directa de la célula solar para tensiones positivas mayores que la tensión umbral del diodo.

La capacidad de difusión  $C_d$  se genera por la recombinación de portadores minoritarios en las zonas neutrales de la unión p-n<sup>+</sup> del diodo que conforma la célula solar. La capacidad de la unión  $C_j$  se crea por la variación de la densidad de portadores mayoritarios dentro de la zona de carga espacial de la propia unión.

Los parámetros referentes a efectos parásitos como la inductancia parásita y la capacidad parásita se omiten ya que las mediciones se realizan mediante placas de circuito impreso y además realizando una compensación con la máquina de medida. El resto de elementos se pueden unificar en un solo elemento que los agrupe simplificando el modelo teórico bastante.

### **2.5.1- Modelo 1. Modelo básico R-C**

El primer modelo utilizado para estudiar células solares mediante espectroscopia de impedancias en polarización en directa es el formado por una resistencia y un condensador en paralelo. La resistencia  $R_1$  representa la resistencia dinámica del diodo con el que se modeliza la célula solar en conducción de la misma forma que para un diodo rectificador cuando conduce corriente. Respecto de la Fig. 2.15 sería la  $R_d$  en paralelo con  $R_r$ , que al tener un valor alto (resistencia de un diodo en inversa es alta) quedaría aproximadamente el mismo valor de  $R_d$  mucho menor que el de  $R_r$ . El condensador  $C_1$  se corresponde con la capacidad inherente a la recombinación de portadores mayoritarios de cargas del semiconductor que forma la propia célula solar como sucede en un diodo rectificador (Zona de Carga Espacial). Esto es según la Fig 2.15  $C_j$  que está en paralelo con  $C_d$  que siendo de menor efecto que  $C_j$  se puede omitir, al menos en un modelo básico.

Para tener en cuenta las pérdidas óhmicas de los colectores de fingers, contactos y el flujo de portadores mayoritarios dentro de la capa del emisor n<sup>+</sup> se incluye en el modelo la resistencia  $R_0$  para representar dicho valor. El modelo básico explicado se muestra en la Fig 2.16.

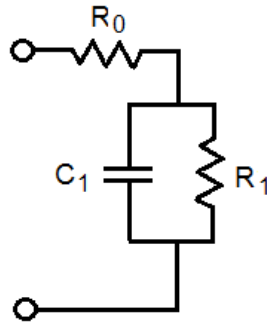


Fig. 2.16: Modelo circuital de célula solar básico.

Aunque las resistencias de contacto no tienen un gran impacto en las mediciones se deben tener en cuenta, sobretodo su afectación en las medidas a alta frecuencia con valores resistivos más pequeños. Aparte de su posible comportamiento en alterna, en régimen de trabajo en continua (con calentamiento y efecto Joule) también pueden contribuir en la medición. En esta resistencia también se incluye el contacto no ideal (por la superficie y fuerza aplicada) con las puntas de prueba utilizadas en las mediciones, ya que en cierto grado la cantidad de fuerza aplicada sobre la punta de prueba y su terminación puede hacer variar ligeramente la resistencia de contacto.

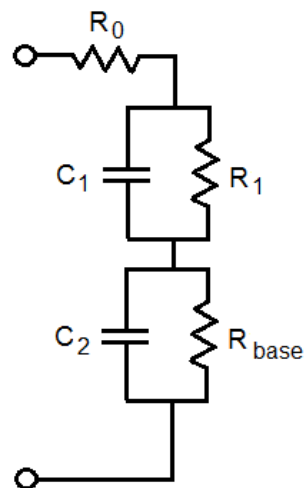
En una representación por gráfico de Nyquist en el que se enfrenten las medidas de impedancia imaginaria respecto la impedancia real medidas este modelo representa un único lóbulo en todo el espectro de medición.

### 2.5.2- Modelo 2. Célula solar con base contactada a través de MIS

El segundo modelo circuital parte de la base del primero con la consideración adicional de que se ha incluido una capa de aislante por dióxido de silicio en la base para crear un campo superficial que compense la transición semiconductor-metal (MIS). Este proceso se realiza aplicando una capa de dióxido de silicio sobre el semiconductor y después aplicando una capa metálica (aluminio entre otros) muy fina que realizará a su vez de la función de contacto y colector en la base. Para realizar la contactación con el semiconductor de la base a través de la capa de aislante, entre otras técnicas se puede utilizar el disparo de pulsos de láser (Laser Firing Contacts; LFC) [21, 22] con un determinado patrón o bien la técnica de fotolitografía [23, 24] habitual para aplicar las capas aislantes con puntos de contacto ya determinados.

Al incluir el dióxido de silicio en la base como aislante para crear un campo superficial que evite la transición directa entre semiconductor-metal se debe modelar su comportamiento con parámetros eléctricos. En este caso se incluye una resistencia  $R_{base}$  que corresponde a la resistencia de los contactos realizados en la base. En la Fig. 2.17 se incluye en el modelo eléctrico un condensador  $C_2$  en paralelo con  $R_{base}$  que modela eléctricamente el comportamiento de la recombinación de portadores minoritarios en la zona cercana a la

superficie de la base.



**Fig. 2.17: Modelo circuital de Célula solar con BSF.**

Para poder medir de forma independiente el valor de  $R_{base}$  se realizarán las mediciones con Espectroscopia de Impedancias y a partir de los resultados se obtendrá el valor de la misma.

### 3- Diseño de la placa de medida

En el desarrollo del diseño de la placa se incluyó la posibilidad de poder medir dos tipos diferentes de célula solar con las mismas conexiones pero con un tipo cada vez ya que las conexiones son compartidas. Al realizar pruebas de medición con cables conectados a la máquina aun siendo específicos de laboratorio presentaban efectos parásitos que se solapaban a la medición. La máquina de medición a pesar de realizar una calibración no podía eliminar totalmente dichos efectos parásitos del cable. Este problema se solucionó con los diseños presentados a continuación.

Para no correr el riesgo de romper la muestra de oblea al intentar cortar y separar las diferentes células solares se decidió continuar con la oblea entera. El diseño del primer PCB no estaba pensado para trabajar con la oblea entera y fue necesario pasar al segundo modelo de diseño con dos características de diseño a tener en cuenta: debía ser capaz de trabajar con la oblea entera y se debía conectar directamente a la máquina. En la Fig. 3.1 se pueden ver 3 tamaños diferentes de células solares en la oblea de muestra.

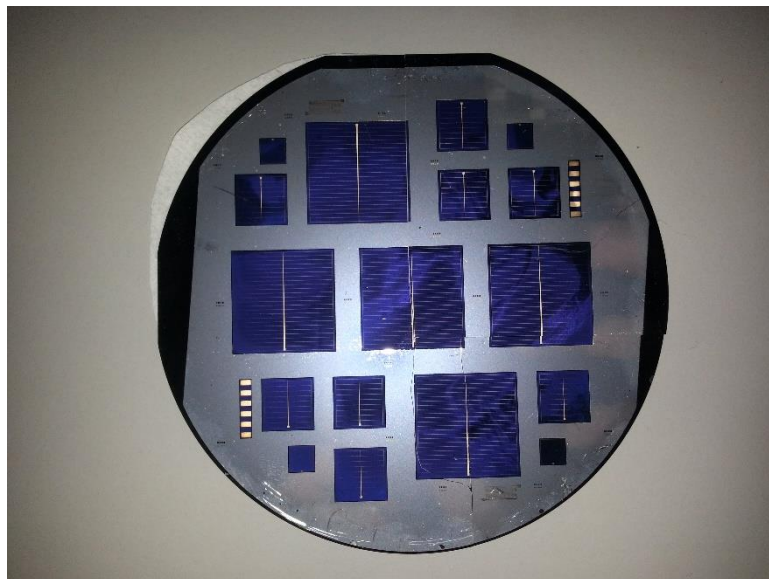


Fig. 3.1: Oblea con células a medir.

En el presente trabajo se ha realizado la medida de las de tamaño medio de 11mm. de lado. Aunque inicialmente se contempló la posibilidad de realizar más medidas con otros tamaños y tipos, dados los resultados obtenidos con la de tamaño medio se decidió centrarse en el estudio de ésta.

### 3.1-Placa de test inicial

El diseño del primer prototipo de placa de mediciones se ha realizado sobre una placa de circuito impreso P.C.B. (Printed Circuit Board) de fabricación profesional a través de una empresa especializada. El diseño inicial se ha realizado con la premisa que pueda utilizarse para medir dos tipos de células solares de diferente tamaño y tipología. Un tipo tiene contactos a los dos lados siendo bifacial sobre sustrato de tipo p y con BSF en la parte de contactación posterior. Requiere de una ventana para poder iluminar la célula además de un contacto por el mismo lado. El otro tipo es una célula interdigitada con contactos en la parte posterior a la zona de iluminación y es más grande que la anterior siendo de 40mm. de lado. En la Fig. 3.2 se muestra una foto de la placa acabada y preparada para realizar mediciones.

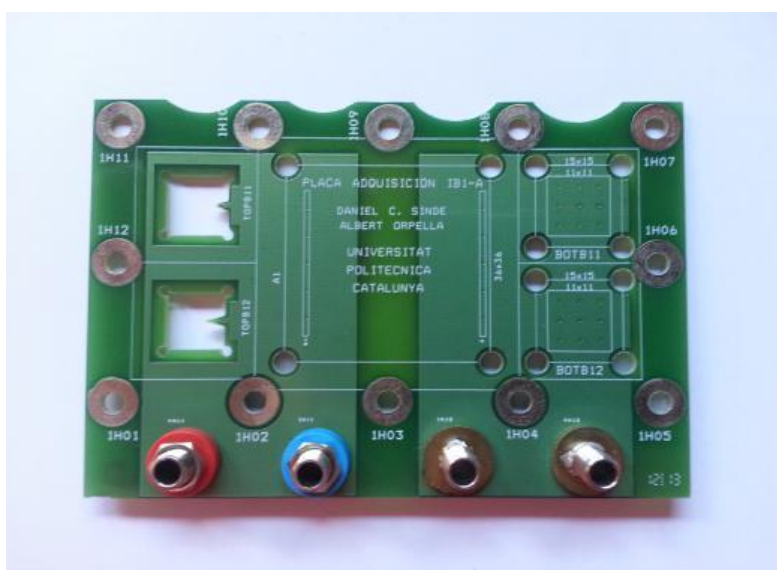


Fig. 3.2: Primer diseño de circuito impreso capaz de medir dos tipos diferentes de células.

El diseño escogido requiere de dos placas, A y B contrapuestas entre sí, con diferentes variaciones y consideraciones para poder medir las células de tamaño menor, además de proporcionar 4 posiciones de medición. Para las células solares grandes sólo es necesario una placa de test (la A o B indiferentemente) pero necesita de un útil metálico que incluye una ventana para poder hacer la prueba de iluminación de la célula solar. Tanto con el útil con ventana para la célula grande como en el caso de usar dos placas de test para célula pequeña, requieren apretar suficientemente pero no en exceso la célula. El proceso de apretado es crítico pues puede fracturar y romper la célula solar. El objetivo del apretado es que esté lo más pegada a la zona de contacto designada por diseño de la célula y la placa de test, mejorando de esta forma la resistencia de contacto al reducirla por un buen contacto por presión.

Los contactos de toda la placa se fabricaron con cobre con cobertura superficial en oro para mejorar la superficie de contacto con las células solares y mejorar la soldadura de los bornes de conexionado. Además el oro evita que se oxiden los contactos que de otra forma



dejando el cobre de la placa al descubierto se oxidarían con el tiempo haciendo un peor contacto eléctrico. En los apéndices hay más detalles sobre su construcción.

### 3.2-Placa de test directa. 2ª versión

Tras realizar las primeras mediciones con las placas fabricadas por empresa se constató que los cables introducían elementos parásitos no deseados, que alteraba en exceso las mediciones obtenidas y se requerían mejoras para realizar correctamente las mediciones. Para ello se diseñó una nueva placa que se pudiera conectar directamente a la máquina de mediciones Agilent 4294A para evitar el uso de cables. Además dicha placa debía autosustentarse a sí misma y la oblea con las células solares a medir sin partirse o deteriorarse.

En la nueva placa de mediciones sólo se puede medir el tipo de células solares bifaciales con los contactos en la parte frontal y la parte posterior. El diseño final fue realizarla con dos placas diferentes: la base que se conectaba a la máquina y la tapa que tiene ventana para iluminación y alambre de cobre para el contacto en el colector de la zona iluminada. Este alambre de cobre fue el causante de deteriorar alguna célula con lo que se decidió realizar una tercera versión con contacto en oro y con muelle de presión. En estas dos placas se tuvo en cuenta los planos de masa de los BNC que se repartieron por ambas placas a modo de apantallamiento excepto en las zonas donde habían pistas de los contactos (4 contactos al ser de 4 puntas de medición). En la Fig. 3.3 se muestra foto del prototipo.



Fig. 3.3: Placa prototipo de conexión directa a máquina de medición.

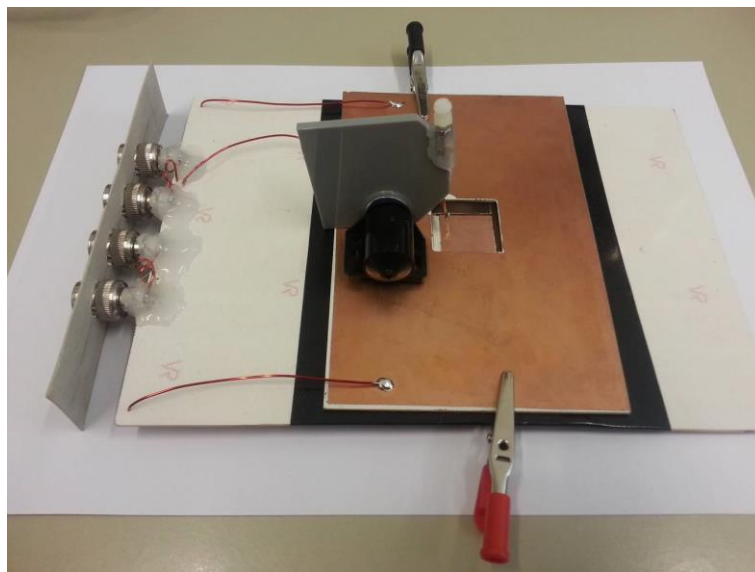
Para proteger la oblea y a la vez aislarla de la superficie de la placa se colocó cinta aislante ancha. Además la cinta aislante acometía la función de relleno debido al grosor del contacto de cobre situado en la placa principal que contactaba con la base de la célula solar en medida. La sujeción y presión necesaria sobre la oblea para evitar que se moviera se

realizaba con pinzas de presión. Se pueden encontrar más detalles constructivos en los apéndices.

### **3.3-Placa de test directa mejorada. 3ª versión**

En este diseño la placa es más grande para dar cabida a obleas enteras sin riesgo de dejar parte por fuera de la superficie de la placa como sucedía con los dos diseños anteriores. También se ha utilizado un contacto de oro con punta retráctil para evitar ejercer demasiada presión sobre el silicio y que éste se parta. Para sujetar correctamente la punta de prueba con muelle incluido, se diseñó y construyó un soporte regulable para sujetarse a la placa y así facilitar la colocación de la punta de prueba sobre la célula solar. Dado que ajustar el punto de contacto de la punta de prueba es muy complicado se consideró la posibilidad de que se pudiera mover lateralmente y de atrás adelante sobre la placa.

Para ejercer mayor o menor presión (afectando con ello ligeramente a la resistencia de contacto) se puede ajustar la presión sobre la punta de prueba sin llegar a deteriorar o partir la célula solar. Para ello se diseñó y montó un sistema con tornillo para regular la fuerza de apriete sobre la célula ejercida por la punta retráctil. En la Fig. 3.4 se muestra una foto de la placa fabricada junto con el soporte de la punta de prueba.



**Fig. 3.4: Placa de conexión directa a máquina de medición mejorada para sujetar oblea completa y con punta retráctil que ejerce menor fuerza sobre oblea.**

Esta placa es la que ofrece mejores resultados de medición para células solares sin tenerlas que separar de la oblea de fabricación. En el apéndice hay más detalles sobre su fabricación.



### 3.4-Montaje de periféricos, cables y otros útiles requeridos.

En la idea original de realización de mediciones se decidió usar cables entre la máquina de mediciones (Agilent 4294A) y las placas de test que contactaban con la oblea de silicio.

Se iniciaron las mediciones con cables tipo banana del propio laboratorio de test. No obstante se observó que a alta frecuencia introducían un comportamiento no deseado además de no filtrar bien las interferencias ambientales que había en el laboratorio como los propios fluorescentes de iluminación. Para subsanar el problema se optó por la fabricación de cables 100% apantallados (de tipo video digital). Esta solución proporcionó un apantallamiento casi total a interferencias inducidas y de tipo electromagnético de tipo ruido en tensión. Por el contrario introdujo un inconveniente que hubo que tener en cuenta en las mediciones. Cada cable, de unos 2 metros de largo para facilitar la manipulación y ajuste de las células solares, introducía una capacidad parásita considerable debida al propio apantallamiento.

Aunque la máquina de medición lograba compensar los efectos parásitos introducidos por los cables en el proceso de calibración, seguían tomando relevancia los efectos parásitos en las altas frecuencias. A pesar de este hecho se logró pasar de un ancho de banda de unos 5 MHz con el cable banana del laboratorio a un ancho de banda útil de casi 10 MHz con el nuevo tipo de cable, logrando medir con menos efectos parásitos a partir de esta frecuencia que con el cable de laboratorio.

El objetivo de la medición era alcanzar los 15MHz con lo que aún faltaba más espectro a medir y fue uno de los motivos de pasar a los diseños de placa a conexión directa a la máquina de medición a través de las conexiones BNC. En la Fig. 3.5 se muestran dos fotos con las dos terminaciones del cable de tipo video utilizado en las mediciones.



Fig. 3.5: Fotos de las terminaciones del cable de conexión máquina-placa de pruebas.

El cable apantallado tiene en un extremo una conexión BNC como las de la máquina de medida y en el otro extremo un borne soldado directamente al cable. Se optó por la utilización de un borne soldado por ser más fiable y manejable que no la conexión de tipo

banana que además dificultaban la manipulación de las placas con la oblea colocada.

El borne soldado del cable de tipo hembra se conecta a la placa (primer prototipo) encajándola en el bornero de tipo banana. Posteriormente se aprieta con una tuerca sobre la arandela de latón soldada a la placa y bornero (ver bornes de la derecha de la Fig. 3.2). Esta conexión era más fiable que la conexión de los cables del laboratorio y con mejor contacto eléctrico al estar apretado el borne con tuercas a presión.

Los 4 cables fabricados (al ser medición a 4 puntas) se conectaban de la misma forma que los cables de laboratorio requiriendo conectar los cuatro apantallamientos de los cables entre sí como única masa. Esto permitía llevar el apantallamiento casi hasta la propia placa. En las siguientes versiones se tuvo más en cuenta este hecho con la conexión a la masa del conector de tipo BNC las masas creadas en las placas (segunda y tercera versión).

Respecto a las resistencias de contacto cuanto menos resistencia haya mejor, pues menor desviación habrá en las mediciones debido a las conexiones de los diferentes bornes. Por ello se aseguró que el contacto fuera óptimo.

En los apéndices se pueden encontrar más detalles de la fabricación de las placas, cables y útiles utilizados para las mediciones y pruebas.

## 4- Medición de células solares

Para las mediciones realizadas en el proyecto se han utilizado células solares fabricadas sobre oblea de sustrato de tipo P (c-Si p-type) en el que se dopa el emisor con n+ en un lado de la célula. La célula bifacial en estudio tiene 11mm. de lado con forma cuadrada. Las superficies tanto frontal donde está el emisor como posterior donde están los contactos de base están pasivadas con óxido térmico. El contacto frontal para el emisor con los fingers y el busbar está formado por Titanio/Plata/Aluminio, mientras que la superficie posterior está cubierta con Aluminio donde se ha realizado un proceso de contactación por láser, para crear los contactos locales separados una cierta distancia (pitch) [25]. Se pueden hallar más detalles constructivos en la referencia [26]. Es el comportamiento de la célula solar el que se estudiará con mediciones y modelos teóricos en los siguientes puntos permitiendo obtener los parámetros de mérito de la célula.

El comportamiento de una célula solar una vez fabricada antes incluso de que se ponga en uso comercial, se puede determinar empíricamente a través de sus parámetros tras la fabricación utilizando la espectroscopia de impedancias y su comparación con un modelo teórico. Para poder ver la evolución en diferentes modos de funcionamiento se debe polarizar la célula solar con tensiones en continua. Esta polarizaciones permiten evaluar el comportamiento de la célula en modo de oscuridad y simulando la iluminación de la misma aplicando la misma polarización que se obtendría a 1 sun.

Normalmente en la fabricación de las células solares se usa la fotolitografía para delimitar los diferentes materiales (conductores, semiconductores o aislantes) y crear así el dispositivo en cuestión [23, 24]. En este caso se ha probado a fabricar con tecnologías más modernas ya probadas y en desarrollo actualmente.

Para lograr mejorar el acabado superficial de la célula se han aplicado varias tecnologías en su fabricación fortaleciendo 3 puntos de la misma (algunos ya comentados en capítulo 2):

- 1) Se ha utilizado un haz láser con el propósito de atravesar la capa de aislante en forma de dióxido de silicio en la cara superficial de la base y logrando que se fusione la capa de metal (aluminio) que recubre el dióxido con el propio semiconductor de silicio [27, 28].
- 2) Para conseguir que se fusione la capa exterior de metal (aluminio en este caso) con la superficie del semiconductor (en la base) se ha utilizado, además de para retirar el dióxido de silicio que actuaba como aislante, disparos por láser conocido como técnica Laser Firing Contacts (LFC). Esta técnica se suele aplicar típicamente en sustratos de tipo P [21, 22] aunque recientemente se ha probado también en sustratos de tipo N pero con otro tipo de metal de contactación como es el antimonio en vez de aluminio [29].

- 3) La radiación láser afecta directamente la capa de dióxido de silicio eliminándolo realizando uniones de calidad entre semiconductor-metal del contacto exterior de la base. La ventaja es que requiere de una potencia reducida comparada con otros métodos. Se ha probado en sustratos de tipo P con óxido de aluminio [25] y capas de silicio cristalino dopados con boro [30]. Para sustratos de tipo N se ha probado con silicio cristalino dopado con fósforo [31, 32].

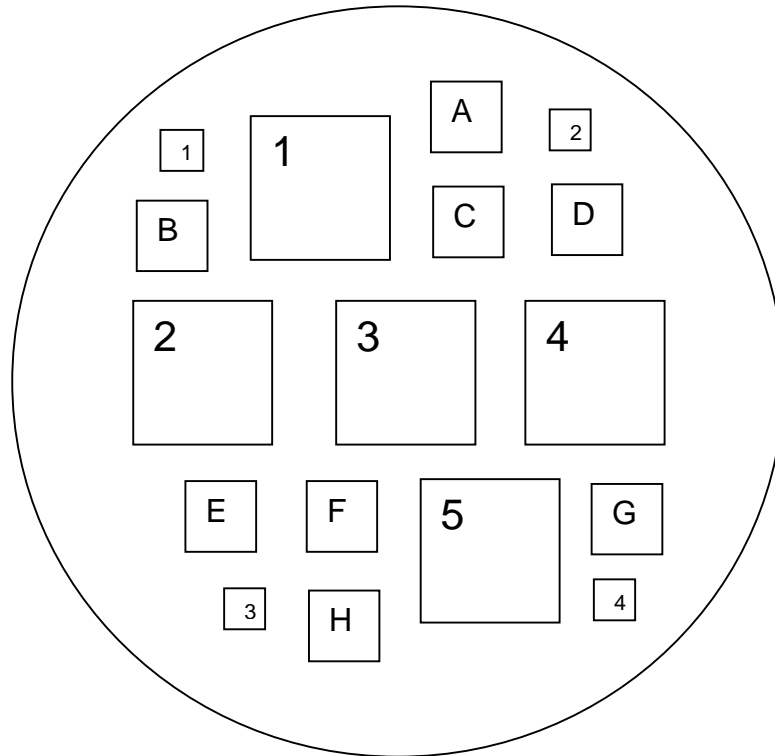
La característica de las células fabricadas con esta tecnología es la variación en el comportamiento y eficiencia que se puede obtener según la calidad con la que se realice la unión por contactación de la película metálica exterior de la base con el semiconductor a través de la capa aislante de dióxido de silicio. En este punto de contacto, la calidad del punto de unión realizado por láser según su potencia y la separación de los mismos según el patrón escogido tiene un efecto considerable.

Para la fabricación de las células solares a probar se ha escogido un patrón en cuadrícula para cada base de célula solar dando lugar a 7 opciones de pitch de las 8 células fabricadas en total con separaciones comprendidas entre 300 y 900  $\mu\text{m}$ . El valor de 600 $\mu\text{m}$  está repetido pues en un estudio previo a la fabricación resultaba ser el más óptimo según simulaciones realizadas previamente. La tabla 1 muestra la distribución de las separaciones de pitches considerando que los parámetros de disparo de láser se han mantenido (dentro de un punto de contactación de calidad) con la premisa de valorar cómo afecta la separación (pitch) entre los puntos a la resistencia de base  $R_{\text{base}}$ .

Célula	A	B	C	D	E	F	G	H
Pitch ( $\mu\text{m}$ .)	600	600	700	300	500	900	800	400

**Tabla 1: Asignación de las diferentes separaciones entre puntos de contactación en la bases de las células solares de la oblea.**

Las mediciones con las placas de circuito impreso de medida se realizaron una a una según la disposición de las diferentes células solares que se muestran en la Fig. 4.1. La oblea presenta tres tamaños de célula, pero como previamente se ha comentado se escogió la célula de tamaño medio de 11x11mm. por ser de un tamaño cercano a 1cm<sup>2</sup>, suficiente para poder medir con punta de prueba y tener más células para probar la separación de pitch en la base de la células solares.



**Fig. 4.1: Distribución de las células solares sobre la oblea de pruebas. (Tamaño real)**

Antes de la fabricación de células solares con la inclusión de campo superficial (en la base) se realizaron simulaciones 3D que aproximan al detalle el modo de fabricación con la separación óptima de los puntos de contacto a través del dióxido de silicio [33, 34]. Sin embargo se suele reducir el problema de 3D a 1D aplicando la ecuación propuesta por Fischer [35], mejorada por Plagwitz y Brendel [36] y generalizada por Saint-Cast y otros [37]. Es a partir de estas mejoras y simplificaciones que se puede sintetizar en un solo parámetro las resistencias por pérdidas óhmicas debido al patrón de puntos de contacto; siendo el parámetro nombrado como  $R_{base}$ .

La relación de la separación de los puntos de contactación con la resistencia de base es directa en el sentido de que cuanto más separados los puntos peores son las pérdidas óhmicas de  $R_{base}$  (resistencia más grande) pero menor la recombinación superficial en el lado de la base y viceversa. El objetivo es evaluar un punto de equilibrio entre ambas variables que permita una alta eficiencia de la célula solar con bajas pérdidas óhmicas.

Los cálculos teóricos que se pueden realizar conociendo la resistividad del sustrato y el patrón de separación de los puntos de contactación de la base de una célula solar no son suficientes para una medición precisa. Para obtener unos resultados más precisos y directos de los parámetros de la célula solar se debe medir directamente en la célula usando diferentes modos de medición [38]. Esto es debido a que el método de medición mide a la vez, de forma común, la resistividad del contacto y la resistencia de base.

#### **4.1-Definición del modelo**

El modelo teórico a utilizar parte del explicado en el punto 2.5.2 en el que se incluía la resistencia de base con la inclusión del BSF (Back Surface Field). Este modelo recoge la mayoría de parámetros propios a la fabricación de la célula solar que con las mediciones obtenidas se pretende dar lugar a una caracterización amplia de una célula solar y su eficiencia una vez fabricada pudiendo cotejar la teoría aplicada en su fabricación con los resultados empíricos obtenidos en su medición posterior.

Las células utilizadas en la medición (oblea) se han fabricado siguiendo unos modelos de fabricación ya utilizados anteriormente [39] donde se detallan más a fondo. Como características de fabricación se ha partido de una oblea de 260  $\mu\text{m}$ . de grosor, con una resistividad nominal de  $\rho_{\text{sub}} = 1.8 \Omega \cdot \text{cm}$ . Correspondientes a un dopado de portadores aceptores  $N_A = 7,8 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$  y con un dopado de emisor  $n^+$  de 120  $\Omega/\text{sq}$ .

La fabricación de las células medidas tienen una estructura en la base de tipo Point Contacted (contactado por puntos por pulsos de láser) y estructura Metal Insulator Semiconductor. La estructura de metal (aluminio) Insulator (dióxido de silicio) Semiconductor (la propia oblea de silicio cristalino c-Si) es la capa añadida a la fabricación que genera el BSF que permite mejorar la transición de semiconductor a metal.

#### **4.2-Definición de medida para modelo**

En la medición de impedancias por espectroscopia se obtienen valores de resistencia Real e Imaginaria a lo largo del barrido frecuencial de medición. Al aumentar la frecuencia partiendo de una baja frecuencia con un valor determinado de resistencia para células solares se ve un lóbulo ascendente hacia la impedancia imaginaria sobre un gráfico de impedancias imaginarias respecto las reales. Se dibuja positiva al aplicar un cambio de signo pero en realidad es negativa al ser una impedancia imaginaria capacitiva. Tras alcanzar un pico el lóbulo vuelve a disminuir hacia el eje de resistencia real pero con valor más bajo de resistencia en alta frecuencia. Esta sería la medición habitual de una célula solar para un modelo simple como el primer modelo mostrado en el capítulo 2.5.1 que considere la resistencia dinámica del diodo que conforma la célula solar y la capacidad por difusión debidos a la transición entre los dopados P-N.

Para el modelo de las células en estudio (PC + MIS) se incluye al mismo los parámetros de evaluación debidos a la inclusión de la capa de pasivación con aislante (MIS) como son  $C_2$  y  $R_{\text{base}}$  ya inicialmente explicados también en el modelo del punto 2.5.2.

La inclusión de la parte aislante para crear el BSF en la cara de la base aparte de repercutir en el modelo eléctrico y teórico también afecta a la respuesta frecuencial que se obtendrá en las medidas. Los nuevos parámetros ( $C_2$ ,  $R_{base}$ ) generan un segundo lóbulo en las altas frecuencias de menor tamaño. Para este caso se extraen los valores a partir de los parámetros indicados en la Fig. 4.2.

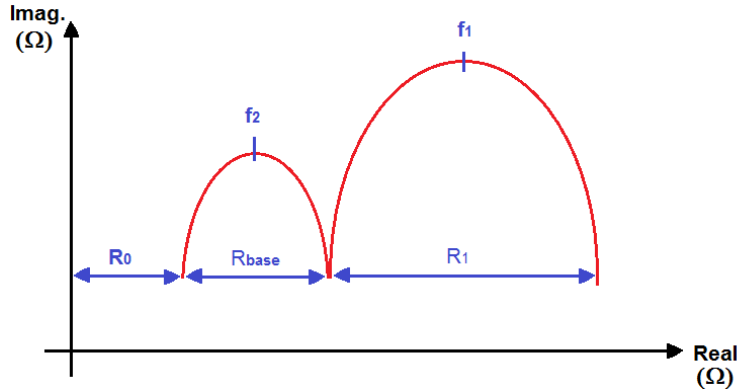


Fig. 4.2: Gráfico de impedancias Imaginarias-Reales.

Las resistencias de interés que se usan para la extracción del resto de parámetros se pueden ver gráficamente en la Fig. 4.2. El barrido frecuencial empieza en el extremo derecho de mayor valor real para las bajas frecuencias y acaba en el extremo izquierdo con menor valor real a altas frecuencias. La resistencia dinámica  $R_1$  del diodo que conforma la célula solar corresponde al ancho del primer lóbulo a la derecha para baja frecuencia. La resistencia de base debida a la creación del BSF se extrae del ancho del segundo lóbulo a la izquierda, en frecuencias altas. La resistencia  $R_0$  debida a los contactos y otros efectos de pérdidas óhmicas se corresponde con la separación entre el valor a alta frecuencia donde termina la medición y el valor de cero ohmios de impedancia real.

Las frecuencias  $f_1$  y  $f_2$  se corresponden a las frecuencias en las que se hallan los valores máximos de impedancia imaginaria para cada uno de los dos lóbulos. La frecuencia  $f_2$  es superior a la frecuencia  $f_1$  según el sentido del barrido frecuencial. A partir de estas frecuencias y de las resistencias de base  $R_{base}$  y dinámica  $R_1$  se pueden hallar los tiempos de vida efectivos de la unión P/N<sup>+</sup> y de la zona del BSF.

El valor de las capacidades se puede extraer aplicando las ecuaciones 4.1 para el caso de la capacidad  $C_1$  y la ecuación 4.2 para la capacidad  $C_2$  utilizando los valores de resistencia obtenidos anteriormente y conociendo los valores de frecuencia donde se producen los valores máximos de impedancia imaginaria en los dos lóbulos.

$$C_1 = \frac{1}{2 * \pi * f_1 * R_1} \quad \text{Ec. 4.1}$$

$$C_2 = \frac{1}{2 * \pi * f_2 * R_{base}} \quad \text{Ec. 4.2}$$



Con los parámetros obtenidos hasta este punto se puede hallar el tiempo de vida efectivo  $\tau_{eff} = \tau_1$  de la célula solar correspondiente al tiempo de vida en la unión P/N<sup>+</sup>. Tiene una tendencia a incrementarse con la tensión de polarización ya que se incrementa el campo eléctrico en la zona de carga espacial y con ello la duración de los portadores minoritarios al aumentar la componente de capacidad dinámica. El producto de la resistencia dinámica y la capacidad generada en la zona de carga espacial da como resultado el tiempo de vida efectivo de la unión p-n+ según la ecuación Ec. 4.3.

$$\tau_{eff} = \tau_1 = 2 * R_1 * C_1 \quad \text{Ec. 4.3}$$

El tiempo de vida en la base  $\tau_2$  también se ve afectado por el pitch aplicado a la base, siendo un parámetro a tener en cuenta y poder comparar. La Ec. 4.4 muestra el valor de este tiempo de vida en la base de la célula solar.

$$\tau_2 = 2 * R_{base} * C_2 \quad \text{Ec. 4.4}$$

Se puede comprobar que a partir de los valores de resistencias y aplicando las ecuaciones anteriores se puede obtener un buen número de parámetros característicos de las células solares.

### **4.3-Medición con máquina de impedancias**

La medición de Espectroscopia de Impedancias parte de la idea de realizar una medida frecuencial aplicando un barrido de pequeña señal en alterna y capturar la respuesta del dispositivo bajo medida como impedancia Real e impedancia Imaginaria obteniendo una respuesta completa del mismo. Este paso se debe realizar en diferentes puntos de polarización de la célula solar para poder comparar su estado y respuesta a partir de los resultados.

Para realizar las mediciones de las células se ha requerido un aparato de medición específico capaz de realizar mediciones a 4 puntas con valores muy pequeños tanto de señal inyectada como recibida. La máquina en cuestión es un medidor de impedancias Agilent 4294A situada en el laboratorio de test del departamento d'Enginyeria Electrònica de la UPC dedicado al estudio de micro y nanotecnología. Ver Fig. 4.3 donde se muestra la máquina utilizada para realizar las medidas en el laboratorio durante las primeras mediciones con cables sonda del laboratorio.





**Fig. 4.3: Foto de máquina de medición Agilent 4294A realizando mediciones.**

La medición a 4 puntas se realiza inyectando con dos puntas una pequeña señal alterna sobre un offset de tensión continua que sirve para polarizar en diferentes zonas de trabajo la célula solar. Las otras dos puntas miden la tensión resultante de la aplicación de señal sobre la célula solar. Conociendo las señales inyectadas y las medidas durante todo el barrido frecuencial la máquina de medición obtiene las impedancias reales e imaginarias.

La máquina de medición requiere de unos minutos para estabilizarse y realizar las mediciones de forma más precisa por lo que se encendía la máquina con antelación antes de realizar las mediciones. Durante las mediciones iniciales con los cables, incluso con los apantallados construidos a propósito para realizar las mediciones, se pudo comprobar que la iluminación por fluorescentes de la sala introducía una interferencia en las mediciones (probablemente a través de la fuente de alimentación por el suministro eléctrico de la máquina). Se optó por realizar las mediciones con las luces apagadas. Este motivo aparte de que la autocalibración de la máquina no podía compensar todos los efectos introducidos por los cables fueron determinantes para diseñar el segundo prototipo de placa, más simple que el primero pero que permitiera mejorar las mediciones de las células solares con menores interferencias ya que éste se conectaba directamente a la máquina.

La máquina presenta la información en una cadena de datos con los puntos de medición del barrido frecuencial. Se utiliza el programa Excel para recibir los datos directamente de la máquina a través de un bus de comunicaciones conectado entre la máquina y un PC del laboratorio. En la hoja Excel de información recibida se indican los datos de configuración de la máquina seguidos de los datos medidos. Como información se presenta en la Fig. 4.4 una captura del formato en que presenta la máquina los valores medidos por cada canal (Real e Imaginario).

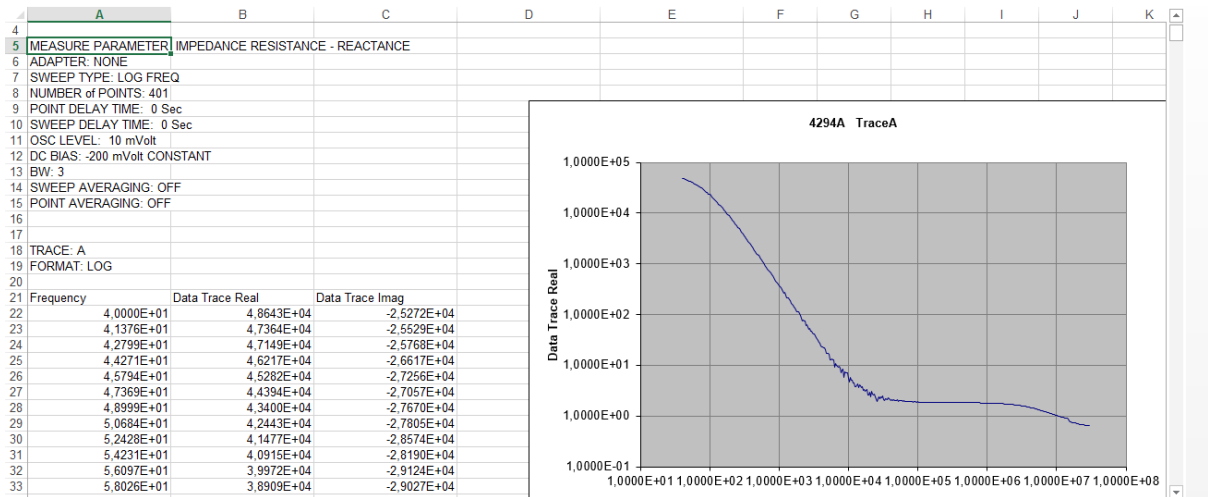


Fig. 4.4: Captura de formato de datos grabados por máquina de medición de impedancias.

Los datos presentados por la máquina se pueden representar por módulo de la impedancia medida como se muestra en Fig. 4.5 y en fase en grados según se muestra en la Fig. 4.6.

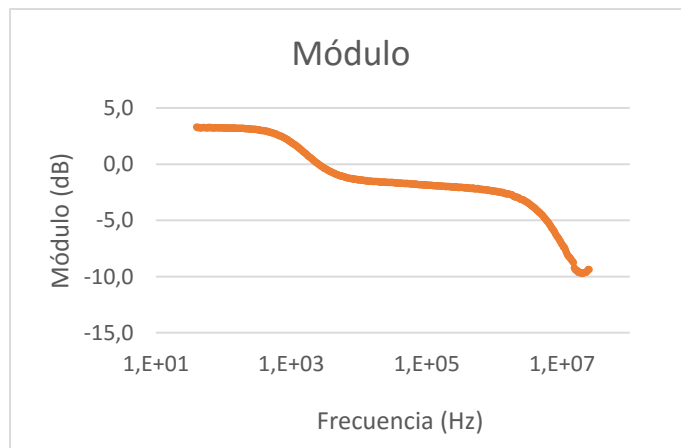


Fig. 4.5: Diagrama Bode el módulo de la impedancia 650mV de célula A.

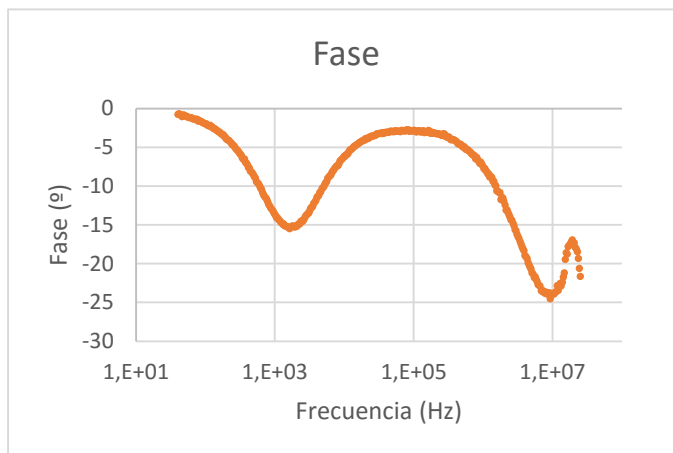


Fig. 4.6: Diagrama de Bode de Impedancia Imaginaria a 650mV de célula A.

Se puede apreciar que para el módulo la impedancia va disminuyendo a medida que se aumenta la frecuencia de barrido. Tiene una primera caída de valor resistivo a partir de 1kHz siendo la frecuencia a partir de la cual se pasa de la respuesta del paralelo  $R_1//C_1$  explicado en el modelo teórico. La siguiente bajada se produce en alta frecuencia a partir de 1MHz y se debe al efecto introducido por la fabricación de la contactación a través del MIS en la base que crea el BSF. Se puede entender que es vital poder realizar la medición a alta frecuencia para poder evaluar el comportamiento del paralelo  $R_{base}//C_2$  del modelo teórico ampliado con la característica del BSF.

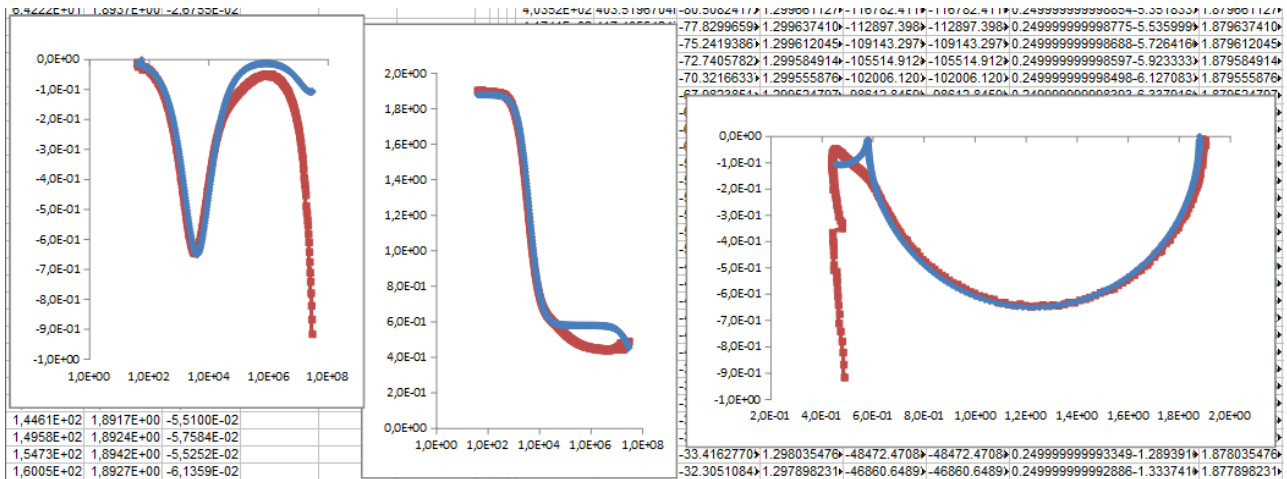
La fase se ve afectada en los mismos puntos del barrido frecuencial que el módulo de la impedancia ya que van ligados entre sí. La relación entre en las variaciones de módulo y fase son relación directa de los paralelos  $R_1//C_1$  y  $R_{base}//C_2$  del modelo teórico. La fase tiene signo negativo lo que indica que es de tipo capacitivo confirmándose el modelo utilizado. En el modelo ampliado la fluctuación a alta frecuencia se corresponde con el modelado de la célula solar contactada por puntos de contacto a través de aislante entre metal y semiconductor (PC + MIS: Point Contacted + Metal Insulator Semiconductor).

Las medidas realizadas con la máquina se han repetido de la misma forma para diferentes células solares. Las mismas respuestas frecuenciales se han repetido para todas las células resultando en valores similares aunque con cierta variación como cabía esperar por las diferencias de pitch en los contactos de la base.

#### **4.4-Ajustes de resultados**

Se han realizado ajustes con simulaciones para comprobar que los valores obtenidos se ajustaban a los que se obtendrían con los modelos circuitales utilizados para el análisis de los valores de la célula solar.

En la Fig. 4.7 se pueden ver unos gráficos de los ajustes realizados probando con diferentes valores que se acercasen al comportamiento que mostraban los valores medidos.



**Fig. 4.7: Simulaciones con los parámetros del modelo circuital (azul) respecto medidas reales (rojo).**

Con el ajuste de las medidas se pueden extraer los parámetros de las células a partir de los valores utilizados para asemejar más los valores medidos. Esto es necesario ya que a partir de las mediciones se pueden extraer parte de los valores pero para otros no medibles directamente es más complejo obtenerlos y se recurre a la simulación hasta conseguir obtener un resultado similar al medido.

Las células medidas son de tipo LFC-PERC indicando que en su construcción la zona de emisor está pasivada con contactos en la cara opuesta para la base (Passivated Emitter Rear Contact; PERC). Además la base está contactada a través de un material aislante (SiO<sub>2</sub>) creando un campo superficial Back Surface Field (BSF) que evita el problema de pasar de semiconductor a metal directamente evitando pérdidas por el conexionado. Esta conexión se realiza con puntos de contactación creados con un láser por el método Laser Firing Contacts (LFC) ya explicado anteriormente. Para determinar el comportamiento del ancho de los contactos y la separación entre los mismos respecto a la resistencia de base que se crea se deben realizar diferentes medidas para evaluar la mejor disposición y tamaño de los contactos. En la tabla 2 se muestran las diferentes células medidas junto con sus valores de pitch en la base y otros parámetros obtenidos en las mediciones con el simulador solar a 1 Sol.

NOMBRE	PITCH ( $\mu\text{m}$ )	FILL FACTOR	EFICIENCIA (%)	Voc (V)	Isc (mA)	COLORES
A	600	79,07387404	20,20464	0,642	39,8	VERDE CLARO
B	600	79,38105818	20,008472	0,643	39,2	VERDE OSCURO
C	700	77,52883141	19,975536	0,649	39,7	AMARILLO
D	300	79,03446353	18,139832	0,622	36,9	VIOLETA
E	500	78,85717155	18,84576	0,639	37,4	TURQUESA
F	900	75,50960714	18,659028	0,652	37,9	ROJO
G	800	77,55694785	20,226852	0,652	40	NARANJA
H	400	79,33096134	18,550752	0,632	37	AZUL

Tabla 2: Tabla con valores de las células solares medidas.

El comportamiento de las diferentes células solares según su pitch se puede observar en la Fig. 4.8 en la se incluyen diversas medidas con barrido frecuencial para diferentes pitch de la base. Se ha dibujado con signo positivo la resistencia imaginaria para hacer el gráfico más simple. En la medida de máquina los valores de resistencia o impedancia imaginaria son negativos, indicando que el comportamiento de la célula solar es de tipo capacitivo como se esperaba coincidiendo con el modelo teórico. Las unidades de los ejes de los siguientes gráficos hacen referencia a resistencia en  $1\text{ cm}^2$  al ser las células de esa área útil y quedando normalizado para su comparación de parámetros con otras células de diferente tamaño.

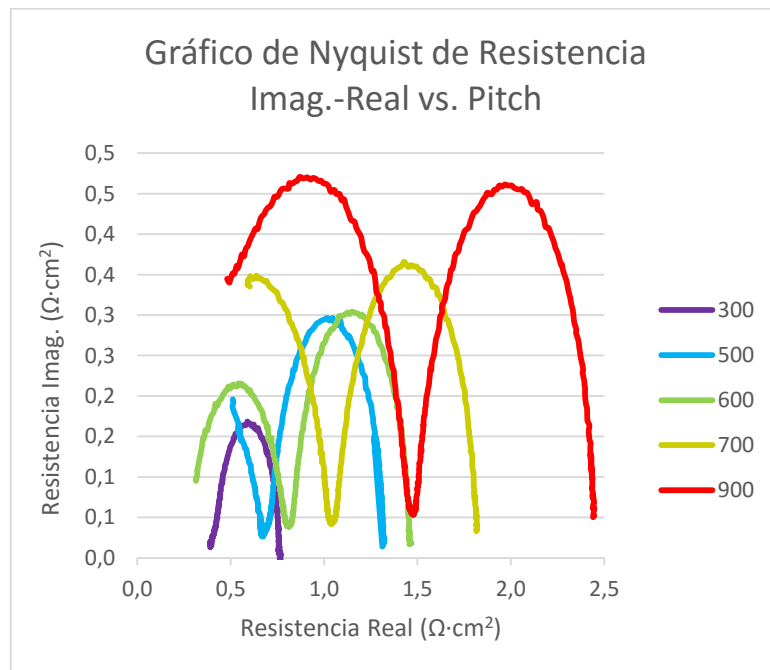


Fig. 4.8: Gráfico de Nyquist de Resistencia Imag.-Real vs. Pitch a 650mV de polarización.

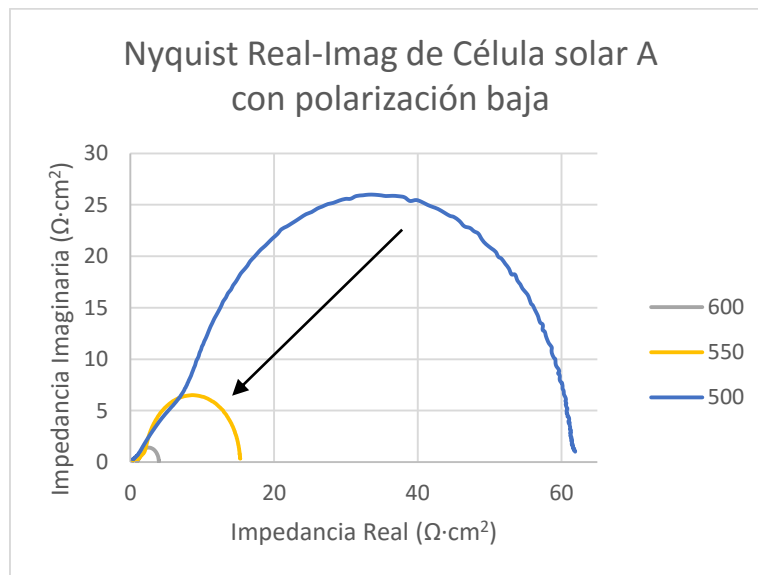
El primer lóbulo por la derecha se corresponde al comportamiento en frecuencias bajas del paralelo de la resistencia dinámica de la célula solar y el condensador que modela el comportamiento capacitivo de la zona de carga espacial creada por unión p-n+ de la propia célula solar (comportamiento como un diodo). Se puede ver que al medir células con menor

separación de contactos o pitch la impedancia en general, tanto Imaginaria como Real, disminuye pues indica que hay más puntos de contacto en la base reduciendo la resistencia conjunta.

El segundo lóbulo que se ve a la izquierda del lóbulo principal se corresponde al valor en alta frecuencia del paralelo de la resistencia de base y la capacidad que se crea en el BSF aplicado a la base con la capa de aislante. Es una variación de impedancia que sucede en altas frecuencias del barrido con lo que en algunos casos es complejo compensar la máquina de medida. Esto hace que no se vea para pitch pequeños (300-400 $\mu\text{m}$ ).

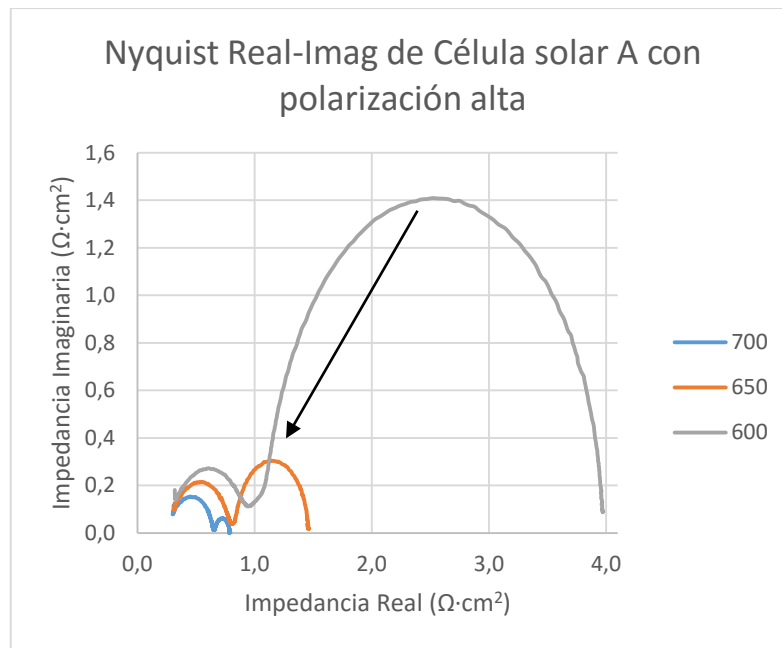
A medida que se disminuía la separación de los puntos de contacto de la base o pitch la medición se complica más debido a la poca señal que se puede medir a altas frecuencias al ser impedancias de miliohms.

En el caso de una polarización directa de una célula solar obtenemos una respuesta de reducción del valor de la impedancia a medida que se polariza ésta. Al acercarse más la polarización a la tensión umbral el funcionamiento de la célula mejora aumentando la potencia llegando al punto de máxima potencia. Este efecto se puede observar viendo la reducción que sufre la impedancia al aumentar la tensión de polarización en la Fig. 4.9. Se ha escogido la célula solar A con pitch de 600 $\mu\text{m}$ . por ser el valor de pitch que ofrecía mejor rendimiento en las simulaciones teóricas. Dada la variación de impedancia de varias decenas de ohms para el caso de polarización a 500mV a valores de pocas décimas de ohms para la polarización de 700mV, se muestran en la Fig. 4.9 las polarizaciones con menor tensión.



**Fig. 4.9:** Gráfico con valores de impedancia Imaginaria respecto Real para polarización baja.

En la Fig. 4.10 se muestran el resto de las polarizaciones de 600mV, 650mV y 700mV donde se debe destacar que la escala de resistencia es mucho más baja que la de la Fig. 4.9.



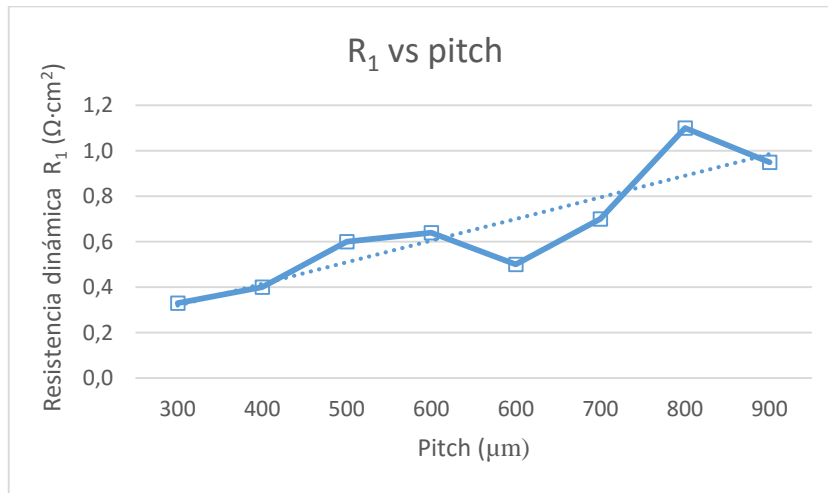
**Fig. 4.10: Gráfico Nyquist para la célula A de 600 $\mu$ m para  $V_{pol}$  de 700, 650, 600mV.**

En el caso de polarización directa alta se puede observar que a medida que se polariza con mayor tensión la impedancia baja considerablemente a valores muy bajos de resistencias imaginarias y reales por debajo de la unidad.

Además con polarizaciones altas próximas a la tensión en circuito abierto de la célula se aprecia con más intensidad el efecto del BSF de la base creado por el paralelo de la resistencia de la base y la capacidad creada por el dieléctrico del aislante utilizado para crear el BSF. Con baja polarización este efecto apenas aparecía ya que es un valor muy bajo de resistencia. Además se da a alta frecuencia con lo que se veía tapado por los altos valores de impedancia que hay con baja polarización.

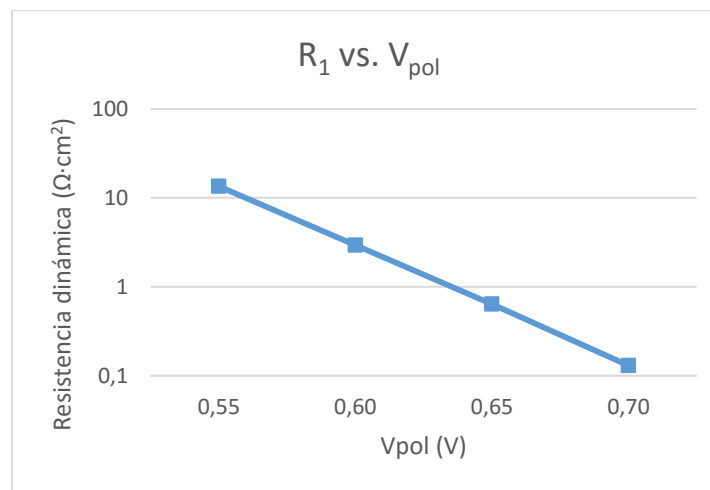
El efecto de la resistencia dinámica o según el modelo circuital,  $R_1$ , en función del pitch es significativa. La tendencia a medida que se incrementa el pitch es que la resistencia se incremente también ya que se aumenta la resistencia  $R_{base}$  que induce el incremento de la resistencia dinámica al haber menos flujo de corriente. En la Fig. 4.11 se muestra la tendencia de  $R_1$  respecto al pitch y su tendencia de aumento al incrementar el pitch.





**Fig. 4.11: Resistencia dinámica  $R_1$  versus pitch.**

Aparte, la resistencia dinámica también se ve afectada por la polarización aplicada sobre la célula solar ya que es la que define el comportamiento de la célula por sí. A medida que se van aplicando tensiones de polarización más altas la resistencia dinámica se va reduciendo acorde a un mayor flujo de corriente y por tanto mayor potencia de generación en el caso de la célula solar. En la Fig. 4.12 se muestra la tendencia de la resistencia dinámica al aumentar la polarización.



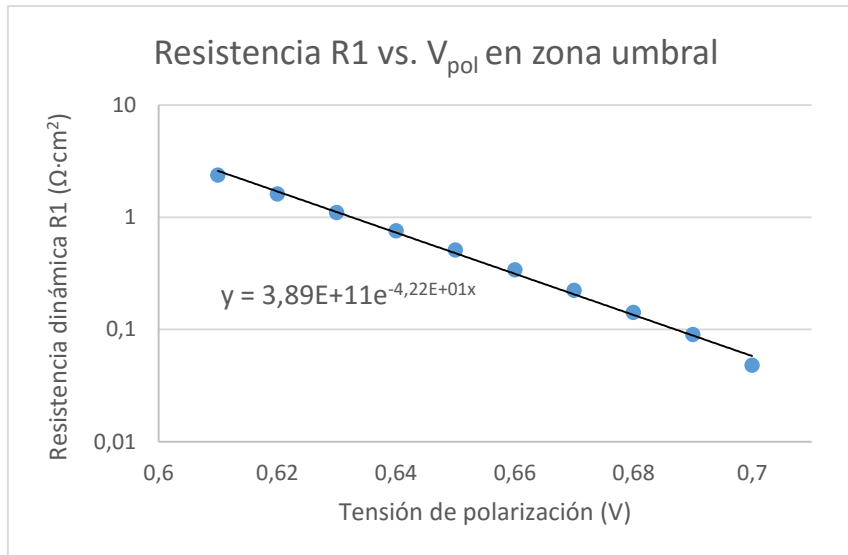
**Fig. 4.12: Resistencia dinámica  $R_1$  versus  $V_{pol}$ .**

La resistencia dinámica se reduce de forma considerable al acercarse a la tensión de circuito abierto. Esto es debido a que en el caso de máxima potencia la resistencia tiene que ser mínima para que la potencia generada no se disipe precisamente en una resistencia interna de la propia célula, pues no tendría sentido su uso para generar corriente eléctrica ya que dispararía parte antes de entregarla.

Realizando un barrido en polarización cerca de la tensión umbral de conducción del diodo se puede extraer el factor de idealidad y la corriente inversa de saturación  $I_0$ , aplicando la Ec. 2.3 y aislando  $R_1$ :

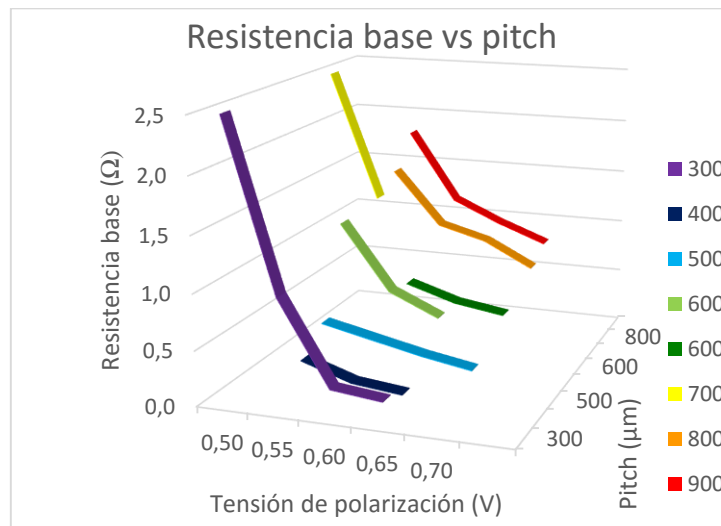
$$R_1 = \frac{nV_t}{I_{Pol}} = \frac{nV_t}{I_0} \cdot e^{(-V/nV_t)} \quad \text{Ec. 4.5}$$

Igualando la Ec. 4.5 con la expresión exponencial de la Fig. 4.13, se puede despejar un factor de idealidad muy cercano a la unidad que indica que el diodo de la célula solar es prácticamente ideal. En cuanto a la corriente inversa en saturación se obtiene un valor de unos 70 fA/cm<sup>2</sup>.



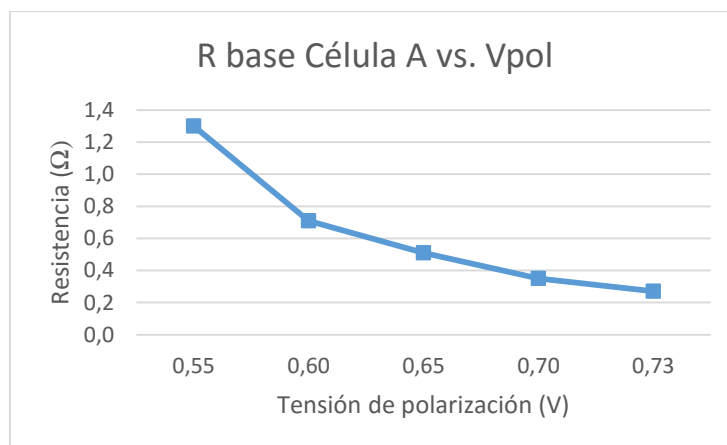
**Fig. 4.13: Resistencia dinámica vs. Tensión de polarización en zona umbral.**

La resistencia de base es la otra resistencia que juega un papel importante en la célula solar. Esta es la resistencia que como se ha explicado en el modelo circuital del punto 2.5.2 modela la resistencia de la base respecto el interfaz entre el semiconductor y el contacto metálico de la base. En la Fig. 4.14 se muestra su tendencia a la baja al aumentar la polarización en función de los pitch. Se puede apreciar que los valores de resistencia se reducen al reducirse el pitch pues hay más puntos de contactación dando posibilidad a un mayor flujo de corriente y menor resistencia de base.



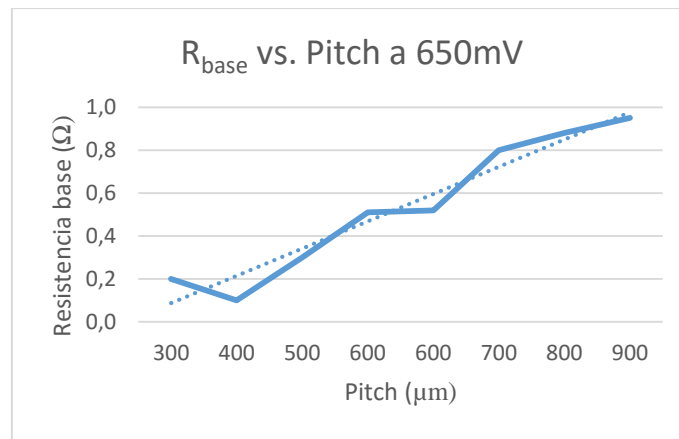
**Fig. 4.14: Resistencia base medida según tensión de polarización para diferentes pitch.**

Para ver más claramente este efecto en la Fig. 4.15 se puede observar el efecto de reducción de resistencia de base al incrementar la tensión de polarización para la célula A de 600 μm de pitch.



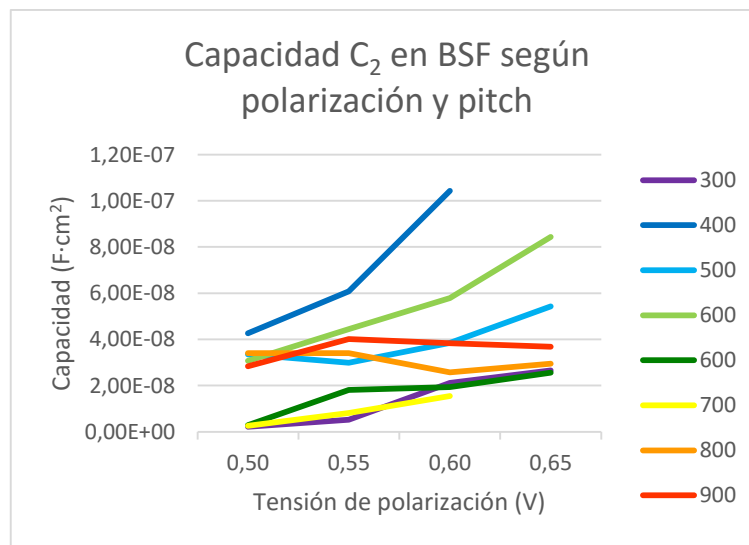
**Fig. 4.15: Rbase de célula A en función de tensión de polarización.**

La resistencia de base como ya indicado en los gráficos de Nyquist de este punto, se ve afectada directamente por el pitch que tenga aplicado la célula en la base. Al aumentar la separación de los puntos de contacto o el pitch la resistencia de base tenderá a aumentar proporcionalmente. En la Fig. 4.16 puede verse dicha tendencia.



**Fig. 4.16: Resistencia de base respecto Pitch para tensión de polarización a 650mV.**

El efecto del BSF aplicado a la base de la célula genera el par en paralelo resistencia de base y capacidad debida al dieléctrico aplicado para obtener el BSF. Esta capacidad se modela con el condensador  $C_2$  que como para el caso de la resistencia de base también se ve afectado por el pitch. En este caso el condensador o capacidad se verá disminuida al disminuir el pitch ya que reduciendo la separación de los puntos de contactación se reduce el área no contactada sobre el dieléctrico de la base, y por tanto se reduce la capacidad. En la Fig. 4.17 se muestran los diferentes valores medidos de  $C_2$  para cada célula de diferente pitch.



**Fig. 4.17: Condensador  $C_2$  modelando la capacidad del BSF.**

El tiempo de vida efectivo  $\tau_1$  de la unión p-n+ de la célula solar aporta información acerca del propio tiempo de vida de los portadores minoritarios en la zona de carga espacial. Se ve afectado por el pitch de los puntos de contactación de la base variando aumentando desde los 50  $\mu\text{s}$  para pitch de 300  $\mu\text{m}$  a los 210  $\mu\text{s}$  para pitch de 900  $\mu\text{m}$  (para 650mV de polarización). En el caso de la célula A con un pitch de 600  $\mu\text{m}$  el tiempo de vida está en unos 130  $\mu\text{s}$ , siendo un valor intermedio de los pitch medidos. La Fig. 4.18 muestra gráficamente estos resultados.

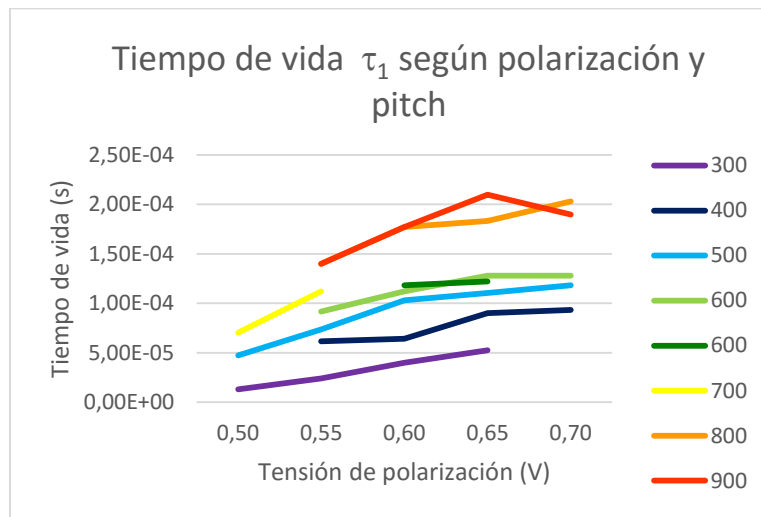


Fig. 4.18: Tau 1 correspondiente a respuesta dinámica de las células según su pitch.

Al contrario, para el caso del tiempo de vida  $\tau_2$  formado por la resistencia de base y la capacidad creada por el BSF tiende a disminuir a medida que se aumenta la tensión de polarización. Esto es debido a que al polarizar más la célula solar se incrementa el valor de la capacidad  $C_2$  pero en cambio la resistencia de base disminuye. La resistencia de base disminuye tanto que la tendencia es a la baja, aunque el valor de  $C_2$  se incremente también. En la Fig. 4.19 se muestra una gráfica con la tendencia a la baja según se aumenta la polarización.

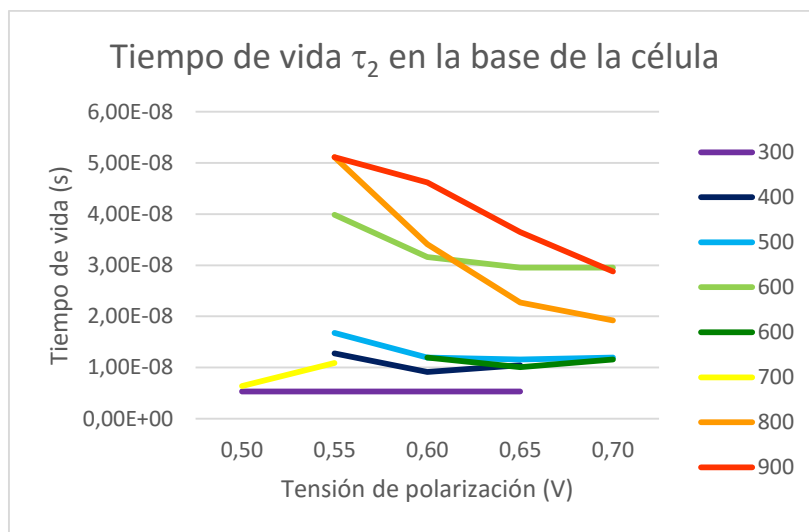


Fig. 4.19: Tau 2 correspondiente a tiempo de vida de portadores en la base en el BSF.

Se debe constatar que los tiempos de vida  $\tau_1$  y  $\tau_2$  tienen valores muy diferentes ya que el primero tiene un tiempo de vida que ronda los 50-200 $\mu$ s. mientras que para el tiempo de vida  $\tau_2$  es bastante más bajo de entre 10 a 50ns. Esto se corresponde con las frecuencias en las que se hallan ya que  $\tau_1$  se halla en los valores de frecuencia de las decenas de kHz mientras que  $\tau_2$  se halla en valores altos de frecuencia de varios MHz.

Dados los valores en frecuencia altos de  $\tau_2$  y a su vez los bajos valores de  $R_b$  ( $< 1\Omega$  a 650 mV) se hace necesario insistir en la necesidad de poder medir a altas frecuencias con mínimas interferencias de la forma más precisa posible.

Se han realizado nuevas medidas con una tensión de polarización fija a 0.65V para las células con diferente pitch, con la finalidad de observar la variación de las capacidades y de esta forma los tiempos de vida. Se puede observar en la Fig. 4.20 como las dos capacidades varían muy poco con el pitch obteniéndose valores de unos 25 nF/cm<sup>2</sup> para la  $C_2$  que coincide con el valor obtenido por la capacidad del óxido de la estructura MIS, y de unos 120  $\mu$ F/cm<sup>2</sup> para la  $C_1$ .

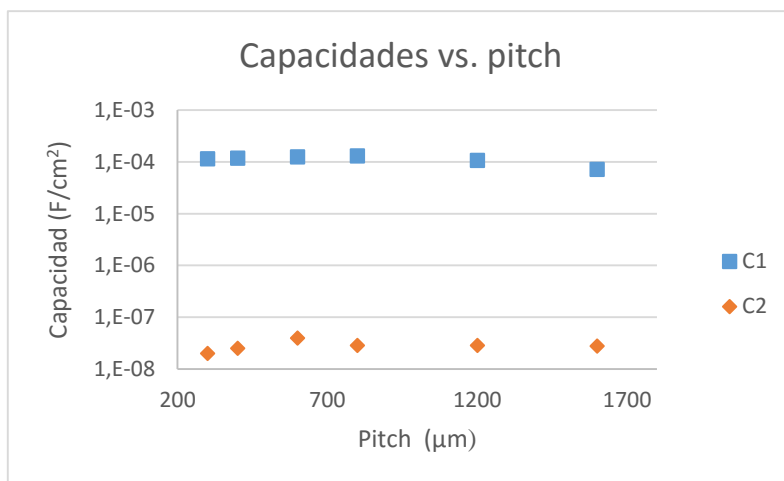


Fig. 4.20: Capacidades respecto de pitch.

Multiplicando estas capacidades por sus correspondientes resistencias se obtienen los tiempos de vida  $\tau_1$  y  $\tau_2$ . Se observa en la Fig. 4.21 como los dos aumentan con la distancia de pitch, obteniendo valores para el tiempo de vida efectivo de los portadores  $\tau_1$  cercanos a 200  $\mu$ s.

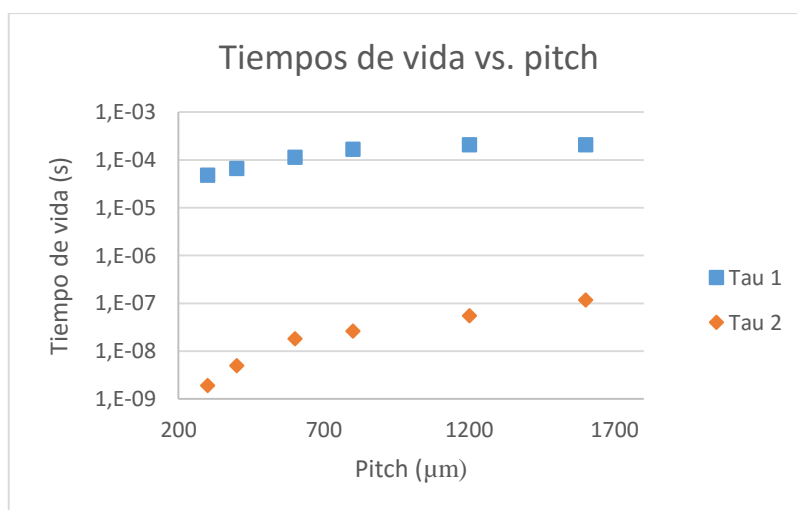


Fig. 4.21: Tiempo de vida respecto pitch.

## 5- Extracción de la resistencia de base a partir de medidas de impedancia

Habiendo realizado las mediciones se presenta la posibilidad de ampliar la teoría de los modelos teóricos utilizados e incluir más parámetros que se pueden extraer con la medición por espectroscopia de Impedancias. Al realizar la medición en alta frecuencia se puede obtener el valor de  $\tau_2$  correspondiente al contacto de la base. A partir de las mediciones se puede extraer otro valor interesante para la caracterización de las células solares como es el caso de la resistencia de sustrato en las proximidades de la base además de la resistencia de base general ya medida en el capítulo anterior.

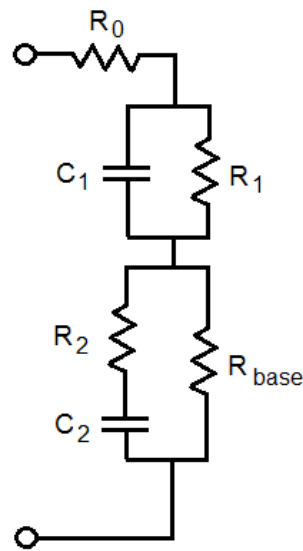
### 5.1-Célula solar con base SiO<sub>2</sub> y resistencia de sustrato

La resistencia de sustrato es la resistencia que cruza el flujo de electrones desde el emisor a la base. En el modelo anterior este efecto quedaba incluido dentro de la  $R_{base}$  pero es interesante separarlo como otra resistencia diferente e independiente. La resistencia de sustrato  $R_2$  se puede calcular a partir de la resistividad del sustrato multiplicado por el grosor de la oblea como buena aproximación pues el emisor constructivamente es de un grosor mínimo comparado con el grosor total de la oblea. Considerando el valor de  $R_2$  en el modelo resulta en que la resistencia de base  $R_{base}$  se ajusta más a su valor real exclusivamente para los valores resistivos ocasionados por los puntos de contactación de la base.

Al estar inyectándose señal en AC durante la medición por Espectroscopia de Impedancias (IS) la resistencia de sustrato afecta a la capacidad creada por el BSF que se carga y descarga al ritmo de la frecuencia aplicada en el barrido frecuencial. Esta resistencia tiene una gran importancia ya que anteriormente se incluía en la resistencia de base correspondiente a la resistencia de los contactos de la base cuando en realidad se puede desglosar y obtener valores más precisos de cada una de las dos resistencias que afectan principalmente la base: la resistencia de base y la resistencia de sustrato.

En la Fig. 5.1 se muestra el nuevo modelo circuital para el estudio de las células solares.





**Fig. 5.1: Modelo de célula solar con BSF y resistencia de sustrato.**

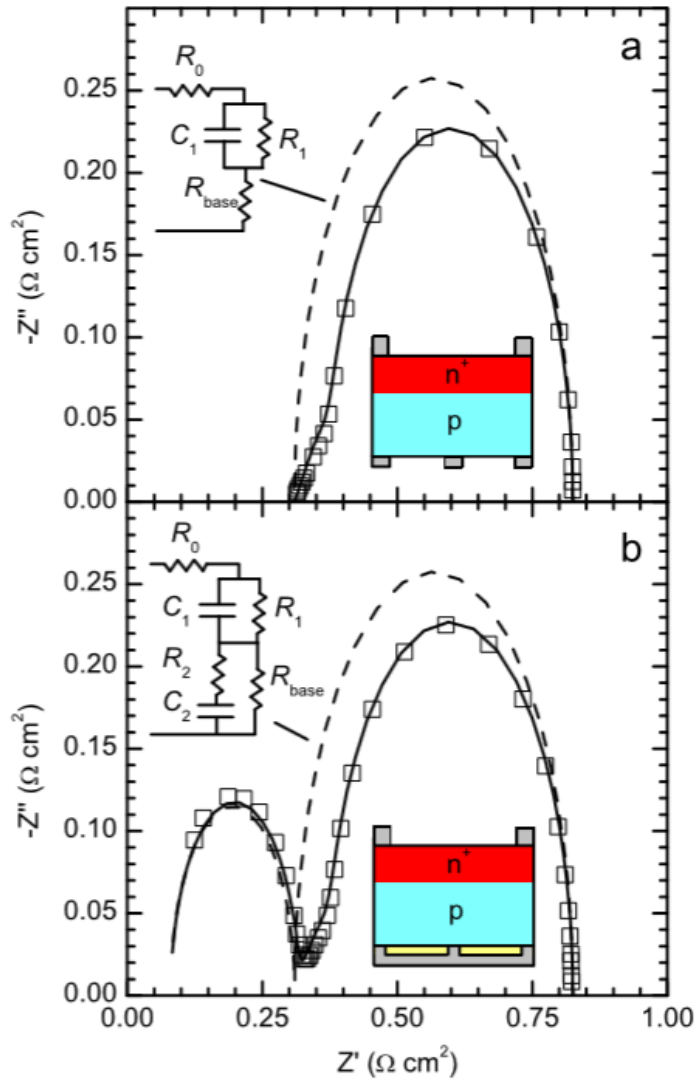
Con este nuevo circuito se puede medir la mayoría de parámetros de una célula solar que se pueden usar para valorar la calidad de producción de la misma y evaluar su rendimiento futuro durante su uso.

En la Fig. 5.2b se muestra en línea de trazos la forma obtenida según el modelo de la Fig. 5.1 y en línea entera con cuadrados los resultados de una simulación con el software ATLAS TCAD en el que se puede apreciar la similitud en la forma de la aproximación realizada sobretodo en el segundo lóbulo referente a la capa MIS en la base.

En el modo de fabricación de una célula solar típica, mostrado en Fig. 5.2a, con contactos metálicos directamente contactados con el semiconductor y asumiendo que la corriente a través de la unión n<sup>+</sup>/p transcurre mayoritariamente por la base gracias a los electrones inyectados a través de la misma, se puede aplicar la expresión de respuesta a contactos con buena pasivación [40]. Dicha expresión muestra la impedancia característica de la célula solar bajo respuesta frecuencial con tres grandes sumandos:  $R_0$ , resistencia dinámica  $R_1$  (respuesta en frecuencia) y la resistencia de base  $R_{base}$

$$Z = R_0 + \frac{R_1 \coth(w/L) \sqrt{1 + jR_1 C_1 \omega}}{\coth(w/L) \sqrt{1 + jR_1 C_1 \omega}} + R_{base} \quad \text{Ec. 5.1}$$

Donde  $\omega$  es la frecuencia angular,  $L$  es la longitud de difusión efectiva (de portadores minoritarios en el diodo),  $w$  es el grosor de la oblea,  $R_1$  la resistencia en pequeña señal de la unión n<sup>+</sup>/p y  $C_1$  es la capacidad debida a la difusión de portadores en la unión. Estos dos últimos parámetros se suelen utilizar para determinar el factor de idealidad y el tiempo de vida efectivo de los portadores minoritarios [20, 41].



**Fig. 5.2: Gráficos de impedancias Real-Imaginario para modelo con Rbase y modelo con Rbase y BSF [26].**

El modelo no incluye el efecto de la longitud de difusión el cuál es responsable del efecto ovalado que toma el lóbulo en su respuesta frecuencial. El no incluir este efecto implica que no se ajusta fielmente a altas frecuencias en lo que se conoce como efecto Warburg. Sin embargo encaja en la respuesta a baja frecuencia en los puntos críticos para analizar el comportamiento de una célula solar;  $R_0+R_{base}$ ,  $R_1$  y  $C_1$ . En este caso  $R_1$  se puede identificar como el valor correspondiente al ancho del arco sobre el eje de impedancia real,  $R_0+R_{base}$  se corresponden con el valor que separa el lado izquierdo (valor de alta frecuencia de impedancias) del arco respecto del origen de coordenadas (resistencia real cero) y  $C_1$  se determina a partir de la frecuencia donde se halla el máximo punto del lóbulo en cuando a resistencia imaginaria de la cual se puede obtener el valor de la capacidad. Para obtener la capacidad se parte del concepto que la resistencia imaginaria es en sí una reactancia capacitiva en el circuito y se puede extraer el valor de la capacidad con la siguiente expresión:

$$C = \frac{1}{X_C \omega} = \frac{1}{X_C 2\pi f} \quad \text{Ec. 5.2}$$

Dónde  $X_C$  es el valor de la reactancia capacitiva en ohmios,  $\omega$  es la frecuencia angular correspondiente a la frecuencia ( $f$ ) del máximo punto del lóbulo ( $\omega=2*\pi*f$ ).

En el caso de fabricación de célula solar con estructura PC+MIS (point contacted y Metal Insulator Semiconductor) se añaden más parámetros como se ha indicado anteriormente. Este caso también añade una resistencia  $R_2$  que modeliza la resistencia de sustrato de la oblea en todo su grosor ya que comprende el recorrido de flujo de portadores desde la unión  $n^+/p$  hasta la región MIS de la base. El modelo es la resistencia  $R_2$  en serie con  $C_2$  (modela la capacidad creada por el contacto MIS), todo ello en paralelo con  $R_{base}$ . Se puede ver un esquema eléctrico superpuesto con la estructura de la propia célula solar en sección en la siguiente figura Fig. 5.3 (con detalles constructivos).

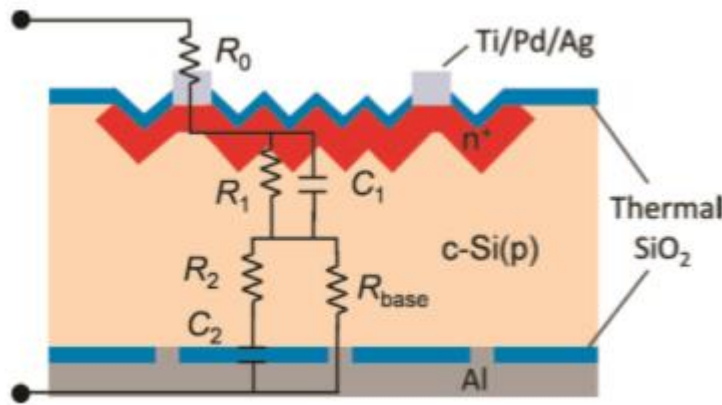


Fig. 5.3: Sección de célula solar con BSF y esquema eléctrico superimpreso [26].

La fórmula de la impedancia de la célula solar se reescribe de la siguiente forma con los nuevos parámetros:

$$Z = R_0 + \frac{R_1 \coth(w/L) \sqrt{1+jR_1C_1\omega}}{\coth(w/L) \sqrt{1+jR_1C_1\omega}} + \frac{R_{base}(j\omega C_2 R_2 + 1)}{j\omega C_2 (R_{base} + R_2) + 1} \quad \text{Ec. 5.3}$$

Dónde  $R_2$  es la resistencia de pérdidas óhmicas del flujo que atraviesa la unión  $n^+/p$  y la región MIS y  $C_2$  es la capacidad de la propia región MIS. Dado que la resistencia  $R_2$  caracteriza la resistencia a través de la oblea se puede asignar valor como  $R_2 \approx \rho w$ , siendo  $\rho$  la propia resistividad del sustrato  $\rho_{sub}$  y  $w$  el grosor de la oblea. Es una buena aproximación pero es dependiente de la tensión de polarización de la célula solar (o flujo de iluminación) y la separación (pitch) utilizado en los puntos de contactación de la base. Respecto  $C_2$ , ésta representa la capacidad de la estructura MIS a un potencial de 0V debido a que está contactada. A partir del grosor de la capa aislante aplicada para crear la capa MIS y la permitividad del dieléctrico (dióxido de silicio) se puede obtener el valor de la capacidad con simulaciones. Aunque este valor se ve afectado por la cantidad de área efectiva en sí que tiene en la región MIS ya que se reduce al aumentar la cantidad de puntos de contactación (disminuyendo la separación entre los puntos).

A partir del gráfico 5.2b en el que se ven los dos lóbulos del caso de fabricación con MIS se puede aproximar que el valor de  $R_{base}$  se corresponde al ancho del segundo lóbulo a la izquierda del primer lóbulo causado por la propia unión n+/p. Esto es debido a que  $R_{base}$  está relacionado con la pasivación de la base directamente y es el segundo lóbulo a frecuencias más altas el que refleja dicho comportamiento. Esta consideración permite obtener de forma relativamente sencilla el valor de  $R_{base}$  a partir de la medición de una célula solar y poder evaluar su comportamiento según su polarización y separación entre puntos de contactación (pitch) para analizar la separación más óptima para la fabricación de células solares más eficientes.

### 5.2-Dependencia de $R_{base}$ respecto a la resistividad.

Al polarizar con tensiones cercanas a la umbral la unión n+/p se confirma que al entrar en conducción (también podría ser ocasionado por iluminación directa al ser una célula solar) el primer lóbulo a baja frecuencia se reduce. Esta reducción se debe a que cada vez que se aumenta la polarización se produce mayor flujo de corriente y por ende menor resistencia dinámica que al realizar una espectroscopia de impedancias (IS) afecta el resultado obtenido reduciéndose la impedancia del primer lóbulo. Este efecto se puede observar en la siguiente Fig. 5.4.

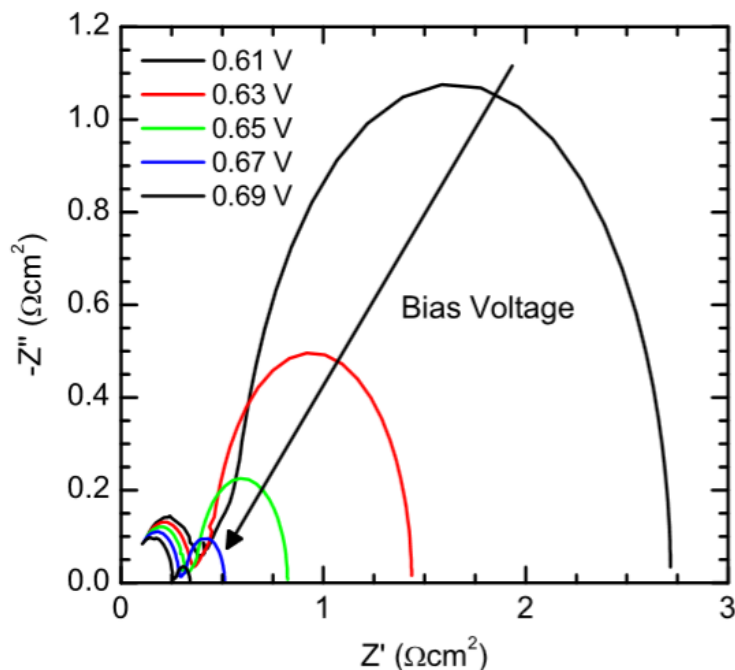


Fig. 5.4: Gráfico de impedancias según tensión de polarización [26].

Para obtener una expresión aproximada del valor de  $R_{base}$  se puede usar el modelo presentado por Fischer con contactos de forma redondeada (forma resultante de su creación por pulsos láser) [35].

$$R_{base} = \rho \frac{p^2}{2\pi r} \times \tan^{-1} \left( \frac{2w}{r} \right) + \rho w \left( 1 - e^{(-w/p)} \right) \quad \text{Ec. 5.4}$$

Dónde  $r$  es el radio del contacto,  $p$  es la separación (pitch) entre puntos de contactación y  $w$  es el grosor de la oblea de silicio.

La ecuación Ec. 5.4 presentada por Fischer [35] se deduce a partir de las consideraciones en la afectación a la  $R_{base}$  según el grosor de la oblea y el pitch o separación entre los puntos de contacto. En las consideraciones se parte de la solución proporcionada por Brooks and Mattes [42] de la resistencia de dispersión  $R_{Spread}$  alrededor del punto de contacto y en la solución empírica aportada por Cox and Strack [43] mostrada en Ec.5.5.

$$R_{Spread} = \frac{1}{\sigma} \frac{1}{2\pi r} \tan^{-1} \left( \frac{2w}{r} \right) \quad \text{Ec. 5.5}$$

Donde  $\sigma$  es la conductividad del sustrato (siendo la inversa de la resistividad  $\rho$ ) y  $r$  el radio del contacto.

La solución propuesta por Fischer para el cálculo de  $R_{base}$  es la de considerar dos supuestos en relación al grosor de la oblea  $w$  y la separación entre contactos  $p$ . El primer supuesto es el de que el pitch es mucho mayor que el grosor de la oblea como muestra la Ec. 5.6 que utiliza la resistencia de dispersión obtenida en Ec. 5.5.

$$R_{base} = R_{Spread} \cdot p^2 \quad \text{Ec. 5.6}$$

El segundo supuesto es el caso de que el pitch sea menor que el grosor de la oblea en el que se aplica la Ec. 5.7.

$$R_{base} = \rho w \quad \text{Ec. 5.7}$$

En la Fig. 5.9 se muestran dos esquemas que representan las líneas de distribución de corriente en el caso de pitch mayor que grosor de oblea (esquema superior) y pitch menor que grosor de oblea (esquema inferior). La separación entre contactos en la figura se expresa por  $L_P$  en vez de por  $p$ .

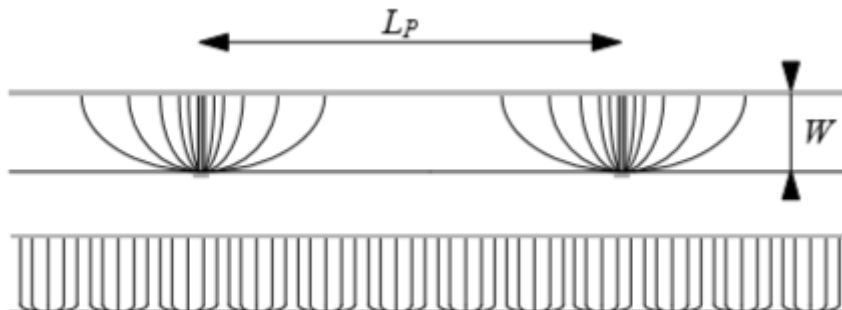


Fig. 5.5: Diferencia de flujo de corriente en contactos separados y juntos [35].

Para obtener el valor total de  $R_{base}$  para ambos supuestos de pitch y grosor de oblea se suman las Ec. 5.6 y 5.7, pero ésta última requiere de un ajuste para evitar que la contribución de ambos sumandos supere el valor de  $R_{base}$ . Esta limitación se logra añadiendo un factor exponencial en relación al grosor de oblea y pitch en la Ec. 5.7. Esta exponencial pondera el uso de un sumando u otro según la relación entre grosor de oblea y pitch. En la Ec. 5.11 se muestra como sería la ecuación para la aportación con pitch menor que grosor.

$$R_{base} = \rho W(1 - e^{-w/p}) \quad \text{Ec. 5.8}$$

Sumando las ecuaciones 5.6 y 5.8 se obtiene finalmente la Ec. 5.4 presentada anteriormente.

Se observa que el valor de resistividad disminuye según se aumenta la tensión de polarización al inyectarse más portadores minoritarios. Una estimación para la resistividad en cada tensión de polarización se puede realizar asumiendo que la densidad de portadores minoritarios en la oblea de silicio cristalino c-Si es la misma que la que se puede hallar en el borde de la Zona de Carga Espacial de la unión n+/p. Se introduce cierto error ya que esta densidad no es constante en toda la distribución interior de la célula solar pero es un error minimizable si la base está bien pasivada como es el caso al aplicar la región MIS. A partir de esta aproximación la resistividad de base se puede calcular como:

$$\rho = \frac{1}{q[\mu_n \Delta n + \mu_p (N_A + \Delta n)]} \quad \text{Ec. 5.9}$$

Donde  $\mu_n$  y  $\mu_p$  son la movilidad de electrones y huecos respectivamente [ $\text{cm}^2/\text{Vs}$ ],  $q$  la carga eléctrica del electrón [C; Culombio] y  $\Delta n$  [ $\text{cm}^{-3}$ ] incremento de concentración de electrones que se obtiene de la expresión:

$$\Delta n = \frac{n_i^2}{N_A} \times e^{(qV_j/k_B T)} \quad \text{Ec. 5.10}$$

Donde  $n_i$  [ $\text{cm}^{-3}$ ] representa la concentración intrínseca,  $N_A$  [ $\text{cm}^{-3}$ ] es la concentración de portadores aceptores y  $V_j$  es la tensión aplicada a la unión n+/p que puede calcularse a partir de la ecuación:

$$V_j = V - J * (R_0 + R_{base}) \quad \text{Ec. 5.11}$$

Donde  $V$  es la tensión y  $J$  es la densidad de corriente [ $\text{A}/\text{cm}^2$ ] medidas en continua en la célula solar y en polarización directa.

Para el valor calculado de  $R_{base}$  aplicando la Ec. 5.4 con  $\rho = 1,8 \Omega \cdot \text{cm}$ . y con las ecuaciones anteriores (Ec. 5.9, Ec. 5.10 y Ec. 5.11) se extrae que el comportamiento de la

célula en este punto es dependiente de la resistividad del sustrato. La resistividad tiene variación según la tensión de polarización al aumentar las concentraciones de portadores en la unión por el incremento que se produce en la conducción de corriente.

En la Fig. 5.5 se muestra el valor utilizado de resistividad además de incluir los valores de una simulación a una tensión de polarización a 0,65V con otros dopados simulados para valores de resistividad de sustrato de 0,8 y 4  $\Omega\cdot\text{cm}$ . Se observa que el dopado del semiconductor afecta en gran medida a la resistividad de manera importante, pero es además la tensión de polarización la que también disminuye la resistividad.

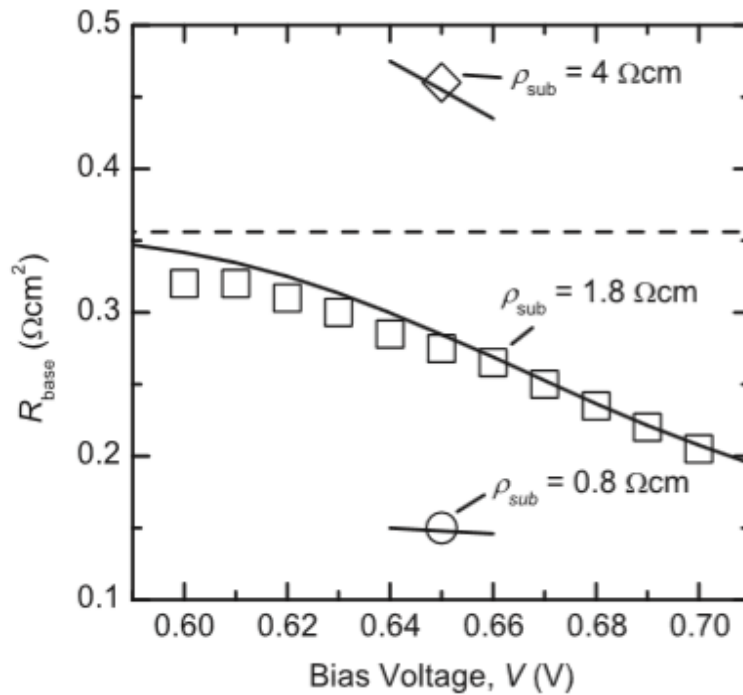


Fig. 5.6: Gráfica de resistencia de base según tensión de polarización [26].

### 5.3-Dependencia de $R_{\text{base}}$ según el pitch

Para comparar los efectos del pitch o separación de los puntos de contactación en la región MIS de la base respecto el comportamiento de la célula se realizó una simulación con diferentes valores comprendidos entre 300 y 1600  $\mu\text{m}$ . En la simulación que incluye la inyección de portadores se calcula el valor de  $R_{\text{base}}$  para estos puntos (línea continua) y se compara con la tendencia que debería seguir (línea discontinua) si se usase la Ec. 5.4 para calcular el valor de la resistencia de base. Esta información así como medidas reales de células solares a las medidas en el presente trabajo se muestran en la Fig. 5.6.



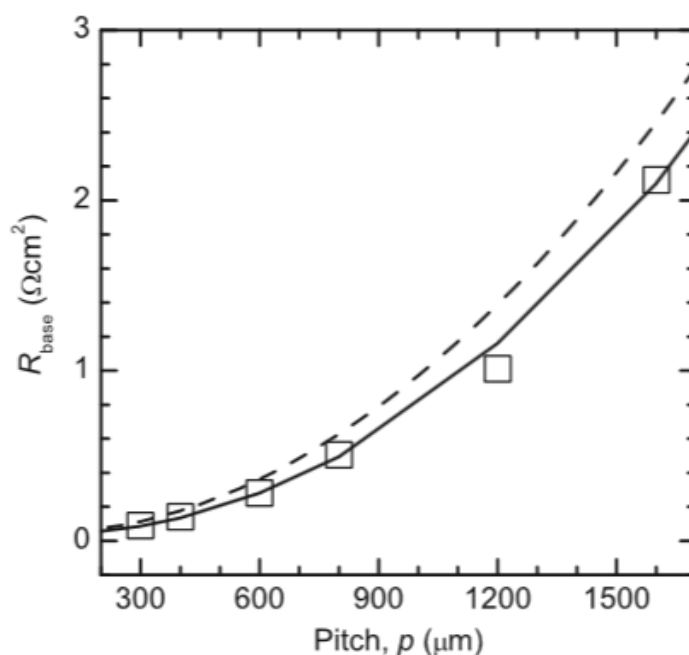


Fig. 5.7: Gráfico comparativo entre resistencia de base y pitch de base [26].

La desviación que se observa a medida que el pitch aumenta es debido a que con mayor pitch la pasivación es mejor (menos contactos metal-semiconductor a través del aislante) y el exceso de densidad de portadores que pueda mantenerse a ciertas tensiones se incrementa. Al incrementarse dicha densidad de portadores afecta a la resistividad de la base reduciéndola al haber mayor inyección de portadores.

#### 5.4-Resultados con modelo avanzado incluyendo $R_2$

La explicación del apartado anterior tiene una aplicación útil importante para el desarrollo de la construcción de células solares por el método de contactado por láser (LFC). Las diferencias entre los valores simulados y los valores medidos se deben a que el punto de contacto realmente no tiene el diámetro con el que se ha supuesto que se realizaba la soldadura por láser entre la capa metálica de la base y el semiconductor. Independientemente del motivo por el que no se logre realizar la unión esperada, la medición por Espectroscopia de Impedancias se puede utilizar para comprobar si las uniones de los contactos tienen el diámetro requerido tras el proceso de disparo por láser. Esto permite ajustar los parámetros del láser de forma que se logre realmente el diámetro deseado y con ello el funcionamiento y rendimiento esperado de la célula. En este punto radica una de las principales ventajas de la medición frecuencial de una célula solar y su análisis.

En la Fig. 5.7 se muestran valores medidos experimentalmente a diferente valor de tensión con la superposición de una línea que muestra el trazado con misma polarización que realiza el modelo circuital que incluye  $R_2$  que divide de la medida el valor de  $R_{\text{base}}$  el valor de la resistencia inherente al sustrato.

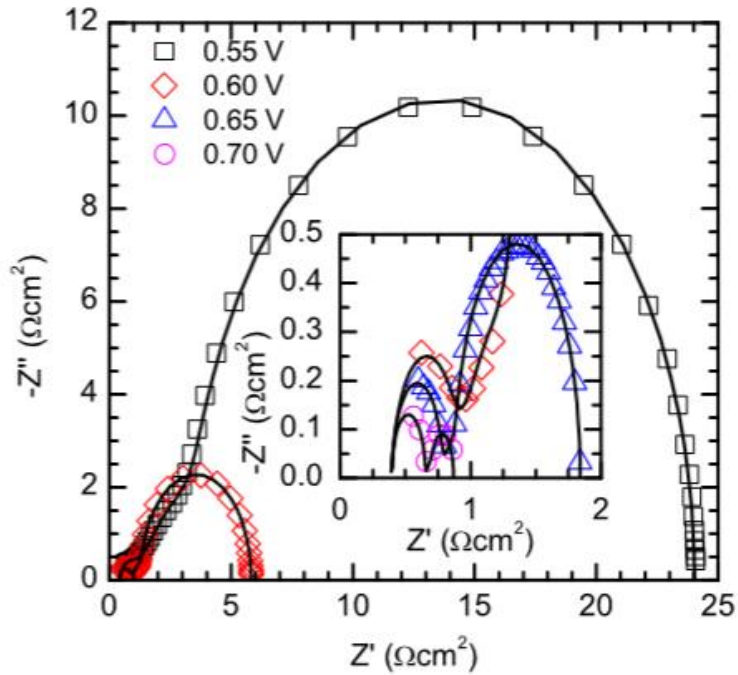


Fig. 5.8: Medidas experimentales ajustadas con nuevo modelo circuital [26].

La resistencia de base de la célula con MIS tiene variación de su valor según la tensión de polarización aplicada. En la Fig. 5.8 se puede apreciar dicha variación donde se muestra con símbolos valores obtenidos con medidas empíricas y con una línea continua se muestra la aproximación analítica según la Ec. 5.4.

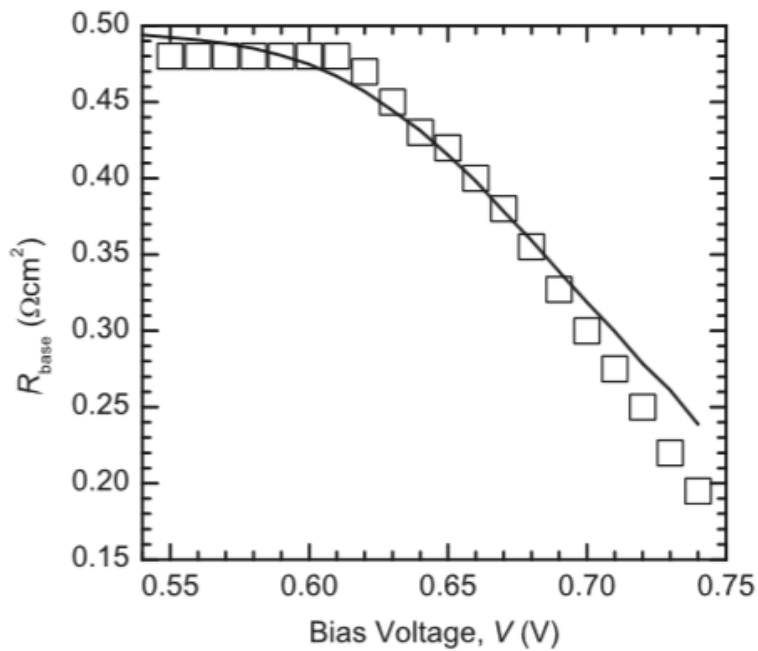


Fig. 5.9: Dependencia experimental de resistencia de base respecto la tensión de polarización [26].

Las medidas de datos experimentales realizados en la Fig. 5.7 y Fig. 5.8 han sido realizadas dentro del grupo MNT y concuerdan con las medidas realizadas en el apartado cuatro.

Realizando un ajuste de la resistencia de base obtenida mediante Espectroscopia de Impedancias con la fórmula de Fischer Ec. 5.4 [35] se consigue extraer de forma precisa el valor del radio del contacto. En este estudio pasa de 40  $\mu\text{m}$ . que se estipulaba por diseño a un valor de 33  $\mu\text{m}$ . extraído a partir de la medición de  $R_{\text{base}}$  y despejando el valor de radio de contacto a partir de Ec. 5.4. Este resultado es importante para conseguir determinar el pitch óptimo con el radio “real” fabricado en la célula solar.

## 6- Conclusiones y líneas futuras

El mercado actual de las células fotovoltaicas intenta reducir costes de producción fabricando células con estructuras cada vez más complejas para conseguir disminuir el grosor y aumentar al mismo tiempo el rendimiento. Esto se puede realizar disminuyendo los mecanismos de recombinación en la superficie, tanto frontal como posterior, mediante una buena pasivación. La pasivación de la superficie posterior con un óxido aislante y la extracción de los portadores minoritarios generados en el sustrato mediante contactos metálicos producen dichas estructuras complejas donde es muy importante estudiar cómo afectan a los factores de mérito para poder seguir optimizando su funcionamiento. En este sentido, las medidas por espectroscopia de impedancias, a diferencia de las medidas habituales en DC, permiten discernir las contribuciones de los diferentes elementos o capas que forman las estructuras.

Se ha comprobado que realizando medidas de impedancia mediante cables produce distorsión a frecuencias elevadas (>10 MHz) debido a elementos parásitos y que es en estas frecuencias donde se suelen observar las variaciones de impedancia debido a la pasivación del sustrato. Por este motivo, se han fabricado placas de circuito impreso específicas destinadas a poder medir por contacto cada tipología de célula, conectadas directamente al instrumento de medida. De esta forma se han realizado medidas de impedancia de gran precisión a células tipo PERC fabricadas en el grupo MNT.

A partir de la estructura de estas células se han propuesto tres modelos circuitales. El primer circuito equivalente más simple con una sólo RC ajusta las medidas a baja frecuencia donde se obtiene la resistencia dinámica del diodo y su capacidad de difusión. De estas medidas se puede obtener el factor de idealidad y el tiempo de vida efectivo. No contempla pero, la respuesta a alta frecuencia debido a la pasivación del sustrato posterior.

El segundo circuito equivalente con dos RCs conectadas en serie permite ajustar de forma global todo el comportamiento en frecuencia y obtener además la resistencia de base i la capacidad del óxido de pasivación. Este segundo circuito, no ajusta correctamente la resistencia de base. Es necesario incluir una resistencia en serie con el condensador del sustrato ( $R_2$ ) que modela el camino de los minoritarios para atravesar todo el "bulk" o bloque de la oblea desde emisor a base.

Aplicando este tercer circuito equivalente con  $R_2$ , se ha realizado un estudio en particular donde a partir de la extracción de la resistencia de base mediante medidas de impedancias y su ajuste posterior con la fórmula física propuesta por Fisher, permite extraer de forma precisa el radio del contacto laser realizado en el sustrato de la base para poder extraer la corriente. En particular, en este estudio se ha observado que de un radio estimado por interferometría de 40  $\mu\text{m}$ , se obtiene un radio eléctricamente activo de contacto real de 33  $\mu\text{m}$ . Dicha variación es causada por las imperfecciones en el perímetro de la realización del contacto por pulsos de láser, siendo complicado prever el acabado que tendrá en el material. Esta diferencia en el radio es muy importante ya que provoca una variación en la

distancia de pitch óptima, y es la primera línea futura inmediata a explorar.

Líneas futuras de investigación a medio plazo pueden ser continuar con el desarrollo de nuevos modelos, por ejemplo para incluir el efecto de la carga fija en el condensador de sustrato; realizar medidas a células solares con otras estructuras, como las interdigitadas, o con otros materiales de fabricación como células orgánicas o células CIGS.

Además, otra línea futura de investigación es la continuación del desarrollo de nuevas placas de medida que permitan medir a mayor frecuencia, con menor ruido, y sobretodo con luz para estudiar el comportamiento de las células autopolarizadas a 1 sun. Esto permitirá obtener nuevos resultados y avanzar en el conocimiento del funcionamiento de dichas células.

## 7- Bibliografía

- [1] S. Bowden y C. Honsberg, «PVEDUCATION.ORG,» [En línea]. Available: <http://www.pveducation.org/pvcdrom/appendices/standard-solar-spectra>.
- [2] H. Bend, «Sunlight Solar Spectrum,» [En línea]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Sunlight#/media/File:Solar\\_spectrum\\_en.svg](https://en.wikipedia.org/wiki/Sunlight#/media/File:Solar_spectrum_en.svg).
- [3] M. A. Green, «The future of crystalline silicon solar cells,» *Progress in Photovoltaics.: Research and applications*, nº Millenium Special Issue, pp. 127-139, 2000.
- [4] A. Li, «Interaction of nanoparticles with radiation,» de *ASP Conference Series Vol. 000*, Arizona, U.S., 2003.
- [5] S. W. Glunz, «High-Efficiency crystalline silicon cells,» *Advances in optoelectronics*, vol. DOI: <http://dx.doi.org/10.1155/2007/97370>, 2007.
- [6] M. A. Green, K. Emery, Y. Hishikawa, W. Warta y E. D. Dunlop, «Solar Cell efficiency tables (Version 45),» *Prog. Photovolt.: Res. Appl.*, vol. DOI: 10.1002/pip2573, nº 23, pp. 1-9, 2015.
- [7] Wikipedia, «Wikipedia: Solar Cell Efficiency,» [En línea]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Solar\\_cell#Efficiency](https://en.wikipedia.org/wiki/Solar_cell#Efficiency).
- [8] D. H. Neuhaus y A. Münzer, «Industrial silicon wfer solar cells,» *Advances in optoelectronics*, vol. 2007, p. DOI: <http://dx.doi.org/10.1155/2007/24521>, 2007.
- [9] A. Rehman y S. H. Lee, «Advancements in n-type base crystalline silicon solar cells and their emergence in the photovoltaic industry,» *The Sci. World journal*, vol. DOI: <http://dx.doi.org/10.1155/2013/470347>, 2013.
- [10] E. Barsoukov y J. R. McDonald, *Impedance Spectroscopy: Theory, Experiment, and Applications*, New York: Wiley-Interscience, John Wiley & Sons, Inc., 2005.
- [11] U. G. Kyle, I. Bosaeus, A. D. De Lorenzo, P. Deurenberg, M. Elia, J. M. Gomez, B. L. Heitmann, L. Kent-Smith, J. C. Melchior, M. Pirlich, H. Scharfetter, A. Schols y C. Pichard, *Clin. Nutr.*, nº 23, pp. 1226-1243, 2004.
- [12] M. S. Suresh, «Measurement of solar cell parameters using impedance spectroscopy,» *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, nº 43, pp. 21-28, 1996.
- [13] R. Anil Kumar, M. S. Suresh y J. Nagaraju, «Measurement and comparison of AC parameters of silicon (BSR and BSFR) and gallium arsenide (GaAs/Ge) solar cells used in space applications,» *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, nº 60, pp. 155-166, 2000.
- [14] F. Fabregat-Santiago, J. Bisquert, G. García-Belmonte, G. Boschloo y A. Hagfeldt, «Influence of electrolyte in transport and recombination in dye-sensitized solar cells studied by impedance spectroscopy,» *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, nº 87, pp. 117-131, 2005.
- [15] F. Fabregat-Santiago, G. García-Belmonte, I. Mora-Seró y J. Bisquert, «Characterization of nanostructured hybrid and organic solar cells by impedance spectroscopy,» *Phys. Chem.*, nº 13, pp. 9083-9118, 2011.
- [16] I. Mora-Seró, G. García-Belmonte, P. P. Boix, M. A. Vazquez y J. Bisquert, «Impedance spectroscopy characterization of highly efficient silicon solar cells under different light illumination intensities,» *Energy Environ. Sci.*, nº 2, pp. 678-686, 2009.
- [17] G. García-Belmonte, J. García-Cañadas, I. Mora-Seró, J. Bisquert, C. Voz, J. Puigdollers y R. Alcubilla, «Effect of buffer layer on minority carrier lifetime and

series resistance of bifacial heterojunction silicon solar cells analyzed by impedance spectroscopy,» *Thin Solid Films*, nº 514, pp. 254-257, 2006.

- [18] D. J. Crain, J. E. Garland, S. E. Rock y D. Roy, «Quantitative characterization of silicon cells in the electro-analytical approach: combined measurements of temperature and voltage dependent electrical parameters,» *Anal. Methods*, nº 4, pp. 106-117, 2012.
- [19] D. J. Crain, S. E. Rock, J. E. Garland y D. Roy, «Comparison of D.C. and A.C. electro-analytical methods for measuring diode ideality factors and series resistances of silicon solar cells,» *Curr. Appl. Phys.*, nº 13, pp. 2087-2097, 2013.
- [20] S. Kumar Vandana, C. Rauthan, V. K. Kaul, N. Singh y P. K. Singh, «Spectral and injection level dependence of recombination lifetimes in silicon measured by impedance spectroscopy,» *IEEE J. Photovolt.*, nº 4, pp. 380-386, 2014.
- [21] E. Scheneidorlöchner, R. Preu, R. Lüdemann y W. Glunz, «Laser-fired rear contacts for crystalline silicon solar cells,» *Prog. Photovolt.: Res. Appl.*, nº 10, pp. 29-34, 2002.
- [22] P. Ortega, A. Orpella, I. Martín, M. Colina, G. Lopez, C. Voz, M. I. Sánchez, C. Molpeceres y R. Alcubilla, «Laser-fired contact optimization in c-Si solar cells,» *Prog. Photovolt.: Res. Appl.*, nº 20, pp. 173-180, 2012.
- [23] J. Zhao, A. Wang, P. P. Altermatt, S. R. Wenham y M. A. Green, «24% Efficient per silicon solar cell: recent improvements in high efficiency silicon cell research,» *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, nº 41, pp. 87-99, 1996.
- [24] M. A. Green, J. Zhao, A. Wang y S. R. Wenham, «Very high efficiency silicon solar cells - science and technology,» *IEEE Trans. Electron Devices*, nº 46 (10), pp. 1940-1947, 1999.
- [25] P. Ortega, I. Martín, G. Lopez, M. Colina, A. Orpella, C. Voz y R. Alcubilla, «P-type c-Si solar cells based on rear side laser processing of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiC<sub>x</sub> stacks,» *Sol. Energy Mater. Col. Cells*, nº 106, pp. 80-83, 2012.
- [26] A. Orpella, I. Martín, J. M. López-González, P. Ortega, J. Muñoz, D. C. Sinde, C. Voz, J. Puigdollers y R. Alcubilla, «Experimental determination of base resistance contribution for point-like contacted c-Si solar cells using impedance spectroscopy analysis,» *Solar Energy Materials and Solar Cells*, nº 141, pp. 350-355, 2015.
- [27] W. Pflöging, A. Ludwig, K. Seemann, R. Preu, H. Mäckel y S. W. Glunz, «Laser micromachining for applications in thin film technology,» *Appl. Surf. Sci.*, nº 154-155, pp. 521-527, 2000.
- [28] P. Engelhart, S. Hermann, T. Neubert, H. Plagwitz, R. Grischke, R. Meyer, U. Klug, A. Schoonderbeek, U. Stute y R. Brendel, «Laser ablation of SiO<sub>2</sub> for locally contacted Si solar cells with ultra-short pulses,» *Prog. Photovolt.: Res. Appl.*, nº 15, pp. 521-527, 2007.
- [29] J. He, S. Hegedus, U. Das, Z. Shu, M. Bennett, L. Zhang y R. Birkmire, «Laser-fired contact for n-type crystalline Si solar cells,» *Prog. Photovolt.: Res. Appl.*, p. DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/pip.2520>, 2014.
- [30] B. Steinhauser, U. Jäger, J. Benick y M. Hermle, «PassDop rear side passivation based on Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/a-SiC<sub>x</sub>:B stacks for p-type PERL solar cells,» *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, nº 131, p. 129, 2014.
- [31] U. Jäger, D. Suwito, J. Benick, S. Janz y R. Preu, «A laser based process for the formation of a local back surface field for n-type silicon solar cells,» *Thin Solid Films*, nº 519, pp. 3827-3830, 2011.



- [32] I. Martín, M. Colina, A. Orpella, C. Voz, S. De Vecchi, T. D. Esrues, S. Abolmazov, P. Roca i Cabarrocas y R. Alcubilla, «Low recombination  $n^+$  regions created by  $n^+$  c-Si epitaxial layers and laser processing of phosphorous-doped SiCx films,» *Proceedings of the 27th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, pp. 1519-1523, 2014.
- [33] K. Kotsovos y K. Misiakos, «Three-dimensional simulation of carrier transport effects in the base of rear point contact silicon solar cells,» *J. Appl. Phys.*, nº 89, pp. 2491-2496, 2001.
- [34] M. Zanucoli, R. De Rose, P. Magnone, E. Sangiorgi y C. Fiegna, «Performance analysis of rear point contact solar cells by three-dimensional numerical simulation,» *IEEE Trans Electron Devices*, nº 59, pp. 1311-1319, 2012.
- [35] B. Fischer, «Loss analysis of crystalline silicon cells using photoconductance and quantum efficiency measurements,» (*Ph.D. thesis*) University of Konstanz, 2003.
- [36] H. Plagwitz y R. Brendel, «Analytical model for the diode saturation current of point-contacted solar cells,» *Prog. Photovolt.: Res. Appl.*, nº 14, pp. 1-12, 2006.
- [37] P. Saint-Cast, M. Rüdiger, A. Wolf, M. Hofmann, J. Rentsch y R. Preu, «Advanced analytical model for the effective recombination velocity of locally contacted surfaces,» *J. Appl. Phys.*, nº 108, p. 013075, 2010.
- [38] K. C. Fong, K. R. McIntosh y A. W. Blakers, «Accurate series resistance measurements of solar cells,» *Prog. Photovolt.: Res. Appl.*, nº 21, pp. 490-499, 2013.
- [39] J. M. López-González, I. Martín, P. Ortega, A. Orpella y R. Alcubilla, «Numerical simulations of rear point-contacted solar cells on 2.2  $\Omega$  cm p-type c-Si substrates,» *Prog. Photovolt.: Res. Appl.*, nº 23, pp. 69-77, 2014.
- [40] J. Bisquert, G. García-Belmonte, F. Fabregat-Santiago y F. R. Bueno, «Theoretical models for ac impedance of finite diffusion layers exhibiting low frequency dispersion,» *J. Electroanal. Chem.*, nº 475, pp. 152-163, 1999.
- [41] I. Mora-Seró, Y. Luo, G. García-Belmonte, J. Bisquert, D. Muñoz, C. Voz, J. Puigdollers y R. Alcubilla, «Recombination rates in heterojunction silicon solar cells analyzed by impedance spectroscopy at forward bias and under illumination,» *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, nº 92, pp. 505-509, 2008.
- [42] R. D. Brooks y H. G. Mattes, «Spreading resistance between constant potential surfaces,» *Bell Sys. Techn. J.*, nº 50 (3), p. 775, 1971.
- [43] R. H. Cox y H. Strack, «Ohmic contacts for GaAs devices,» *Sol. State El.*, nº 10, p. 1213, 1967.
- [44] P. Ortega, G. López, A. Orpella, I. Martín, M. Colina, C. Voz, S. Bermejo, J. Puigdollers, M. García y R. Alcubilla, «Crystalline silicon solar cells beyond 20% efficiency,» *Proceedings of the 8th IEEE Spanish Conference on Electron Devices*, p. 5744231, 2011.
- [45] A. Roigé, J. Alvarez, J. P. Kleider, I. Martín, R. Alcubilla y L. F. Vega, «Microscale spatially resolved characterization of highly doped regions in laser-fired contacts for high-efficiency crystalline Si solar cells,» *IEEE J. Photovolt.*, nº 5, pp. 545-551, 2015.
- [46] A. Bautista Hernández y M. Salazar Villanueva, «Resistencia mecánica ideal de C, Si y Ge con estructura cúbica: un estudio de primeros principios,» *Revista Mexicana de Física*, nº 57, pp. 388-394, 2011.
- [47] J. E. Garland, D. J. Crain y D. Roy, «Impedance spectroscopy coupled with voltammetry for quantitative evaluation of temperature and voltage dependent

- parameters of a silicon solar cell,» *Solar Energy*, nº 85, pp. 2912-2923, 2011.
- [48] «National Renewable Energy Laboratory,» [En línea]. Available: <http://rredc.nrel.gov/solar/spectra/am1.5/>.
- [49] M. B. F., «Level 5: A knowledge for Extragalactic Astronomy and Cosmology,» NASA's Applied Information Systems Research Program (AISRP), [En línea]. Available: <http://ned.ipac.caltech.edu/level5/>.
- [50] G. Sun, «The Intersubband Approach to Si-based Lasers,» InTech, [En línea]. Available: <http://www.intechopen.com/books/advances-in-lasers-and-electro-optics/the-intersubband-approach-to-si-based-lasers>.
- [51] «National Renewable Energy Laboratory,» NREL, [En línea]. Available: [http://www.nrel.gov/ncpv/images/efficiency\\_chart.jpg](http://www.nrel.gov/ncpv/images/efficiency_chart.jpg).
- [52] «Photonics Spectra,» [En línea]. Available: <http://www.photonics.com/Article.aspx?AID=31368>.
- [53] L. Prat Viñas y J. Calderer Cardona, *Dispositius electrònics i fotònics. Fonaments*, Barcelona: Edicions UPC, 2001.
- [54] S. López López, «Fabricación de emisores para células solares a partir del depósito por plasma y recocido posterior de capas amorfas de carbonitruro de silicio,» Proyecto Final de Carrera, 2015.
- [55] «Research @ the Solar Energy Group. Photovoltaics Research,» The University of Sidney, [En línea]. Available: <http://www.physics.usyd.edu.au/app/solar/research/pv.html>.
- [56] R. M. Swanson, «A vision for crystalline silicon photovoltaics,» *Special Issue: PV crystal-gazing: the next ten years for solar cells.*, vol. 14, nº 5, pp. 443-453, 2006.
- [57] J. R. Macdonald y E. Barsoukov, *Impedance Spectroscopy Theory, Experiment, and Applications*, John Wiley & Sons, Inc, 2005.
- [58] S. M. Sze, de *Physics of Semiconductor devices*, John Wiley & Sons, 1969, pp. 640-653.

## 8- Apéndices

### 8.1-Diseño primera placa

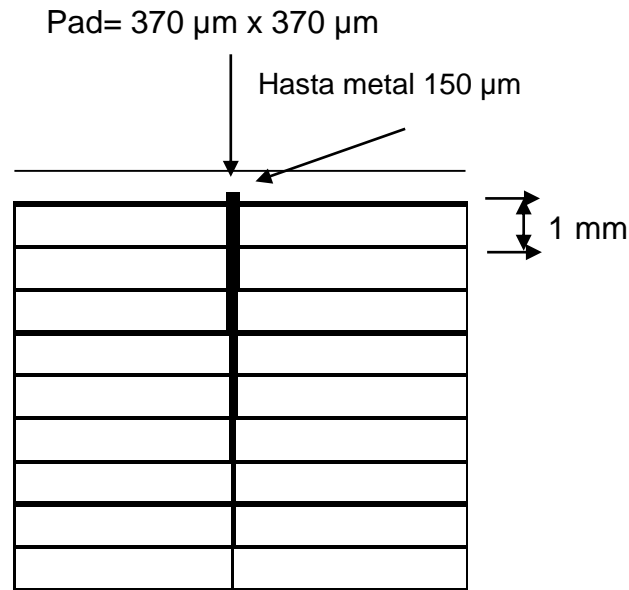
#### 8.1.1- Diseño

El diseño de la primera placa fue en sí el más complejo. Es en el primer diseño en el que se incorporó la posibilidad de medición de células interdigitadas con iluminación por una cara y conexiones en la otra cara de la célula. Finalmente se optó por la medición de células de  $1\text{cm}^2$  y poder analizar las medidas obtenidas, se deja la posibilidad de medir células interdigitadas como posibilidad para continuar con el presente trabajo.

El primer paso del diseño fue obtener las medidas de las células para realizar un boceto de la distribución sobre la placa de medida y poder aprovechar al máximo el área de la placa. Se incluyó la posibilidad de que la placa se complementase con otra igual pero invertida en colocación a modo de sándwich para realizar las medidas de las células de  $1\text{cm}^2$ . Una placa mediría la parte Top o de emisor de la célula por la que recibe la luz y la otra placa la parte Bottom o base siendo la que contactaría con la parte posterior de la célula o de sombra. Dado que por las dimensiones de la placa cabía la posibilidad de poder incluir la medida de dos células a cada costado de la zona central definida ya para la célula interdigitada se decidió incluirlo en el diseño. El contrapunto de esta posibilidad es que se debe aislar la parte que no se utilice o bien utilizarlo para medir dos células a la vez en paralelo ya que podía ser interesante para el estudio en cuanto al conexionado en paralelo que se realiza en los paneles solares. La opción de realizar medidas de células separadas no se llegó a realizar porque la oblea de mediciones no se separó en células individuales como se planteó inicialmente debido al riesgo de rotura de las células prototipo en la separación.

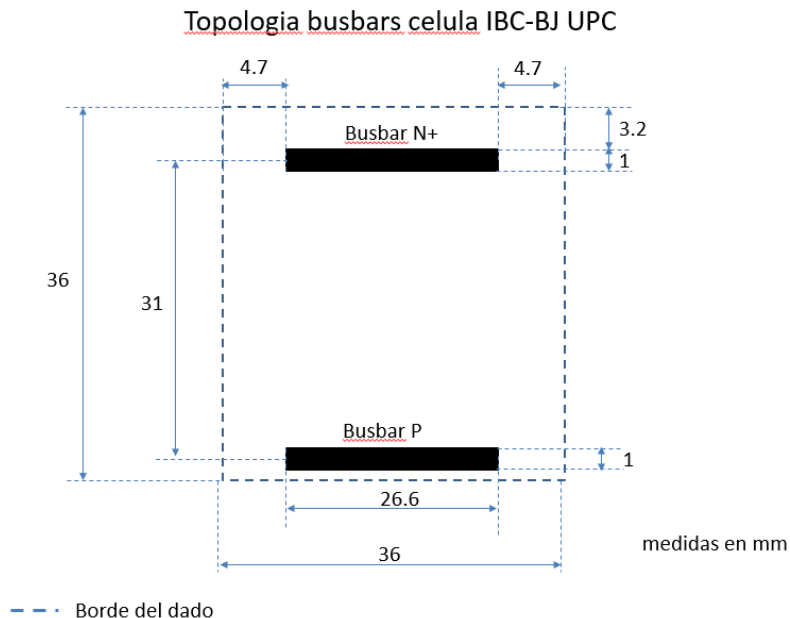
Para la célula pequeña utilizada las medidas son las mostradas en la Figura 8.1 con lados de 1 cm. y separación de  $150\mu\text{m}$ . con el acabado metálico de alrededor de la célula debido al proceso de fabricación. En el diseño de la misma célula solar se designó un pad de  $370\mu\text{m}$ . de lado sobre el mismo colector principal del emisor de la célula. Éste fue uno de los puntos más complejos del diseño de las placas para lograr contactar en este punto sin tocar otras partes y evitar un cortocircuito o falso contacto

Las placas se sujetan entre sí mediante unos tornillos pasantes que se aprietan con tuercas tipo palomilla para ser más sencillo la manipulación. Este punto cambió al no poderse realizar en todos los puntos al mantener la oblea entera con las células a medir sin cortar.



**Fig. 8.1: Medidas de célula solar bifacial (UPC – MNT).**

La célula interdigitada incorporada en la placa de medición es más grande que la célula bifacial medida pues es de 36 x 36 mm. de lado. Debido a su tamaño y que requiere de una tapa puesta sobre la placa se decidió poner en el centro de la placa. Los contactos también son mayores y más fáciles de centrar para la realización de medidas. En la Fig. 8.2 se muestra el esquema de medidas este tipo de célula solar.



**Fig. 8.2: Medidas de célula solar interdigitada (UPC- MNT).**

El diseño eléctrico es simple ya que la placa realiza la función de interfaz entre la oblea contactando directamente sobre la célula solar a medir y los bornes de conexión a los cables

de medición. Para los cables se decidió incluir un bornero estándar para conectores de tipo banana habitual en los laboratorios de 4mm. de diámetro. Además para mejorar la conexión eléctrica y evitar pérdidas por resistencias de contacto se añadió la posibilidad de conectar el cable apantallado fabricado para la mejora de las mediciones con conexión de tipo terminal plano que se pudiera apretar sobre en la placa de medición de la célula solar. La otra punta del cable tiene una conexión BNC hembra como requerido por la máquina de medición. La conexión tipo arandela del cable se conecta a la placa directamente al bornero de tipo banana por la parte exterior del mismo sobre otra arandela que está soldada al bornero y a la placa, apretado por una tuerca del mismo métrico que el bornero. Esta conexión reduce al mínimo las posibles pérdidas por resistencia.

La conexión de la máquina de medida es directa sobre los bornes de la placa, dos para la corriente de inyección y dos para la medida de la impedancia resultante. En el caso de la célula solar interdigitada el contacto con la placa de circuito impreso conexiones se realizan sobre una misma placa. En cambio para la célula pequeña que tiene los contactos a dos caras se conectarán dos cables a una placa y los otros dos en la otra para cerrar el circuito creado entre las dos placas que contactan con la célula. Estas conexiones por parejas son la de inyección de corriente y medición de tensión positiva y la otra pareja de conexiones son la de salida de corriente y medición de tensión negativa, que son las 4 conexiones necesarias para realizar una medición a 4 puntas.

El esquema eléctrico se realizó con el programa OrCAD así como el diseño posterior de la placa. El nombre que se le dio es de IB-1 referente a Impedance Base-1. El esquema conecta los dos tipos de placa (grande y pequeña) a los mismos puntos para cara top o de emisor o bottom con la base de la célula bifacial. Para evitar pedir más placas se optó por juntarlas por parejas habilitando una zona de separación entre ambas. Para ello el esquema aparece como duplicado con la placa 1 y la placa 2. En diseño son esencialmente la misma placa en forma y conexiones pero sirve además para diferenciar qué puntas se conectan según qué parte se use para medir al diferenciarse como placa 1 y 2. Se muestra el esquema eléctrico en la Fig. 8.3 con los iconos del programa referentes para los dos tipos de célula: célula A y célula B; siendo la B la de menor tamaño y utilizada en el análisis.

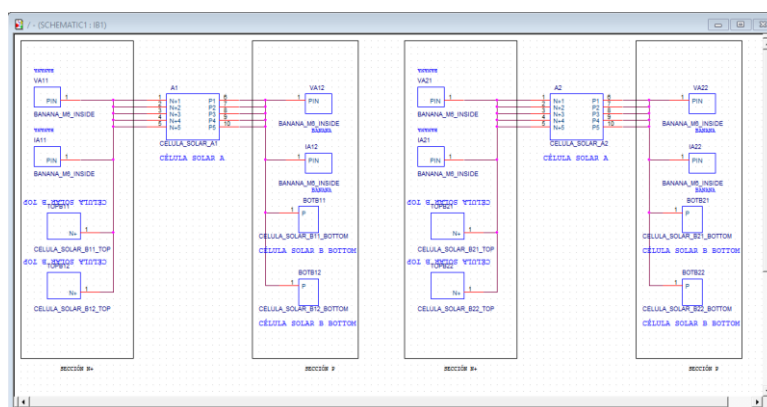


Fig. 8.3: Captura del Esquema eléctrico del diseño de la placa de circuito impreso.

Al incorporar la geometría de las células solares se realizaron nuevos componentes en la base de datos al ser tan específicos. Para las células se generaron los componentes específicos mostrados en Fig. 8.4 con la geometría exacta según sus medidas y el requerimiento de apertura para la célula tipo B al requerir dos contactos diferenciados: la base con zona de cobre para su contacto (Celula solar B Bottom) y el emisor o zona de iluminación (Célula solar B Top). La célula solar A se corresponde con la interdigitada y tiene ambos contactos en una sola cara (Célula solar A). Para el bornero de conexión se utilizó el componente generado: Banana\_M6\_Inside con la mejora de incluir metalizado dentro del propio agujero para el bornero sirviendo de mejor sujeción a la placa además de disminuir la resistencia eléctrica.

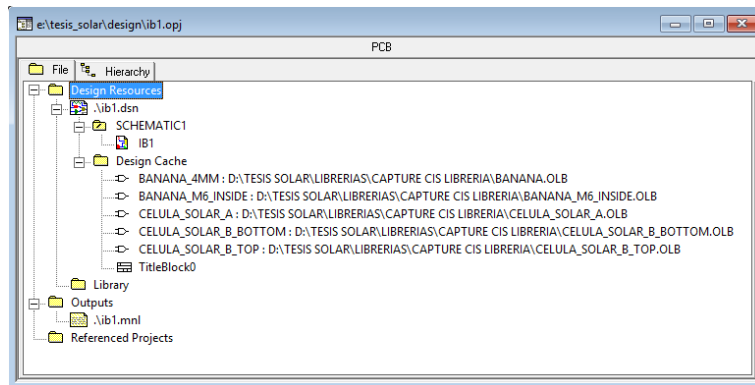


Fig. 8.4: Plantillas de componentes de diseño.

El diseño de las placas en la parte del programa dedicado al diseño del propio circuito impreso requirió de un trabajo similar, creando librerías específicas para los diferentes componentes creados en el diseño eléctrico. Se colocaron los componentes aprovechando el espacio al máximo posible ya que el coste de fabricación va ligado directamente al área de la placa. Se tuvo en cuenta que la placa se debía solapar con otra igual para poder medir las células pequeñas y que los bornes no debían entorpecer la colocación. En las siguientes figuras se muestran la cara Top del diseño (Fig. 8.5) y la cara bottom (Fig. 8.6).

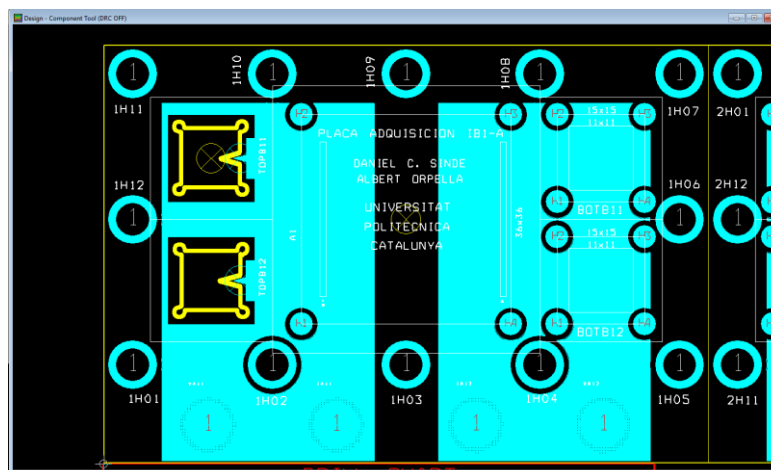


Fig. 8.5: Cara Top del diseño de la placa.

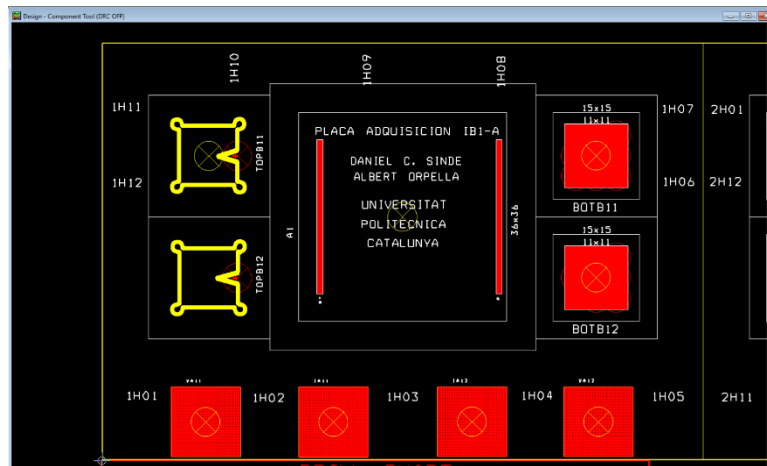


Fig. 8.6: Cara Bottom del diseño de la placa.

Para apreciar mejor la distribución utilizada de las células sobre la placa de circuito impreso se omiten las capas de cobre de las imágenes anteriores y se dejan sólo los contornos en la Fig. 8.7.

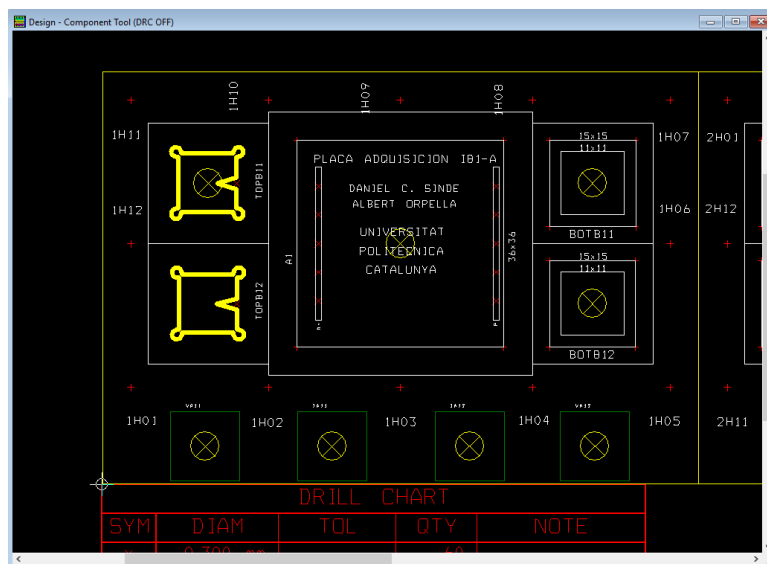


Fig. 8.7: Contornos de posición de las células solares en placa.

El diseño no fue excesivamente complejo en cuanto a conexiones eléctricas pero por el contrario fue en su colocación y distribución sobre la placa lo que requirió de más cuidado y atención para lograr que al sobreponerse las placas éstas quedasen alineadas correctamente y coincidiesen los puntos de contacto sobre las zonas de interés de las células bajo estudio. El punto de contacto de la cara Top de la célula bifacial fue el más complejo de generar, ya que al ser dimensiones tan escasas y que además la apertura de iluminación de la placa no hiciera sombra sobre la iluminación de la célula se tuvo que ajustar al límite de las restricciones de diseño del circuito impreso.



### 8.1.2- Fabricación

La fabricación corrió a cargo de una empresa especializada en realización y entrega de prototipos. El acabado que se requirió fue de oro superficial para mejorar el contacto eléctrico tanto de los bornes que luego se soldarían como las zonas que tocarían las células solares. De este modo se consigue que el cobre que forma parte de la placa no se oxide o deteriore en las zonas que está expuesto. Las capa aislante o solder resist es del estándar habitual en cuanto a grosor y color (verde). Se añadió la opción de serigrafía blanca con el nombre de los componentes (células en este caso) para identificarlos sobre la placa. Se muestra la cara fabricada como Top en la Fig. 8.8 y la cara Bottom en la Fig. 8.9.

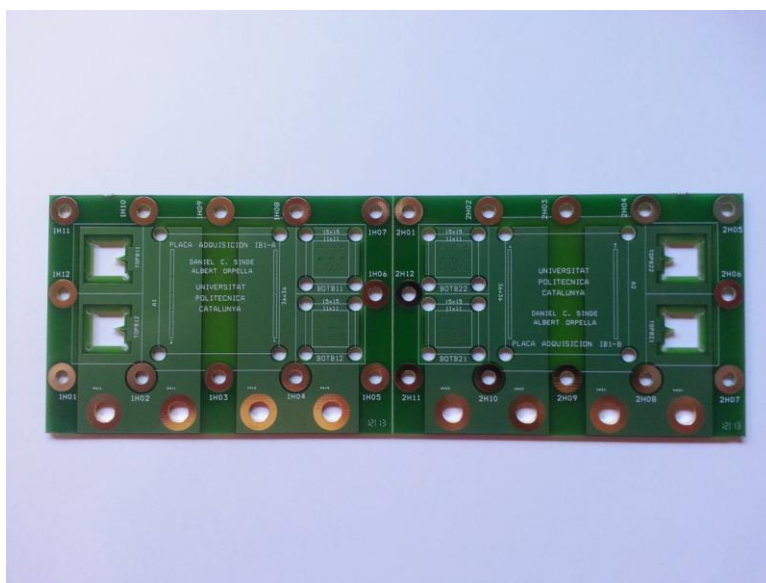


Fig. 8.8: Cara top de placa primer prototipo.

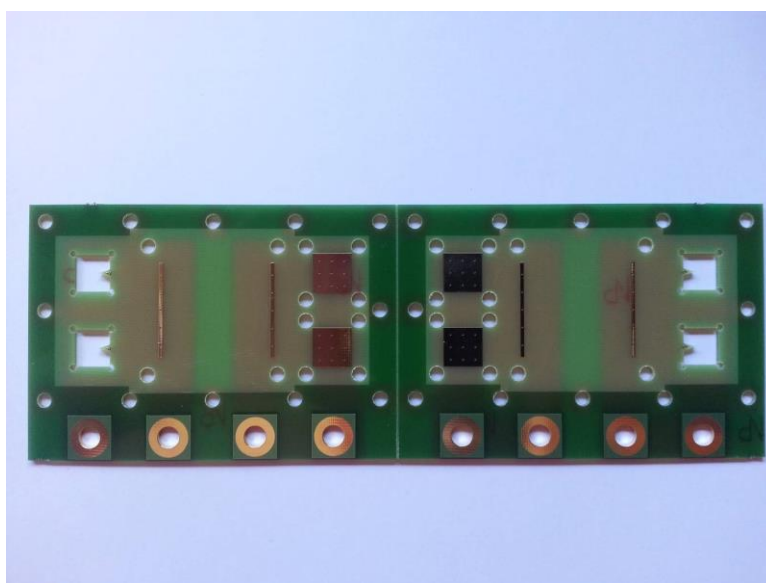


Fig. 8.9: Cara bottom de placa primer prototipo.

### 8.1.3- Montaje

El montaje principal de las placas fue correcto aunque se tuvieron que hacer algunos ajustes como suele pasar en los prototipos. Los conectores de tipo banana, ver Fig. 8.10, añadían más anchura si se montaba la parte plástica de diferentes colores que servía para diferenciar los diferentes bornes. Además se incluyó en el montaje las arandelas de latón para utilizar con los terminales de los cables como mejor superficie de contacto y reducir al máximo la resistencia eléctrica.

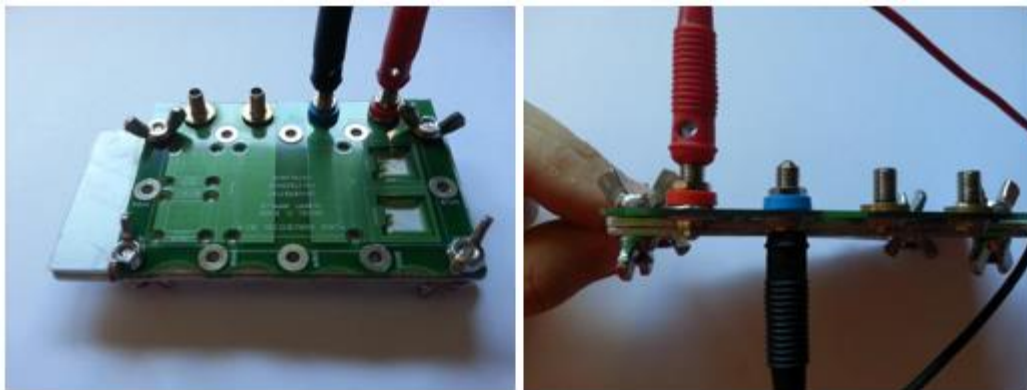
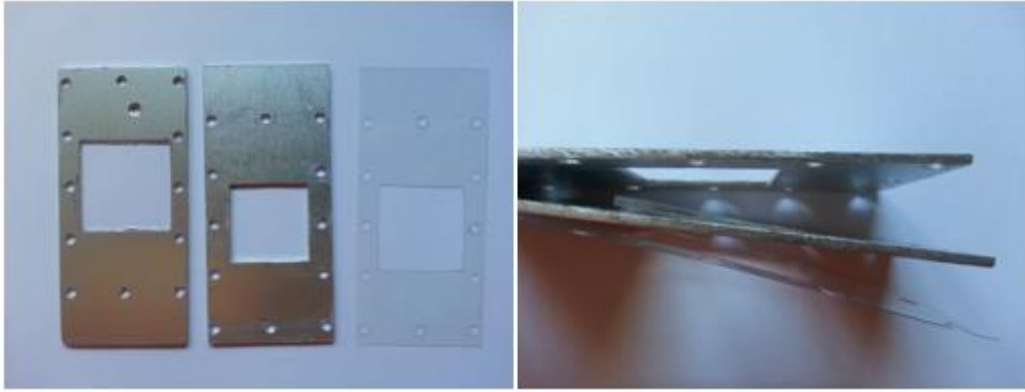


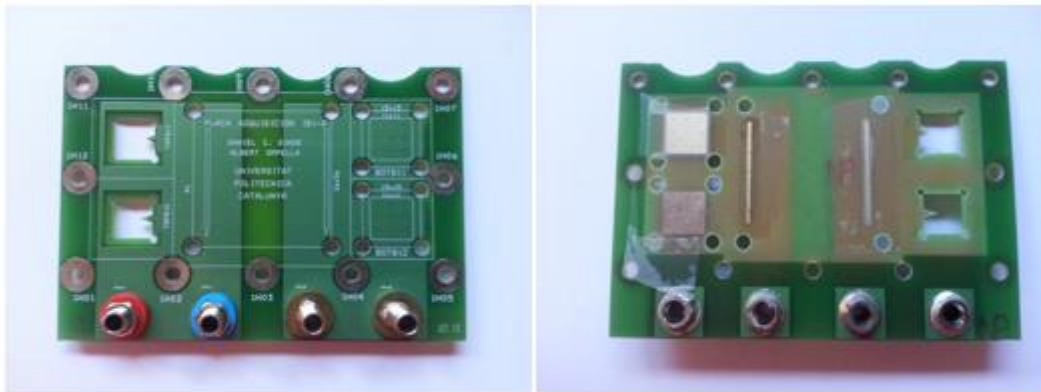
Fig. 8.10: Fotos de placa primer prototipo con conexiones.

Las conexiones de tipo banana para las sondas de la máquina se contemplaron para que se pudieran conectar bidireccionalmente ya que las placas se deben solapar para poder realizar la medida de las células de pequeño tamaño. Para evitar cortocircuitos entre zonas que no se utilizan en la medición se colocó cinta de plástico o aislante.

Para las células grandes de contactación por un único lado (interdigitadas) se ha construido un útil con las medidas adecuadas para sujetar la célula con un plástico aislante que evite cortocircuito con la misma célula y útil metálico. El útil metálico (Fig. 8.11) está compuesto a su vez de dos partes, la que sujeta el cristal especial que retiene en posición la célula solar de tamaño 36x36mm. y la que evita que se salga dicho cristal de la primera pieza y acaba reteniendo todo el conjunto para la medición. En resumen es como un sándwich con célula solar en medio y placa de medición a un lado y útil metálico al otro. Se realizó una plantilla de plástico para suplir el grosor de la célula solar y evitar deteriorarla al apretar el útil metálico.



**Fig. 8.11: Detalle de útil para sujeción de células interdigitadas en placa primer prototipo.**



**Fig. 8.12: Detalle de 2 placas de primer prototipo funcionales.**

La unión de las dos placas para la medición de las celulares solares ha sido uno de los puntos que han forzado a la creación de los posteriores modelos de placa de medida. Esto es debido a que la presión ejercida sobre la oblea era difícil de controlar y podía crear microrroturas que afectarían a la célula solar y por ende a la medida. Además el tamaño de la oblea y los bornes de contacto para el cableado no facilitaba la medida de la oblea de silicio entera de 10cm. de diámetro (ver Fig. 8.13). La unión entre placas de circuitos estaba planteada a realizarse con tornillos y palomillas (ver Fig. 8.14) para su fácil manipulación y apriete manual. Inicialmente se había contemplado con la idea de que las mediciones se realizarían con las células separadas de la oblea, pudiéndolas ajustar alineando las esquinas de las células con el centro de los agujeros en las esquinas de las ventanas de iluminación de las placas.

Finalmente se optó por no dividir las células de la propia oblea y se usaron pinzas de presión para sujetar la oblea entera en posición, requiriendo muchos ajustes para evitar falsos contactos en las mediciones además del planteamiento real de un siguiente prototipo de medición más acorde a esta forma de medición. Se debía soportar la oblea entera durante la medición y sólo medir una célula concreta cada vez.

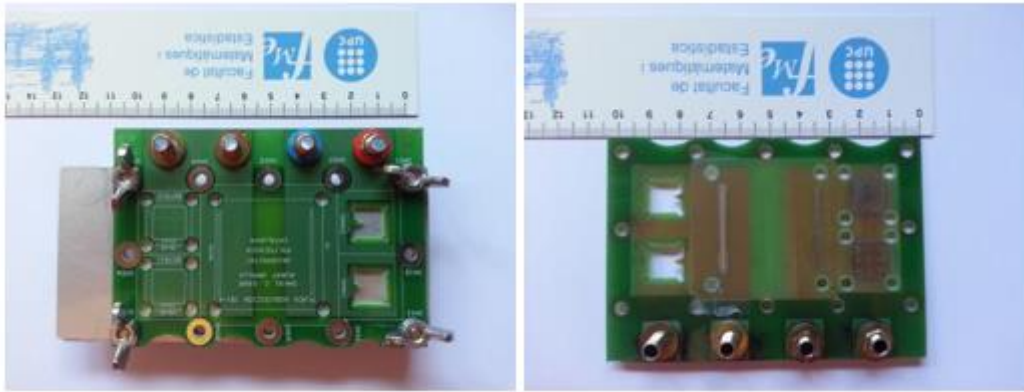


Fig. 8.13: Fotos con referencia de tamaño de placa de primer prototipo.



Fig. 8.14: Fotos de detalle de unión tornillo-palomilla.

#### 8.1.4- Cableado

El cableado inicialmente se contempló a realizar con los cables típicos de laboratorio BNC-bananas ya que su conexión con la máquina y borneros de tipo banana es el más sencillo y fiable. El problema radicó en que ya se había contemplado que su respuesta frecuencial a alta frecuencia podía no ser suficiente y se incluyó en el diseño de las placas la posibilidad de usar un cableado apantallado mejor respecto a las interferencias y comportamiento a altas frecuencias. El cableado escogido es el de un cable de transmisión de vídeo con bajas pérdidas de propagación y apantallamiento completo al 100% con malla y plástico conductor.

El montaje de cada set de cable (4 al ser de 4 puntas) se realizó con un extremo con terminal atornillable a la placa para garantizar una conexión eléctrica óptima y otro extremo con conexión acodada rotacional de tipo BNC para la máquina. Las soldaduras, apantallamientos de masa y protecciones aislantes se realizaron cuidadosamente para evitar cualquier fuga o interferencia.

El funcionamiento de los cables fue correcto con la placa excepto que introducían efecto parásito inductivo en las mediciones que alteraban la medida. La compensación de la máquina podía compensar los efectos de pérdidas óhmicas del cable y en gran parte la

capacidad parásita del mismo, pero en alta frecuencia se hacía notar el efecto inductivo predominantemente sobre la medición siendo de especial interés dicha medición en alta frecuencia para poder estudiar la segunda forma que se presentaba en altas frecuencias del modelo teórico en estudio.

El siguiente paso en este caso fue la opción ineludible de conectar directamente la placa de medición junto con oblea directamente a la máquina para evitar cualquier interferencia o fuga durante la medición.

En las Figuras 8.15 y 8.16 se muestra el montaje del extremo conectado a la placa de test y en la Figura 8.17 el montaje del conector BNC que se conecta directamente a la máquina de medición.



**Fig. 8.15: Fotos montaje de extremo terminación de cable de conexión.**



**Fig. 8.16: Detalle soldadura de terminación de cable de conexión.**

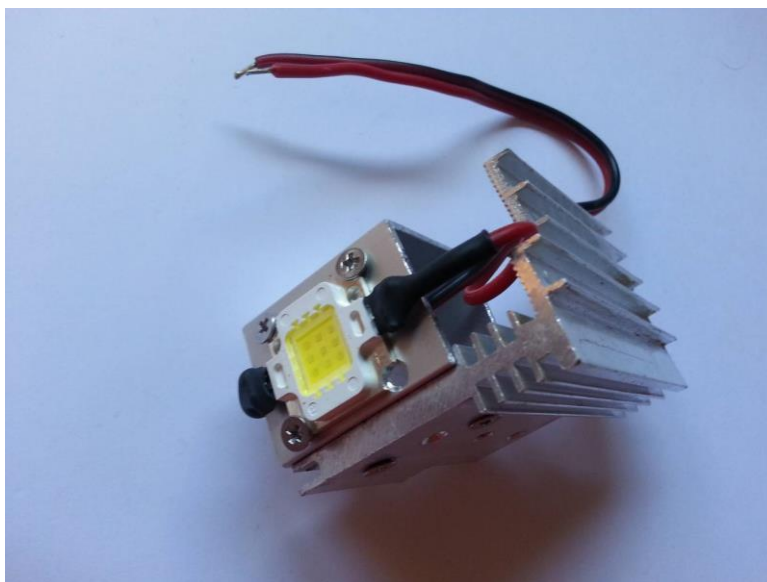




Fig. 8.17: Detalle de montaje conexión BNC del cable de conexión.

### **8.1.5- Fabricación útil iluminación por led de alta potencia**

Para poder evaluar el comportamiento de las células con iluminación se realizó un prototipo de iluminación por LED de alta potencia con disipador de aluminio para disipar el calor generado el mismo. El LED escogido (Fig. 8.18) es de color blanco frío siendo de los más parecidos al espectro del Sol. Como consideración futura se puede considerar el estudio del comportamiento de las células con luz producida por LED o por una fuente de 1 Sol calibrada.



**Fig. 8.18: Led de alta potencia con disipador montado.**

### **8.1.6- Resultados**

Los resultados han resultado bastante aproximados a los teóricos excepto en altas frecuencias por el efecto inductivo introducido por los cables y por la diferencia de escala que introducía el propio equipo de medida Agilent 4294A. Para poder solucionar estos problemas en la medición se decide continuar con el diseño y fabricación de un segundo prototipo de placa de medición.

## **8.2-Diseño de segunda placa**

### **8.2.1- Diseño**

El diseño se ha enfocado a conectar directamente la placa a la máquina de medida para evitar los efectos parásitos introducidos por los cables y poder realizar las mediciones de forma más precisa.

La placa de medición en este caso son dos placas realmente a modo sándwich con la oblea en medio. Las soldaduras y partes de contacto expuestas se han reforzado o montado con mayor sección procurando introducir el mínimo de resistencia en la medición.



### 8.2.2- Fabricación

La fabricación de esta placa es por proceso de revelado a partir de fotolito realizado en cartulina. Se ha usado cable de cobre esmaltado para unir las dos placas (fija a máquina y móvil con punta de prueba de cobre). En la parte donde se soporta la oblea para evitar diferencias de altura respecto la placa y la zona de contactación de la base de la célula en medición se añadió cinta aislante (ver Fig. 8.19) para suplir esta pequeña diferencia de grosores entre zona de contacto en cobre y resto de superficie de la placa. La base de la célula solar se realiza con un trozo de hoja de cobre. El contacto de la parte frontal de la célula solar con la placa se realiza con un trozo de hilo de cobre esmaltado soldado a la placa.

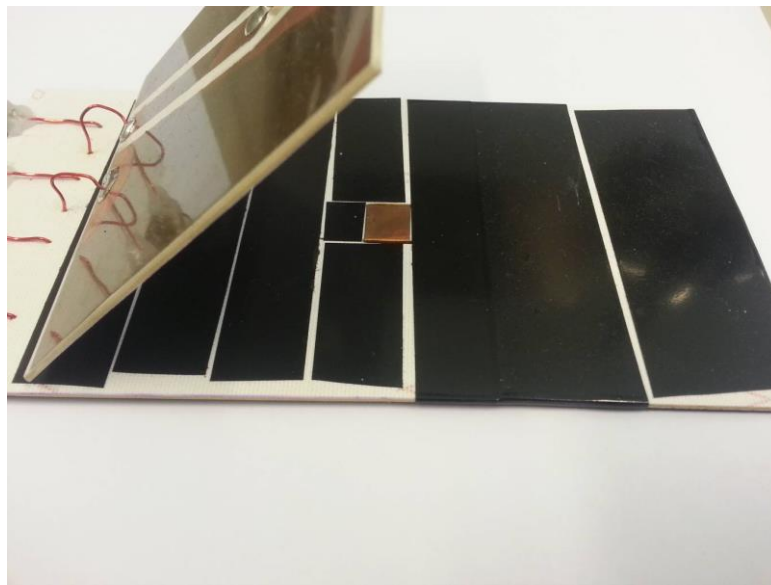


Fig. 8.19: Foto de zona de la oblea para el tercer diseño.

En el diseño se ha tenido en cuenta la masa o apantallamiento de la propia máquina para cubrir con planos de masa de cobre las zonas que no son señal a modo de escudo electromagnético para evitar posibles interferencias que pudieran afectar a las mediciones.

No se ha realizado el revelado de la capa fotosensible (color verdoso) en este prototipo para que sirviera de capa protectora al cobre que tiene debajo y evitar su oxidación o deterioro.

### 8.2.3- Resultados

Buenos resultados obtenidos al enchufar directamente la placa con la oblea a la máquina pero falta mejorar el soporte mecánico a la máquina y hacer más grande la placa para aguantar toda la oblea. El contacto por hilo de cobre soldado de la cara frontal de la célula solar no ofrece una solución óptima (si útil para realizar mediciones) como se sugiere para el contacto con una célula solar. Esto es determinante para el diseño y fabricación del tercer

prototipo de célula solar y poder mejorar el resultado de la medición.

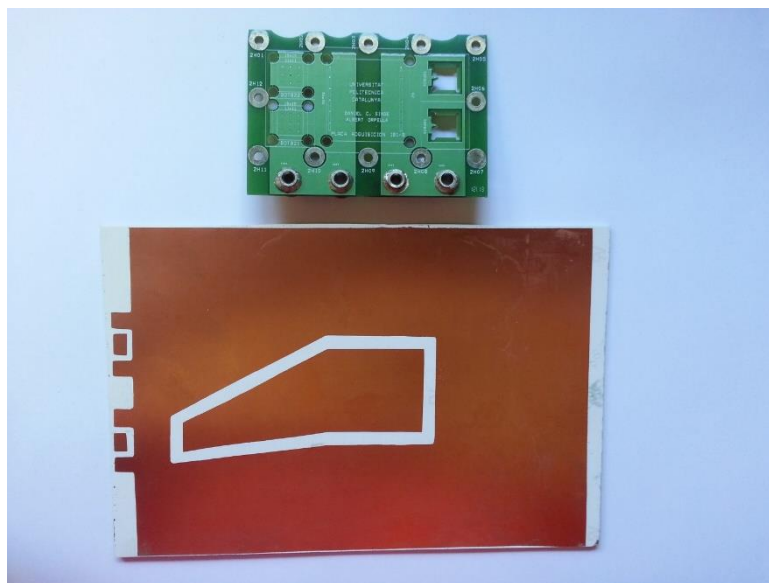
### **8.3-Diseño de tercera placa**

#### **8.3.1- Diseño**

El tercer diseño de placa de medición se ha realizado más grande para que cubra la mayor parte de la oblea además de incluir una punta de medición con punta compresible (muelle) de oro. Esta punta mejora el contacto al no ejercer una fuerza excesiva al comprimir las placas con pinzas de presión como sucedía en el prototipo anterior. Para este diseño ya se ha incluido un soporte para aguantar el propio peso de la placa de medición en la máquina y no forzar las conexiones BNC de la máquina. También se ha incluido un soporte en la propia placa ajustable en posición y fuerza de apretado contra la oblea para lograr disponer la punta en el punto óptimo de la célula a medir, mejorando los resultados de medición.

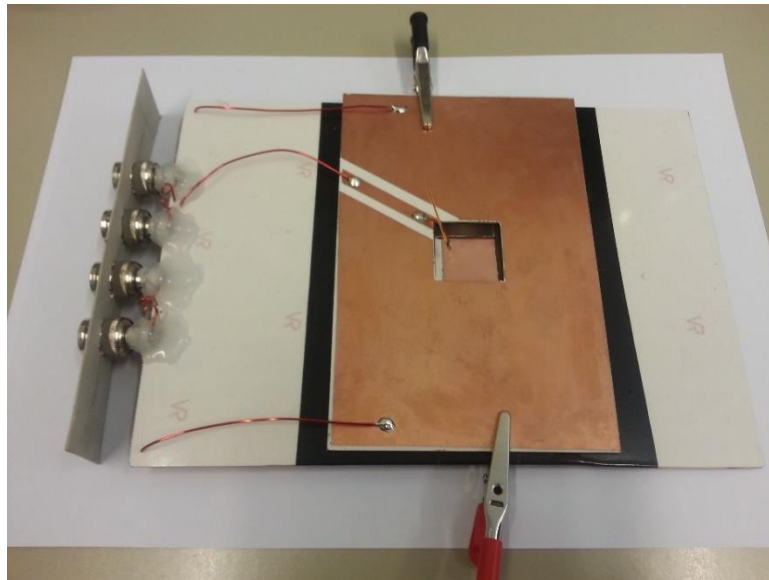
#### **8.3.2- Fabricación**

Fabricación igual en cuanto a fotolito y revelado de placa con diferencias de tamaño considerable respecto el primer tamaño (ver Fig. 8.20).



**Fig. 8.20: Comparación de tamaño entre primer y tercer diseño.**

En la Fig. 8.20 también se puede ver la placa inferior o base de la placa de medida con las zonas de soldadura de los conectores BNC en el lado izquierdo. La unión de la punta de prueba se ha realizado soldándola como el prototipo previo pero en este caso es necesario un soporte para sujetar la punta de prueba en posición (ver Fig. 8.21).



**Fig. 8.21: Tercer diseño con punta de prueba sin soporte.**

Se ha usado plástico para la fabricación de la estructura de soporte de la placa y el soporte para la punta de contacto de prueba. El soporte para la punta de prueba también permite el posicionamiento lateral de la punta sobre la oblea y el ajuste de la presión ejercida sobre la punta de prueba hacia la célula solar.

### **8.3.3- Resultados**

En este caso se han obtenido mejores resultados que con las placas diseñadas anteriormente, incluso mejor que con la inicial que se fabricó ex-proceso, ya que esta placa se ha diseñado solventando los problemas que se presentaban antes como el tamaño de placa (demasiado pequeña con peligro de partir oblea) y el uso de cables que introducían en la medición efectos parásitos no deseados entre otros problemas. El mayor tamaño de la placa favorece la colocación de la oblea en la posición correcta con menos ajustes permitiendo realizar la medición con mayor seguridad y buenos resultados.

Para de seguir teniendo buenos resultados de medición, en caso de requerir nuevos diseños de placas de medida, se partiría del diseño base utilizado en este último prototipo junto con el uso de la punta de test con acabado en oro y con la posibilidad de ajuste de posición.

## Glosario

- $A_L$**  Área de la célula iluminada.
- $C_1$**  Capacidad generada por la propia recombinación de la unión P-N
- $C_2$**  Capacidad que se genera por la recombinación de portadores en la BSF de la base.
- FF** Fill Factor. Factor de idealidad de células solares que compara la máxima potencia con valores máximos de cortocircuito y circuito abierto.
- $I_0$**  Corriente inversa de saturación.
- $I_M$**  Corriente en máxima potencia.
- $I_{sh}$**  Corriente de cortocircuito.
- $I_{sun}$**  Irradiancia solar.
- $J_0$**  Densidad de corriente en oscuridad.
- $J_{cell}$**  Densidad de corriente total de la célula con iluminación
- $J_L$**  Densidad de corriente generada por la iluminación.
- $n$**  Factor de idealidad de la célula solar.
- $\eta_{eff}$**  Eficiencia de captación de luz de la célula solar.
- $P_{célula}$**  Potencia obtenida por la célula solar en la conversión de energía.
- $P_{sun}$**  Potencia lumínica proporcionada por el Sol.
- $R_0$**  Resistencia de la célula solar referente a resistencias óhmicas y contactos.
- $R_1$**  Resistencia dinámica de célula solar de la propia unión P-N.
- $R_2$**  Resistencia de la célula solar del flujo de corriente que atraviesa oblea y región MIS.
- $R_{base}$**  Resistencia específica generada por la separación de los contactos de en el BSF de la base.
- $\rho_{sub}$**  Resistividad del sustrato de la oblea.
- $V_{oc}$**  Tensión en circuito abierto.
- $V_M$**  Tensión en máxima potencia.