

E.T.S. de Ingeniería Industrial,
Informática y de Telecomunicación

Integración de células solares fotovoltaicas de c-Si bifaciales



Máster Universitario en
Ingeniería Industrial

Trabajo Fin de Máster

Amaia Martínez de Narvajas Urra

Director: Idoia San Martín (UPNA)

Eugenia Zugasti (CENER)

Pamplona, 28/06/2018



ÍNDICE	PÁGINA
RESUMEN.....	10
1.- INTRODUCCIÓN	12
2.- METODOLOGÍA DE CARACTERIZACIÓN.....	13
2.1.- PERFILÓMETRO.....	13
2.2.- MICROSCOPIO ÓPTICO	14
2.3.- TIEMPO DE VIDA.....	15
2.4.- RESISTENCIA CAPA.....	15
2.5.- PSEUDOCURVA	16
2.6.- CURVA I-V.....	17
2.7.- TERMOGRAFÍA	18
2.8.- ELECTROLUMINISCENCIA	20
2.9.- RESPUESTA ESPECTRAL	22
2.10.- CARACTERIZACIÓN DE CÉLULAS BIFACIALES	24
2.10.1.- MEDIDA DE LA CARACTERÍSTICA I-V DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS BIFACIALES IEC.....	25
2.10.2.- MEDIDA DE LA CARACTERÍSTICA I-V DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS BIFACIALES CENER.....	27
3.- ANTECEDENTES.....	29
4.- DESARROLLO EXPERIMENTAL: PROCESO DE FIRING	31
4.1.- OBJETIVO	31
4.2.- FUNDAMENTOS	31
4.3.- PROTOCOLO DE ENSAYOS	32
4.4.- RESULTADOS EXPERIMENTALES	33
4.4.1.- TEMPERATURA DE FIRING	33
4.4.1.1.- Procesado	33
4.4.1.2.- Caracterización	34
4.4.2.- TEMPERATURA DE FIRING ÓPTIMA	36
4.4.2.1.- Procesado	36
4.4.2.2.- Caracterización	36
4.5.- RESUMEN DEL DESARROLLO DEL PROCESO DE FIRING	38
5.- DESARROLLO EXPERIMENTAL: AISLAMIENTO DE BORDE	39
5.1.- OBJETIVO	39
5.2.- FUNDAMENTOS	39
5.3.- PROTOCOLO DE ENSAYOS	39
5.4.- RESULTADOS EXPERIMENTALES	40

5.4.1.- AISLAMIENTO DE BORDE CON LÁSER	40
5.4.1.1.- Procesado	40
5.4.1.2.- Caracterización	40
5.4.2.- AISLAMIENTO DE BORDE CON PUNTA DE DIAMANTE	42
5.4.2.1.- Procesado	42
5.4.2.2.- Caracterización	42
5.5.- RESUMEN DEL DESARROLLO DEL PROCESO DE AISLAMIENTO DE BORDE	42
6.- DESARROLLO EXPERIMENTAL: PROCESO DE DIFUSIÓN DE BORO	43
6.1.- OBJETIVO	43
6.2.- FUNDAMENTOS	43
6.3.- PROTOCOLO DE ENSAYOS	46
6.4.- RESULTADOS EXPERIMENTALES	47
6.4.1.- DEPÓSITO DE SOD MEDIANTE SPINNER	47
6.4.1.1.- Procesado	47
6.4.1.2.- Caracterización	47
6.4.2.- TIEMPO DE DRIVE-IN DE BORO EN SUSTRATOS TIPO N	48
6.4.2.1.- Procesado	48
6.4.2.2.- Caracterización	49
6.4.3.- DIFUSIÓN DE BORO EN SUSTRATOS TIPO P	50
6.4.3.1.- Procesado	50
6.4.3.1.- Caracterización	51
6.4.4.- TEMPERATURA DE DRIVE-IN	52
6.4.5.- ATMÓSFERA DURANTE LA DIFUSIÓN	53
6.4.5.1.- Procesado	53
6.4.5.2.- Caracterización	53
6.4.6.- DRIVE-IN CON LÁSER	54
6.4.6.1.- Procesado	54
6.4.6.2.- Caracterización	55
6.5.- RESUMEN DEL DESARROLLO DEL PROCESO DE DIFUSIÓN DE BORO	57
7.- DESARROLLO EXPERIMENTAL: PROCESO DE SERIGRAFÍA	58
7.1.- OBJETIVO	58
7.2.- FUNDAMENTOS	58
7.3.- PROTOCOLO DE ENSAYOS	59
7.4.- RESULTADOS EXPERIMENTALES	60
7.4.1.- INUNDADO MANUAL	60
7.4.1.1.- Procesado	60
7.4.1.2.- Caracterización	60
7.4.2.- INUNDADO AUTOMÁTICO	61

7.4.2.1.- Procesado	61
7.4.2.2.- Caracterización	62
7.4.3.- PRESIÓN DE LAS ESPÁTULAS	63
7.4.3.1.- Procesado	63
7.4.3.2.- Caracterización	64
7.5.- RESUMEN DEL DESARROLLO DEL PROCESO DE SERIGRAFÍA	64
8.- INTEGRACIÓN DE CÉLULAS SOLARES BIFACIALES.....	66
8.1.- CÉLULAS N-PERT, DRIVE-IN CON HORNO RTP	66
8.1.1.- RUTA DE FABRICACIÓN	66
8.1.2.- RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN	67
8.1.2.1.- Pseudocurva	67
8.1.2.2.- Termografía y electroluminiscencia	68
8.1.2.3.- Curva I-V (Simulador solar).....	71
8.2.- CÉLULAS P-PERT, DRIVE-IN CON HORNO RTP	73
8.2.1.- RUTA DE FABRICACIÓN	73
8.2.2.- RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN	73
8.2.2.1.- Pseudocurva	73
8.2.2.2.- Termografía y electroluminiscencia.....	74
8.2.2.3.- Curva I-V	77
8.2.2.4.- Respuesta espectral.....	78
8.2.2.4.1.- Utilización de portasustratos metálicos en las medidas	79
8.3.- CÉLULAS P-PERT Y N-PERT, DRIVE-IN CON LÁSER	81
8.3.1.- RUTA DE FABRICACIÓN	81
8.3.2.- RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN	82
8.3.2.1.- Resistencia capa	82
8.3.2.2.- Pseudocurva	83
8.3.2.3.- Termografía y electroluminiscencia	83
8.3.2.4.- Curva I-V	84
9.- CONCLUSIONES	85
10.- LÍNEAS FUTURAS.....	89
11.- BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS.....	90

ÍNDICE DE FIGURAS.....	PÁGINA
Figura 1 a) Medida individual b) Mapa	14
Figura 2 Microscopio óptico (CENER)	14
Figura 3 Resistencia de capa [1].....	15
Figura 4 Esquema del medidor de 4 puntas [1]	16
Figura 5 Equipo 4 puntas (CENER)	16
Figura 6 Equipo Suns-Voc (CENER).....	17
Figura 7 Simulador solar (CENER)	18
Figura 8 Curva I-V según Rserie y Rparalelo [4].....	18
Figura 9 Curva oscuridad ideal.....	19
Figura 10 a) Esquema del equipo de termografía. b) Portamuestras y cámara DLIT (CENER).....	20
Figura 11 a) Técnica Lock-in. b) Parámetros empleados en las pruebas de termografía	20
Figura 12 Configuración del equipo de EL	21
Figura 13 Primera fila (mono): a) imagen óptica b) imagen EL	22
Figura 14 Célula con fingers cortados y células con presencia de grietas	22
Figura 15 a) SR ideal y SR real de una célula fv. b) SR real de una célula Al-BSF de mSi.....	23
Figura 16 a) Comparación EQE real vs ideal b) Esquema EQE bifaciales	23
Figura 17 Interior del equipo de medida de respuesta espectral (CENER)	24
Figura 18 Sistemas para hallar la eficiencia de una célula bifacial: a) Irradiando la cara frontal [12] b) Irradiando ambas caras [13]	25
Figura 19 Representación de los pasos 2 y 4 de la caracterización I-V [14].....	26
Figura 20 Ruta de fabricación de Apus29 y Apus30	29
Figura 21 (a) Topografía Apus30 cara p (b) Apus30 cara p 3 Hz 890 mV c) Apus30 cara n 3 Hz 890 mV. La célula se rompió durante el proceso de caracterización	29
Figura 22 Modelo simplificado de la formación del contacto [17]	31
Figura 23 SEM de la sección de las espigas para T firing de 840°C [18].....	32
Figura 24 Ruta de fabricación Only14	33
Figura 25 Patrón de división de minicélulas en Only14 para el proceso láser y parámetros láser que se utilizan para la división de la oblea.....	33
Figura 26 Perfil de temperatura del firing	34
Figura 27 Curva I-V de las minicélulas obtenidas a partir de la oblea ONLY-14.....	35

Figura 28 (a) Minicélulas obtenidas a partir de la oblea Only14 (b) Detalle Only14 trozo 4.....	36
Figura 29 Ruta de fabricación Only61 y Only62.....	36
Figura 30 Comparación curvas I-V Only61 y Only62	37
Figura 31 a) Only-61 3Hz 1.7V 300mAAmp b) Only-62 3Hz 1.7V 300mAAmp	37
Figura 32 Esquema del proceso de aislamiento de borde sobre una oblea con arquitectura Al-BSF [16].....	39
Figura 33 a) Only61 3Hz 1.7V 300mAAmp b) Only62 3Hz 1.7V 300mAAmp	41
Figura 34 a) Only62 borde derecho superior b) Only62 borde derecho inferior c) Pasada continua en una muestra anterior de CENER	41
Figura 35 Perfiles de dopado de boro [22]	43
Figura 36 Influencia del valor de R_{capa} en las características de las células [22].....	43
Figura 37 a) Distribución de impurezas vs distancia a la superficie. b) Coeficiente de difusión vs temperatura [23]	44
Figura 38 Solubilidad en silicio de distintos dopantes	45
Figura 39 Recomendaciones del fabricante para la fase de depósito del SOD [25]	46
Figura 40 Recomendación del fabricante de los parámetros del proceso de drive-inde boro con PBF2.2DS [25].....	46
Figura 41 a) Only20 después de la difusión de boro en el que se aprecia en las esquinas unas zonas más oscuras donde no había llegado el SOD y b) Only15 se aprecia que en los bordes el boro está sobre la cara protectora	48
Figura 42 Esquema de los procesos empleados: minicélulas Apus61 (en 4 trozos).....	49
Figura 43 Evolución R_{capa} según el tiempo de difusión sustratos tipo n.....	50
Figura 44 Esquema de los procesos empleados: minicélulas Only78 (en 4 trozos)	51
Figura 45 Evolución de la resistencia de capa medida con el tiempo de drive-in en sustratos tipo p.....	52
Figura 46 Evolución de R_{capa} según el % de O_2 y el tiempo.....	53
Figura 47 Patrón con los parámetros del láser	54
Figura 48 a) Prueba $ds=s=0,2$ y 22 A. b) Prueba $ds=s=0,4$ y 22 A	55
Figura 49 a) Patrón aplicado a Apus59. b) Valores de R_{capa} Apus59	56
Figura 50 a) Apus59 $s=0,3$ y 20,5 A b) Apus59 $s=0,3$ y 22 A	56
Figura 51 a) Patrón aplicado Only79. b) Valores R_{capa}	57
Figura 52 Serigrafía frontal y trasera optimizada	61

Figura 53 Primeros resultados del inundado automático: a) Estado de la pantalla después del proceso b) Estado de la oblea.....	62
Figura 54 Segundos resultados del inundado automático: a) Cordón de serigrafía b) Estado de la pantalla	63
Figura 55 Finger pasta Ag/Al y Ag.....	63
Figura 56 Detalle de un finger pasta Ag.....	64
Figura 57 Detalle de fingers de pasta Ag zona cercana a bus: a) Bus central b) Bus izquierdo.....	64
Figura 58 Ruta de fabricación PERT-N en horno RTP	67
Figura 59 Imagen DLIT Only37: a) zona lineal. b) zona no lineal	68
Figura 60 Termografía Apus40: a) Zona directa lineal b) Zona límite directa lineal/no lineal c) Zona no lineal.....	69
Figura 61 Superposición electro-termografía Apus40 zona lineal directa: a) Cara n b) Cara p	69
Figura 62 Evolución de las imágenes de termografía de Apus39 a distintas polarizaciones	70
Figura 63 Termografía Apus45 P: a) Zona inversa b) Zona directa lineal c) Límite zona directa lineal/no lineal d) Zona no lineal.....	70
Figura 64 Termografía Apus47 P: a) Zona inversa b) Zona directa lineal c) Límite zona directa lineal/no lineal d) Zona directa no lineal.....	71
Figura 65 Curva I-V células N-PERT bifaciales	72
Figura 66 Ruta de fabricación PERT-P en horno RTP. El texturizado de la Ra22 es ácido y el texturizado de la Only16 es básico	73
Figura 67 Ra22: a) Termografía directa cara P b) Electroluminiscencia de alta cara P c) Termografía directa cara N d) Electroluminiscencia de alta cara N.....	75
Figura 68 Only16: a) Termografía directa cara p b) Electroluminiscencia de alta cara p c) Termografía directa cara n d) Electroluminiscencia de alta cara n.....	76
Figura 69 Curvas I-V Only16, Ra22	77
Figura 70 EQE Ra22 y Only16.....	79
Figura 71 Corriente fotogenerada Ra22 en función de los diferentes rangos de longitudes de onda para dos chucks	80
Figura 72 Potencia absorbida en la cara no irradiada.....	81
Figura 73 Ruta de fabricación PERT-P y PERT-N con drive in con láser.....	82
Figura 74 Termografía Apus58: a) Cara n zona inversa b) Cara n zona directa c) Cara p zona directa d) Cara p zona inversa	84

ÍNDICE DE TABLAS
PÁGINA

Tabla 1 Resumen de pruebas de caracterización	13
Tabla 2 Correspondencia minicélula - temperatura de firing.....	34
Tabla 3 Parámetros de la curva I-V trozos Only-14.....	35
Tabla 4 Parámetros de la curva I-V Only61 y Only62.	37
Tabla 5 Patrón para el aislamiento de borde con láser	40
Tabla 6 Resultados pseudocurva Only61 y Only62.....	40
Tabla 7 Resultados pseudocurva Only61 y Only62.....	41
Tabla 8 Datos Only61 y Only62 aisladas con diamante	42
Tabla 9 Evolución de parámetros proceso de depósito SOD.....	47
Tabla 10 R_{\square} de los trozos de la célula Apus61	49
Tabla 11 R_{\square} de los trozos de Only78	51
Tabla 12 Características de las pastas.....	58
Tabla 13 Compatibilidad pastas-pantallas [28].....	59
Tabla 14 Parámetros de la prueba de inundado manual	60
Tabla 15 Geometría de los fingers delanteros.....	61
Tabla 16 Parámetros de prueba del inundado automático.....	62
Tabla 17 Parámetros de la prueba a 10 Kg de presión	64
→Con 10 Kg, los fingers tienen buen grosor, pero los cortes son frecuentes. Además se observa cómo coinciden los cortes de los fingers con las marcas de la malla:.....	64
Tabla 18 Parámetros finales	65
Tabla 19 : Valores deseados	66
Tabla 20 Tensión de circuito abierto y resistencia paralelo de las células N-PERT	67
Tabla 21 Tensión y corriente en los distintos puntos de la curva de oscuridad	68
Tabla 22 Parámetros curva I-V células N-PERT bifaciales	72
Tabla 23 Tensión de circuito abierto y resistencia paralelo de las células Ra22 y Only16.....	74
Tabla 24 Parámetros curva I-V Only16 y Ra22	78
Tabla 25 Resumen de medidas de Isc Ra22.....	80
Tabla 26 R_{\square} Apus58 después de drive in con láser.	82
Tabla 27 R_{\square} Only76 después de drive in con láser.	82

Tabla 28 Tensión de circuito abierto y resistencia paralelo de las células Apus58 y Only76	83
Tabla 29 Receta para realizar el proceso de depósito SOD	85
Tabla 30 Resumen de las pantallas y pastas utilizadas para cada difusión de la célula bifacial	86
Tabla 31 Parámetros del proceso de serigrafía finales	87
Tabla 32 Ruta de fabricación células solares fotovoltaicas de c-Si.....	87
Tabla 33 Resultados de las mejores células integradas con arquitectura PERT-N y PERT-P..	88

RESUMEN

El objetivo de este trabajo fin de Máster es establecer las bases para la fabricación de células bifaciales con estructura PERT. Este objetivo se lleva a cabo dentro de la línea de trabajo del Departamento de Fotovoltaica de CENER.

En un primer momento se estudian las técnicas de caracterización disponibles en el Laboratorio de Células: curva I-V, respuesta espectral, EL, DLIT, tiempo de vida. A continuación, se presenta como punto de partida el resultado de las primeras células bifaciales PERT integradas que presentaron cortocircuitos. En los siguientes puntos se desarrollan ensayos para la mejora, abordando distintas variantes en los procesos de fabricación de estas células: firing, aislamiento de borde, difusión de boro y serigrafía. Una vez aplicadas estas variantes, se realiza un estudio de los resultados obtenidos. El trabajo finaliza con una exposición de las conclusiones y un planteamiento de líneas futuras en el ámbito de la integración de células solares fotovoltaicas de c-Si bifaciales.

ABSTRACT

The aim of this project is to establish the fundamentals of fabrication of PERT bifacial solar cells. This aim is in line with the R&D projects of the Photovoltaic Department of CENER

Firstly, the characterization techniques like I-V Curve, DLIT, EL, lifetime, SR are studied. Then, the short circuit of the first bifacial solar cells is presented as a starting point for the successive research. In the following points, experiments for the improvement are developed, approaching different variants in the manufacturing processes of these cells: firing, edge isolation, boron diffusion and screen printing. Once these variants are applied, a study of the results obtained is carried out. In the final part of the project, the conclusions and future work to manufacture PERT bifacial solar cells are addressed.

LISTA DE PALABRAS CLAVE

Células fotovoltaicas bifaciales

Firing

Aislamiento de borde

Difusión de boro

Rapid Thermal Process (RTP)

Láser IR

Serigrafía

Técnicas de caracterización

1.- INTRODUCCIÓN

Este proyecto Fin de Máster se enmarca dentro de la línea de trabajo del Departamento de Fotovoltaica de CENER encaminada a establecer, en el Laboratorio de Células, una ruta para la fabricación de células fotovoltaicas de alta eficiencia. Concretamente, la fabricación de células de silicio cristalino bifaciales.

La tecnología fotovoltaica basada en silicio se considera madura, por lo que la industria se enfoca hacia dos vías de desarrollo. En primer lugar, la reducción del coste de los procesos desde la producción del silicio hasta las actividades de reciclado, y en segundo lugar, el aumento de la eficiencia. Es en esta segunda vía dónde se enmarcan las células bifaciales.

El objetivo de este TFM es el desarrollo de los procesos de fabricación de células fotovoltaicas con estructura bifacial tipo PERT en el laboratorio de producción de células de CENER.

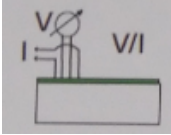
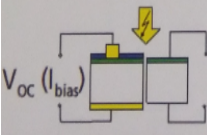
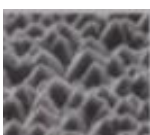
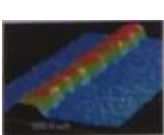
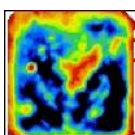
Para cumplir con el objetivo de este proyecto se completó una búsqueda bibliográfica sobre el estado del arte de la tecnología bifacial, así como la situación del mercado y la previsión de crecimiento para este tipo de tecnología. Además se estudió la metodología de fabricación empleada en CENER. Esta primera fase de documentación se recoge en el documento correspondiente al Complemento al Trabajo Fin de Máster (CTFM).

En el capítulo 2 del presente documento se describirá la metodología de caracterización de las células bifaciales, objeto del presente estudio, de acuerdo a las técnicas disponibles en el laboratorio. Una vez completada esta primera fase de documentación, en el capítulo 3, se explica el punto de partida en la integración de células bifaciales en el presente proyecto. En los capítulos siguientes, se expondrán y discutirán los resultados experimentales obtenidos, durante el desarrollo de los procesos individuales que se incluyen en la ruta de fabricación de células PERT bifaciales. Posteriormente, en el capítulo 8, se presentarán los resultados de la integración de los procesos desarrollados en células completas con la estructura PERT bifacial. Además, se analizarán los datos obtenidos y su correlación con los parámetros del proceso, llevando a cabo las modificaciones pertinentes en la fabricación para avanzar en el objetivo de obtener una estructura bifacial de alta eficiencia. Por último, se resumirán los logros principales del proyecto, así como las líneas futuras de desarrollo, capítulos 9 y 10 respectivamente.

2.- METODOLOGÍA DE CARACTERIZACIÓN

En el siguiente capítulo se describen las distintas técnicas de caracterización aplicadas a las células integradas en CENER, incluyendo, al final del capítulo, algunos aspectos importantes a tener en cuenta cuando se caracterizan células bifaciales

Los equipos disponibles en el laboratorio de CENER permiten extraer numerosa información, siendo necesario aclarar qué aspecto caracteriza cada una de las 9 técnicas utilizadas, véase Tabla 1.

Prueba	Medidor 4 puntas	Curva Suns-Voc	Microscopio SEM	Perfilómetro	MW-PCD
Información	R_{sheet}	V_{oc} , $R_{paralelo}$	Microestructura de contactos y superficies	Altura/anchura de los contactos	Tiempo de vida, recombinación
Esquema					

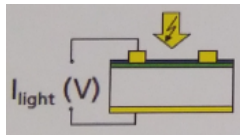
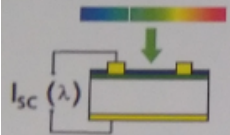
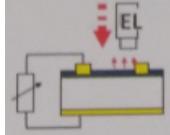
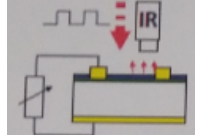
Prueba	Curva I-V	Respuesta espectral	Electrolumiscencia	Termografía
Información	I_{sc} , V_{oc} , FF, η	EQE(λ) IQE (λ)	R_{serie} y defectos	Distribución y tipos de cortocircuitos.
Esquema				

Tabla 1 Resumen de pruebas de caracterización

En la tabla anterior, la fila correspondiente a información indica los parámetros o características que se pueden conocer al llevar a cabo la caracterización. Estos parámetros y su significado se explican con más detalle los apartados “1.3.- Parámetros Eléctricos” y “1.4.- Perdidas y límites en la eficiencia” en el capítulo “1.- Fundamentos” del CTFM.

2.1.- PERFILÓMETRO

Una vez, se ha completado la metalización de una célula solar se puede estudiar el perfil de los fingers y buses mediante el perfilómetro de contacto que está disponible en el laboratorio. El programa empleado es **Dektak**, que permite realizar tanto perfiles individuales (Figura 1a) como un barrido de perfiles que se usará para obtener un mapa de la superficie del contacto ((Figura 1 b).

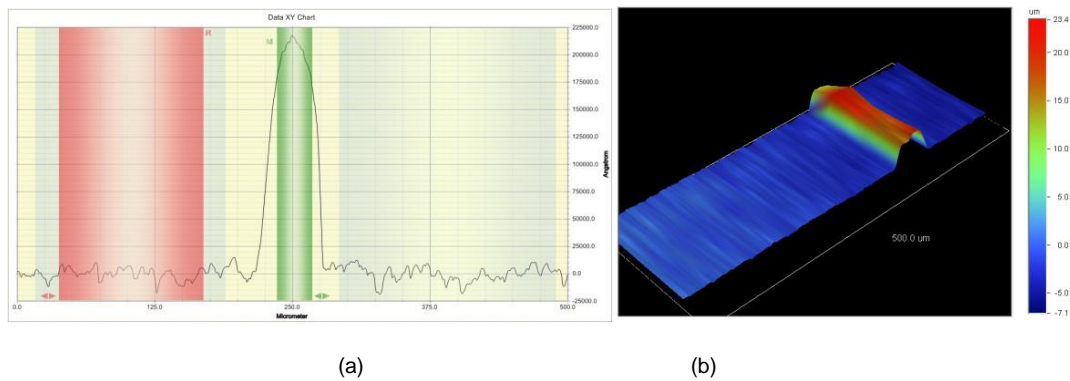


Figura 1 a) Medida individual b) Mapa

Además, desde el ordenador se puede seleccionar la posición de la cabeza del perfilómetro de forma que se pueden estudiar varias zonas de una misma muestra. Este equipo permite medir la altura y anchura de los fingers, por lo que se podrá comprobar la **calidad**, la **homogeneidad** de la **metalización** de una muestra y además, comparar las metalizaciones de distintas muestras.

El criterio empleado para valorar las alturas de los fingers es que sea mayor de 10 μm . El rango que se estima aceptable para la anchura de los fingers es $\pm 15\%$ la anchura de los fingers diseñados en la pantalla.

2.2.- MICROSCOPIO ÓPTICO

Este tipo de microscopio constituye una manera fácil de realizar la inspección óptica de las muestras, cuando el tamaño de lo que se quiere ver está en el rango de aumento del mismo. Principalmente, se va a emplear para estudiar la calidad de los fingers, ya que se puede hacer un barrido por la oblea para comprobar la cantidad de cortes o defectos no perceptibles a simple vista. Esta prueba será especialmente útil para el estudio de los parámetros a emplear en la etapa de **serigrafía**.

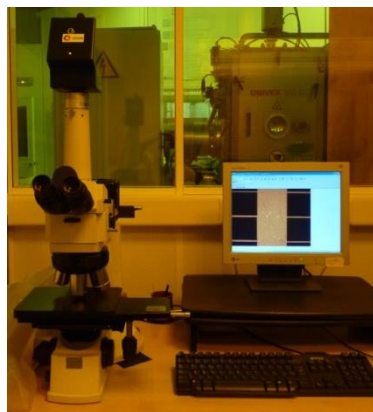


Figura 2 Microscopio óptico (CENER)

El microscopio del laboratorio, Figura 2, tiene diferentes valores de magnificación (5x, 10x, 20x...). Además, empleando el software de captura y tratamiento de imágenes del microscopio

se puede aumentar la cantidad de información obtenida, ya que permite medir dimensiones de interés y facilita la comparación de imágenes.

2.3.- TIEMPO DE VIDA

Cuando un semiconductor está fuera del equilibrio térmico, por ejemplo, mediante iluminación y/o la inyección de corriente, la concentración de electrones y huecos tienden a volver a sus valores de equilibrio, es lo que se conoce como **recombinación**, donde un electrón de la banda de conducción (BC) cae a la banda de valencia (BV) eliminando un par electrón-hueco. Por otro lado, el tiempo de vida es aquel que transcurre antes de que un electrón de la red se recombine con un hueco. En definitiva, el tiempo de vida de portadores minoritarios efectivo depende de la **recombinación** en el sustrato (radiactiva, Auger y SRH) y de la recombinación en la superficie, ver apartado “1.4.- Pérdidas y límites en la eficiencia” del CTFM. De forma que se puede expresar como:

$$\frac{1}{\tau_{bulk}} = \frac{1}{\tau_{radiactiva}} + \frac{1}{\tau_{Auger}} + \frac{1}{\tau_{SRH}}$$

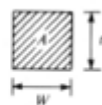
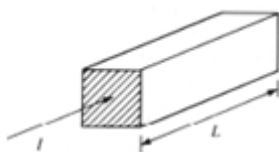
$$\frac{1}{\tau_{eff}} = \frac{1}{\tau_{bulk}} + \frac{1}{\tau_{surface}} \quad (1)$$

Dónde τ es el tiempo de vida asociado a cada recombinación.

La técnica **μ PCD** es la empleada para medir el tiempo de vida efectivo (τ_{eff}). Para ello, un pulso de laser de una determinada longitud de onda genera las cargas y se mide la velocidad de recombinación de los portadores generados mediante la variación en la fotoconductividad. Esta técnica de medición evalúa la calidad de las capas pasivantes y del material, siendo menor el tiempo de vida en células con alta recombinación. Además, permite obtener un mapa de toda la célula pudiendo identificar patrones o defectos que se pueden asociar a las distintas etapas del proceso de fabricación.

2.4.- RESISTENCIA CAPA

La resistencia de una capa difundida es muy dependiente de la profundidad del dopado. Considerando una capa uniformemente dopada de sección A y de longitud L se define:



$$R = \rho \frac{L}{A} = \rho \frac{L}{w \cdot t} = R_s \frac{L}{w} \quad (2)$$

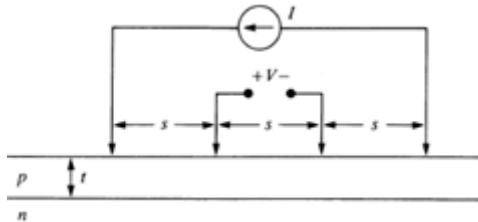
Dónde R_s es la resistencia de capa. (Ω/\square)

Figura 3 Resistencia de capa [1]

La resistencia de capa debe ser lo suficientemente alta para evitar tener mucha

recombinación, pero lo suficientemente baja como para formar un buen contacto.

El equipo empleado es el medidor de resistencia de capa mediante el método 4 puntas (**four-point probe**), este equipo está formado por 4 cabezales, dos de corriente y otros dos de tensión. Este instrumento fuerza una corriente conocida y mide el voltaje, determinando así la resistencia de la capa difundida [2].



$$R_s = \frac{\rho}{t} = \frac{\pi V}{\ln 2 I} = 4.53 \frac{V}{I} \text{ siendo } s \gg t \text{ (3)}$$

Figura 4 Esquema del medidor de 4 puntas [1]

En la siguiente figura se ve el equipo empleado para la medida de la resistencia capa. El sustrato a medir se coloca sobre el portamuestras que gira describiendo el patrón de puntos que se indica desde el ordenador. El patrón típicamente empleado consta de 25 puntos repartidos en la superficie de la muestra.



Figura 5 Equipo 4 puntas (CENER)

En caso de tener una capa no uniformemente dopada, esta debe ser modelada como varias capas más finas uniformemente dopadas (unas sobre otras). De esta forma, la medida con el equipo de 4 puntas corresponde al paralelo de las resistencias de las subcapas [3]. Esto es importante a la hora de interpretar la resistencia de capa de una cara dopada con boro sobre sustrato tipo p o de una cara dopada con fósforo sobre sustrato tipo n.

2.5.- PSEUDOCURVA

Esta técnica de medida (**Suns-Voc**) es una forma de trazar una curva I-V sin influencia de la resistencia serie. Para ello, se mide la tensión en circuito abierto en función de la intensidad lumínica. Para trazar esta curva se varía la iluminación de la célula con una lámpara flash caracterizada por un decaimiento lento y se mide la **Voc** en cada nivel de iluminación, Figura 6.

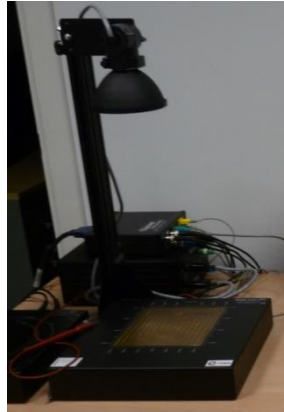


Figura 6 Equipo Suns-Voc (CENER)

La R_{serie} no tiene ningún efecto sobre la V_{oc} ya que en ese punto de funcionamiento no se extrae corriente de la célula. Con esta técnica, es posible conocer la tensión en circuito abierto de la célula y por tanto la calidad de la unión p-n.

Si se compara la curva obtenida con esta técnica con la obtenida en el simulador solar se puede conocer el efecto de la resistencia serie de la célula [4].

2.6.- CURVA I-V

La curva I-V representa los puntos de operación de una célula fotovoltaica en unas determinadas condiciones de temperatura e irradiancia. En laboratorio se emplea un **simulador solar**, que consiste principalmente en una lámpara, un multímetro capaz de variar tensión y medir corriente y un controlador de temperatura, Figura 7, este equipo simula las condiciones STC (1000 W/m^2 , $25 \text{ }^\circ\text{C}$ y AM1.5). Utilizando un programa de Labview y una macro de Excel se pueden manejar los datos obtenidos.

Previamente a cada ensayo, de acuerdo al protocolo de calidad interno de CENER, se comprueba con una célula de referencia que los ajustes del sistema son adecuados y el equipo mide correctamente verificando que la característica IV de la célula de referencia coincide con una calibración previa.

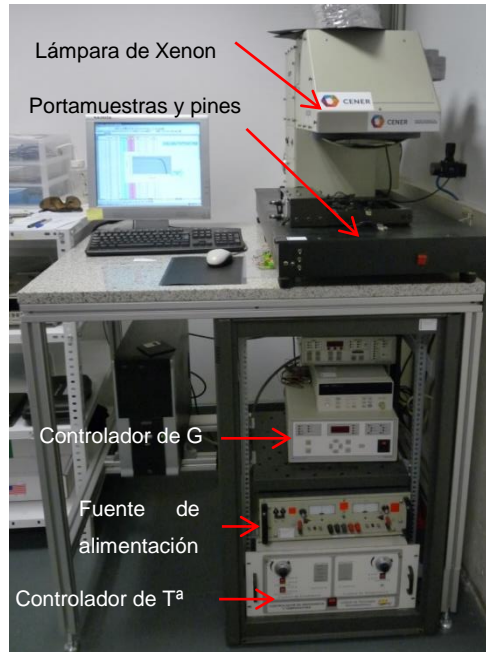


Figura 7 Simulador solar (CENER)

Esta prueba permite obtener la tensión de circuito abierto, la corriente de cortocircuito, la corriente y la tensión en el punto de máxima potencia. A partir de los datos anteriores, se calcula el FF y la eficiencia y se puede identificar las resistencias serie y paralelo de la célula caracterizada.

Una resistencia serie ideal sería nula al no suponer caída de tensión. Se identifica con la pendiente vertical de la curva. Por otro lado, una resistencia paralelo ideal sería infinita ya que supondría que no existen corrientes de pérdidas por shunts. Esta característica influye en la pendiente horizontal de la curva I-V.

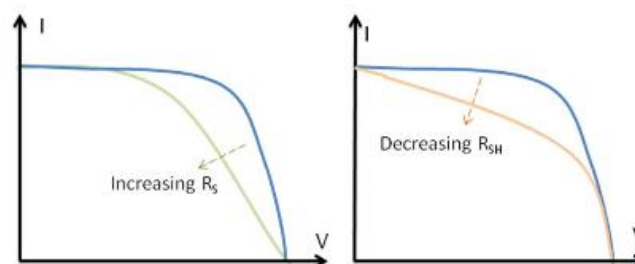


Figura 8 Curva I-V según R_{serie} y $R_{paralelo}$ [4]

En la Figura 8 se aprecia la influencia de la resistencia serie y de la resistencia paralelo en la característica I-V de una célula fotovoltaica.

2.7.- TERMOGRAFÍA

La Termografía Infrarroja (TIR) es una técnica de Ensayo No Destructiva (END) que obtiene la temperatura de la superficie de un cuerpo a través de la captación de la radiación infrarroja que este emite.

Al polarizar la célula, pueden producirse puntos de fuga de corriente asociadas a

cortocircuitos u otros defectos (R_{paralelo} baja). Esto provoca una disipación local de potencia que conlleva el calentamiento de estos puntos. La termografía DLIT (**Dark Lock-in Thermography**) aplicada a células fotovoltaicas permite detectar in-homogeneidades y defectos en las mismas ya que cuando el flujo de calor es alterado provoca contrastes de temperatura en su superficie.

En la Figura 9 se representa la curva de oscuridad de una célula fotovoltaica ideal. Esta curva se caracteriza principalmente por 3 zonas; zona directa no lineal, zona directa lineal y zona inversa ($V < 0$).

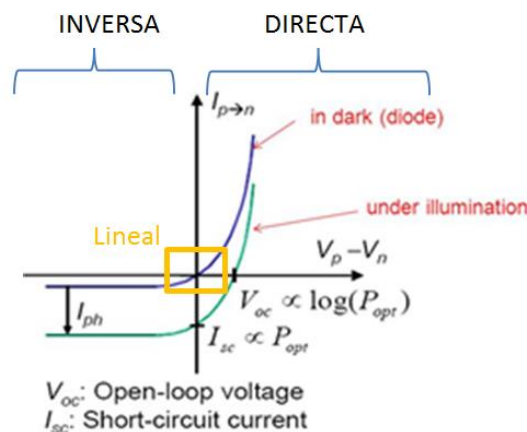
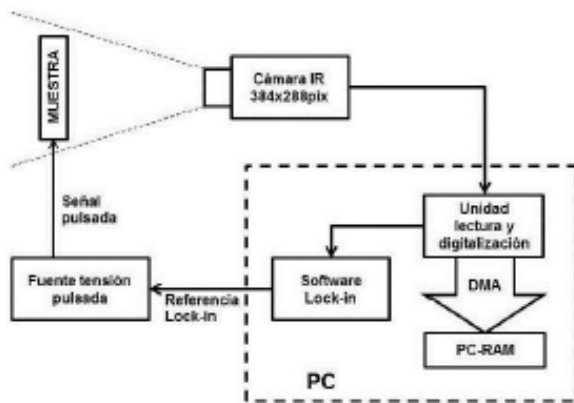


Figura 9 Curva oscuridad ideal

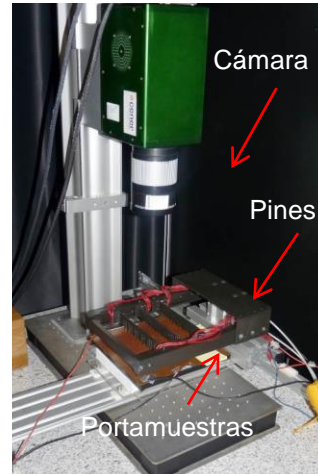
La curva anterior se modifica según la calidad de la célula evaluada, por ejemplo, una célula cortocircuitada no tendrá respuesta del diodo y su curva será lineal tanto en la zona directa como en la inversa. Por tanto, esta técnica no solo muestra la posición del *shunt*, sino que también es capaz de distinguir si la característica I-V es lineal o no lineal. Los defectos que modifican la curva ideal se pueden clasificar en:

- Lineales (óhmicos): este tipo de cortocircuitos reducen significativamente la resistencia en paralelo y se identifican fácilmente ya que aparecen tanto en la imagen de termografía obtenida en polarización directa a 0,5 V como en polarización inversa a -0,5 V [5]. Por ejemplo: un mal aislamiento de bordes o una grieta son cortos lineales, en estos casos el emisor llega a través de los bordes o de las grietas al contacto posterior [6].
- No lineales: este tipo de cortocircuitos alejan el comportamiento de la célula del ideal de un diodo Schottky, asociado a una metalización ideal [7]. Por ejemplo: un contacto directo entre los contactos metálicos y el material base o por una alta recombinación local [6].

En este caso, se va a emplear para detectar las anomalías en las células integradas el equipo de termografía de laboratorio, Figura 10.



(a)

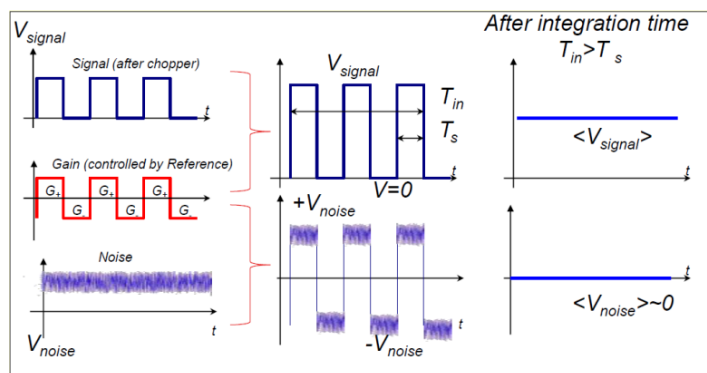


(b)

Figura 10 a) Esquema del equipo de termografía. b) Portamuestras y cámara DLIT (CENER)

El software, que está sincronizado con la cámara, genera la señal trigger de lock-in que controla la fuente de tensión que polariza la muestra. Esta técnica consiste en aplicar pulsos de tensión con una frecuencia y amplitud fijada. La señal generada y también el ruido se multiplican por una ganancia igualmente pulsante, de forma que al integrar las señales el valor medio del ruido es prácticamente nulo.

El programa desarrollado en CENER permite ajustar los parámetros de la señal de Lock-in (Figura 11). Los parámetros típicos que se emplean en células monocristalinas se indican a continuación, la mayor frecuencia (25 Hz), se utiliza para localizar el origen (centro) de los puntos calientes.



(a)

(b)

Nº de periodos	500	2000
Frecuency (Hz)	3	25
Máx.current (mA)	3000	1000
Set voltage (V)	3	3

Figura 11 a) Técnica Lock-in. b) Parámetros empleados en las pruebas de termografía

2.8.- ELECTROLUMINISCENCIA

Las células FV transforman la radiación electromagnética emitida por el sol en energía eléctrica. La técnica de electroluminiscencia, EL, consiste en revertir el proceso, haciendo que pase corriente por la célula que emitirá radiación, esta radiación será captada por una cámara.

La intensidad de luminiscencia, Φ , está relacionada con el voltaje, V, que se aplica entre los

contactos frontales y traseros de la célula [7], según la siguiente expresión:

$$\Phi = \Phi_0 \cdot \exp \left\{ \frac{q \cdot V}{K \cdot T} \right\} \quad (4)$$

Donde KT es el voltaje térmico y Φ_0 es un factor de calibración que depende, entre otros factores, de la configuración de la cámara, los dispositivos ópticos, la longitud de difusión y la velocidad superficial de recombinación [7].

Basándose en lo anterior, la técnica de EL consiste en aplicar diferentes corrientes a la célula y mediante una cámara registrar la respuesta lumínica de la misma. Generalmente se captan dos imágenes complementarias. La primera de alta polaridad, cuando la corriente es cercana a la I_{sc} (alrededor de 8 A) y la segunda a baja polaridad donde la corriente es el 10% de I_{sc} (alrededor de 0.8 A) [8].

Para las medidas de EL normalmente se utilizan cámaras con un chip CCD de silicio. Este tipo de cámaras tiene buena resolución espacial pero el problema es que la respuesta de los detectores CCD en el rango de emisión del Si (1000-1200) nm es muy baja, de manera que se emplean filtros y se trabaja principalmente en oscuridad [8]. A continuación, se muestra un esquema del equipo para ensayos EL.

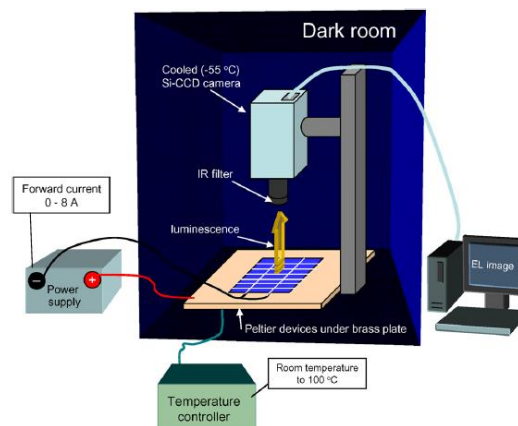


Figura 12 Configuración del equipo de EL

Un rendimiento uniforme de la célula da lugar a una imagen de EL homogénea. En el momento en el que la intensidad lumínica de una célula no es homogénea, se debe identificar una zona con defecto. La primera fila de la Figura 13 corresponde a la imagen EL de una célula de silicio cristalino homogénea y la segunda fila corresponde a la de una célula de multi-cristalino, donde se pueden ver las dislocaciones y fronteras de grano.

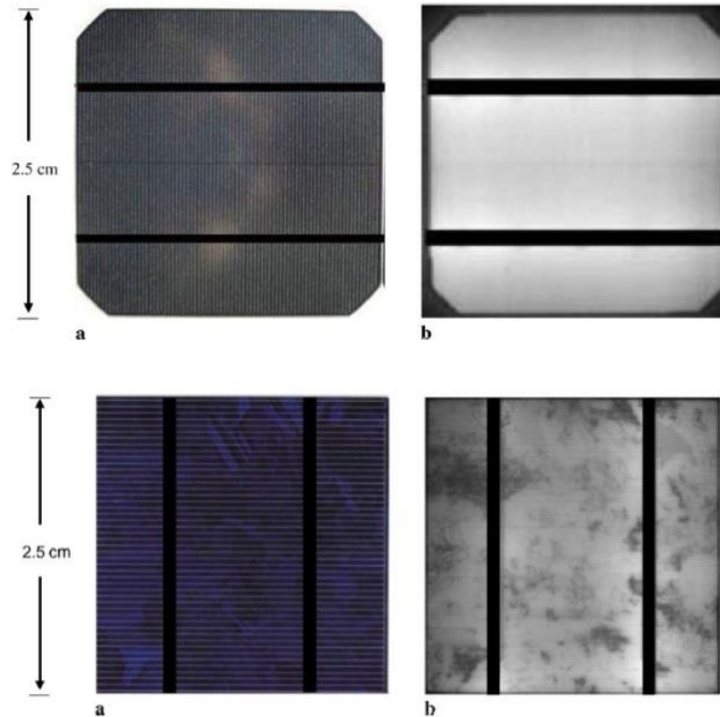


Figura 13 Primera fila (mono): a) imagen óptica b) imagen EL
 Segunda fila (multi): a) imagen óptica b) imagen EL

Los defectos más comunes que se pueden detectar con el ensayo de EL son las grietas y la mala calidad de los fingers (Figura 14). Estos defectos que están asociados a una R_{serie} mayor que en el resto de la oblea, se detectan mejor en las imágenes captadas con mayor corriente (alta polarización), ya que la caída de tensión es mayor y por tanto la caída de la intensidad lumínica también es notable.

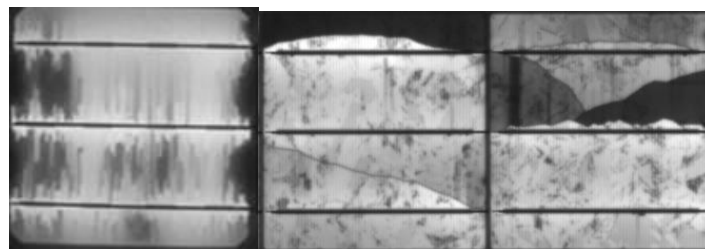


Figura 14 Célula con fingers cortados y células con presencia de grietas

2.9.- RESPUESTA ESPECTRAL

La respuesta espectral **SR (Spectral Response)** es el ratio entre la corriente generada y la potencia incidente en ella. A longitudes de onda baja los fotones tienen un exceso de energía de forma que la potencia que se aprovecha es limitada, ocurre lo contrario en longitudes altas dónde la incapacidad del semiconductor de absorber fotones con energías por debajo del límite de banda (band gap) limita la SR [9]. De forma que la SR es creciente desde los 320 nm alcanzando el máximo en torno a 940 nm, pasando a descender de forma más brusca hacia los 1200 nm, Figura 15.

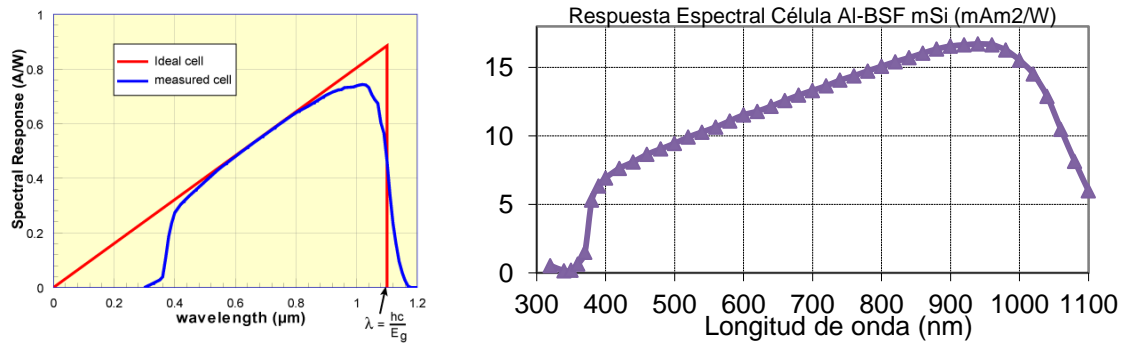


Figura 15 a) SR ideal y SR real de una célula fv. b) SR real de una célula Al-BSF de mSi

Un segundo parámetro relevante es la eficiencia cuántica externa o **EQE (External Quantum Efficiency)** que es el ratio entre el número de electrones recolectados y el número de fotones incidentes en una célula fotovoltaica para una determinada longitud de onda. La eficiencia cuántica de la célula indica la cantidad de corriente que producirá cuando sea irradiada con una determinada longitud de onda [10].

$$EQE(\lambda) = \frac{\text{Electrones recolectados como fotocorriente, por segundo}}{\text{Fotones incidentes por segundo}} \quad (5)$$

En la Figura 16 se ve la diferencia entre la eficiencia cuántica de una célula FV ideal (EQE=1 para las longitudes de emisión del sol) y la de una célula solar real. Aparte de otros parámetros, a longitudes de onda bajas los efectos de recombinación de la superficie frontal reducen la EQE y a longitudes de onda altas la EQE se reduce debido a la recombinación de la superficie trasera [11].

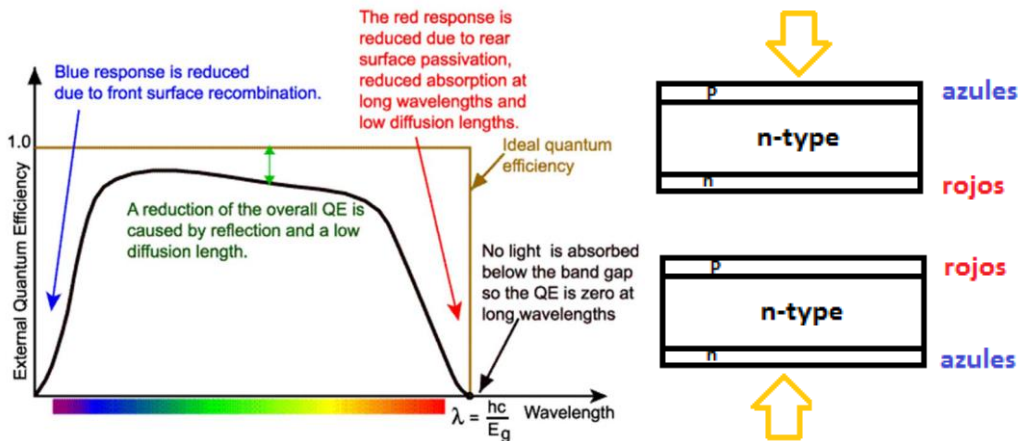


Figura 16 a) Comparación EQE real vs ideal b) Esquema EQE bifaciales

En las células bifaciales se mide la respuesta espectral iluminando tanto la cara p (boro) como la cara n (fósforo), Figura 16 b).

El tercer parámetro que se puede extraer de esta caracterización es la eficiencia cuántica interna o **IQE (Internal Quantum Efficiency)** que hace referencia al ratio entre el número de electrones generados y el número de fotones que llegan al interior de la célula solar fotovoltaica.

El procedimiento en CENER para medir la respuesta espectral de las células integradas se

inicia con el encendido del equipo que consiste en: dos lámparas halógenas una de medición espectral y otra de polarización o bias light, un chopper para el control de la frecuencia que en células de silicio cristalino se mantendrá en 45 Hz, un portamuestras metálico que será uno de los bornes de colección de corriente, un pincho metálico que será el segundo borne, un ordenador con el software de control instalado y dos osciloscopios, ver Figura 17. Mediante la lámpara de polarización se irradia una zona pequeña de la célula con las longitudes de onda de interés (320 nm – 1100 nm), se mide la respuesta de la célula a cada longitud de onda (Solar Cell Response) en unidades de A/W.

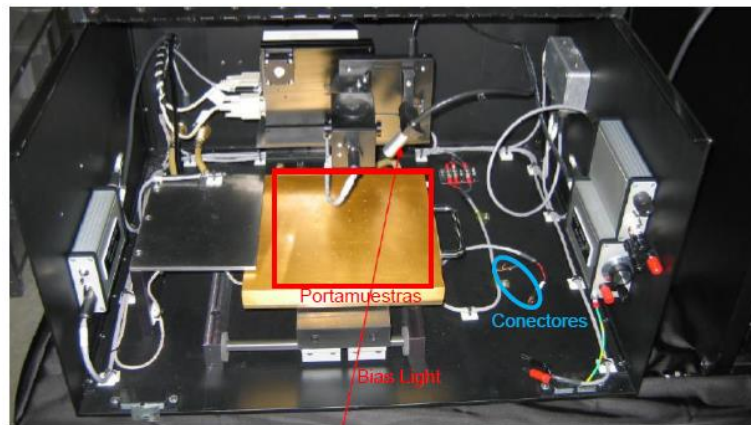


Figura 17 Interior del equipo de medida de respuesta espectral (CENER)

El siguiente paso es usar una macro de Excel para hallar los parámetros de interés. A partir de la respuesta espectral en $\text{mA m}^2/\text{W}$ y la irradiancia espectral del sol en condiciones STC en unidades de W/m^2 , se puede conocer la corriente de cortocircuito integrando en todo el espectro de longitudes de onda medido:

$$SR_{\text{corregida}} (\text{mA m}^2/\text{W}) = SR (\text{A/W}) * \text{Área} (\text{cm}^2) * F_{\text{CALIBRACIÓN}} \quad (6)$$

$$I_{\text{sc}} (\text{mA}) = \int_{320}^{1100} SR * \text{Irradiancia espectral} d\lambda \quad (7)$$

Además, la respuesta espectral se emplea para calcular la eficiencia cuántica, como se muestra a continuación (más desarrollado en el anexo):

$$EQE = \frac{1240}{\lambda} SR \quad (8)$$

A continuación, se calcula la IQE, siendo necesario medir la reflectancia global de la célula para cada longitud de onda.

$$IQE (\%) = \frac{EQE (\%)}{1 - \text{Reflectancia}} \quad (9)$$

La medida de la reflectancia se realiza con una esfera integradora, una lámpara de xenón y dos detectores, uno para el rango de la radiación visible y otro para la radiación infrarroja.

2.10.- CARACTERIZACIÓN DE CÉLULAS BIFACIALES

Derivado de la incidencia de radiación por ambas caras, la medida de la eficiencia en esta

tecnología difiere de la tradicional empleada en monofaciales y constituye uno de los retos a los que se enfrenta esta tecnología.

La eficiencia de las células solares bifaciales habitualmente se determina usando medidas independientes de la cara trasera y delantera bajo distintas irradiancias para calcular factores de corrección, Figura 18 a. Estos factores se emplearán posteriormente para calcular una irradiancia equivalente. Otra opción es irradiar al mismo tiempo, pero de forma independiente la cara frontal y trasera, mediante 2 fuentes o mediante un sistema de espejos, Figura 18 b.

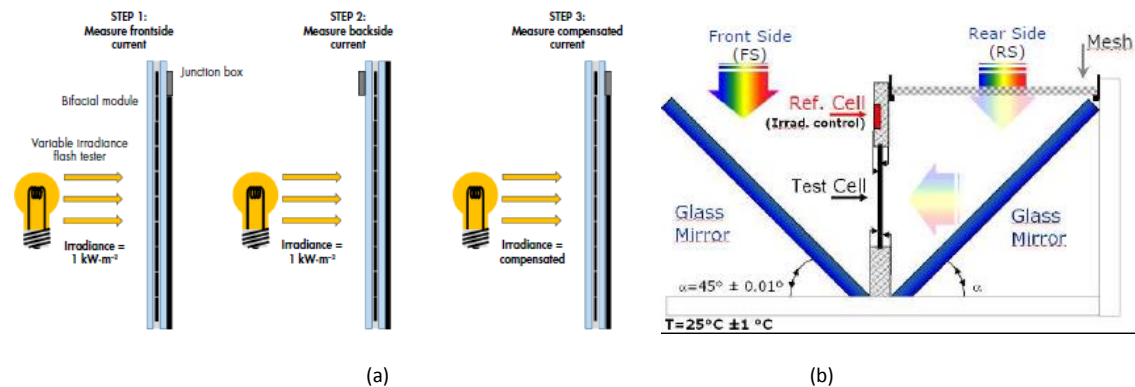


Figura 18 Sistemas para hallar la eficiencia de una célula bifacial: a) Irradiando la cara frontal [12] b) Irradiando ambas caras [13]

En los siguientes puntos se presentan el procedimiento propuesto por el IEC (International Electrotechnical Commission) y el procedimiento llevado a cabo en CENER, para la medida de la curva I-V en células bifaciales.

2.10.1.- MEDIDA DE LA CARACTERÍSTICA I-V DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS BIFACIALES IEC

Las condiciones para la medida estándar de la curva I-V en células bifaciales son 25 °C de temperatura de la célula, AM1.5 y dos condiciones de irradiancia: irradiancia delantera de 1000 W/m² y trasera de 200 W/m² e irradiancia delantera de 1000 W/m² y 100 W/m² traseros. Para realizar correctamente las medidas hay que cumplir con los siguientes requisitos [14]:

- **Portamuestras que no refleje:** en el caso de módulos la condición para considerar que una superficie no refleja, es que la irradiancia reflejada por la misma sea menor o igual a 3 W/m². Sin embargo, en células se puede hacer, en ese caso, una compensación de la corriente de cortocircuito como una función de la irradiancia reflejada en esa superficie.
- **Coeficientes de bifacialidad:** definidos como el cociente entre la respuesta trasera y la frontal para los parámetros de I_{sc} , V_{oc} y P_{max} , irradiando cada lado individualmente con 1000 W/m² en condiciones STC.

- Coeficiente de bifacialidad de corriente de cortocircuito ($\phi_{I_{sc}}$):

$$\phi_{I_{sc}} = \frac{I_{sc, rear}}{I_{sc, front}} \quad (10)$$

$I_{sc, rear}$: es la corriente en cortocircuito cuando se ilumina sólo la cara trasera en condiciones STC.

$I_{sc, front}$: es la corriente en cortocircuito cuando se ilumina sólo la cara trasera en condiciones STC.

- Coeficiente de bifacialidad de tensión de circuito abierto ($\phi_{V_{oc}}$):

$$\varphi_{Voc} = \frac{V_{oc,rear}}{V_{oc,front}} \quad (11)$$

$V_{oc,rear}$: es la tensión en circuito abierto cuando se ilumina sólo la cara trasera en condiciones STC.

$V_{oc,front}$: es la tensión en circuito abierto cuando se ilumina sólo la cara trasera en condiciones STC.

- Coeficiente de bifacialidad de potencia máxima (φ_{Pmax}):

$$\varphi_{Pmax} = \frac{P_{max,rear}}{P_{max,front}} \quad (12)$$

$P_{max,rear}$: es la potencia máxima cuando se ilumina sólo la cara trasera en condiciones STC.

$P_{max,front}$: es la potencia máxima cuando se ilumina sólo la cara trasera en condiciones STC.

- **Medición indoor con iluminación por una sola cara:** para tener un comportamiento asimilable a tener irradiancia por ambos lados la irradiancia frontal se debe ajustar a una irradiancia equivalente o G_e , de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$G_e = G_{front} + \min(\varphi_{ISC}, \varphi_{Pmax}) * G_{rear} \quad (13)$$

En concreto la norma obliga a reportar dos casos, el primero equivalente a irradiar la cara frontal con 1000 W/m^2 y la trasera con 200 W/m^2 , y el segundo equivalente a irradiar la cara frontal con 1000 W/m^2 y la trasera con 100 W/m^2 , como se muestra a continuación:

$$G_{e100} = G_{1000f} + \min(\varphi_{ISC}, \varphi_{Pmax}) * G_{100} \quad (14)$$

$$G_{e200} = G_{1000f} + \min(\varphi_{ISC}, \varphi_{Pmax}) * G_{200} \quad (15)$$

Calculadas las irradiancias equivalentes en esos dos supuestos, se hallará la potencia máxima en condiciones de G_{e100} , obteniendo $P_{maxbifi100}$, y en condiciones de G_{e200} , obteniendo $P_{maxbifi200}$.

Una vez se cumplan los requisitos anteriores se puede completar el **procedimiento propuesto**:

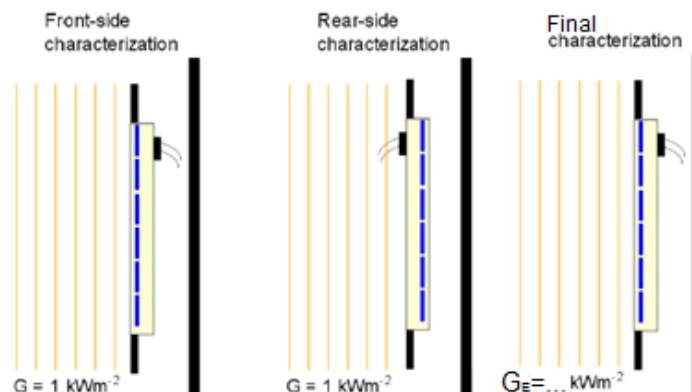


Figura 19 Representación de los pasos 2 y 4 de la caracterización I-V [14]

- **Paso 1:** irradiar con 1000 W/m^2 la cara delantera, asegurando que la cara trasera está sobre una superficie no reflectante (primera imagen de la Figura 19).

- **Paso 2:** irradiar con 1000 W/m^2 la cara trasera, asegurando que la cara delantera está sobre una superficie no reflectante (segunda imagen de la Figura 19).
- **Paso 3:** hallar los coeficientes de bifacialidad.
- **Paso 4:** irradiar con una irradiancia equivalente a 1000 W/m^2 delanteros y 200 W/m^2 en la trasera (según la ecuación 13) y hallar $P_{\text{maxbifi200}}$. Irradiar con una potencia equivalente a 1000 W/m^2 delanteros y 100 W/m^2 en la trasera y hallar $P_{\text{maxbifi100}}$ (tercera imagen de la Figura 19).
- **Paso 5:** redactar el informe de la medida de la característica I-V. Este informe debe incluir de forma obligatoria: los coeficientes de bifacialidad anteriormente descritos, I_{sc} , V_{oc} y P_{max} como función de la irradiancia equivalente (G_e) e I_{sc} , V_{oc} , P_{max} , FF y eficiencia de cada lado de forma individual, en condiciones STC.

2.10.2.- MEDIDA DE LA CARACTERÍSTICA I-V DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS BIFACIALES CENER

Los portamuestras con superficies metálicas que se emplean en las pruebas de caracterización como contacto trasero, normalmente son superficies reflectantes. Esta característica falsea la medida de la corriente de la célula, ya que al irradiar la célula por una de sus caras la radiación transmitida por la célula, generalmente entre los 900nm y los 1200nm, se refleja en el portasustratos y vuelve a la célula provocando un aumento de la corriente generada [15]. Dependiendo de las características de bifacialidad de las células medidas y de su reflectancia, este error en la medida puede ser de distinta magnitud por lo que se va a estudiar cada caso de forma individual.

El **procedimiento seguido** será:

- **Paso 1:** medida de la respuesta espectral (SR) iluminando la cara tipo p e iluminando la cara tipo n. Se hallará la corriente de cortocircuito correspondiente según la ecuación 18.

$I_{\text{sc,caraN}}$: corriente de cortocircuito de la cara N más la contribución de la cara P.

$I_{\text{sc,caraP}}$: corriente de cortocircuito de la cara P más la contribución de la cara N.

- **Paso 2:** medida de la respuesta espectral (SR) iluminando la cara tipo p y cubriendo la cara tipo n con una cartulina negra no reflectante. Esta cartulina se coloca en la vertical correspondiente a la zona iluminada. Se hallará la corriente de cortocircuito correspondiente según la ecuación 7.

$I_{\text{sc,caraPNEGRO}}$: corriente de cortocircuito de la cara P sin la contribución de la cara N.

- **Paso 3:** medida de la respuesta espectral (SR) iluminando la cara tipo n y cubriendo la cara tipo p con una cartulina negra no reflectante. Esta cartulina se coloca en la vertical correspondiente a la zona iluminada.

$I_{\text{sc,caraNNEGRO}}$: corriente de cortocircuito de la cara N sin la contribución de la cara P.

- **Paso 4:** se compararán los resultados obtenidos con el portasustratos metálico (paso 1) con los obtenidos con la cartulina negra (paso 2 y paso3). La diferencia entre $I_{\text{sc,caraN}}$ e $I_{\text{sc,caraNNEGRO}}$ corresponde a la contribución de la cara P. La diferencia entre $I_{\text{sc,caraP}}$ e $I_{\text{sc,caraPNEGRO}}$ corresponde a la contribución de la cara N.

Una vez se hayan completado los pasos anteriores se considera necesario **verificar los resultados**, es decir, se comprobará que la contribución de la cara no irradiada está bien calculada.

Los pasos seguidos para verificar los resultados son:

- **Paso 1:** medida de las propiedades de radiación de las superficies involucradas para un rango de longitudes de onda entre 300 nm y 1600 nm cada nm.

Transmitancia: de la célula bifacial se hallará iluminando una cara y después la contraria.

$$\tau = \frac{G_{\text{transmitida}}}{G} \quad 0 < \tau < 1 \quad (14)$$

Reflectividad: del portasustratos metálico y de la célula bifacial se hallará tanto iluminado una cara y después la contraria.

$$\rho = \frac{G_{\text{reflejada}}}{G} \quad 0 < \rho < 1 \quad (15)$$

Absortividad: se calculará a partir de la transmitancia y de la reflectividad.

$$G_{\text{reflejada}} + G_{\text{transmitida}} + G_{\text{absorbida}} = G \quad (16)$$

$$\tau + \rho + \alpha = 1 \quad (17)$$

$$\alpha = \frac{G_{\text{absorbida}}}{G} \quad 0 < \alpha < 1 \quad (18)$$

- **Paso 2:** cálculo de la contribución a la medida de la superficie no irradiada. El subíndice 1 se asocia a la superficie irradiada y el subíndice 2 a la superficie que está sobre el portasustratos (chuck) metálico.

$$\text{Irradiancia transmitida:} \quad G_{\text{transmitida}} = G(\lambda) * \tau_1(\lambda) \quad (19)$$

$$\text{Irradiancia reflejada por el chuck:} \quad G_{\text{chuck}} = G(\lambda) * \tau_1(\lambda) * \rho_{\text{portasustratos}}(\lambda) \quad (20)$$

$$\text{Irradiancia absorbida por la cara no iluminada:} \quad G_{\text{noiluminada}} = G(\lambda) * \tau_1(\lambda) * \rho_{\text{portasustratos}}(\lambda) * \alpha_2(\lambda) \quad (21)$$

Una vez calculada la irradiancia que es absorbida por la cara no iluminada, se comprobará la coherencia de los resultados de medida. Esto es, cuanto mayor sea la irradiancia absorbida por la cara no iluminada, mayor será la contribución de esta cara a la corriente de cortocircuito de la cara iluminada.

Según lo anterior, se conocerá la influencia de la superficie metálica (chuck), determinando la necesidad de sustituirlo o no por una superficie no reflectante e igualmente conductora. Además, si se determina que la reflectividad del chuck ha afectado a la característica I-V medida será necesario reinterpretar esta curva.

3.- ANTECEDENTES

El punto de partida de los experimentos que se desarrollan en los capítulos posteriores son los resultados obtenidos en la integración de las primeras célula bifacial PERT-N del laboratorio de CENER, **Apus29 y Apus30**. En el siguiente esquema, se presenta la ruta de fabricación seguida por estas células desde el sustrato tipo n hasta la célula integrada.

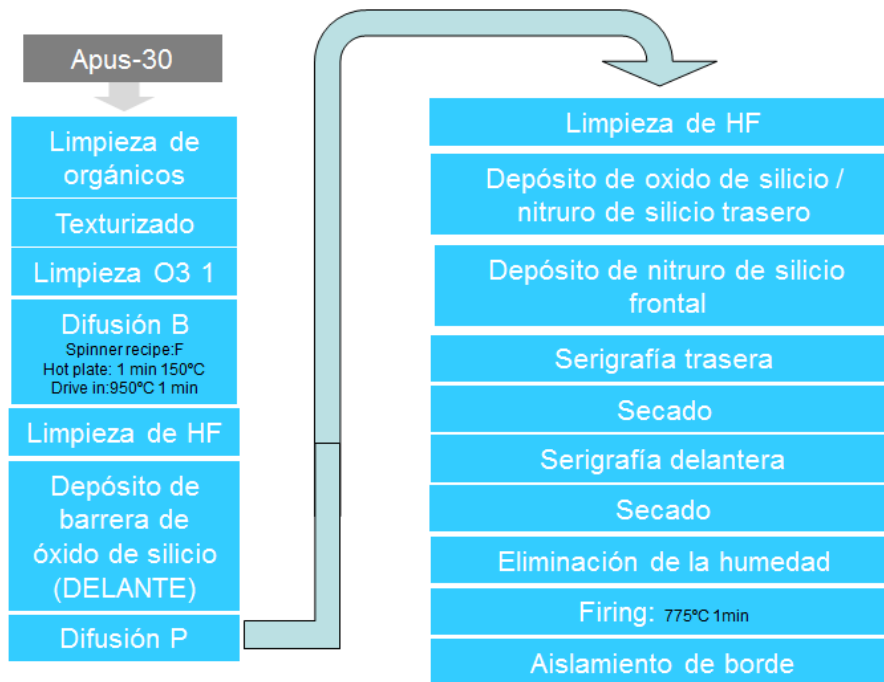


Figura 20 Ruta de fabricación de Apus29 y Apus30

Una vez completados los procesos de la ruta de integración, se caracterizan con la técnica de termografía (Figura 21).

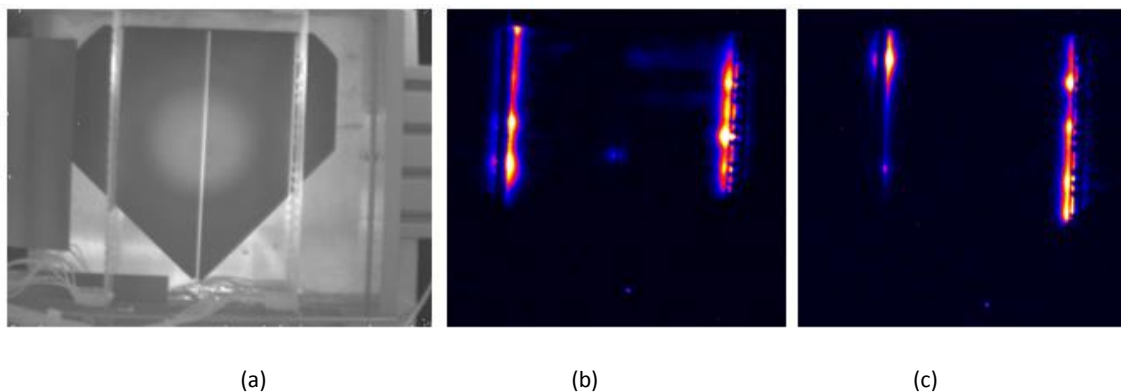


Figura 21 (a) Topografía Apus30 cara p (b) Apus30 cara p 3 Hz 890 mV (c) Apus30 cara n 3 Hz 890 mV. La célula se rompió durante el proceso de caracterización

En las imágenes obtenidas de las células Apus29 y Apus30 se observa como la única zona iluminada son los buses, es decir, la corriente no se distribuye por todo el área de la célula.

Este comportamiento corresponde al **cortocircuito** en la zona por debajo de los buses de la célula. Además, al caracterizar la curva I-V no se obtiene el comportamiento de una célula solar sino el de una resistencia por lo que se confirma el cortocircuito.

En vista de los resultados, se decide estudiar dos posibles procesos para determinar la causa del cortocircuito en las células:

- 1- La temperatura a la que se realiza el proceso de **firing** ha provocado que el metal del contacto atravesase el emisor y se produzca el cortocircuito. Por tanto, se encuentra necesario el desarrollo del proceso de firing.
- 2- El emisor no es suficientemente profundo y durante el firing el metal del contacto atraviesa la unión cortocircuitando la célula. Asimismo, se encuentra necesario el desarrollo del proceso de **difusión de boro**.

Los experimentos realizados en los apartados posteriores se enfocan en el desarrollo y optimización de estos dos procesos principales y, además, de forma paralela, en el desarrollo del proceso de **serigrafía o metalización** y del proceso de **aislamiento de borde**, necesarios para la correcta distribución de la corriente por todo el área de la célula solar.

Por último, se integran células completas con los procesos desarrollados y se caracterizan siguiendo la metodología de caracterización anteriormente descrita.

4.- DESARROLLO EXPERIMENTAL: PROCESO DE FIRING

4.1.- OBJETIVO

El objetivo es encontrar un proceso de firing adaptado a las nuevas pantallas y pastas que se van a utilizar para procesar las células bifaciales objeto de este proyecto.

4.2.- FUNDAMENTOS

Las pastas de serigrafía actualmente utilizadas para contactar el emisor de las células, ya sea la pasta de Ag/Al para el emisor de boro como la pasta de Ag para el emisor de fósforo, tienen entre un 2% y un 5% en peso wt de glass frit (compuesto con borosilicato de plomo) como aglutinante. Durante el proceso de firing, como se puede ver en la Figura 22, la pasta metálica que se encuentra sobre la oblea sufre un proceso térmico a alta temperatura (sin alcanzar la temperatura eutéctica Ag-Si de 835°C) para formar el contacto directo con el emisor. El glass frit que contiene la pasta juega un papel crucial en la formación del contacto eléctrico. Durante el firing, el glass frit líquido ataca la capa AR que está depositada sobre la superficie de la célula y favorece su sinterizado. Cuando la temperatura desciende, la plata recristaliza epitaxialmente formando cristales de plata en la interfaz glass/Si. Estos cristales de plata tienen un tamaño de alrededor de (200-500) nm y penetran en el silicio alrededor de **130 nm** [16].

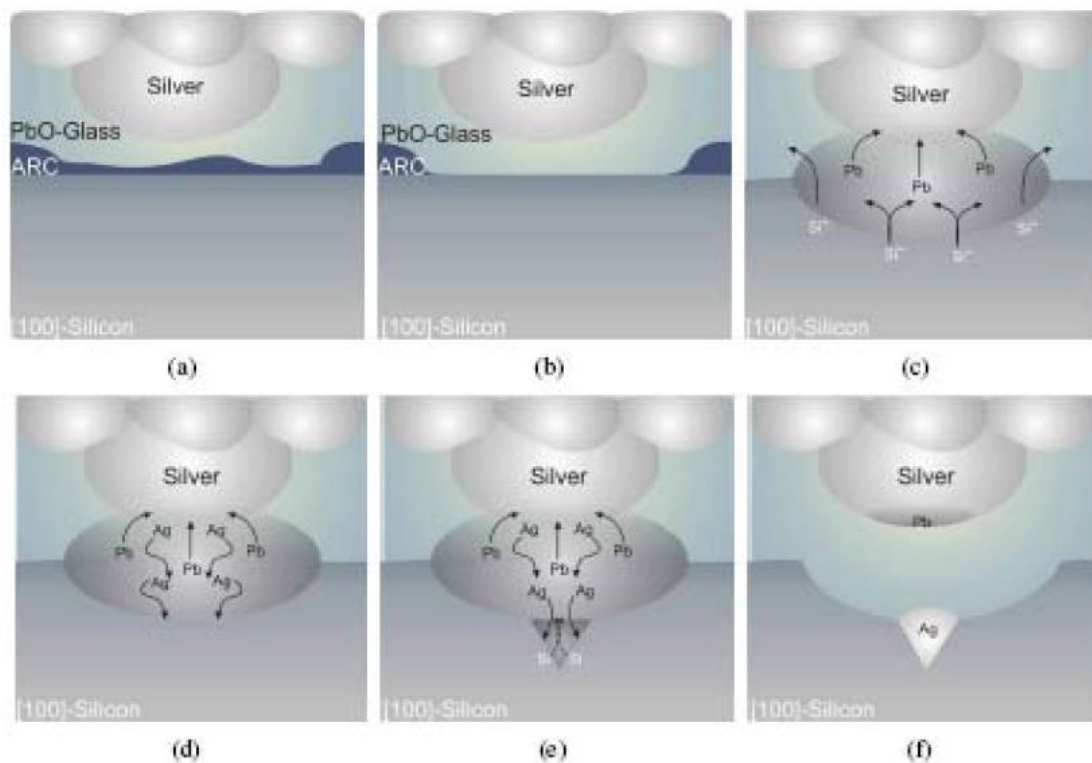


Figura 22 Modelo simplificado de la formación del contacto [17]

Para conseguir un buen contacto óhmico, la distribución de estos cristales de Ag debe ser

homogénea, la densidad debe ser alta y los cristales deben ser pequeños.

Al aumentar la temperatura del firing, aumenta la profundidad y densidad de estos cristales metálicos [18]. Sin embargo, si los cristales de plata son demasiado grandes, la unión, que tiene una profundidad típica de aproximadamente **300 nm**, se cortocircuita [17]. En la Figura 23, se muestra en una imagen SEM como la plata ha penetrado demasiado en el Si provocando shunts. Esta puede ser la causa del cortocircuito de las células **Apus29 y Apus30**. En cualquier caso, la formación de cortocircuitos provoca una disminución del FF y de la Voc, limitando la eficiencia de la célula.

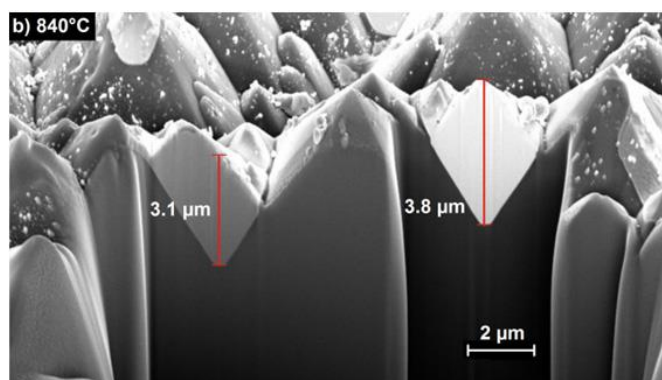


Figura 23 SEM de la sección de las espigas para T firing de 840°C [18]

Con objeto de reducir la formación de shunts o cortocircuitos debidos a este fenómeno, hay que determinar la temperatura de firing óptima. Siguiendo las indicaciones del fabricante de pastas de serigrafía, tenemos que: en la hoja de características de las pasta de Ag (SOL9641B) que se utiliza para contactar el emisor de fósforo de la célula, se indica que se puede realizar un **cofiring** con pastas de Ag/Al, que se utiliza para contactar el emisor de boro de la célula. [19]. Por ello, el proceso de firing de ambas pastas es similar y se asume que encontrando el óptimo para la pasta de Ag se ha encontrado también el óptimo de la pasta Ag/Al (SOL9350C) [20].

4.3.- PROTOCOLO DE ENSAYOS

La forma de proceder va a ser integrar 3 células con estructura **AI-BSF**. En estas células los contactos frontales (emisor n+), se van a realizar con la pasta de Ag (SOL9641B) y la serigrafía trasera con pasta Al 5132. Una de estas células se dividirá en minicélulas, a cada minicélula se le aplicará distintas temperaturas de firing. La temperatura que proporcione mejores resultados se empleará en otra célula AI-BSF. El proceso de firing de la tercera célula será a la temperatura anteriormente establecida como estándar en CENER, 775°C.

4.4.- RESULTADOS EXPERIMENTALES

4.4.1.- TEMPERATURA DE FIRING

4.4.1.1.- Procesado

Una de las células (Only14, tipo p) se integra mediante la ruta Al-BSF hasta el paso de serigrafía. A continuación, se divide empleando el láser IR en 9 minicélulas y a cada minicélula se le aplicará un proceso de firing a distinta temperatura, completando la ruta que se muestra en el siguiente esquema.



Figura 24 Ruta de fabricación Only14

Empleando los parámetros láser de la Figura 25, se forman los surcos que sirven como guía para, posteriormente, dividir manualmente las minicélulas. Debido a que se está trabajando con células monocristalinas que tienen una dirección preferente de rotura en la diagonal de la célula, después de la división manual, las células no tienen la misma forma ni tamaño, de forma que quedan **6 minicélulas** útiles.

9	6	3	Nº de pasadas	100
8	5	2	Corriente (A)	30
7	4	1	Frecuencia (kHz)	100
			Velocidad (mm/s)	150
			Repeticiones	3

Figura 25 Patrón de división de minicélulas en Only14 para el proceso láser y parámetros láser que se utilizan para la división de la oblea

A continuación, se aplican distintas temperaturas de pico al proceso de firing con una duración fija de 1 segundo, $t_{\text{peak}} = 1$ s. El resumen de las temperaturas aplicadas a cada minicélula se encuentra en la siguiente tabla:

	T Firing (°C)
ONLY-14_Tr-1	735
ONLY-14_Tr-2	755
ONLY-14_Tr-3	775
ONLY-14_Tr-4	795
ONLY-14_Tr-7	815
ONLY-14_Tr-8	745
ONLY-14_Tr-9	765

Tabla 2 Correspondencia minicélula - temperatura de firing

En la Figura 26 se muestran gráficamente los 6 pasos de esta receta para la temperatura máxima y mínima estudiada, la duración de los pasos es la misma, modificando únicamente la temperatura pico y, por tanto, la pendiente de calentamiento y enfriamiento del proceso.

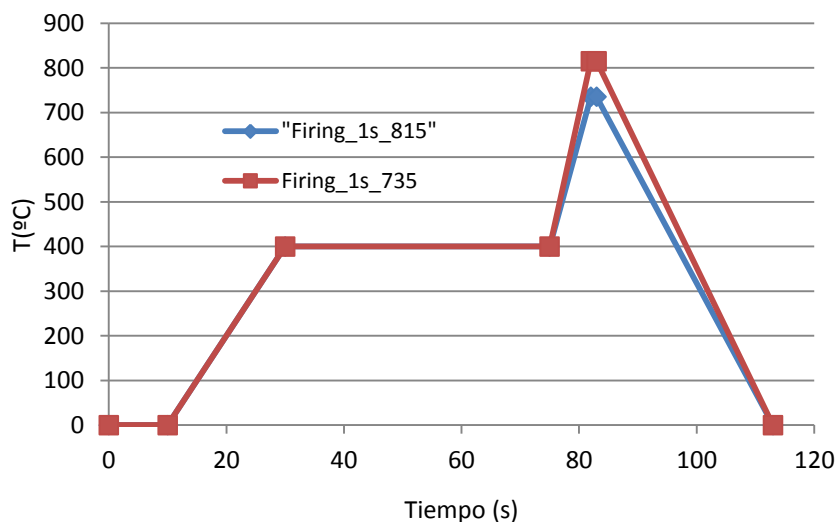


Figura 26 Perfil de temperatura del firing

4.4.1.2.- Caracterización

Llevando a cabo el protocolo anteriormente descrito, se han obtenido los siguientes resultados al caracterizar la curva I-V de cada minicélula:

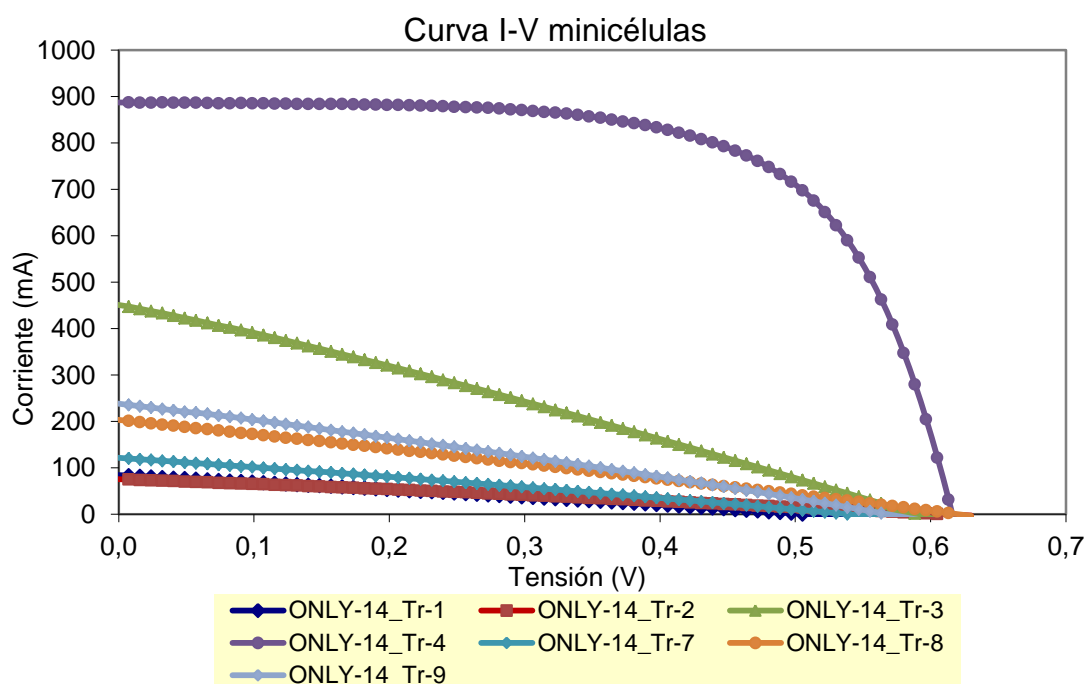


Figura 27 Curva I-V de las minicélulas obtenidas a partir de la oblea ONLY-14

	T Firing (°C)	Voc (V)	Isc (mA)	Pmax (mW)	Vmax (V)	I _{max} (mA)	FF (%)
ONLY-14_Tr-1	735	0,508	84,2	11,4	0,265	42,9	26,6
ONLY-14_Tr-2	755	0,609	75,3	12,4	0,306	40,4	27,0
ONLY-14_Tr-3	775	0,590	450,7	72,8	0,306	237,7	27,4
ONLY-14_Tr-4	795	0,616	887,1	359,4	0,472	760,9	65,8
ONLY-14_Tr-7	815	0,539	121,4	17,6	0,281	62,5	26,9
ONLY-14_Tr-8	745	0,620	203,1	32,8	0,315	104,3	26,0
ONLY-14_Tr-9	765	0,568	238,0	37,1	0,298	124,5	27,5

Tabla 3 Parámetros de la curva I-V trozos Only-14

La temperatura de pico del proceso para los cuales se obtienen mejores resultados es **795°C**, que corresponde a la minicélula 4, ver Figura 27 y Tabla 3. Esta temperatura está 20°C por encima de la temperatura de pico del proceso estándar de firing hasta ahora utilizado por CENER, que era 775°C. Sin embargo, teniendo en cuenta que el resto de minicélulas obtienen un Fill Factor mucho menor aun teniendo temperaturas de firing similares, esto indica que existe otra variable de proceso más significativa que está influyendo en los resultados.

Así pues, aunque en la inspección visual hecha después de la serigrafía en la célula Only-14, no se observaban defectos importantes, tras realizar los procesos de firing, algunas de las minicélulas presentan **defectos graves** (fingers levantados y apariencia oscura) que ocasionan una disminución del FF. La hipótesis sobre la causa de estos defectos es que, al tratarse de mini-células pequeñas no se ha conseguido que el termopar esté en contacto con las células durante el proceso de firing y, por tanto, la temperatura real de firing de estas muestras ha sido mayor que la configurada inicialmente.

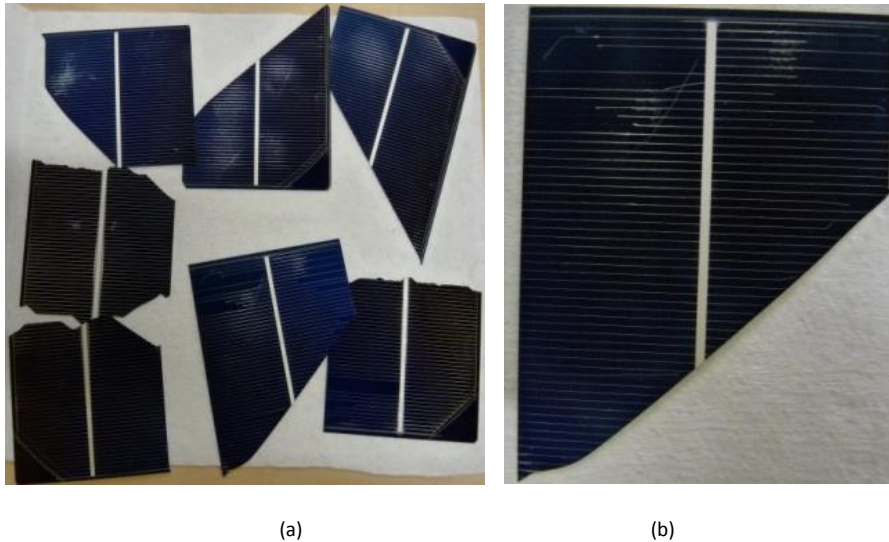


Figura 28 (a) Minicélulas obtenidas a partir de la oblea Only14 (b) Detalle Only14 trozo 4

En cualquier caso, ya que a 795°C se obtienen los mejores resultados, esta temperatura está dentro de la ventana de proceso de firing.

4.4.2.- TEMPERATURA DE FIRING ÓPTIMA

4.4.2.1.- Procesado

Para investigar la temperatura de firing necesaria, se decide integrar células completas con estructura Al-BSF, y dos temperaturas de firing. Las temperaturas seleccionadas son: 775°C la temperatura estándar del proceso de firing disponible en CENER, y 795°C la temperatura que ha proporcionado mejores resultados en los trozos de la célula Only-14. Este proceso se muestra en el siguiente esquema.

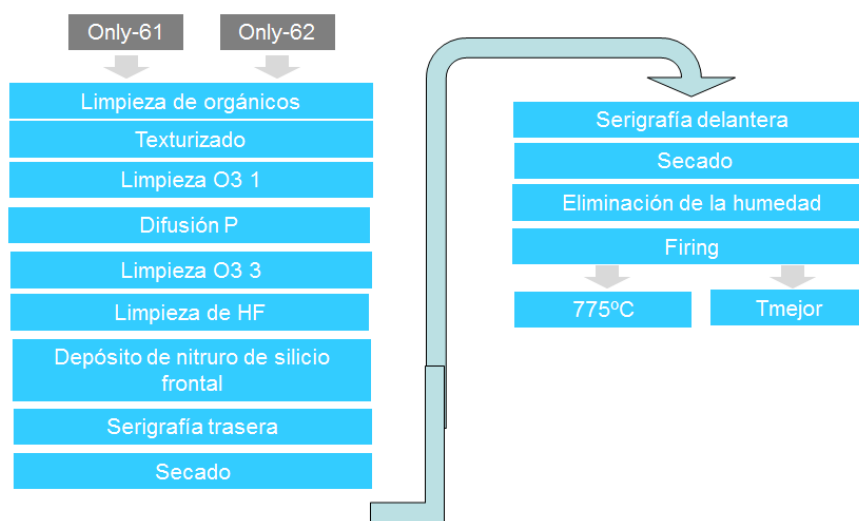


Figura 29 Ruta de fabricación Only61 y Only62

4.4.2.2.- Caracterización

En cuanto a las curvas I-V, las dos células son funcionales y tienen un comportamiento

equivalente, diferenciándose ligeramente en el FF. El resultado de la caracterización IV se muestra en la Figura 30 y en la Tabla 4:

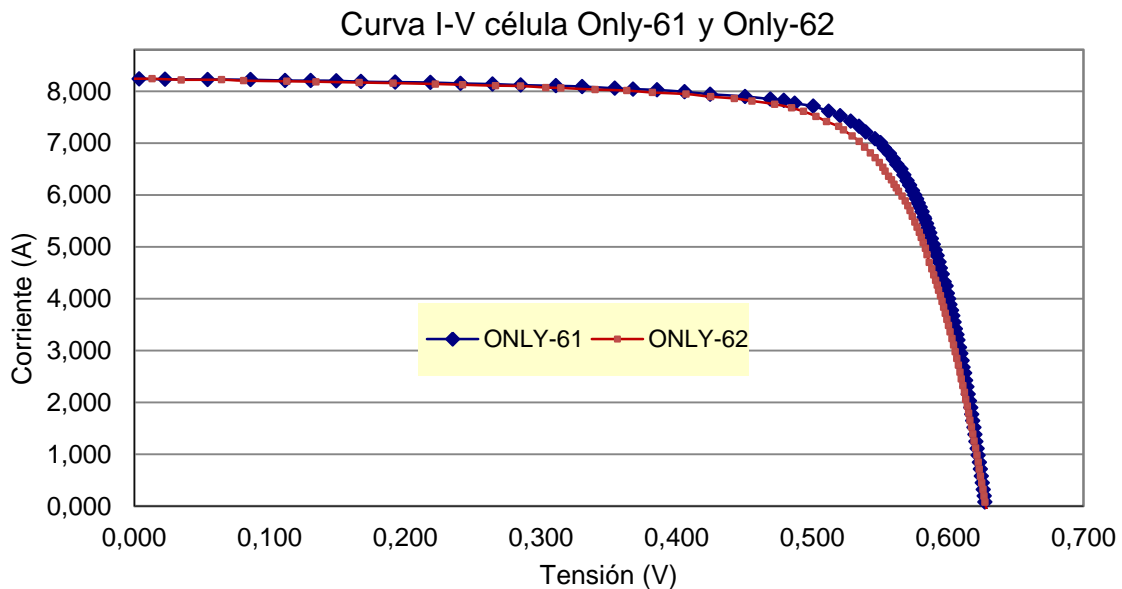


Figura 30 Comparación curvas I-V Only61 y Only62

	T Firing (°C)	Voc (V)	Isc (mA)	Pmax (mW)	Vmax (V)	I _{max} (mA)	FF (%)
Only61	795	0,628	8,236	3,920	0,528	7,418	75,8%
Only62	775	0,628	8,202	3,785	0,522	7,250	73,5%

Tabla 4 Parámetros de la curva I-V Only61 y Only62.

También, se obtienen las imágenes de termografía de las dos células integradas.

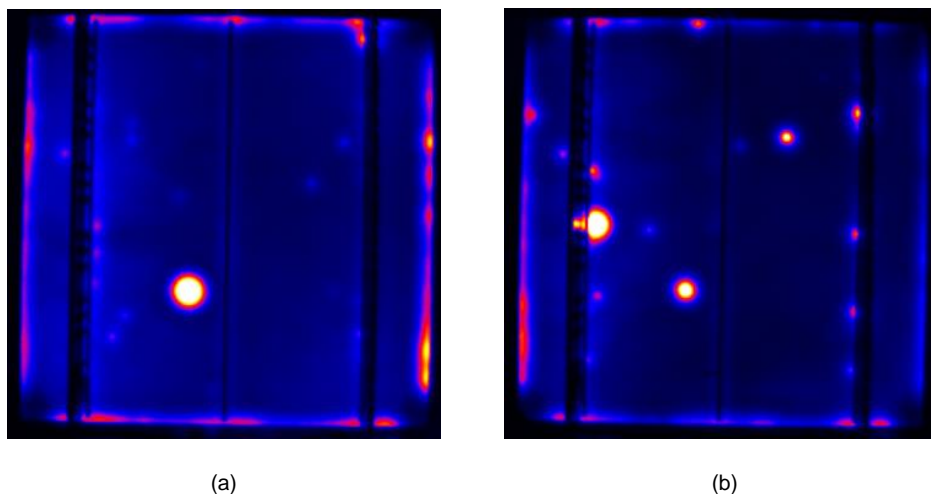


Figura 31 a) Only-61 3Hz 1.7V 300mAmp b) Only-62 3Hz 1.7V 300mAmp

Como se observa en la Figura 31, aunque las dos células tienen algunos pequeños shunts que causan una disminución del FF, debidos a defectos puntuales en el proceso de serigrafía, no existe un cortocircuito total y las células solares se iluminan homogéneamente en todo el área. Los puntos iluminados en el bus de la célula Only62, Figura 31 b, no corresponden a cortocircuitos reales, sino a un mal posicionamiento de los pines de conexionado.

4.5.- RESUMEN DEL DESARROLLO DEL PROCESO DE FIRING

El firing a temperaturas de pico de 775°C y 795°C, no provocaba cortocircuitos, por tanto si la profundidad del emisor de boro es de un grosor suficiente no se deberían producir cortocircuitos. **En definitiva, se concluye que la causa del cortocircuito no es la temperatura del firing sino una capa difundida con boro demasiado delgada.**

En los sucesivos experimentos, **la temperatura de firing se mantendrá en 775°C.** Esta temperatura era considerada óptima anteriormente en CENER y los experimentos realizados no pueden descartar esta idea.

5.- DESARROLLO EXPERIMENTAL: AISLAMIENTO DE BORDE

5.1.- OBJETIVO

El objetivo de estos ensayos es determinar el proceso a emplear para conseguir un buen aislamiento de bordes de las células.

La resistencia paralelo de una célula se aleja de la de una célula ideal cuando existen shunts en la célula o el aislamiento de borde es insuficiente, de forma que el objetivo es que la resistencia paralelo no sea en ningún caso menor de **1000 $\Omega\cdot\text{cm}^2$** .

5.2.- FUNDAMENTOS

El paso final en la integración de las células es el aislamiento de borde [21].

Este proceso tiene como objetivo crear un surco sobre la oblea de mayor profundidad que la de la unión para aislar el emisor de boro del de fósforo (Figura 32).

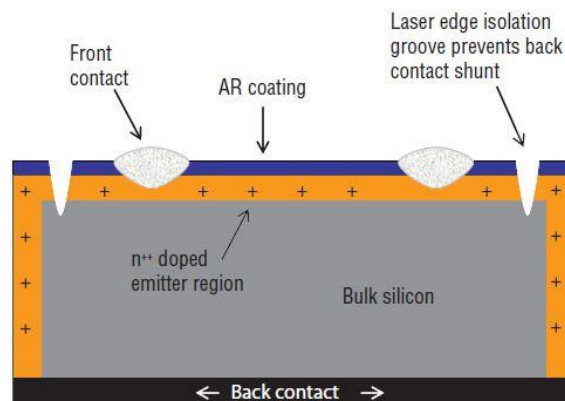


Figura 32 Esquema del proceso de aislamiento de borde sobre una oblea con arquitectura Al-BSF [16]

5.3.- PROTOCOLO DE ENSAYOS

Para realizar este proceso de aislamiento de borde se utiliza el láser del laboratorio. En cualquier caso, se estudiará la evolución de la resistencia paralelo y por consiguiente del aislamiento de borde, empleando las técnicas de Sinton Suns-Voc y de termografía para localizar los puntos de fuga de corriente. El uso del láser aporta automatización y precisión al proceso, pero en ocasiones se ha demostrado insuficiente, por lo que también se explora el refuerzo con punta de diamante.

5.4.- RESULTADOS EXPERIMENTALES

5.4.1.- AISLAMIENTO DE BORDE CON LÁSER

5.4.1.1.- Procesado

Los parámetros del láser que se utilizan son:

- Longitud de onda: IR: 1064 nm
- Corriente: 30 A
- Frecuencia 100000Hz
- Velocidad de los espejos: 150 mm/s

Y se dibuja un patrón cuadrado a 1 mm de distancia del borde de la oblea La receta láser empleada se muestra en la siguiente tabla:

Receta utilizada	Patrón	Nº de pasadas
Summer mejorada	Cuadrado: 4 bordes	25
Summer mejorada reforzada	Sólo borde izquierdo	20

Tabla 5 Patrón para el aislamiento de borde con láser

La extracción del equipo láser se sitúa en el lado izquierdo, de forma que es necesario realizar más pasadas en este borde.

5.4.1.2.- Caracterización

La caracterización de la resistencia paralelo y de la tensión de circuito abierto obtenido mediante la técnica de Suns-Voc se muestra en la siguiente tabla:

	V_{oc} (V)	$R_{paralelo}$ (Ωcm^2)
Only61	0,613	231,12
Only62	0,6139	236,89

Tabla 6 Resultados pseudocurva Only61 y Only62

La resistencia en paralelo medida en la prueba Sinton Suns-Voc, es baja. Para mejorar el aislamiento se refuerza aplicando **2 veces adicionales el patrón** de la Tabla 5 y se vuelve a medir la resistencia paralelo y se caracteriza el resultado por termografía o DLIT.

	V_{oc} (V)	$R_{paralelo}$ (Ωcm^2)
Only61	0,613	240,23
Only62	0,6139	243,3

Tabla 7 Resultados pseudocurva Only61 y Only62

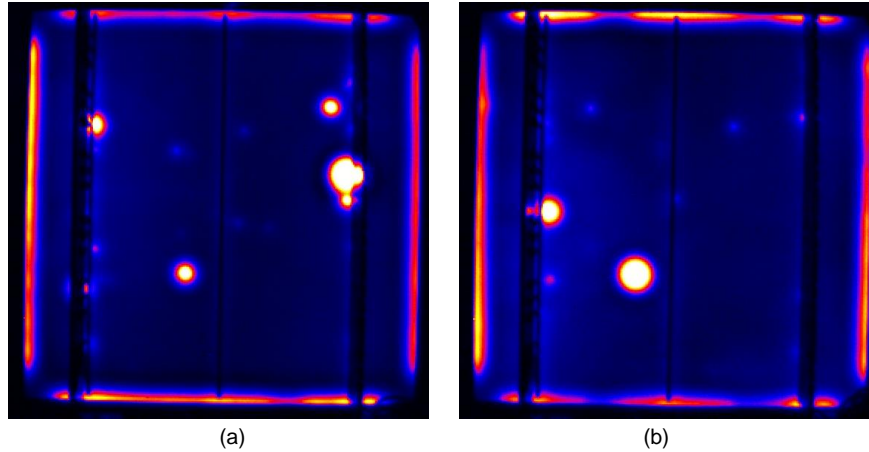


Figura 33 a) Only61 3Hz 1.7V 300mAmp b) Only62 3Hz 1.7V 300mAmp

Al comparar la evolución de la resistencia en paralelo (Tabla 6 y Tabla 7) se observa como la resistencia no ha mejorado, no ha aumentado. En cuanto a la termografía, se ve claramente que los bordes no están correctamente aislados, aun habiendo realizado tres procesos de aislamiento láser.

La no mejora del aislamiento en las sucesivas pasadas lleva a analizar en microscopio los bordes de las células.

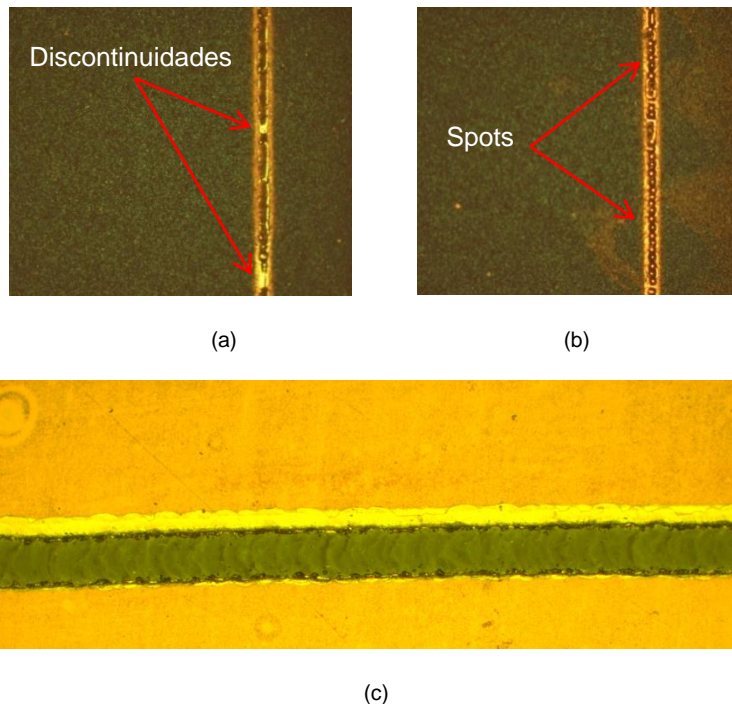


Figura 34 a) Only62 borde derecho superior b) Only62 borde derecho inferior c) Pasada continua en una muestra anterior de CENER

En la Figura 34 a y b, correspondiente a la célula Only62 se pueden identificar los spots del

láser y discontinuidades, es decir, no está realizando un surco continuo (solapamiento) como sería lo deseado Figura 34 c.

Este comportamiento del láser se puede asociar a una pérdida de potencia con los años o falta de calentamiento del láser antes de los procesos de aislamiento o a que las pasadas láser tiene que cortar zonas en las que hay fingers y en vez de cortarlos, difunde el metal hacia el interior de la célula creando cortocircuitos.

5.4.2.- AISLAMIENTO DE BORDE CON PUNTA DE DIAMANTE

5.4.2.1.- Procesado

En vista de que el aislamiento con láser no consigue evitar la fuga de corriente en los bordes de la célula, se opta por realizar un aislamiento mecánico con una punta de diamante sobre las marcas del láser

5.4.2.2.- Caracterización

Se caracteriza de nuevo la resistencia paralelo y la Voc de la dos células.

	Voc (V)	Rparalelo (Ωcm^2)
Only61	0,632	13682
Only62	0,633	22838

Tabla 8 Datos Only61 y Only62 aisladas con diamante

La punta de diamante consigue mejorar el aislamiento, ver Tabla 8, aumentando la resistencia en paralelo de las células en 2 órdenes de magnitud, ha pasado de $240,23 \Omega\cdot\text{cm}^2$ a $13.682 \Omega\cdot\text{cm}^2$, en la célula Only61, y de $243,3 \Omega\cdot\text{cm}^2$ a $22.838 \Omega\cdot\text{cm}^2$, en la célula Only62. Estas células tienen una resistencia paralelo dentro de los objetivos marcados.

5.5.- RESUMEN DEL DESARROLLO DEL PROCESO DE AISLAMIENTO DE BORDE

El proceso de aislamiento de borde realizado con el láser puede ser insuficiente en determinadas ocasiones. Si las imágenes de termografía muestran una fuga de corriente por los bordes y la caracterización, ya sea mediante curva I-V o mediante Sinton Suns-Voc, muestra una resistencia paralelo y/o factor de forma demasiado bajos. En estos casos, está indicado realizar el **aislamiento de borde con la punta de diamante**.

Por tanto, en los sucesivos procesos de aislamiento se hará un surco inicial con el láser que posteriormente se reforzará con punta de diamante.

6.- DESARROLLO EXPERIMENTAL: PROCESO DE DIFUSIÓN DE BORO

6.1.- OBJETIVO

El objetivo es conseguir un emisor con **una resistencia de capa homogénea de alrededor de 100 Ω/\square** adecuada para las arquitecturas PERT-N y PERT-P.

6.2.- FUNDAMENTOS

Uno de los procesos claves en la integración de las células bifaciales es el dopado con boro. El perfil del dopado de boro se caracteriza por un aumento inicial de la concentración de boro hasta un pico, seguido de una disminución paulatina.

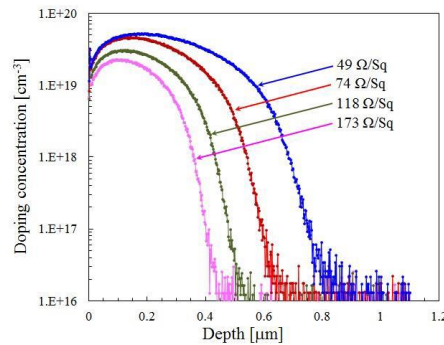


Figura 35 Perfiles de dopado de boro [22]

La concentración y la profundidad final del dopado determinan la resistencia de capa (R_{capa}), ver Figura 35, de forma que cuanto menos cantidad de dopantes o más profundo es el dopado, menor es la resistencia de capa. A su vez, cuanto menor sea esta resistencia, mayores serán las pérdidas por recombinación.

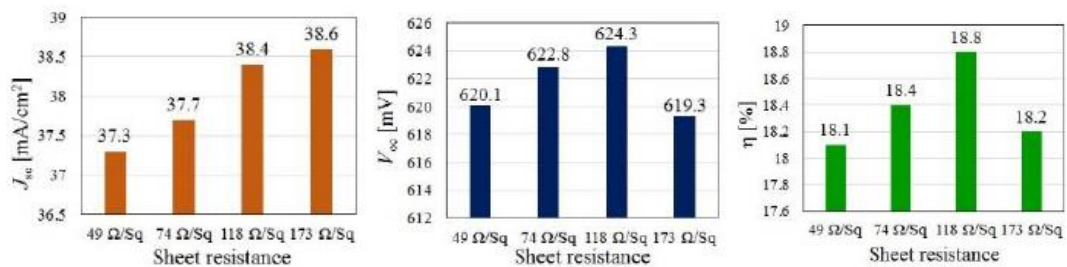


Figura 36 Influencia del valor de R_{capa} en las características de las células [22]

El valor de resistencia de capa influye fuertemente en los parámetros de las células. Una resistencia de capa alta, es decir, una concentración y profundidad de emisor baja, implica menores pérdidas por recombinación y por tanto una corriente de cortocircuito más alta. Sin embargo, una elevada resistencia de capa aumenta la dificultad para formar un buen contacto con el emisor, por lo que se reduce la tensión de circuito abierto, disminuyendo la eficiencia de la célula, ver Figura 36 [22]. En definitiva, hay que conseguir un compromiso entre aumentar la corriente de cortocircuito, aumentando R_{capa} , y tener un buen contacto, disminuyendo R_{capa} .

El perfil de concentración de boro depende de si el dopante presente en la superficie se va agotando o si la cantidad de dopantes se mantiene constante en el tiempo.

Considerando que la fuente de boro es infinita y se mantiene constante en el tiempo, en nuestro caso, la concentración de dopantes que se difunde en la oblea sigue el siguiente modelo matemático [23]:

$$N(x,t) = N_0 \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right) \quad (22)$$

N_0 : concentración inicial

D : coeficiente de difusión

t : tiempo de difusión

x : distancia desde la superficie

$\operatorname{erfc}(x)$: función complementaria al error $\operatorname{erfc}(x) = 1 - \operatorname{erf}(x)$;

$\operatorname{erfc}(x) = 1 - (a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3) e^{-x^2}$ donde: $a_1 = 0.34802$, $a_2 = -0.0958789$ y $a_3 = 0.7478556$

$$t = \frac{1}{1+px} \quad \text{donde: } p = 0.47047$$

La distribución de la concentración en función del tiempo y de la profundidad corresponde a la Figura 37 a y depende del coeficiente de difusión que es función de la temperatura, ver Figura 37 b.

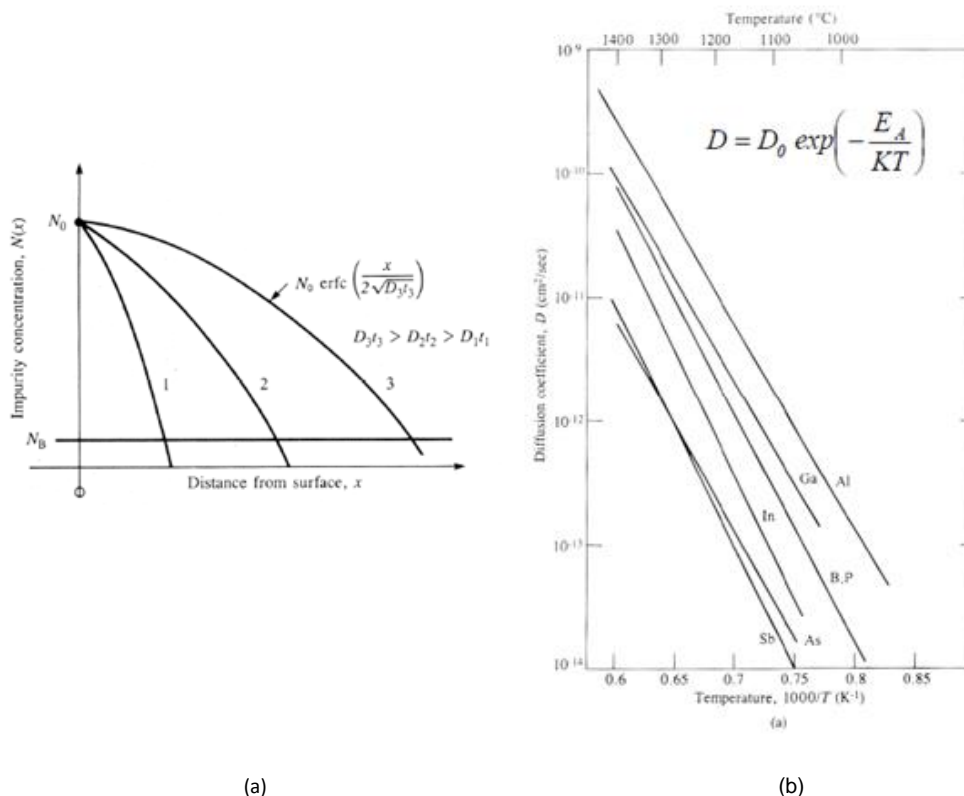


Figura 37 a) Distribución de impurezas vs distancia a la superficie. b) Coeficiente de difusión vs temperatura [23]

En definitiva, de acuerdo a este modelo, se espera que aumentando el **tiempo** de la difusión aumente la profundidad del dopado, cumpliéndose que:

$$\left. \begin{array}{l} t_3 > t_2 > t_1 \\ D_3 = D_2 = D_1 \end{array} \right\} D_3 t_3 > D_2 t_2 > D_1 t_1 \rightarrow \text{Mayor tiempo, mayor profundidad del emisor de boro.}$$

Un segundo factor con alta incidencia en la difusión del boro es la **temperatura** del proceso. Hay que tener en cuenta que para una temperatura dada existe un límite para la cantidad de impurezas (boro) que el silicio puede absorber, es el límite de solubilidad como se muestra en la Figura 38. El límite de solubilidad del boro aumenta conforme aumenta la temperatura, a 950°C (temperatura del proceso implementado) la concentración de impurezas (B) que admite el silicio es del orden de $10,5 \times 10^{20}$ átomos/cm³.

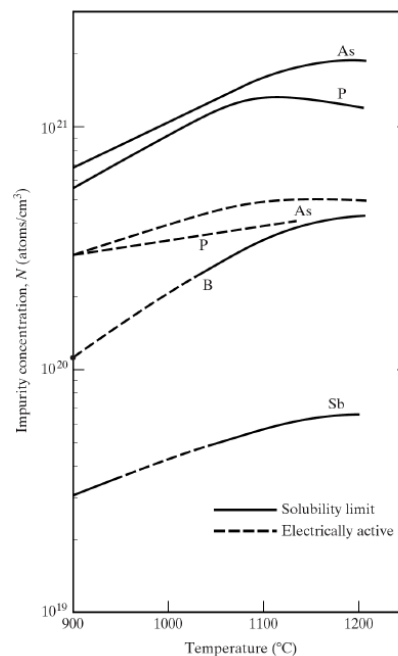


Figura 38 Solubilidad en silicio de distintos dopantes

La **concentración de oxígeno** en la atmósfera del proceso de difusión influye en los mecanismos microscópicos que determinan el perfil de difusión del boro, especialmente en los primeros nm y en la profundidad final del dopado. El agotamiento del boro dopante como consecuencia de un proceso de oxidación puede explicar una baja profundidad del dopado. Los mecanismos de oxidación que provocan **el agotamiento del boro por oxidación** en el proceso de difusión pueden [24]:

- Mecanismo 1: el oxígeno de la atmósfera reacciona con el silicio de la oblea formando la capa de SiO₂. La solubilidad del boro en la capa de SiO₂ es mucho mayor que la solubilidad del boro en el silicio. Por eso si el boro está ya difundido durante la formación de la capa de SiO₂, parte del boro se difunde en la capa de SiO₂.
- Mecanismo 2: el silicio necesario para la formación del SiO₂ se toma de la oblea (bulk), lo que elimina parte del material del bulk que está dopado con B.
- Mecanismo 3: cuando hay un exceso de concentración de boro durante el depósito de un BSG (Boron Silicon Glass) se puede formar una capa "boron rich layer". Cuanto mayor es

la concentración del dopante mayor es el grosor de la BRL y menor es la profundidad de la difusión (menor difusividad del boro en la BRL que en el Si). Esta capa expuesta a una atmósfera con contenido en oxígeno se convierte en una capa de óxido de silicio que se elimina al limpiar y por tanto se elimina cierta cantidad de boro al mismo tiempo.

Los mecanismos anteriores dan cuenta de la importancia de la atmósfera en el proceso de difusión. Es necesario tener un % de O₂ para favorecer la difusión pero esta concentración debe estar controlada. De esta forma se produce un crecimiento constante de la capa de SiO₂ y se previene la formación de una capa BRL.

6.3.- PROTOCOLO DE ENSAYOS

El dopante empleado para realizar el proceso de difusión de boro en CENER es una disolución de borosilicato (SOD) PBF2.2DS del fabricante FILMTRONICS que se deposita con spinner, ver metodología de fabricación CTFM. El proceso consta de dos etapas; la primera es la de extendido del dopante sobre toda la superficie de la oblea (Spread) y la segunda elimina el dopante sobrante al aumentar la velocidad de giro (Spinning). En la figura siguiente, se indican las recomendaciones del fabricante para la fase de spinner de la difusión de boro.

Hand dispensing:	Dispense	Spread	Spinning	Bake
	static	500 RPM	3000 RPM	150° C-1 min
	4" 2ml	2.0 sec.	20.0 sec.	
	5" 3ml		Ex. On	
	6" 4ml			
	8" 8ml			

Figura 39 Recomendaciones del fabricante para la fase de depósito del SOD [25]

Además, en la guía de uso [25], también se muestra la recomendación del fabricante para el proceso de drive-in.

Diffusion: 100mm wafer diameter

850°C	<i>High Temp</i>	<i>High Temp</i>	<i>Low Temp</i>	<i>Steam</i>	850°C
Insert	Ramp 6' min	30 min.	Ramp 3' min	850°C	Remove
4 lpm N2	4 lpm N2	4 lpm N2	4 lpm N2	15 min	4 lpm N2
100 cc O2	100 cc O2	100 cc O2	100 cc O2		

Notes: Always place 5 dummy wafers on each end of the diffusion boat
Post Diffusion film is removed in BOE or Dilute HF

Figura 40 Recomendación del fabricante de los parámetros del proceso de drive-in de boro con PBF2.2DS [25]

Las células integradas Apus29 y Apus30, ver Figura 21, estaban cortocircuitadas ya que el emisor había sido atravesado por los contactos metálicos durante el firing. Modificando el perfil del dopado de boro y aumentando su profundidad, se quiere evitar este cortocircuito.

Los aspectos más importantes que se estudiarán son:

- La **duración del proceso de drive-in**. El fabricante recomienda 30 min, sin embargo, en el proceso que se realizó con las células Apus29 y Apus30 fue de solo 1 min.
- La **atmósfera** durante el proceso de difusión, cantidad de O₂ y N₂.

- La **temperatura** del proceso. En las células Apus29 y Apus30 la temperatura máxima fue de 950°C. Aunque el fabricante no concreta una temperatura máxima, la temperatura inicial y final es de 850°C, por lo que la temperatura máxima recomendada debe ser mayor.

Por tanto, se realizarán experimentos para optimizar el proceso de difusión teniendo en cuenta estos parámetros junto con el proceso de **depósito**. Y, por último, se estudiará una **nueva técnica**, basada en el **láser**, para realizar el proceso de alta temperatura requerido para la difusión del boro en el silicio.

6.4.- RESULTADOS EXPERIMENTALES

6.4.1.- DEPÓSITO DE SOD MEDIANTE SPINNER

6.4.1.1.- Procesado

Con objeto de intentar alcanzar la mayor homogeneidad se van a variar los parámetros de la receta empleada para el depósito. Utilizando controles se variará el tiempo del paso de spreading y la cantidad de dopante de acuerdo a la siguiente tabla:

Receta	Cantidad de PBF2.2DS	Spreading	Spinning
Inicial	7ml	Velocidad: 500rpm Aceleración: 500rmps Duración: 3s	Velocidad: 3000rpm Aceleración: 2000rmps Duración: 20s
Intermedia	10ml	Velocidad: 500rpm Aceleración: 500rmps Duración: 3s	Velocidad: 3000rpm Aceleración: 2000rmps Duración: 20s
Final	10ml	Velocidad: 500rpm Aceleración: 500rmps Duración: 10s	Velocidad: 3000rpm Aceleración: 2000rmps Duración: 20s

Tabla 9 Evolución de parámetros proceso de depósito SOD

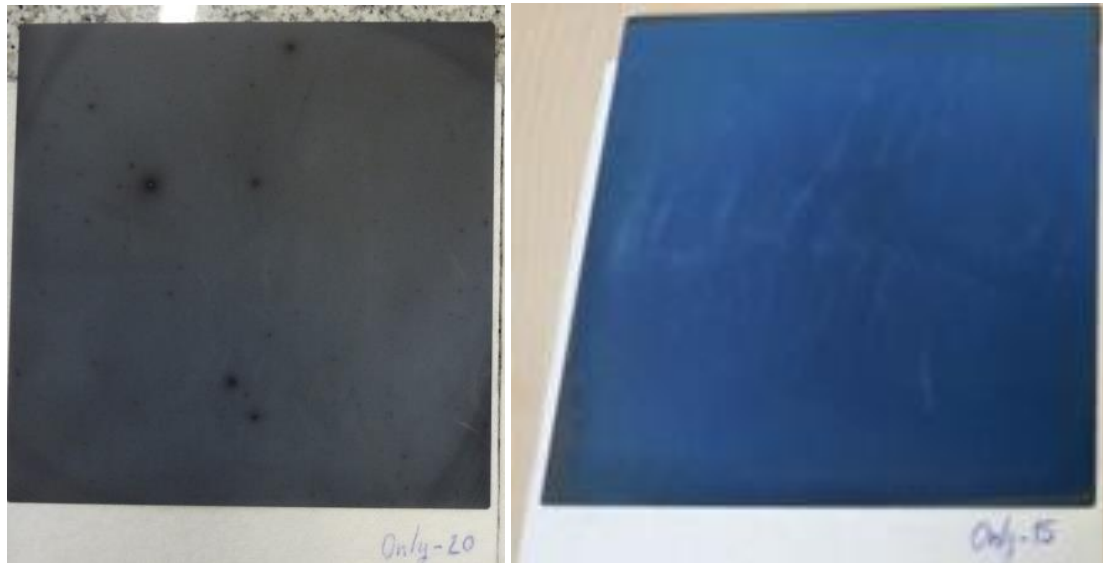
6.4.1.2.- Caracterización

Utilizando la receta inicial, el dopante no se distribuye por toda la superficie de la célula.

Con la receta intermedia, en la que se aumenta a 10 ml la cantidad de SOD, algunas zonas todavía quedan sin dopante, Figura 41 a.

Con la receta final, que aumenta la duración de spreading a 10 s, el dopante se distribuye homogéneamente. Además, con esta receta final, parte del dopante se extiende por los bordes alcanzando la cara trasera Figura 41 b. Sin embargo, gracias a la capa protectora de

óxido de silicio el boro no se difunde en esta cara.



(a)

(b)

Figura 41 a) Only20 después de la difusión de boro en el que se aprecia en las esquinas unas zonas más oscuras donde no había llegado el SOD y b) Only15 se aprecia que en los bordes el boro está sobre la cara protectora

6.4.2.- TIEMPO DE DRIVE-IN DE BORO EN SUSTRATOS TIPO N

6.4.2.1.- Procesado

Con el fin de averiguar la relación que existe entre el tiempo de drive-in y la resistencia de capa del emisor como indicador de la profundidad de la unión, se variará el tiempo de drive-in en sustratos tipo n.

La receta hasta ahora aplicada duraba 1 minuto por lo que se generan nuevas recetas usando el programa **Jet First** del equipo RTP (Rapid Thermal Process), para más detalles consultar el apartado correspondiente del CTFM. Estas recetas se nombran "SOD_B_950_Xmin", dónde X son los minutos de duración del proceso de drive-in.

La ruta de proceso utilizada es la siguiente:

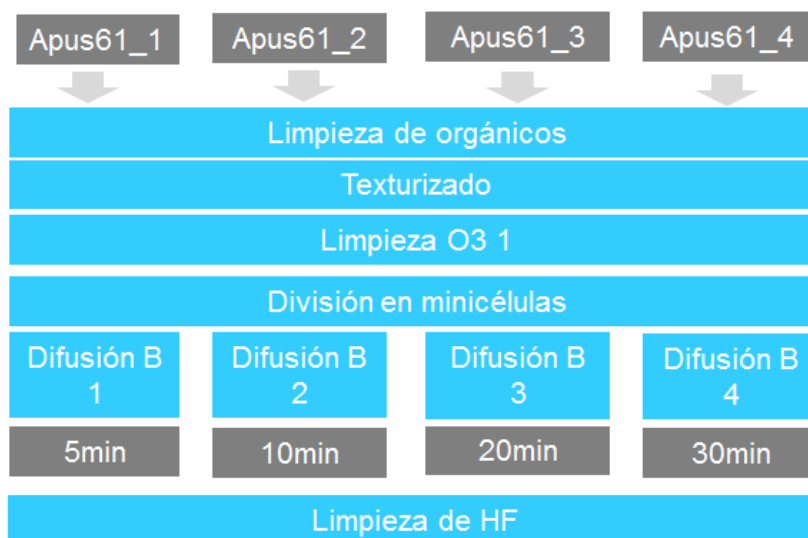


Figura 42 Esquema de los procesos empleados: minicélulas Apus61 (en 4 trozos)

Para proteger la cara trasera, y evitar el **autodopado** producido porque el boro de la cara dopada migre hacia la cara contraria, se plantea evitar la contaminación en la cara n empleando una **barrera de SiO₂**. Esta capa será depositada mediante PECVD sobre la cara n antes del proceso de SOD (Spin On Dopant) y después del drive-in en el RTP se eliminará con HF [21]. Este paso se realizará en los sustratos que se vayan a integrar después de la limpieza de O₃ y antes de la difusión de boro.

6.4.2.2.- Caracterización

El parámetro empleado para el estudio de la profundidad del dopado es la **resistencia de capa (R_□)**. Ésta se mide, con la técnica de cuatro puntas. Los resultados se muestran en la siguiente tabla:

	Apus61_1	Apus61_2	Apus61_3	Apus61_4
AVE ±UNI bulk (Ω/sq)	94,91±19,16			
Tiempo RTP (min)	5	10	20	30
AVE ±UNI P (Ω/sq)	292±13,17	229,4±10	188±10,75	123,4±22,93

Tabla 10 R_□ de los trozos de la célula Apus61

La tendencia descendiente de la resistencia de capa del emisor con el tiempo explicada en los fundamentos de la difusión de boro del presente documento, se cumple en la célula Apus61. **Se considera que el tiempo óptimo está entre 20 y 30 min**, con valores disminuyendo hacia 100(Ω/sq).

A continuación, se representa la evolución de la R_□ de la cara dopada con boro según el tiempo de duración del drive-in. Como es lógico **al aumentar el tiempo de drive-in disminuye la resistencia capa**.

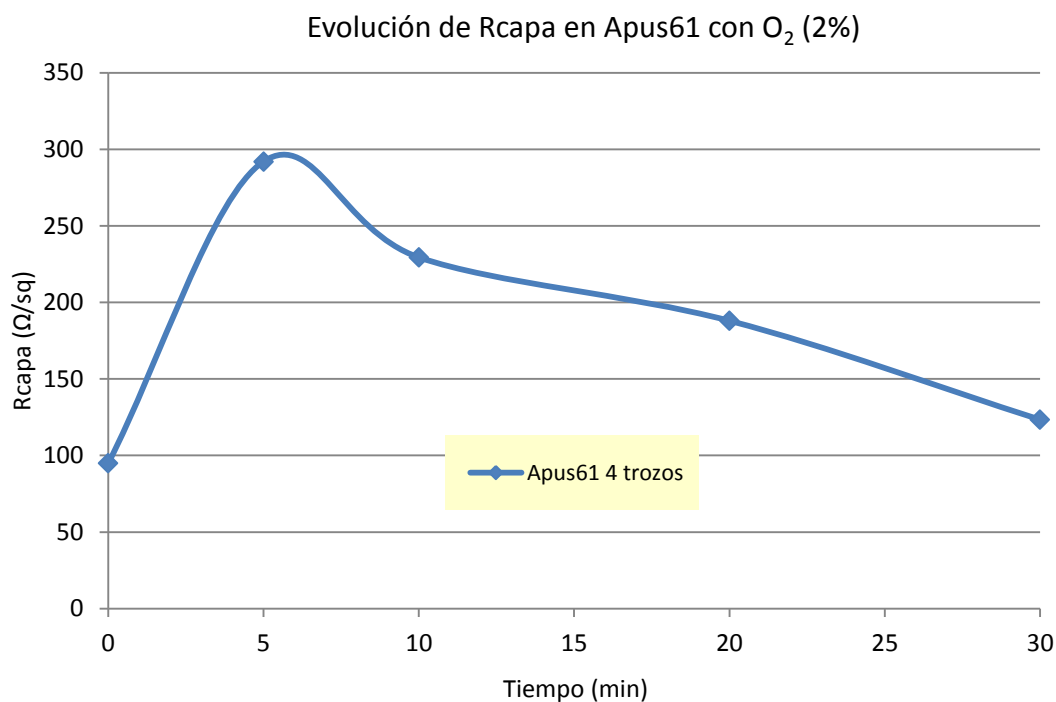


Figura 43 Evolución R_{capa} según el tiempo de difusión sustratos tipo n

6.4.3.- DIFUSIÓN DE BORO EN SUSTRATOS TIPO P

6.4.3.1.- Procesado

En este caso hay que tener en cuenta que la cara frontal será la dopada con fósforo mientras que la cara trasera será dopada con boro, por tanto el perfil de dopado de boro no será tan determinante en la eficiencia de la célula ya que el emisor frontal será el fósforo.

En este caso, la R_{capa} medida con el equipo 4 puntas corresponde al paralelo de las resistencias de capa del bulk y del emisor.

$$\frac{1}{R_{medida}} = \frac{1}{R_{bulk}} + \frac{1}{R_{emisor}} \quad (23)$$

La ruta de proceso utilizada es la siguiente:



Figura 44 Esquema de los procesos empleados: minicélulas Only78 (en 4 trozos)

6.4.3.1.- Caracterización

En la tabla que se muestra en este apartado, se presenta la resistencia de capa medida con el método de 4 puntas y que se corresponde con el paralelo entre el bulk, tipo p, y la R_{\square} del emisor de boro, que aparece como P.

	Only78_1	Only78_2	Only78_3	Only78_4
AVE±UNI bulk(Ω /sq)	113,5±2,64			
Tiempo RTP (min)	5	10	20	30
AVE ±UNI medida (Ω /sq)	65,79±10,79	66,98±5,53	54,45±9,16	63,61±7,74
AVE P (Ω /sq)	156,51	163,42	104,66	144,71

Tabla 11 R_{\square} de los trozos de Only78

A continuación se muestra la relación entre la resistencia de capa medida en la cara p y el tiempo de drive-in:

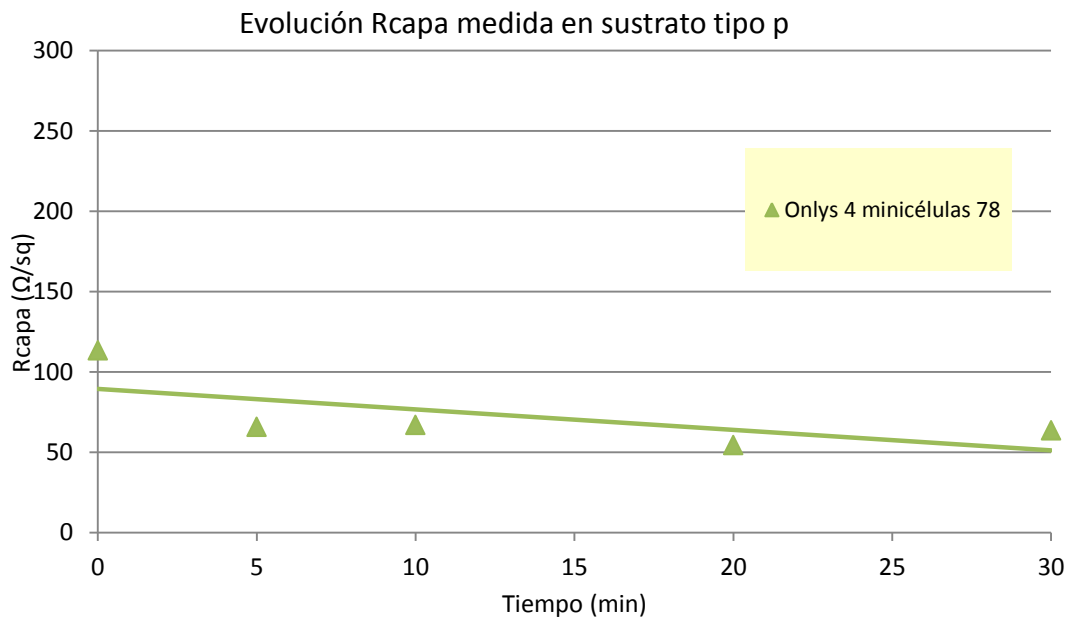


Figura 45 Evolución de la resistencia de capa medida con el tiempo de drive-in en sustratos tipo p. Partiendo del bulk (valor correspondiente a tiempo 0), la resistencia de capa disminuye al dopar con boro, esto es, al introducir mayor cantidad de dopantes en el silicio, Figura 45. Sin embargo, conforme aumenta el tiempo de drive-in, la resistencia de capa no varía altamente. Es decir, **la influencia de la duración del proceso de drive-in no parece tan determinante en el perfil del dopante en sustratos tipo p como n.**

6.4.4.- TEMPERATURA DE DRIVE-IN

Una forma de aumentar el dopado con boro es aumentar su límite de solubilidad en el Si, aumentando la temperatura del proceso hasta los 1000°C o 1100°C con rampas de calentamiento y de enfriamiento de 100°C/s [26]. Sin embargo, la temperatura del proceso está limitada por la **capacidad del equipo RTP del laboratorio**. Al consultar el manual del equipo se detecta que para trabajar por encima de 1000°C es necesario ocultar los termopares y trabajar con un pirómetro que actualmente no está instalado. Este pirómetro está capacitado para medir temperaturas hasta 1300°C, aunque se recomienda que nunca se trabaje por encima de 1000°C demasiado tiempo porque existen juntas que se deterioran rápidamente. Además, el gradiente de temperatura nunca debe ser mayor a 50°C/s debido a que el estrés causado por la diferencia en los coeficientes de expansión térmica de los materiales que componen la cámara de procesos del RTP podría deteriorar el equipo.

Con estas limitaciones, se decide no realizar procesos a mayor temperatura y **seguir explorando las posibilidades del proceso de difusión de boro a 950°C.**

6.4.5.- ATMÓSFERA DURANTE LA DIFUSIÓN

6.4.5.1.- Procesado

El siguiente paso es comprobar la influencia de la atmósfera, así pues, se realizan experimentos de difusión de boro con obleas tipo p y dos atmósferas distintas:

- Manteniendo una cantidad de oxígeno del 2% en nitrógeno
- Aire.

Los sustratos empleados son monotexturizados básicos (células Only) y monotexturizados ácidos (células Ra).

6.4.5.2.- Caracterización

En la gráfica siguiente se observa cómo las células en las que se ha empleado una atmósfera de aire tienen mayor resistencia capa que las células dónde la cantidad de O₂ estaba fijada al 2%. Además, en las muestras realizadas en aire, la variable tiempo parece tener más influencia en la difusión del boro.

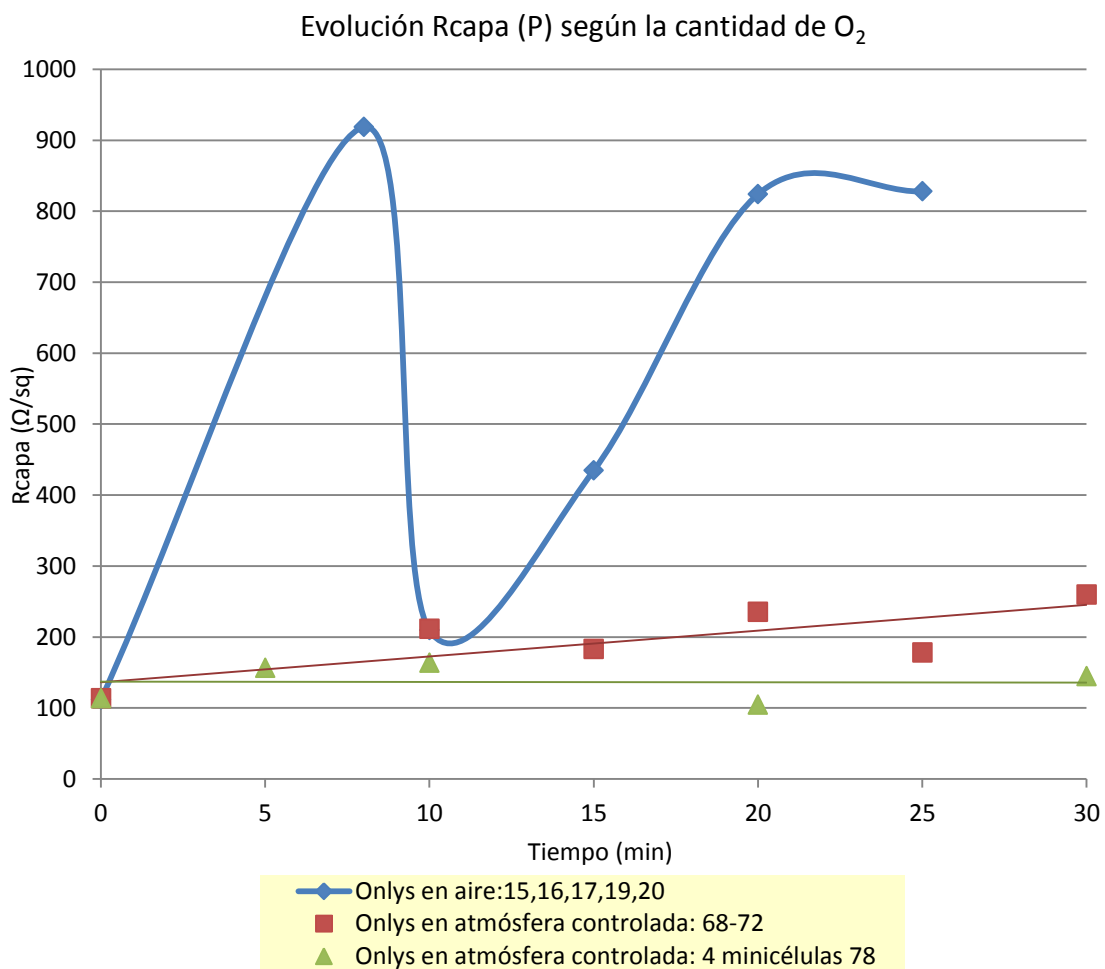


Figura 46 Evolución de Rcapa según el % de O₂ y el tiempo

Visto lo anterior, se determina que **es necesario controlar el % de O₂** y mantener un valor en

torno al 2% para evitar tener valores de resistencia de capa con alta variabilidad y mayores de los deseados debido a que se forme una capa de SiO₂ y que el boro se difunda en esta capa en vez de en la oblea de Si, como es deseable [26].

6.4.6.- DRIVE-IN CON LÁSER

El proceso de drive-in con láser se presenta como alternativa al uso de la técnica de RTP (Rapid Thermal Process) desarrollada en los apartados anteriores.

Actualmente se ha conseguido emplear laser para conseguir células de alta eficiencia con emisores selectivos de fósforo en sustratos tipo p. Sin embargo, su uso no está extendido para la difusión de boro, pero el control del proceso que ofrece el uso del láser hace que sea una técnica prometedora [27].

6.4.6.1.- Procesado

La forma de proceder es hacer pasadas con el láser en células a las que previamente se les ha depositado el SOD de boro. Para acotar la corriente y el solapamiento de los spots a emplear, se dibujan con el láser IR a una frecuencia de 20 kHz, 30 cuadrados de 1,5 cm X 1,5 cm, en 2 tipos de sustratos; **uno tipo p** (Only79) y otro **tipo n** (Apus59), completando el siguiente patrón:

19,5 A s=0=ds	20 A s=0=ds	20,5 A s=0=ds	21A s=0=ds	21,5 A s=0=ds	22 A s=0=ds
19,5 A s=0.2=ds	20 A s=0.2=ds	20,5 A s=0.2=ds	21 A s=0.2=ds	21,5 A s=0.2=ds	22 A s=0.2=ds
19,5 A s=0.3=ds	20 A s=0.3=ds	20,5 A s=0.3=ds	21 A s=0.3=ds	21,5 A s=0.3=ds	22 A s=0.3=ds
19,5 A s=0.4=ds	20 A s=0.4=ds	20,5 A s=0.4=ds	21 A s=0.4=ds	21,5 A s=0.4=ds	22 A s=0.4=ds
19,5 A s=0=ds	20 A s=0=ds	20,5 A s=0=ds	21A s=0=ds	21,5 A s=0=ds	22 A s=0=ds

Figura 47 Patrón con los parámetros del láser

Para conseguir los parámetros anteriores hay que modificar la velocidad de los espejos del láser y la distancia entre líneas o pasadas. Los cálculos se hacen para conseguir el mismo solapamiento entre puntos de una línea (s) y líneas distintas (ds).

- o Velocidad de los espejos del láser (V en mm/s):

$$s=1-\frac{V}{Df} \quad (24)$$

Dónde:

s: solapamiento

D: diámetro del láser, se toma como constante e igual a $50\mu\text{m}$.

f: frecuencia del láser, fija en 20kHz

La velocidad de los espejos necesaria para conseguir distintos solapamiento entre puntos, de acuerdo a la fórmula anteriormente descrita, es:

$$s=0 \rightarrow v=1000 \text{ mm/s}$$

$$s=0.2 \rightarrow v=800 \text{ mm/s}$$

$$s=0.3 \rightarrow v=700 \text{ mm/s.}$$

$$s=0.4 \rightarrow v=600 \text{ mm/s.}$$

La distancia entre líneas, teniendo en cuenta que el diámetro del spot del láser es de $50 \mu\text{m}$, es

$$ds=0 \rightarrow d=50 \mu\text{m}$$

$$ds=0.2 \rightarrow d=45 \mu\text{m.}$$

$$ds=0.3 \rightarrow d=42,5 \mu\text{m.}$$

$$ds=0.4 \rightarrow d=40 \mu\text{m.}$$

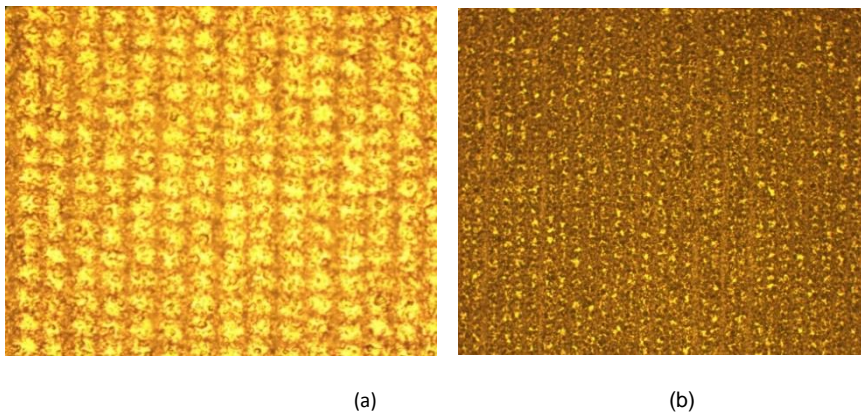


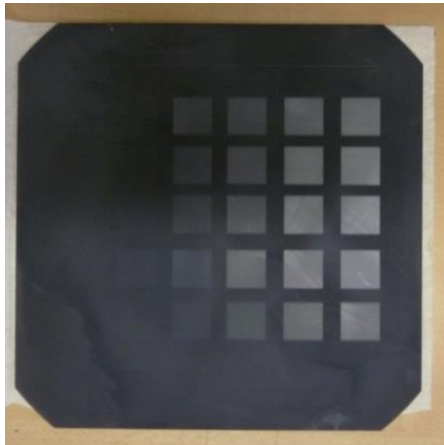
Figura 48 a) Prueba $ds=s=0,2$ y 22 A. b) Prueba $ds=s=0,4$ y 22 A

Una vez se hayan completado el proceso láser se medirá la resistencia de capa en cada cuadrado. El valor mínimo de R_{capa} determinará los parámetros del proceso laser deseados para cada tipo de sustrato para posteriores integraciones utilizando el láser como proceso de drive-in.

6.4.6.2.- Caracterización

○ Sobre sustratos tipo n: Apus59

En la Figura 49 se observa la correspondencia entre el dibujo del láser, los parámetros correspondientes y los valores de resistencia capa de la Apus59.



(a)

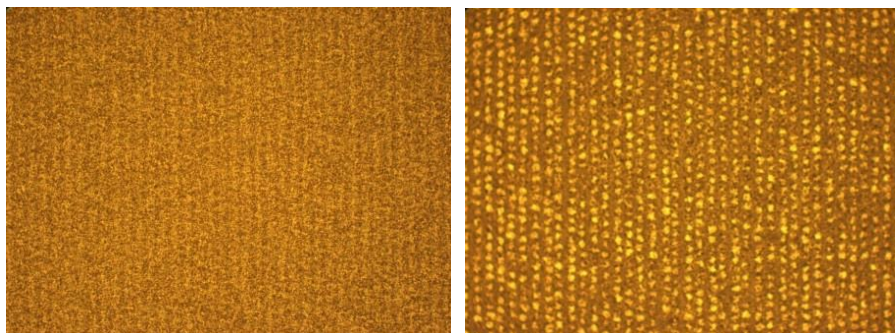
	I (A)	19,5	20	20,5	21	21,5	22
s=ds							
0		97,7	87,1	74,81	77,3	87,3	103
0.2		88,4	79,63	74,51	72	(DESV)	1480
0.3		92	79,89	68,84	70,8	7003	950
0.4		90,1	78,21	71,42	69,2	1410	836
0		91,4	77,74	75,76	76,7	78,1	95,9

(b)

Figura 49 a) Patrón aplicado a Apus59. b) Valores de R_{capa} Apus59

Hay que tener en cuenta en la Figura 49 a, la columna correspondiente a 19,5 A no se marca en la oblea y la correspondiente a 20 A apenas está visible. En la Figura 49 b el punto que aparece como DESV, corresponde a un punto en el que la desviación entre máximo y mínimo medida por el cuatro puntas es elevada, esto ocurre en valores de resistencia alta. En cuanto a resistencia de capa mínima después de la limpieza con HF es de 68,84 Ω/sq y corresponde a los parámetros $s=ds=0,3$ y 20,5 A. **Este valor de resistencia es mucho menor que cualquier otro conseguido después de un proceso de RTP.**

Las imágenes del microscopio confirman que el patrón considerado como óptimo produce un drive-in homogéneo en la superficie, Figura 50 a. Esto contrasta con el resultado obtenido con el mismo solapamiento pero mayor corriente, donde se observan zonas diferenciadas correspondientes al centro del spot del láser, Figura 50 b.



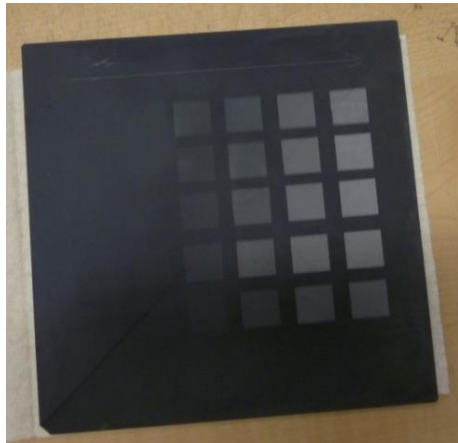
(a)

(b)

Figura 50 a) Apus59 $s=0,3$ y 20,5 A b) Apus59 $s=0,3$ y 22 A

○ Sobre sustratos tipo p: Only79

En la Figura 51, se observa la correspondencia entre el dibujo del láser, los parámetros correspondientes y los valores de resistencia capa de la Only79.



(a)

	I (A)	19,5	20	20,5	21	21,5	22
s=ds							
0		114	113	109	108	107	106
0.2		113	111	108	108	106	102
0.3		116	112	106	106	103	98,5
0.4		115	112	111	106	103	99,4
0		114	111	112	109	119	108

(b)

Figura 51 a) Patrón aplicado Only79. b) Valores R_{capa}

En este caso la resistencia del bulk era de $112 \Omega/\text{sq}$, viendo los valores de la Figura 51 b parece que el proceso de drive-in con láser no ha influido altamente en su valor. La resistencia de capa mínima después de la limpieza con HF es de $98,5 \Omega/\text{sq}$ que corresponde a los parámetros $s=ds=0,3$ y 22 A .

El proceso de drive-in con láser ha conseguido R_{\square} cercanas al objetivo de $100 \Omega/\text{sq}$. Este comportamiento da cuenta de que el proceso de **drive-in con láser puede ser una alternativa para alcanzar menores resistencias serie y por tanto, un mayor FF.**

6.5.- RESUMEN DEL DESARROLLO DEL PROCESO DE DIFUSIÓN DE BORO

A modo de resumen de los apartados anteriores se presentan esquemáticamente las conclusiones de los diversos experimentos.

- En la ruta de integración de células bifaciales hay que proteger con una barrera de óxido de silicio la cara que no va a estar dopada. Es decir se hará una barrera de óxido frontal anterior al dopado trasero y viceversa.
- El tiempo de drive-in óptimo para sustratos tipo n está entre 20 y 30 minutos cuando se realiza el proceso con RTP. Mientras que para sustratos tipo p el tiempo no tiene tanta influencia en la R_{\square} , por lo que el tiempo a emplear está entre los 10 y 30 minutos.
- Hay que controlar la atmósfera durante el proceso de RTP. La cantidad de O_2 se debe mantener en torno al 2% en N_2 .
- La técnica de drive-in con láser, consigue resistencias de capa menores que el drive-in con RTP. Se estudiará como alternativa al proceso de RTP.

7.- DESARROLLO EXPERIMENTAL: PROCESO DE SERIGRAFÍA

7.1.- OBJETIVO

En la etapa final de la ruta de integración se realiza el proceso de serigrafía, ver [21]. El objetivo de este apartado es encontrar los parámetros del proceso de serigrafía adecuados para las nuevas pastas y pantallas adquiridas en CENER para el procesado de células bifaciales.

La calidad de la serigrafía se medirá de acuerdo a las anchuras, alturas de los fingers y la continuidad del contacto, de acuerdo a los siguientes criterios

- Altura de los fingers: mayor de 10 μm .
- Rango de anchura de los fingers: $\pm 15\%$ respecto de la anchura nominal de los fingers en la pantalla.
- Cortes en la metalización: no tienen que ser frecuentes.

7.2.- FUNDAMENTOS

Anterior a cualquier proceso de serigrafía hay que estudiar la **compatibilidad entre la pasta y la pantalla**. Durante el desarrollo de este trabajo fin de máster se han empleado cuatro pantallas distintas diseñadas en CENER y cuatro pastas. Las pastas empleadas son del fabricante Heareus, dos son de Ag/Al para formar el contacto con el emisor p+ y dos de Ag para el contacto con el emisor n+.

Las pastas que se van a utilizar tienen las siguientes propiedades y aspectos a tener en cuenta, de acuerdo a las hojas de especificaciones del fabricante:

	Emisor p+ (Ag/Al)		Emisor n+ (Ag)	
	SOL9350C	SOL9360A	SOL9641B	SOL9641B*
Firing	IR furnace 740-800°C	IR furnace 740-800°C	IR furnace 740-800°C	IR furnace 740-800°C
Viscosidad a 1rpm y 25°C	120-220 kcps	80-140 kcps	40-140 kcps	40-140 kcps
FOG (Tamaño de grano) 50% (μm)	≤ 5	≤ 5	≤ 10	≤ 8
Secado	10 min en horno de aire a T=150°C o 20 s en horno IR a T=250-300°C	10 min en horno de aire a T=150°C o 20 s en horno IR a T=250-300°C	10 min en horno de aire a T=150°C o 20 s en horno IR a T=250-300°C	10 min en horno de aire a T=150°C o 20 s en horno IR a T=250-300°C
Almacenamiento	Lugar seco 5°C-25°C	Lugar seco 5°C-25°C	Lugar seco 5°C-25°C	Lugar seco 5°C-25°C

Tabla 12 Características de las pastas

Además, el suministrador de las pastas envía las siguientes recomendaciones de proceso:

- Print gap: 1 o 1,2 mm.
- Velocidad de las espátulas: 250 mm/s.
- Velocidad de inundado: 300 mm/s.
- Características del inundado: de pequeño grosor (hoja).
- Presión: 65-75 N.
- Temperatura de la pasta: $23^{\circ}\text{C} < T^a < 40^{\circ}\text{C}$.
- Agitado de la pasta doble del habitual.

En todas las pruebas siguientes, se atempera la sala a una temperatura **entre 26 °C y 29 °C**, y se agita la pasta intensamente entre 15 y 20 minutos hasta que se aprecie un cambio de tonalidad (más clara) y viscosidad en la pasta (más líquida). La velocidad de las espátulas está limitada por el equipo de serigrafía a 200 mm/s.

En la siguiente tabla se estudia la adecuación de las pastas a las pantallas disponibles.

	Emisor p+				Emisor n+			
	Pantallas		Pastas Ag/Al		Pantallas		Pastas Ag	
	Joyce Front	Katya Harvey Summer	SOL9350 C	SOL9360 A	Joyce Back	Peva 00222 6/30	SOL9641 B	SOL9641 B*
Número de alambres/pulgada	325	300/320	360	325	360	290	360	360
Espesor de la malla (µm)	16	18	16	16	16	20	16	16
EOM Espesor de la emulsión (µm)	14	18	12-16	12-20	15	18	12-16	12-16
Anchura finger (µm)	45±3	65	45-90	28-45	40±3	60-90	≥30	≥30

Tabla 13 Compatibilidad pastas-pantallas [28]

La anchura de los fingers de la pantalla debe ser igual o mayor que la anchura de los fingers que admiten las pastas, este requisito se cumple en las combinaciones pasta-pantalla anteriores. A su vez, el número de alambres/pulgada de las pantallas tiene que ser menor o igual que el admisible por las pastas. El espesor de la malla y de la emulsión no son parámetros tan críticos.

7.3.- PROTOCOLO DE ENSAYOS

Las pantallas tienen los fingers muy finos y las pastas son nuevas, por lo que se diseñan una serie de experimentos con el fin de determinar unos parámetros de proceso adecuados para el

nuevo utillaje. Estos experimentos, se realizan con tres combinaciones de pantallas y pastas:

- Pantallas Joyce Front y Joyce back con pastas SOL9350C y SOL9641B.
- Pantallas Joyce Front y Joyce back con pastas SOL9360A y SOL9641B*.
- Pantallas Katya y Peva con pastas SOL9360A y SOL9641B*.

Todos los experimentos de serigrafía se han realizado partiendo del protocolo de operación establecido en CENER y se han caracterizado con ayuda del microscopio óptico y del perfilómetro de contacto.

7.4.- RESULTADOS EXPERIMENTALES

7.4.1.- INUNDADO MANUAL

7.4.1.1.- Procesado

El primer utillaje empleado es: **pantallas Joyce Front y Joyce back con pastas SOL9350C y SOL9641B** respectivamente. A su vez, los primeros parámetros del proceso empleados son los siguientes:

	Emisor p+	Emisor n+
	Joyce Front SOL9350C (Ag/Al)	Joyce Back SOL9641B (Ag)
Forward speed	200mm/s	200mm/s
Reverse speed	200mm/s	200mm/s
Front pressure	16Kg	16Kg
Rear pressure	16Kg	16Kg
Print gap	1,3mm	1,3mm
Sequence	Flood manual+print+print	Flood manual+print+print

Tabla 14 Parámetros de la prueba de inundado manual

La secuencia Flood manual+print+print se compone de dos etapas. La primera de ellas corresponde al inundado manual que consiste en extender la pasta utilizando la espátula frontal, mientras que la etapa print+print, es el paso automático de las espátulas desde un extremo de la pantalla hasta el otro.

7.4.1.2.- Caracterización

En primer lugar se estudia la viabilidad de los parámetros aplicándolos a sustratos dummies, que no se van a integrar, se caracteriza su geometría en tres zonas de la superficie y se calcula la media.

	Emisor p+			Emisor n+		
	Joyce Front SOL9350C (Ag/Al)			Joyce Back SOL9641B (Ag)		
Anchura finger media (μm)	39,55	47,42	45,27	46,5	39,5	40
Altura finger media (μm)	16,45	12,32	13,38	16,90	15,07	16,38

Tabla 15 Geometría de los fingers delanteros

Se considera que las medidas cumplen con los criterios de altura y anchura en todas las zonas.

- Serigrafía del emisor p+: $38 < \text{Ancho finger dummy} < 52$, altura finger $> 10 \mu\text{m}$
- Serigrafía del emisor n+: $34 < \text{Ancho finger dummy} < 46$, Altura finger $> 10 \mu\text{m}$.

Cumpléndose los criterios de altura y anchura, y no siendo habituales los cortes se emplearán los parámetros de la Tabla 14 en las siguientes integraciones.

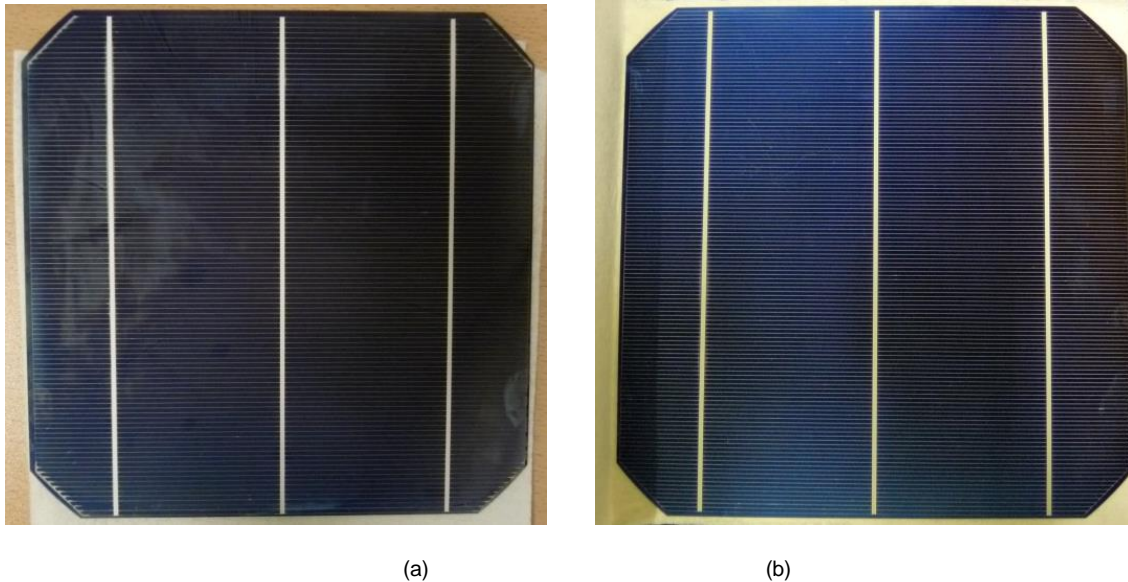


Figura 52 Serigrafía frontal y trasera optimizada

7.4.2.- INUNDADO AUTOMÁTICO

7.4.2.1.- Procesado

Para intentar evitar problemas de repetitividad en los resultados **se opta por automatizar el inundado**, de forma que la presión y el recorrido del **fluid** sea el mismo para todas las pruebas.

La forma de proceder es intentar seguir las recomendaciones del fabricante, incorporando el inundado automático, para ello se emplean las **pantallas Joyce Front y Joyce back con pastas SOL9360A y SOL9641B***.

	Emisor p+	Emisor n+
	Joyce Front SOL9360A	Joyce Back SOL9641B* (Ag)
Forward speed	200mm/s	200mm/s
Reverse speed	200mm/s	200mm/s
Front pressure	16Kg	16Kg
Rear pressure	16Kg	16Kg
Print gap	1,3mm	1,3mm
Sequence	Flood+print	Flood+print

Tabla 16 Parámetros de prueba del inundado automático

7.4.2.2.- Caracterización

La secuencia flood automático y print se comprueba en sustratos dummies.

Conforme avanza el flood automático la pasta se acumula en la **pared de la espátula**, de forma que la disponible para el inundado es insuficiente y la zona inferior queda sin serigrafiar.

En la Figura 53, se observa la correspondencia entre los defectos observados en el sustrato y el estado en el que queda la pantalla.

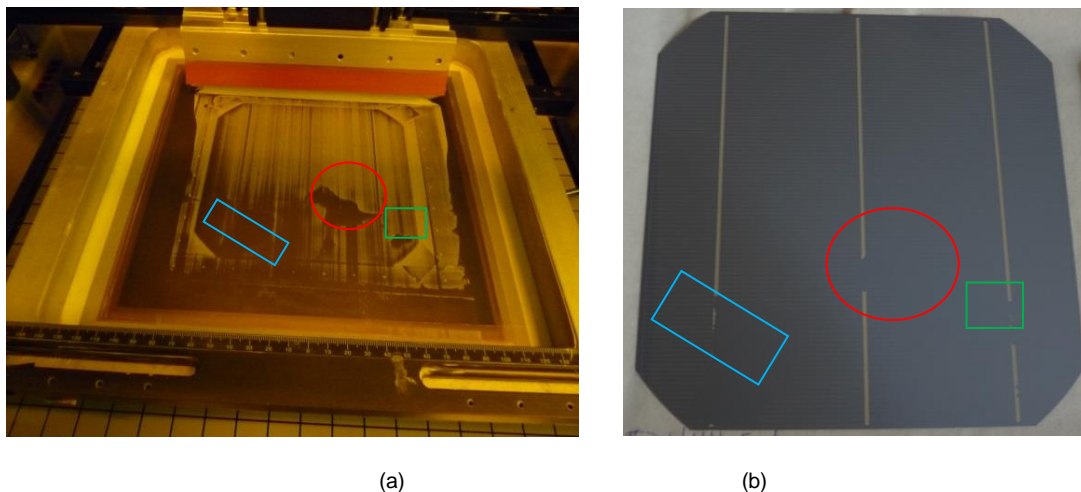


Figura 53 Primeros resultados del inundado automático: a) Estado de la pantalla después del proceso b) Estado de la oblea

Para revertir el problema anteriormente descrito se deposita un **cordón de pasta con una base más ancha**, se marca el ancho de la base del cordón en el lateral derecho de la pantalla.

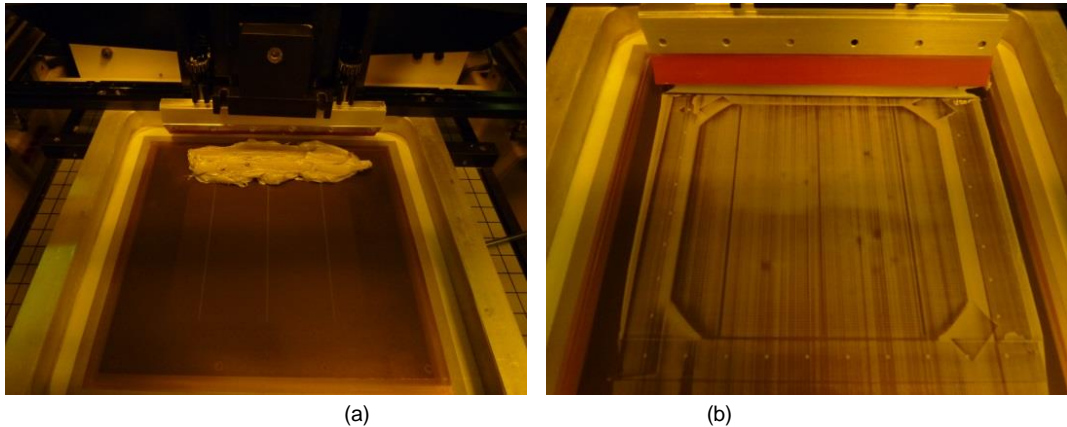


Figura 54 Segundos resultados del inundado automático: a) Cordón de serigrafía b) Estado de la pantalla

El cordón de la Figura 54 a, ha sido suficiente para completar adecuadamente la secuencia flood+print. La pasta ha llegado a toda la pantalla como se observa en la Figura 54 b. Al inspeccionar con microscopio se observa que los fingers no tienen cortes y su geometría es adecuada.

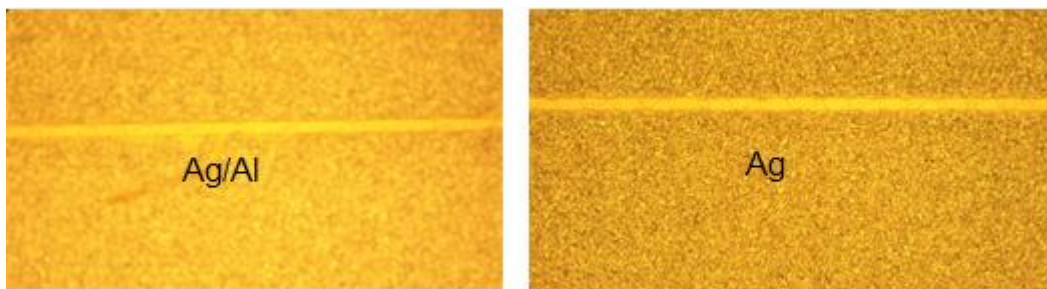


Figura 55 Finger pasta Ag/Al y Ag

En definitiva, consiguiendo un **flood automático correcto la serigrafía es de calidad**, por lo que este paso se incorpora al protocolo de serigrafía.

7.4.3.- PRESIÓN DE LAS ESPÁTULAS

7.4.3.1.- Procesado

Incorporando la mejora del flood automático se varía la presión de la espátula de los 16 Kg anteriormente empleados a 10 Kg y 20 Kg. El utillaje empleado es la **pantalla Joyce Back y la pasta SOL9641B***

	Emisor n+	Emisor n+
	Joyce Back SOL9641B* (Ag)	Joyce Back SOL9641B* (Ag)
Forward speed	200mm/s	200mm/s
Reverse speed	200mm/s	200mm/s
Front pressure	10Kg	20Kg
Rear pressure	10Kg	20Kg

Print gap	1,3mm	1,3mm
Sequence	Flood+print	Flood+print

Tabla 17 Parámetros de la prueba a 10 Kg de presión

7.4.3.2.- Caracterización

→Con 10 Kg, los fingers tienen buen grosor, pero los cortes son frecuentes. Además se observa cómo coinciden los cortes de los fingers con las marcas de la malla:

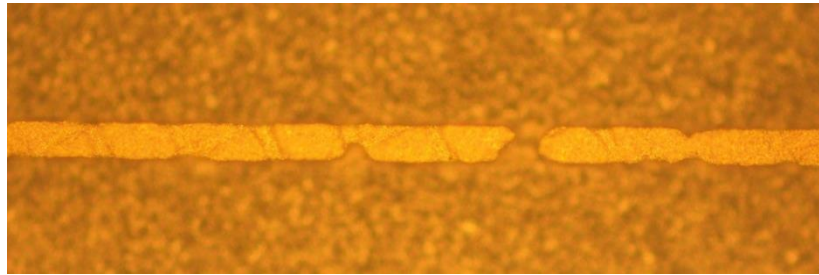


Figura 56 Detalle de un finger pasta Ag

→Con 20 Kg, el resultado es el siguiente:

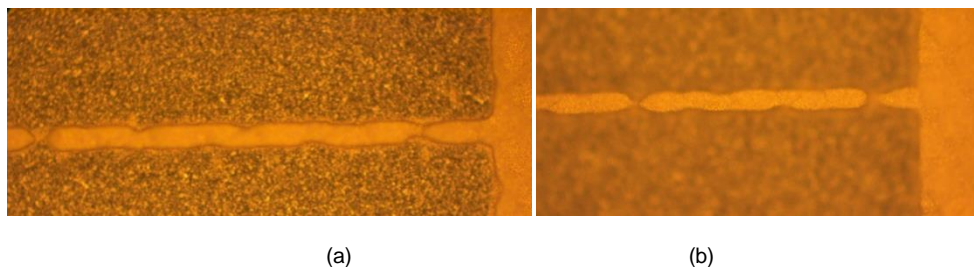


Figura 57 Detalle de fingers de pasta Ag zona cercana a bus: a) Bus central b) Bus izquierdo

La metalización no ha mejorado, los cortes son habituales y además cercanos al bus, lo que provocaría que la corriente generada no llegase a los buses.

10 kg } De las 3 presiones comprobadas la que da mejores resultados es 16 Kg. Por lo que
 16 kg } **16 kg, queda fijada como la presión de las espátulas** para el resto de pruebas de
 20 kg } serigrafía.

Conforme se serigrafían sucesivas células, la calidad se va degradando ya que la pasta se va secando y la pantalla se va obturando. Por ello, **se fija en 2 el número de células máximo a serigrafiar para obtener resultados repetitivos.**

7.5.- RESUMEN DEL DESARROLLO DEL PROCESO DE SERIGRAFÍA

Se establecen como parámetros a emplear aquellos que a lo largo de los resultados experimentales han demostrado dar los mejores resultados.

	Pastas Ag	Pastas Ag/Al
Forward speed	200mm/s	200mm/s
Reverse speed	200mm/s	200mm/s
Front pressure	16Kg	16Kg
Rear pressure	16Kg	16Kg
Print gap	1,3mm	1,3mm
Sequence	Flood+print	Flood+print

Tabla 18 Parámetros finales

8.- INTEGRACIÓN DE CÉLULAS SOLARES BIFACIALES

En este capítulo se presentan los resultados de caracterización de las primeras células bifaciales obtenidas en el laboratorio de CENER, integrando los procesos desarrollados en este trabajo fin de Máster y descritos en los capítulos anteriores. La dificultad a la hora de interpretar los resultados viene dada por el carácter bifacial de estas células, ya que no se pueden asociar a la respuesta independiente de una de las caras, sino a la estructura completa de la célula.

En cualquier caso, se va a intentar extraer la máxima información posible, según la Tabla 1. Una vez recopilada esta información se interpretan los resultados comparando lo obtenido con los valores deseados de cada parámetro según la Tabla 19.

Característica	Valor deseado	Información
R_{serie}	0,2-3 m Ω	$R_{bulk}+R_{emisor}+R_L+R_{contacto}$
		Calidad del contacto
$R_{paralelo}$	150000 Ω cm ²	Menor por un mal aislamiento de borde o si hay cortocircuitos
V_{oc}	0,65 V	Menor si existen mayores pérdidas de recombinación o si la calidad del dopado es insuficiente
EQE	1 entre 400nm y 1000nm	Más alejada de la unidad cuanto peor es la calidad del emisor
FF	100% (ideal)	Magnitud de las pérdidas

Tabla 19 : Valores deseados

8.1.- CÉLULAS N-PERT, DRIVE-IN CON HORNO RTP

8.1.1.- RUTA DE FABRICACIÓN

Las células con estructura N-PERT integradas son: Apus47 con 5 minutos de drive in, Apus45 con 10 min, Apus39 con 20 min y Apus40 con 30 min. La ruta de fabricación de las células es:

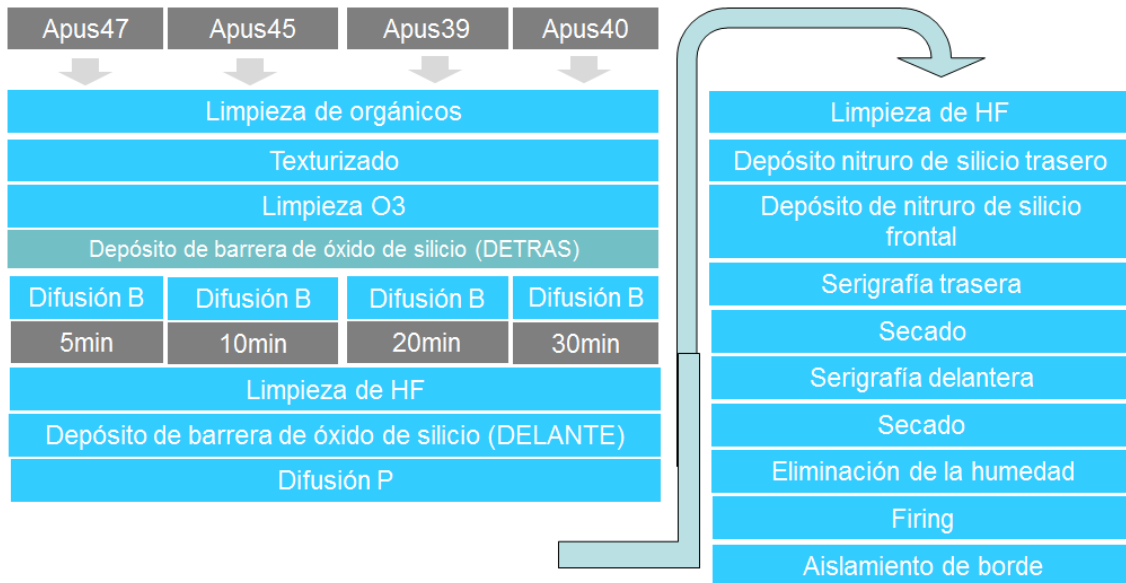


Figura 58 Ruta de fabricación PERT-N en horno RTP

8.1.2.- RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN

Los problemas del proceso de serigrafía de estas células es un factor limitante en la eficiencia de las mismas, que también complica el análisis de los resultados. A continuación, se desarrolla cada prueba de caracterización realizada.

8.1.2.1.- Pseudocurva

En la tabla siguiente la columna cara n corresponde al fósforo y la cara p al boro, las células se miden por las dos caras:

Célula		Apus47	Apus45	Apus39	Apus40
Tiempo (min)		5	10	20	30
V_{oc} (V)	p	0,5514	0,5604	0,5682	0,5584
	n	0,5748	0,5486	0,582	0,6041
$R_{paralelo}$ ($\Omega \cdot cm^2$)	p	1492,29	826,45	881,41	1117,26
	n	1739,9	682,07	889,55	2293,68

Tabla 20 Tensión de circuito abierto y resistencia paralelo de las células N-PERT

Estas células parecen tener algún cortocircuito que ha provocado que la resistencia paralelo sea baja. Además, la V_{oc} no es demasiado buena, menor de 0.6 V, lo que indica que la unión no ha sido suficientemente dopada y/o un problema de recombinación.

8.1.2.2.- Termografía y electroluminiscencia

La prueba de termografía va a consistir en recorrer los puntos de la curva de oscuridad (ver Termografía) para intentar distinguir el origen y tipo de cortocircuitos. En concreto se va a estudiar los siguientes puntos:

Zona	Inversa	Directa lineal	Límite lineal/no lineal	Directa no lineal
Tensión (V)	-3	1	1	3
Corriente (mA)	2000	200	600	2000

Tabla 21 Tensión y corriente en los distintos puntos de la curva de oscuridad

Las imágenes que se muestran en este apartado corresponden a las caras p, dopadas con boro. En cualquier caso, en las imágenes de la cara n se observan los mismos defectos observados que en la cara p. Por otro lado, la mala serigrafía de ambas caras va a complicar el análisis de la termografía de estas células.

Se aplica el siguiente razonamiento para interpretar los resultados:

- Si las células no tienen puntos calientes en la zona lineal directa, y sí que aparecen en la zona no lineal directa como zonas calientes, el problema es debido a la **mala serigrafía** del resto de la célula. En la Figura 59, se puede observar este fenómeno en una célula tipo p con estructura Al-BSF que tiene una zona mal serigrafiada.

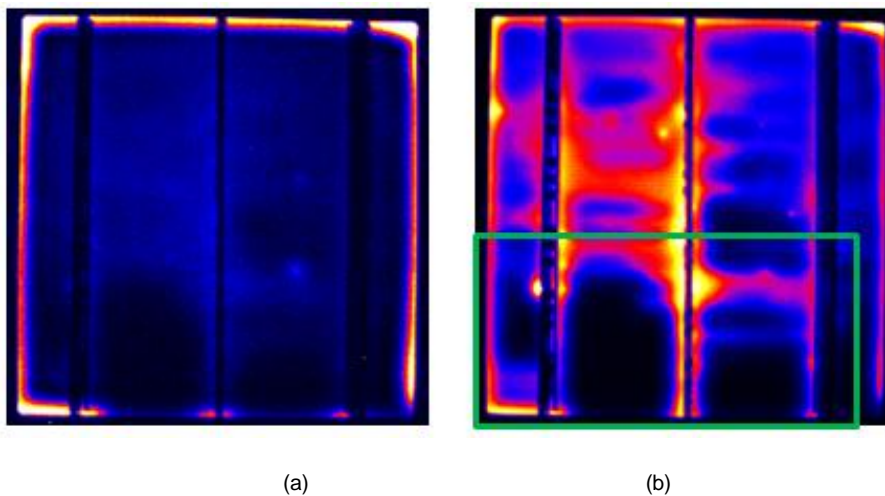


Figura 59 Imagen DLIT Only37: a) zona lineal. b) zona no lineal

- Si las células tienen puntos calientes también en la zona lineal directa, esto se debe a que el contacto **ha atravesado el emisor** como ocurría con la Apus29 y Apus30.

En los siguientes párrafos se interpretan las pruebas realizadas:

1. Drive-in durante 30 minutos:

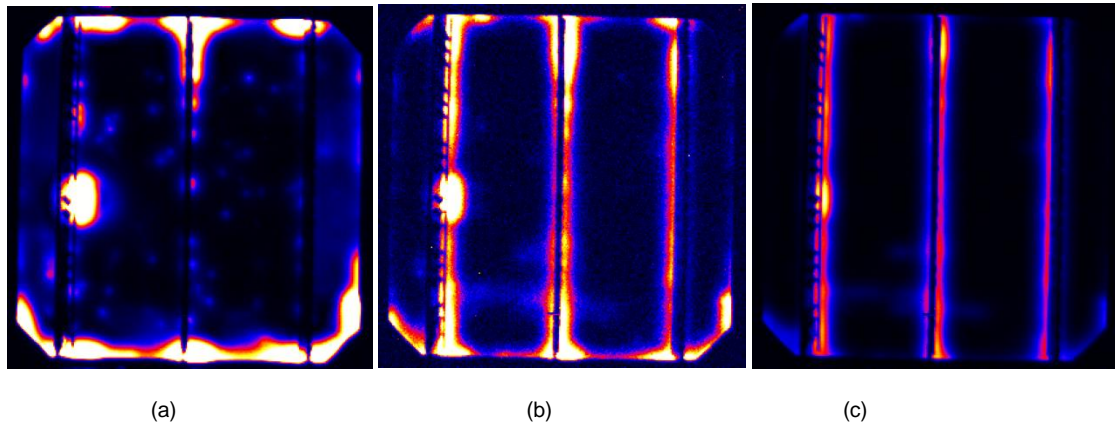


Figura 60 Termografía Apus40: a) Zona directa lineal b) Zona límite directa lineal/no lineal c) Zona no lineal

→Zona directa lineal: los buses no aparecen como zonas calientes.

→Zona no lineal directa: los buses aparecen como zonas calientes. Esto indica que el contacto no ha atravesado el emisor en los buses. Sin embargo, también existen shunts lineales que se concentran en los bordes y en un punto de la zona interior. Esto indica que **un proceso de difusión de boro con drive in durante 30 min en el RTP consigue un emisor del espesor suficiente como para no ser atravesado durante el firing.**

En el montaje de la figura siguiente se superponen los resultados de las imágenes de electroluminiscencia y termografía. La técnica de electroluminiscencia confirma que la corriente no se reparte por la célula sino que se limita a los buses (única zona iluminada). A excepción de los buses el resto de la célula es una zona central inactiva (oscura) asociada a la mala serigrafía (fingers rotos), la corriente no se distribuye por la célula.

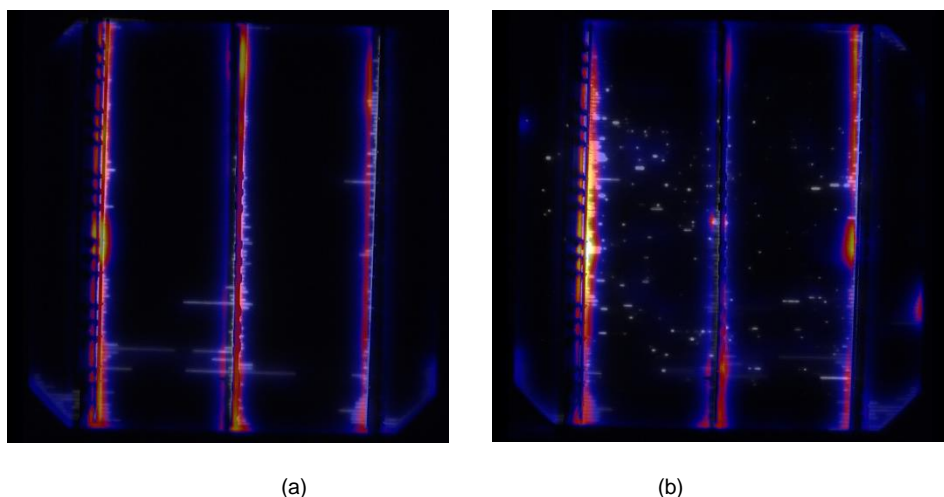


Figura 61 Superposición electro-termografía Apus40 zona lineal directa: a) Cara n b) Cara p

2. Drive-in durante 20 minutos:

A continuación se representa cómo evoluciona la imagen de termografía de la Apus39, al llevarla a trabajar en distintos puntos de polarización en la curva de oscuridad.

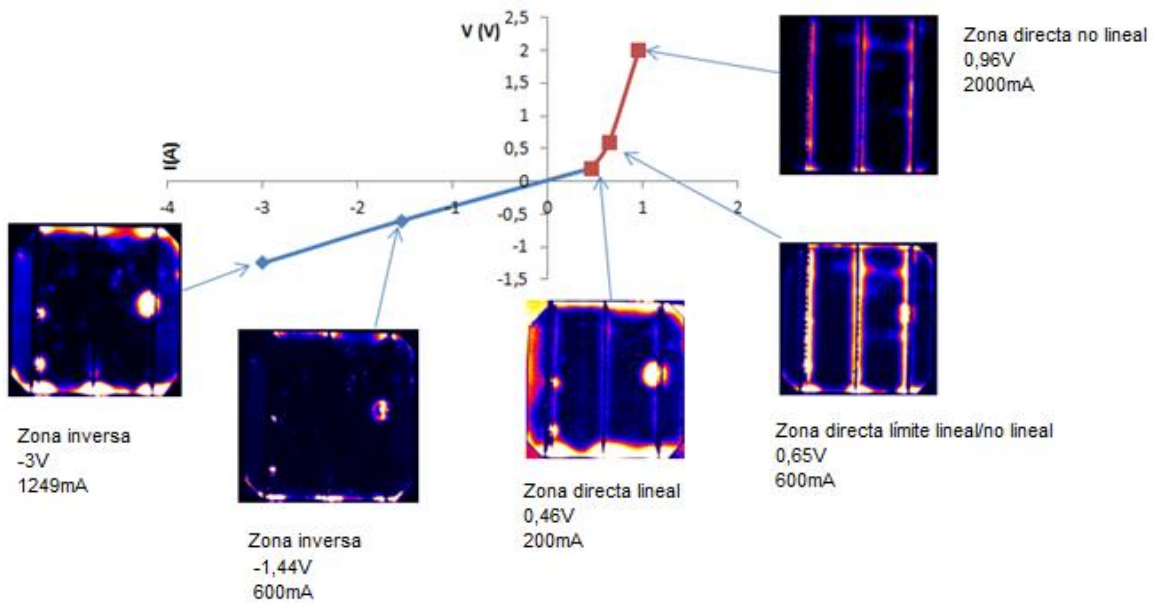


Figura 62 Evolución de las imágenes de termografía de Apus39 a distintas polarizaciones

→ Zona directa lineal: los buses no aparecen como zonas calientes. Además, hay coincidencia con la zona inversa. Hay shunts lineales que se concentran en los bordes y en algún punto de la zona interior. Se necesitaría aislar los bordes.

→ Zona no lineal directa: los buses aparecen como zonas de disipación de calor, por la mala serigrafía del resto de la célula.

Un proceso de difusión de boro con drive-in durante 20 min en el RTP consigue un emisor del espesor suficiente como para no ser atravesado durante el firing.

3. Drive-in durante 10min:

En la figura siguiente se observa que la célula Apus45 tiene un comportamiento similar a las Apus39 y Apus40. **Un proceso de difusión de boro con drive in durante 10 min en el RTP consigue un emisor del espesor suficiente como para no ser atravesado durante el firing.**

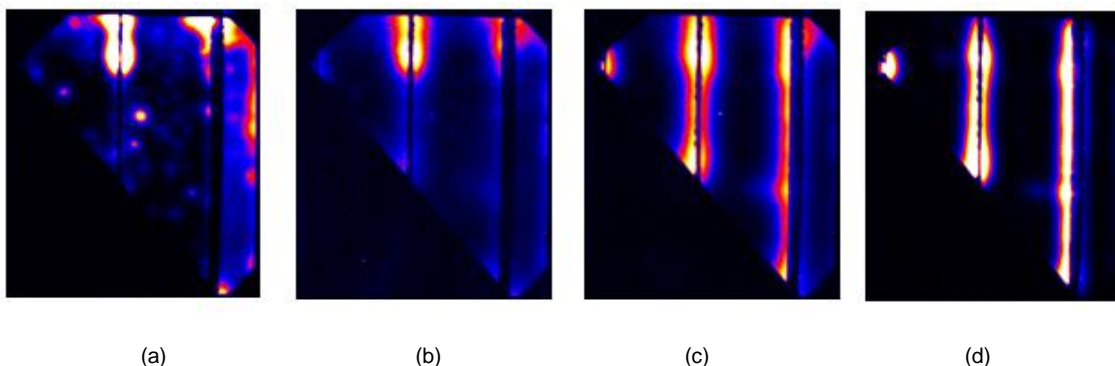


Figura 63 Termografía Apus45 P: a) Zona inversa b) Zona directa lineal c) Límite zona directa lineal/no lineal d) Zona no lineal.

4. Drive-in durante 5 min:

En la Figura 64 se muestra las imágenes de termografía de la Apus47 a distintas polarizaciones:

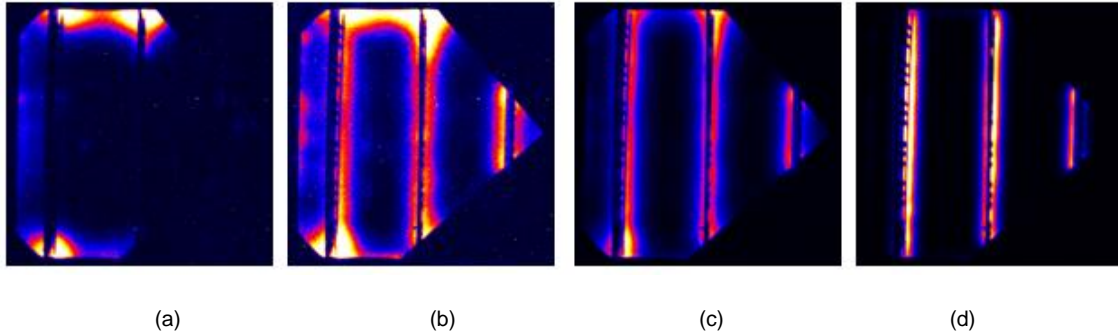


Figura 64 Termografía Apus47 P: a) Zona inversa b) Zona directa lineal c) Límite zona directa lineal/no lineal d) Zona directa no lineal

→ Zona directa lineal: los buses aparecen como zonas más calientes, si hay cortocircuito en el emisor.

En este caso, no hay coincidencia exacta con la zona inversa. Hay shunts lineales que se concentran en los extremos de los buses. Sin embargo, las zonas centrales de los buses no son lineales y corresponden a zonas dónde se ha cortocircuitado la célula.

Un proceso de difusión de boro con drive-in durante 5 min en el RTP no consigue un emisor del espesor suficiente como para no ser atravesado durante el firing.

8.1.2.3.- Curva I-V (Simulador solar)

Empleando el simulador solar del laboratorio, como se desarrolla en el TFM, se obtiene la curva I-V de las células N-PERT.

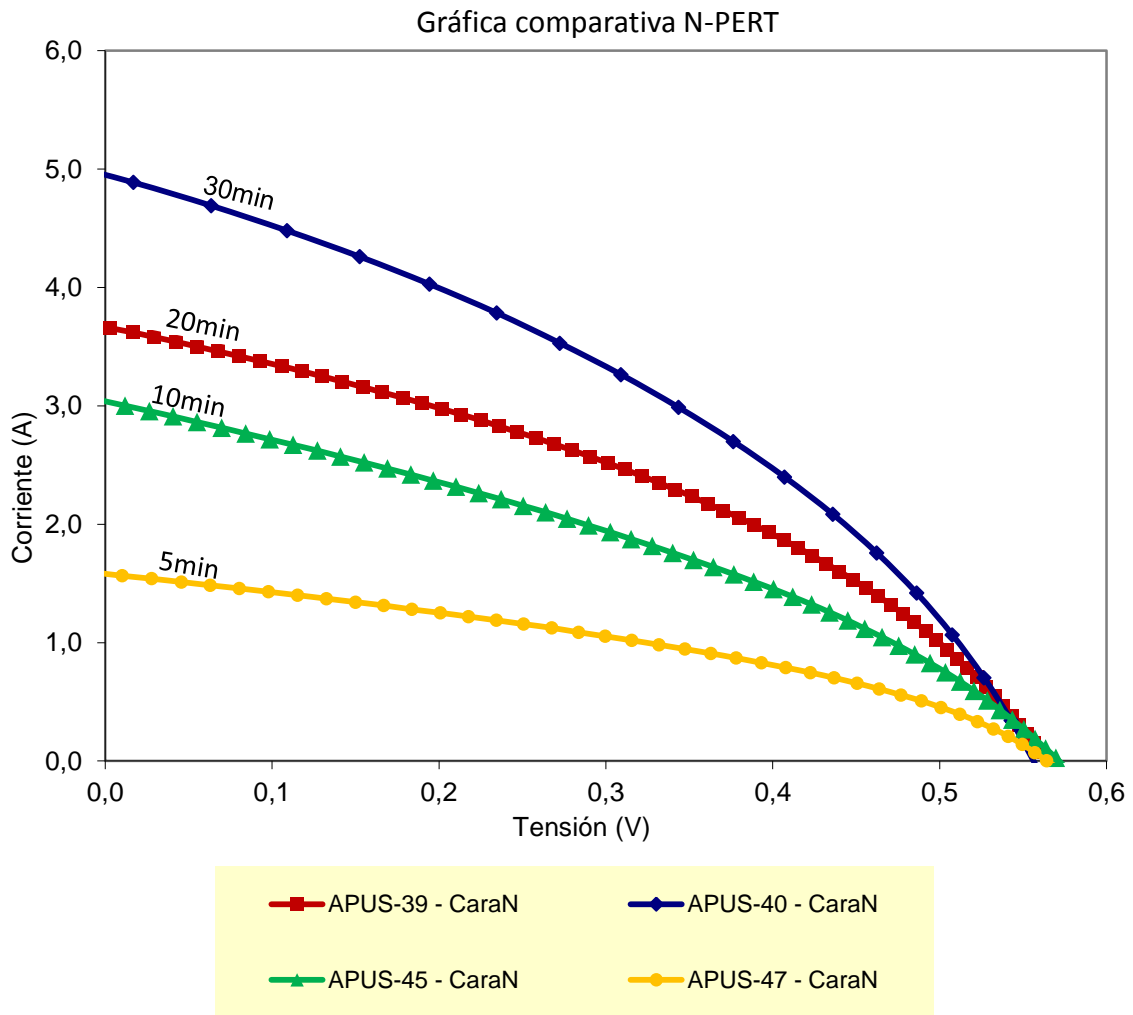


Figura 65 Curva I-V células N-PERT bifaciales

	Tiempo RTP (min)	Voc (V)	Isc (mA)	Pmax (mW)	Vmax (V)	I _{max} (mA)	FF (%)	η (%)
APUS-47-N	5	0,564	1,586	0,331	0,363	0,913	37,031	1,616
APUS-45-N	10	0,572	3,038	0,598	0,353	1,697	34,458	2,483
APUS-39-N	20	0,564	3,666	0,785	0,351	2,235	37,969	3,259
APUS-40-N	30	0,556	4,829	1,007	0,355	2,834	37,467	4,178

Tabla 22 Parámetros curva I-V células N-PERT bifaciales

La curva I-V (Figura 65), en cualquier caso, está muy influenciada por el problema de serigrafía que sufrieron estas células. Esto implica que la resistencia serie asociada a un mal contacto es elevada. Además, la corriente de cortocircuito es baja en las células caracterizadas, la tensión de circuito abierto está por debajo de lo ideal y la resistencia paralelo es menor que la de una

célula comercial. El mejor resultado en términos de eficiencia se encuentra para la célula Apus40 con un tiempo de drive-in en el proceso de difusión de boro de 30 minutos. Además, de acuerdo al estudio de imágenes de termografía realizado se ha podido concluir que para tiempos mayores de 10 minutos, **se ha conseguido superar el cortocircuito de la unión de las Apus29 y Apus30**, ver apartado ANTECEDENTES, que tenían un tiempo de drive-in de sólo 1 minuto.

8.2.- CÉLULAS P-PERT, DRIVE-IN CON HORNO RTP

8.2.1.- RUTA DE FABRICACIÓN

En los sustratos tipo p, el emisor principal es el fósforo. El proceso seguido por las células Ra22 y Only16, se representa en el siguiente esquema:

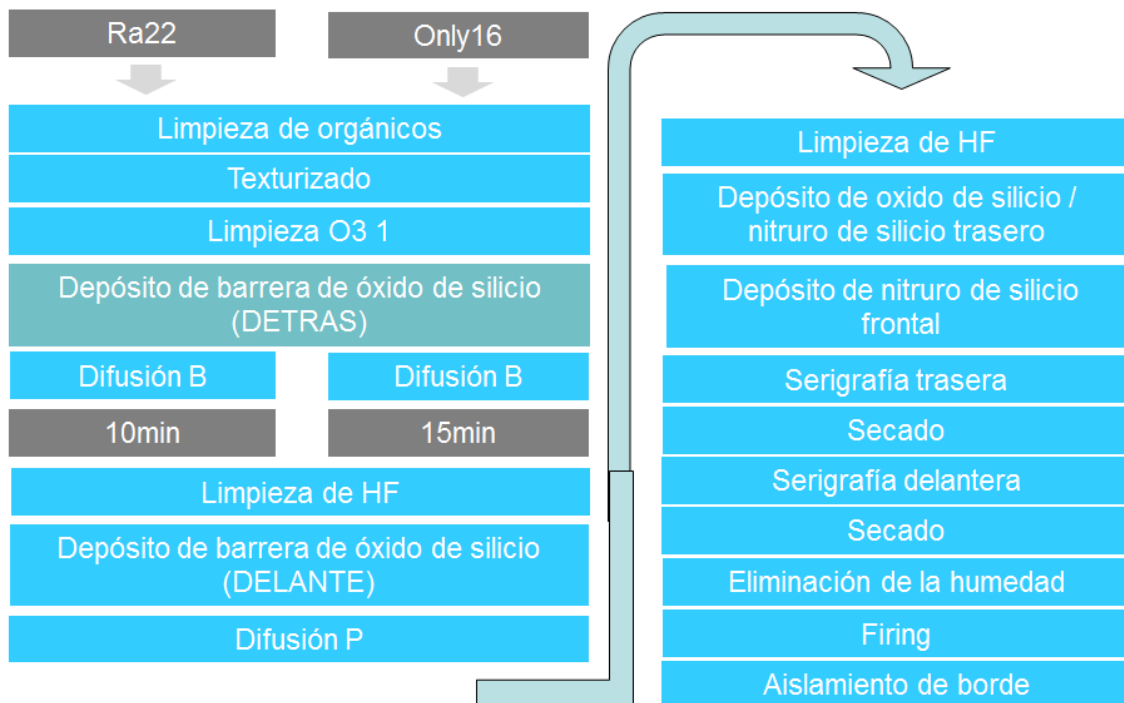


Figura 66 Ruta de fabricación PERT-P en horno RTP. El texturizado de la Ra22 es ácido y el texturizado de la Only16 es básico

8.2.2.- RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN

8.2.2.1.- Pseudocurva

Las dos células integradas tienen un tiempo de drive-in muy similar, entre 10 y 15 minutos. Esto explica que los valores de resistencia paralelo y de tensión en circuito abierto de estas células sean similares, ver Tabla 23.

Célula		Ra22	Only16
Tiempo (min)		10	15
Voc (V)	p	0,575	0,568
	n	0,5973	0,5966
Rparalelo (Ωcm^2)	p	584,66	324,72
	n	2181,16	1009,68

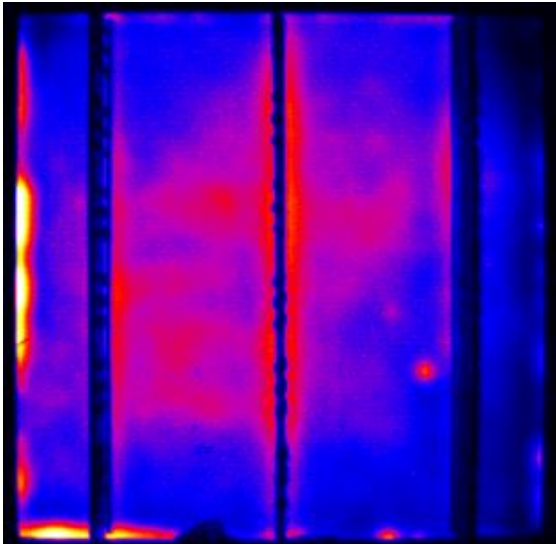
Tabla 23 Tensión de circuito abierto y resistencia paralelo de las células Ra22 y Only16

La baja resistencia paralelo deja ver las fugas de corriente en los bordes de la célula y los posibles cortocircuitos, que también disminuyen la tensión en circuito abierto V_{oc} .

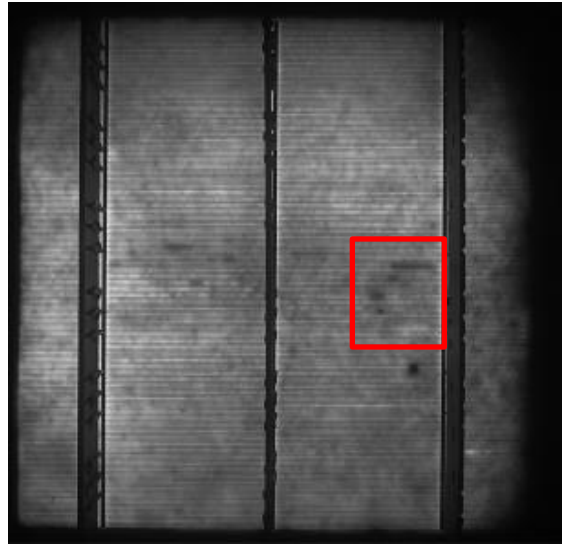
8.2.2.2.- Termografía y electroluminiscencia

A continuación, se presentan las imágenes de termografía y electroluminiscencia de las células integradas:

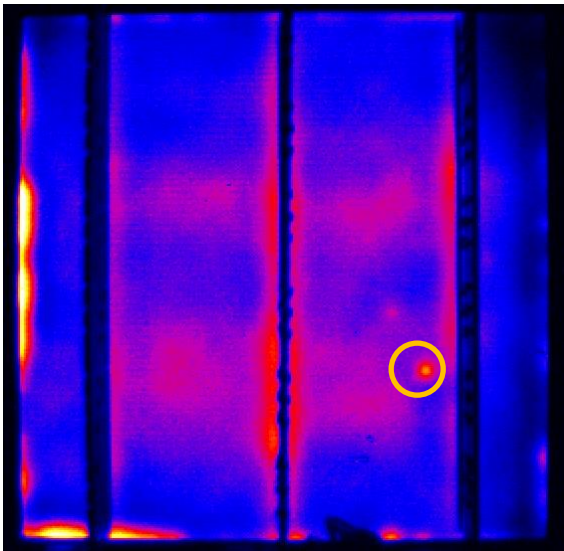
1. Drive-in durante 10 min: Ra22



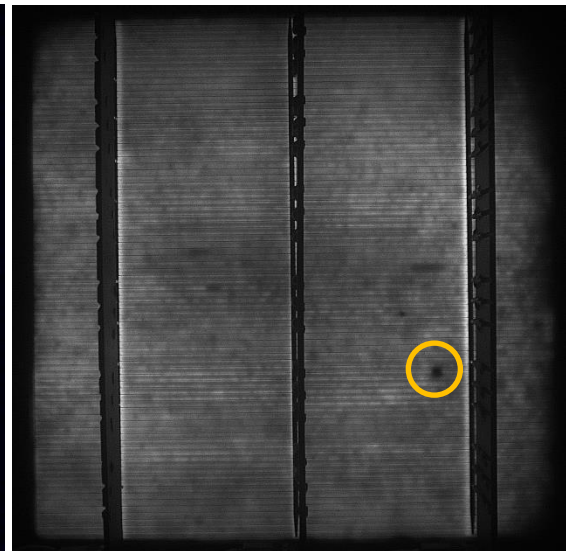
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 67 Ra22: a) Termografía directa cara P b) Electroluminiscencia de alta cara P c) Termografía directa cara N d) Electroluminiscencia de alta cara N

2. Drive-in durante 15 min: Only16

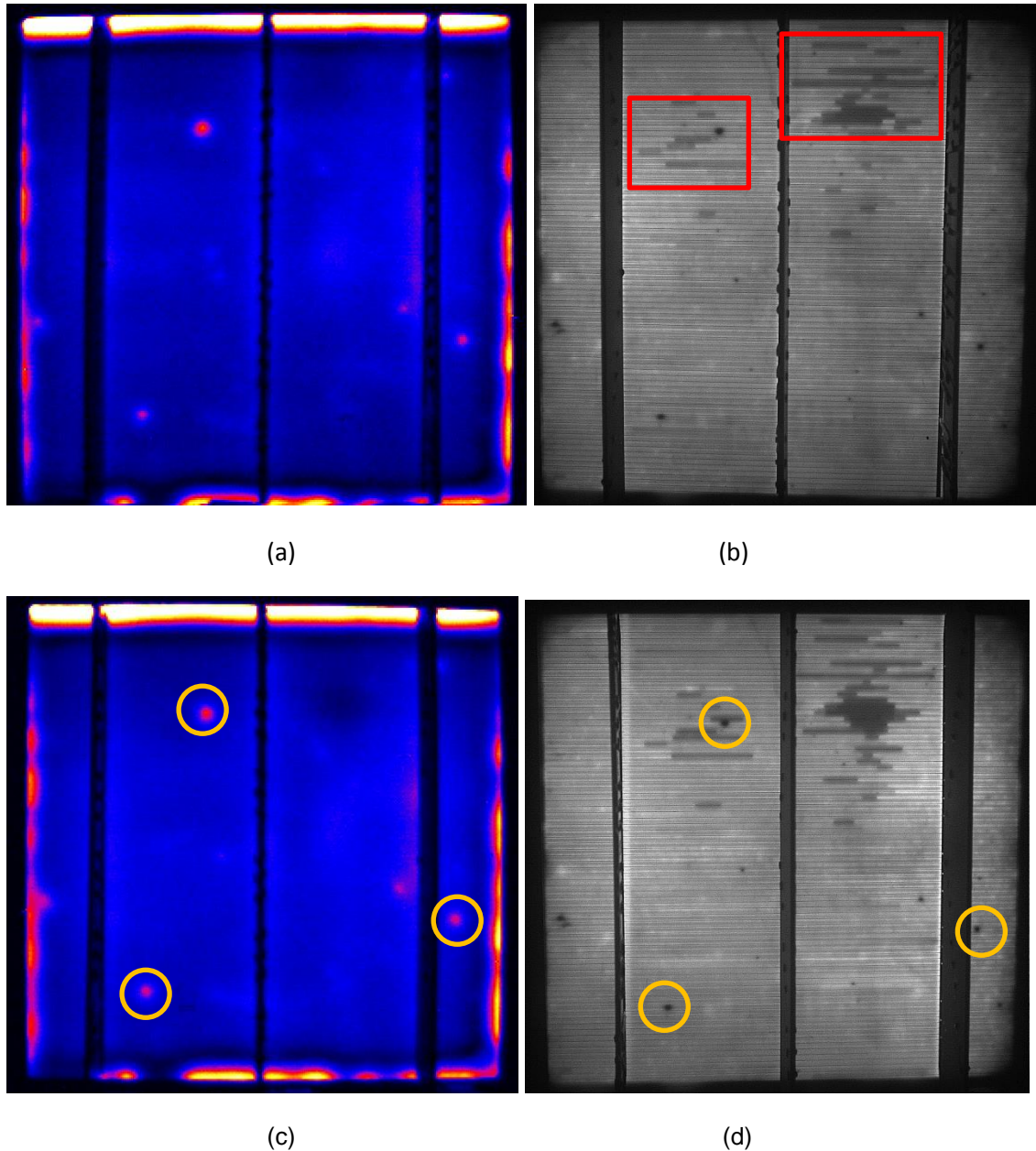


Figura 68 Only16: a) Termografía directa cara p b) Electroluminiscencia de alta cara p c) Termografía directa cara n d) Electroluminiscencia de alta cara n

Como se observa en las Figura 67 y Figura 68, los principales defectos observados son:

- Bordes: en las termografías de ambas células se observan cortocircuitos de borde, concretamente el borde izquierdo e inferior de la Ra22 y los cuatro bordes de la Only16. Este mal aislamiento es la causa de la baja resistencia paralelo caracterizada con la pseudocurva. Para evitar que limite el FF se aísla con láser y punta de diamante.
- Esquinas: aparecen oscuras, se observa mejor en las imágenes de electroluminiscencia de ambas células. Este comportamiento corresponde a una resistencia serie elevada, asumiendo que el firing está optimizado, parece que estas zonas quedan menos dopadas. Esto puede ser debido a la técnica de SOD que parece dejar menos pasta de boro en las esquinas, por lo que la pasta tiene problemas para contactar.

- Zona central: en la Figura 67 correspondiente a la célula Ra22, esta zona tiene una alta recombinación que no es debida a una mala serigrafía sino que es propia del sustrato. Este defecto central no aparece en la célula Only16.
- Defectos puntuales: los puntos locales de cortocircuito corresponden en las electros a puntos oscuros. Hay que destacar que son escasos, uno en la célula Ra22 y tres en la Only16. Véase círculos naranjas de las imágenes c y d de la Figura 67 y de la Figura 68.
- Cortes en los fingers: la alta resistencia serie asociada a un finger discontinuo conlleva que en las imágenes obtenidas en las electros se identifiquen fácilmente como zonas oscuras. Véase recuadros rojos de la Figura 67 b y de la Figura 68 b.

A pesar de los defectos anteriormente comentados, el área activa de ambas células cubre la mayor parte de la superficie de la célula y los defectos son puntuales. Por todo ello, se concluye que **tiempos de drive-in en horno RTP de 10 minutos y 15 minutos son suficientes para formar un emisor de boro que no se atravesase durante el proceso de firing.**

8.2.2.3.- Curva I-V

El resultado de la caracterización IV de estas dos células se presenta a continuación.

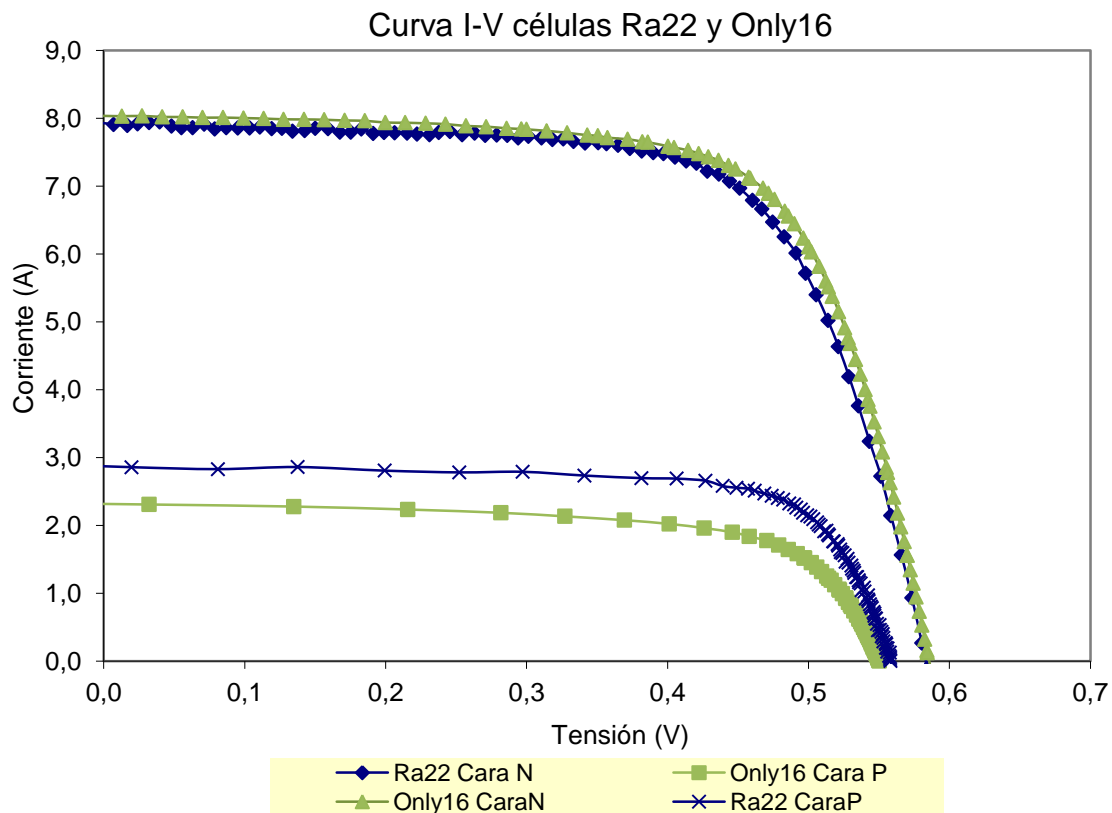


Figura 69 Curvas I-V Only16, Ra22

	Tiempo RTP (min)	Voc (V)	Isc (mA)	Pmax (mW)	Vmax (V)	I _{max} (mA)	FF (%)	η (%)
RA22-N	10	0,584	7,949	3,138	0,451	6,959	67,630	12,9
RA22-P	10	0,560	2,912	1,175	0,463	2,537	72,1	4,83
ONLY16-N	15	0,586	8,036	3,264	0,459	7,117	69,4	13,49
ONLY16-P	15	0,550	2,317	0,847	0,446	1,899	66,4	3,48

Tabla 24 Parámetros curva I-V Only16 y Ra22

De la Figura 69 y de Tabla 24, **destaca que las dos células integradas son operativas con eficiencias mayores del 12%**. Se considera, por tanto, que este resultado establece el proceso de integración llevado a cabo en estas células como punto de partida para la fabricación de la estructura P-PERT.

Por último, teniendo en cuenta que el destino final de esta tecnología es aprovechar la bifacialidad para aumentar la generación eléctrica, se halla el factor de bifacialidad. Este factor de **bifacialidad** se define como el ratio entre la eficiencia trasera y frontal, iluminando independientemente cada una de las caras de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$\text{Factor de bifacialidad (\%)} = \left(\frac{\eta_{SC,Back}}{\eta_{SC,Front}} \right) \times 100 \quad (22)$$

En estas células integradas se obtiene un factor de bifacialidad del 37% para la Ra22 y de un 26% para la Only16.

8.2.2.4.- Respuesta espectral

La siguiente prueba realizada es la caracterización de la respuesta espectral de las células PERT-P, Only16 y Ra22, obteniendo la eficiencia cuántica externa (EQE).

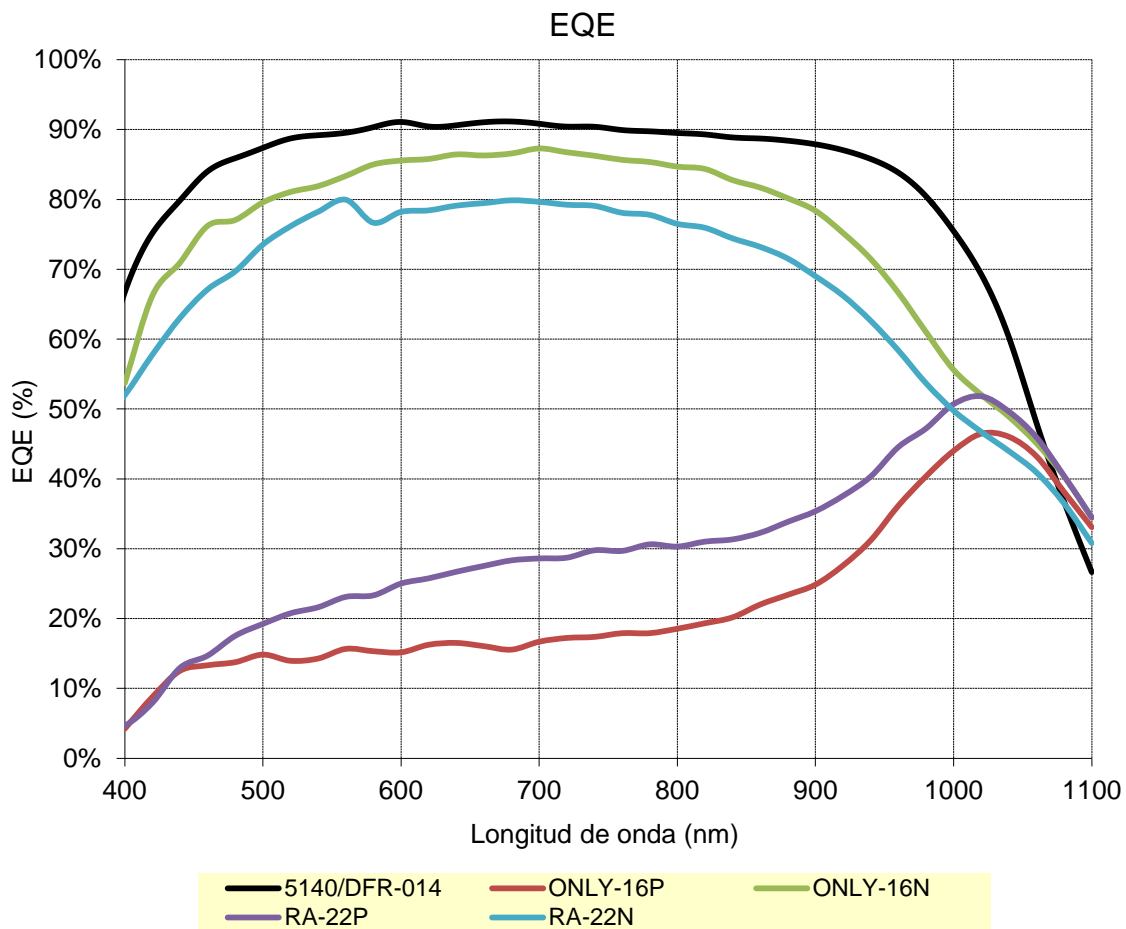


Figura 70 EQE Ra22 y Only16

La EQE de las células PERT-P, como se ve en la Figura 70, está por debajo de la célula de calibración AL-BSF (DFR-014) para longitudes de onda baja y media, debido a la recombinación y la menor eficacia del emisor en la recolección de portadores.

Es importante señalar que la Ra22 que tiene una texturización ácida tiene una reflexión mayor que la Only16 con texturización básica. Por eso, la EQE de la Ra22 es menor en todo el rango espectral que la de la Only16 iluminando por la cara frontal. Sin embargo, la EQE obtenida en la cara trasera es mejor en la célula Ra22 que en la Only16 esto indica que este proceso presenta un grado de bifacialidad potencial mayor.

Además, a partir de 1060 nm la estructura bifacial tiene mejor comportamiento que la de referencia AI-BSF lo que parece indicar que las capas dieléctricas depositadas sobre los emisores exhiben valores menores de velocidad de recombinación superficial que con AI-BSF. Para confirmar esta hipótesis es necesario hacer un estudio específico de tiempo de vida y absorción que no es objeto del presente PFM y que se abordará en futuros estudios.

8.2.2.4.1.- Utilización de portasustratos metálicos en las medidas

Tanto durante la caracterización de la curva IV como de la respuesta espectral se emplea un portasustratos o chuck de cobre metálico como contacto trasero de las muestras. El objetivo de este inciso es conocer cómo afecta la reflectividad de este chuck metálico en estas medidas.

Para ello, se sigue la metodología sobre la Medida de la característica i-v de células fotovoltaicas bifaciales CENER explicada en el capítulo 2 a la célula Ra22.

En la siguiente imagen se representa la corriente fotogenerada en función del rango de longitud de onda, calculada como el producto de la respuesta espectral (SR) y la irradiancia espectral global a 1 sol con dos chucks distintos: el chuck de cobre metálico y uno negro que evita la reflexión

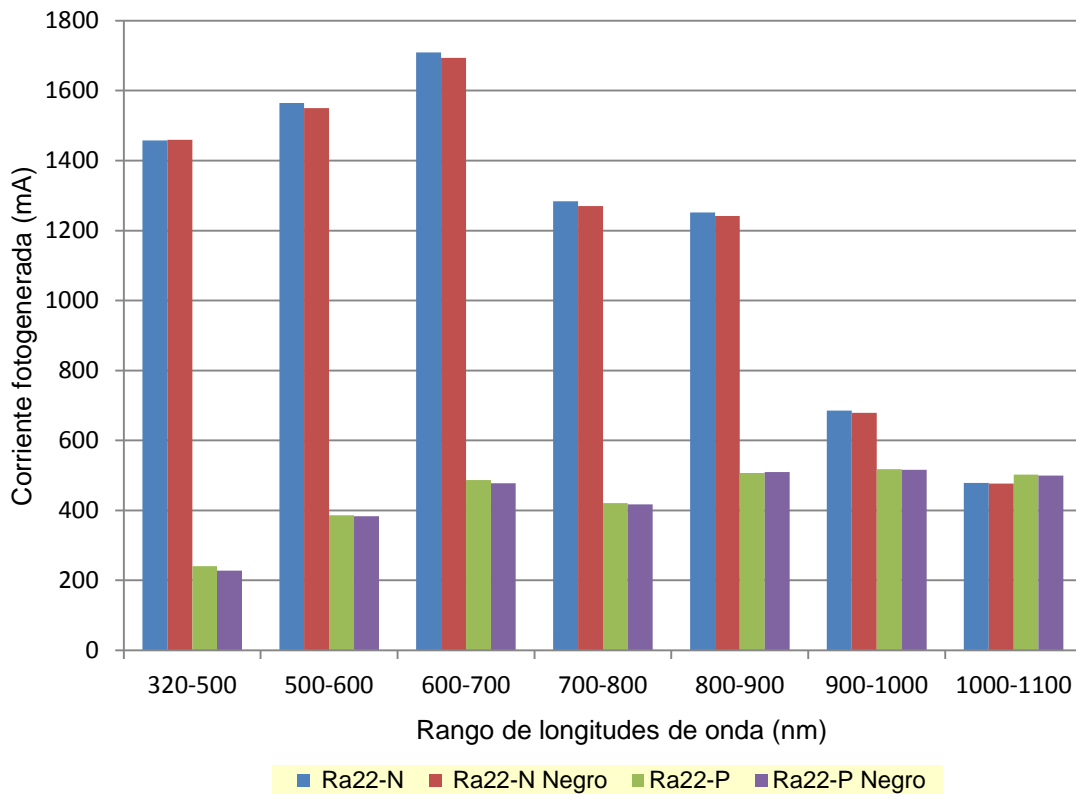


Figura 71 Corriente fotogenerada Ra22 en función de los diferentes rangos de longitudes de onda para dos chucks
 Al analizar la Figura 71, se detecta que para todo el rango de longitudes de onda la corriente fotogenerada al emplear el chuck metálico es tan sólo un poco mayor que al colocar la superficie no reflectante.

A continuación, para cuantificar la diferencia en corriente fotogenerada en esta célula, se realiza un sumatorio de la corriente para el total de longitudes de onda en cada cara. Los resultados obtenidos con el portasustratos metálico ($I_{sc,caraX}$), con los obtenidos con la cartulina negra ($I_{sc,caraX NEGRO}$) son los siguientes:

$I_{sc,caraN}$	8,45A	$I_{sc,caraP}$	3,06A
$I_{sc,caraN NEGRO}$	8,39A	$I_{sc,caraP NEGRO}$	3,03A
Diferencia debida a la reflexión en el portasustratos	55,5mA	Diferencia debida a la reflexión en el portasustratos	30,7mA

Tabla 25 Resumen de medidas de I_{sc} Ra22

De acuerdo a los resultados presentados en la Tabla 25 se deduce que el aumento de corriente debido a la reflexión de la luz que atraviesa la célula en el chuck metálico es muy pequeño. Así

pues, las curvas I-V presentadas tienen una contribución de la luz de albedo debido al portasustratos insignificante.

Por último, se confirma el resultado anterior calculando la potencia que se absorbe en la cara trasera, no iluminada, debido a la reflexión en el chuck. Para ello, se utiliza la transmitancia, reflectancia y absorbancia de las células, la reflectancia del chuck y la irradiancia espectral global, de la siguiente forma:

$$G_{\text{noiluminada}} = G(\lambda) * \tau_1(\lambda) * \rho_{\text{portasustratos}}(\lambda) * \alpha_2(\lambda) \quad (23)$$

Dónde; $G(\lambda)$ es la irradiancia solar espectral, $\tau_1(\lambda)$ es la transmitancia de la célula al iluminar la cara 1, $\rho_{\text{portasustratos}}(\lambda)$ es la reflectancia del chuck y $\alpha_2(\lambda)$ es la absorbancia de la cara no iluminada.

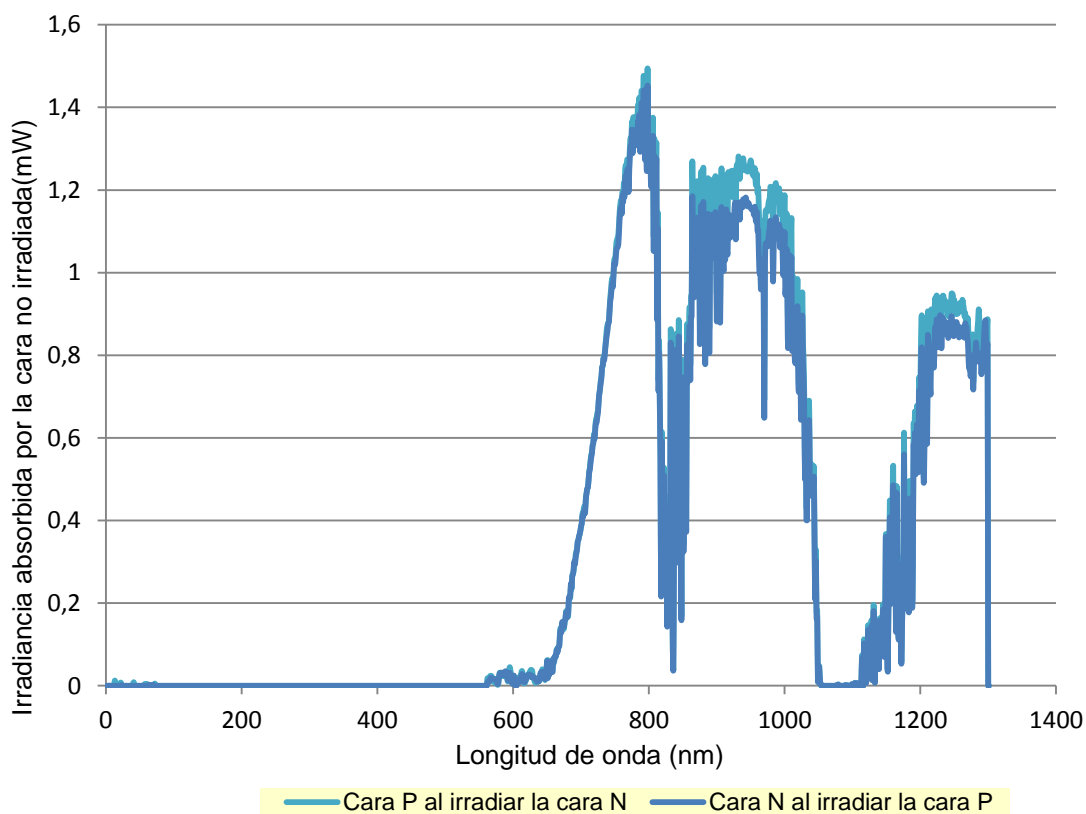


Figura 72 Potencia absorbida en la cara no irradiada

De acuerdo a la Figura 72 la potencia absorbida por la cara no irradiada es despreciable en estas células, confirmando que **las curvas I-V obtenidas son equivalentes a irradiar de forma independiente cada cara.**

8.3.- CÉLULAS P-PERT Y N-PERT, DRIVE-IN CON LÁSER

8.3.1.- RUTA DE FABRICACIÓN

La ruta de fabricación seguida por estas células es la siguiente:

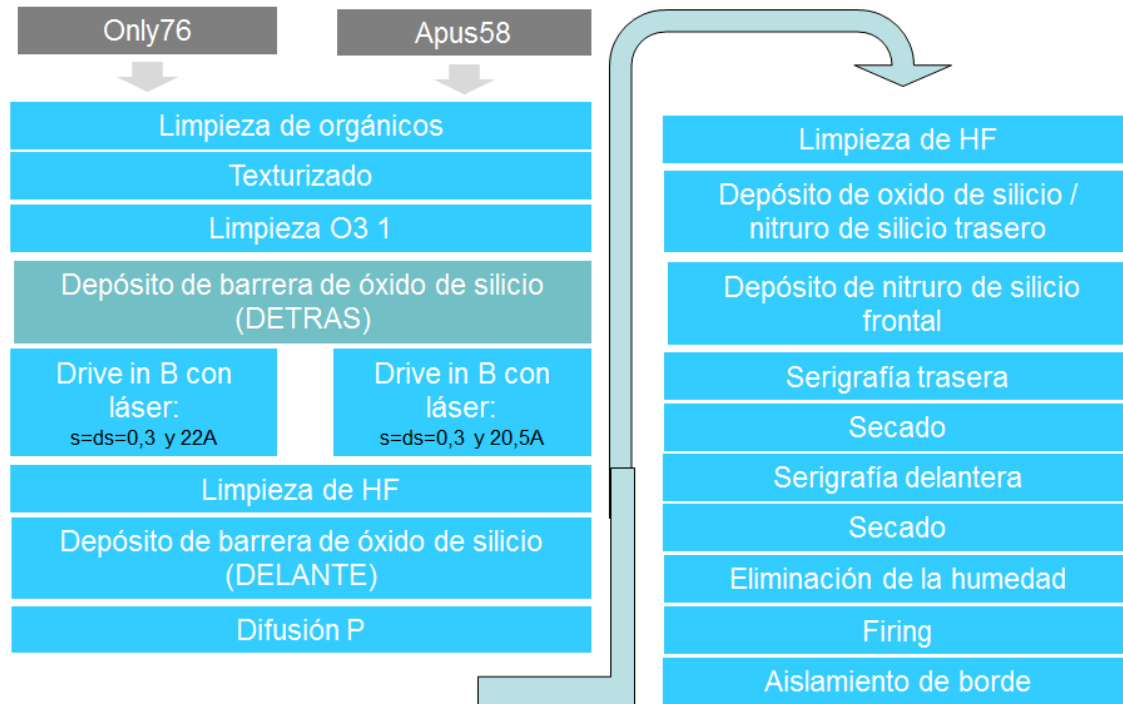


Figura 73 Ruta de fabricación PERT-P y PERT-N con drive in con láser

En este experimento, el drive-in de la difusión de boro se realiza con el láser.

8.3.2.- RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN

8.3.2.1.- Resistencia capa

La evolución de la resistencia de capa se mide con el equipo cuatro puntas; antes del proceso de drive-in con láser (primera columna), después del drive-in y antes de la limpieza con HF (segunda columna) y posteriormente a la limpieza con HF durante 22 minutos (tercera columna).

s=ds=0,3 y 20,5 A	Apus58 bulk	Apus58 preHF	Apus58 postHF
AVE (Ω /sq)	106,9	107,3	107,0
UNI	37,01	38,23	36,43
Máx-min	143,9	165,8	145,1

Tabla 26 R_{\square} Apus58 después de drive in con láser.

s=ds=0,3 y 22 A	Only76 bulk	Only76 preHF	Only76 postHF
AVE (Ω /sq)	111,1	97,09	98,55
UNI	2,91	5,56	5,48
Máx-min	11,1	19,51	20,13

Tabla 27 R_{\square} Only76 después de drive in con láser.

El proceso de drive-in con láser ha conseguido R_{\square} , cercanas al objetivo de 100Ω /sq, ver Tabla 26 y Tabla 27. Este comportamiento da cuenta de que el proceso de **drive-in con láser puede ser una alternativa para alcanzar menores resistencias serie y por tanto, un mayor FF.**

8.3.2.2.- Pseudocurva

Continuando con el proceso de caracterización se halla la pseudocurva de las células Apus58 y Only76.

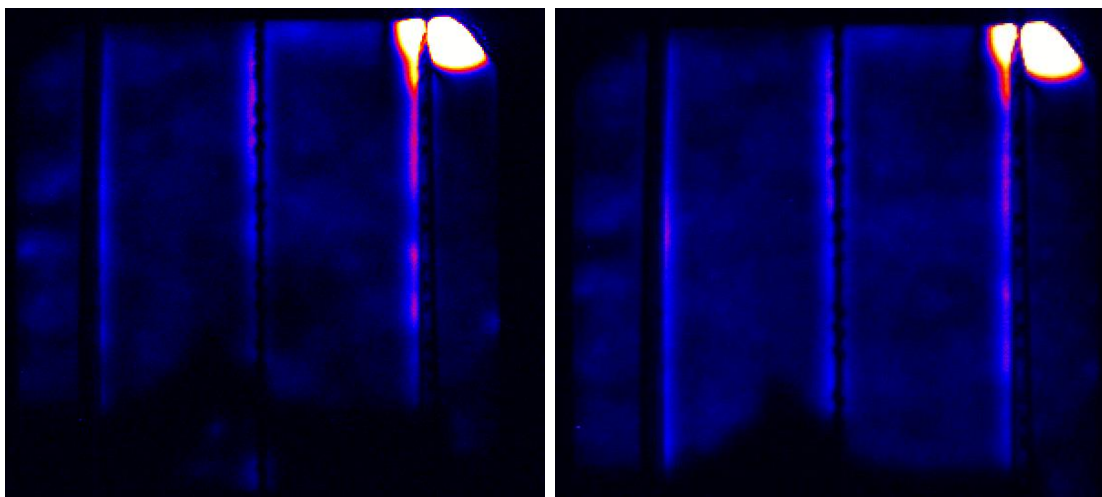
Célula		Apus58	Only76
Parámetros láser		s=ds=0,3 y 20,5 A	s=ds=0,3 y 20,5 A
Voc (V)	p	0	0,063
	n	0,252	0,293
Rparalelo (Ωcm^2)	p	324,72	8
	n	12855	12,29

Tabla 28 Tensión de circuito abierto y resistencia paralelo de las células Apus58 y Only76

La tensión medida está muy por debajo de la esperada (cercana a 0,6V) y la resistencia paralelo es muy pequeña, Tabla 28. Descartando que se deba a la serigrafía, se intuye que durante el proceso de firing o bien no se ha formado el contacto, o bien se ha atravesado el emisor de boro, además de un mal aislamiento de borde.

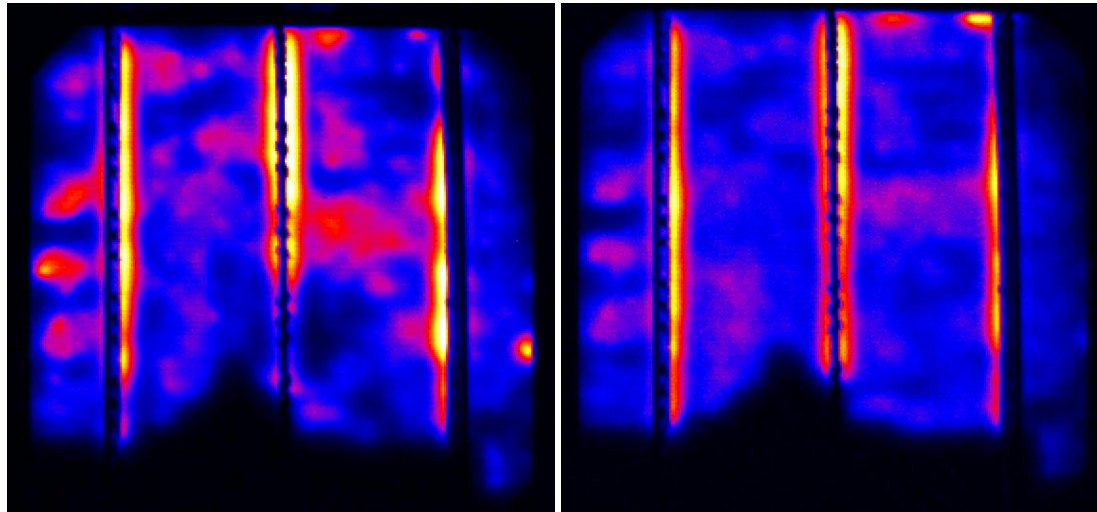
8.3.2.3.- Termografía y electroluminiscencia

Durante la fase de caracterización la célula Only76 rompe, se realiza la prueba de termografía a la célula Apus58.



(a)

(b)



(a)

(b)

Figura 74 Termografía Apus58: a) Cara n zona inversa b) Cara n zona directa c) Cara p zona directa d) Cara p zona inversa

En las Figura 74 a y b se observa que la célula Apus58 carece de área activa. El proceso de difusión de fósforo está bajo control por lo que parece que el boro depositado no ha difundido, no se ha formado el emisor tipo p, de forma que no hay unión p-n. Además, teniendo en cuenta las imágenes de la cara p, Figura 74 c y d, la zona de los buses son cortocircuitos lineales, aparecen tanto en inversa como en directa, confirmando el fallo durante el proceso de difusión de boro.

Al realizar la electroluminiscencia no aparece ninguna zona iluminada, es decir, la corriente no se distribuye por la célula y por tanto no se genera radiación.

8.3.2.4.- Curva I-V

Las curvas I-V obtenidas se corresponden a una resistencia. La técnica de drive-in con láser, a pesar de conseguir valores de resistencia capa pequeños, no logra obtener la unión p-n necesaria para generar corriente. En definitiva **el método empleado de drive-in con láser no ha dado resultados positivos en comparación con el uso del RTP, por lo que se deberá seguir explorando esta alternativa realizando modificaciones en el proceso.**

9.- CONCLUSIONES

Este proyecto ha dado respuesta a la necesidad de establecer las bases para la integración de células solares fotovoltaicas de c-Si bifaciales en el laboratorio de células fotovoltaicas de CENER. Estudiando distintas variantes en algunos de los procesos que intervienen en la fabricación, se han identificado parámetros de proceso con una alta influencia en el resultado final y se han delimitado ciertos límites de proceso para conseguir células bifaciales operativas.

Las principales conclusiones que se han extraído en este TFM son las siguientes:

- 1) En la actualidad, las tecnologías fotovoltaicas se enfrentan al reto de aumentar la eficiencia de las células reduciendo al mismo tiempo su coste. La estructura tradicional o Al-BSF ha llegado a su límite de eficiencia en los últimos años. Por ello, actualmente la industria está evolucionando hacia diseños de células más eficientes como PERC o heterounión. Las **células bifaciales**, como evolución natural de la tecnología PERC, ofrecen una potencial ganancia en eficiencia entre el 5% y el 30% ya que aprovechan la luz de albedo que llega al dispositivo por lo que se espera que su introducción en el mercado fotovoltaico aumente aproximadamente desde el 5% actual hasta casi el 40% en el año 2028.
- 2) La ruta de fabricación de una célula bifacial requiere algunas **modificaciones de proceso** e introducción de nuevos pasos en la secuencia respecto a la ruta estándar o Al-BSF. Para realizar células bifaciales en CENER: se adaptarán los procesos de serigrafía, firing y aislamiento de borde a esta estructura y se desarrollará el proceso de difusión de boro.
- 3) Respecto al **proceso de difusión de boro** que consiste en el depósito de una fuente de boro (spin-on-dopant) seguido de un proceso de drive-in a alta temperatura, se ha encontrado que:
 - **Barreras de protección:** se detectó que durante el proceso de dopado de boro en el RTP, el boro difundía hacia la cara contraria. Para evitar este fenómeno, se determina que es necesario depositar una barrera de óxido de alrededor de 300 nm para proteger la cara que no se quiere dopar previamente al dopado de boro.
 - El protocolo de **depósito** de la fuente de boro mediante **spinner** con el que se obtienen los mejores resultados es el siguiente:

Receta	Cantidad de PBF2.2DS	Spreading	Spinning
Final	10ml	Velocidad: 500rpm Aceleración: 500rmps Duración: 10s	Velocidad: 3000rpm Aceleración: 2000rmps Duración: 20s

Tabla 29 Receta para realizar el proceso de depósito SOD

- Técnica de drive-in: se estudiaron dos **alternativas** para realizar el tratamiento de alta temperatura que genera el drive-in de dopantes en silicio: la primera empleando el **horno RTP** y la segunda utilizando el **láser IR**.

- Estudio de **tiempos de drive-in en el RTP**: un tiempo de drive-in insuficiente ocasiona un emisor demasiado fino que durante el proceso de metalización cortocircuite la unión. Este cortocircuito de la unión se ha encontrado tanto en muestras procesadas durante 1 minuto y 5 minutos. Por ello, es necesario un tiempo de drive-in **mayor de 10 minutos** para evitar este problema.
 - La **resistencia de capa** medida con el método de 4 puntas **disminuye en sustratos tipo n aumentado el tiempo de drive-in** con el RTP. En **sustratos tipo p**, la **resistencia de capa medida no es tan sensible con la variación del tiempo** de drive-in.
 - Control de la **atmósfera del RTP**: La cantidad de **O₂** se debe mantener en torno al **2% en N₂**.
 - Estudio de **drive-in con el láser**: se ha conseguido unos **valores de resistencia de capa homogéneos y mucho menores que los conseguidos con el RTP** realizando el drive-on con el láser. Para encontrar la ventana de proceso se ha utilizado un láser IR y se ha variado la corriente y el solapamiento, encontrándose mínimos de resistencia de alrededor de 70 Ω/sq con los parámetros láser $s=ds=0,3$ y 20,5 A en sustratos tipo n y de 100 Ω/sq con los parámetros láser $s=ds=0,3$ y 22 A.
- 4) Respecto al **proceso de firing para realizar el contacto**, se ha encontrado que: el firing a **temperaturas de pico de 775°C** es adecuado para las pantallas y pastas utilizadas para la fabricación de células bifaciales ya que genera un buen contacto y no cortocircuita la unión.
- 5) Respecto al **proceso de aislamiento de borde**, cuando se realiza con el láser únicamente, y, sobre todo, si este proceso debe cortar fingers de la metalización, puede ser insuficiente para evitar corrientes de fuga en los bordes (resistencia paralelo demasiado baja). Por tanto, en determinadas ocasiones está indicado realizar el aislamiento de borde adicional con la punta de diamante sobre el surco marcado por el láser
- 6) Respecto al **proceso de serigrafía**: se han adaptado los protocolos disponibles en CENER para las nuevas pastas y pantallas adquiridas para fabricar células bifaciales. Estas son:

Emisor p+				Emisor n+			
Pantallas		Pastas Ag/Al		Pantallas		Pastas Ag	
Joyce Front	Katya Harvey Summer	SOL9350 C	SOL9360 A	Joyce Back	Peva 00222 6/30	SOL9641 B	SOL9641 B*

Tabla 30 Resumen de las pantallas y pastas utilizadas para cada difusión de la célula bifacial

Así pues, se han establecido los parámetros que, de acuerdo a los resultados experimentales, han demostrado dar los mejores resultados:

	Pastas Ag	Pastas Ag/Al
Forward speed	200 mm/s	200 mm/s
Reverse speed	200 mm/s	200 mm/s
Front pressure	16 Kg	16 Kg
Rear pressure	16 Kg	16 Kg
Print gap	1,3 mm	1,3mm
Sequence	Flood+print	Flood+print

Tabla 31 Parámetros del proceso de serigrafía finales

- 7) Respecto a la **caracterización de células bifaciales**: se ha estudiado la influencia de la superficie metálica reflectante (chuck), empleada en las técnicas de caracterización. Determinando que la influencia no es significativa, de forma que las curvas I-V obtenidas son equivalentes a irradiar independientemente cada cara.
- 8) Se ha intentado integrar células bifaciales completas realizando el **drive-in de la difusión de boro con el láser** pero **no se han obtenido resultados positivos** por lo que se deberá seguir explorando esta alternativa realizando modificaciones en el proceso.
- 9) En el desarrollo de este estudio, **se han conseguido integrar células bifaciales completas y funcionales con la arquitectura PERT**, tanto con sustratos tipo p como con sustratos tipo n, realizando el **drive-in de la difusión de boro con el RTP**. Estas células solares, aunque con resultados modestos en eficiencia **establecen las bases para la optimización y mejora de eficiencia** en células bifaciales en desarrollos posteriores.
- 10) La **secuencia de procesos** establecida como **base** para la fabricación de **células bifaciales** y con mejores resultados en términos de eficiencia es la siguiente:

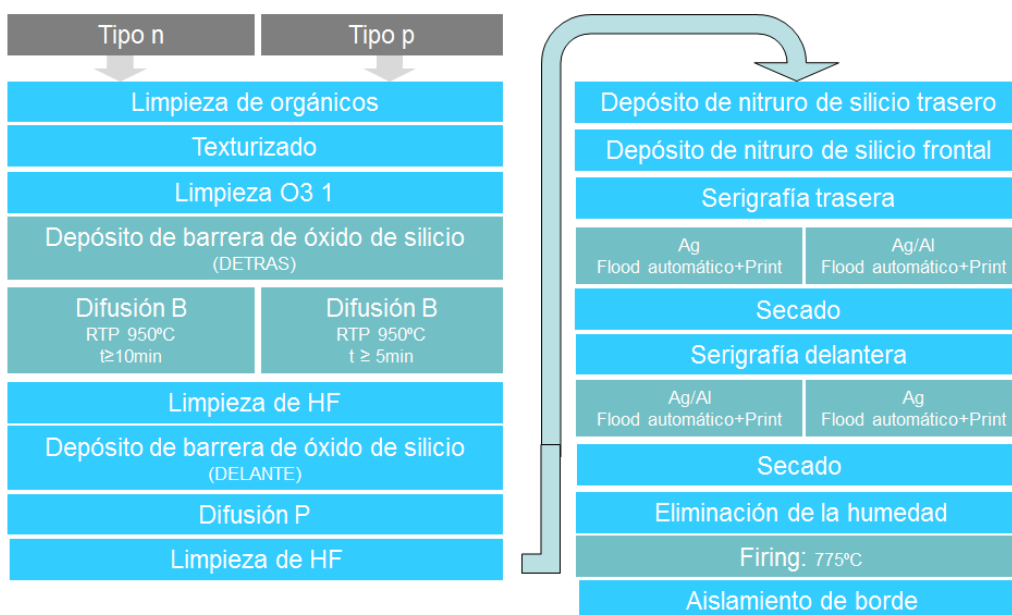


Tabla 32 Ruta de fabricación células solares fotovoltaicas de c-Si

- 11) Los parámetros eléctricos de las **mejores células bifaciales integradas con estos procesos** se pueden ver en la siguiente tabla. Es importante señalar que las células integradas con sustratos tipo n tuvieron un problema en proceso de serigrafía por lo que aunque se demuestra la viabilidad de la ruta de proceso, estos resultados no son representativos de su potencial.

	Sustrato	Tiempo RTP (min)	Voc (V)	Isc (mA)	Pmax (mW)	Vmax (V)	I _{max} (mA)	FF (%)	η (%)	Factor de bifacialidad (%)
APUS40	n	30	0,556	4,829	1,007	0,355	2,834	37,5	4,2	-
ONLY16	p	15	0,586	8,036	3,264	0,459	7,117	69,4	13,5	26%

Tabla 33 Resultados de las mejores células integradas con arquitectura PERT-N y PERT-P

10.- LÍNEAS FUTURAS

Con objeto de continuar el desarrollo de la tecnología PERT bifacial se proponen las siguientes vías de investigación:

- Repetir la integración de estructuras N-PERT sin que la serigrafía sea un factor limitante en la eficiencia de las células.
- Realizar pruebas de repetitividad de los procesos para establecer una línea base confiable tanto N-PERT como P-PERT
- Realizar pruebas para explorar las posibilidades de difusión de boro con drive-in mediante láser adaptando el proceso. Se encuentra prometedor estudiar esta alternativa utilizando dos pasos: primero con RTP y luego con láser.
- Estudiar la influencia de la temperatura del proceso de difusión de boro en horno RTP ya que, en colaboración con otras entidades, sería posible aumentar la temperatura del proceso a 1000°C.
- Por otro lado durante la estancia en CENER se tuvo la posibilidad de estudiar minicélulas con arquitectura HIT con una bifacialidad cercana al 100%. Se plantea como línea a explorar la integración de este tipo de arquitectura.
- Realizar un estudio de la funcionalidad de las capas dieléctricas que se depositan en las dos caras de las células tanto para disminuir la reflexión de la luz como para disminuir la velocidad de recombinación superficial en ambos emisores. El objetivo es obtener mejores tensiones de cortocircuito.

11.- BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

- [1] J. Willey, «Semiconductor material and device characterization,» 1998.
- [2] MAE582, Diffusion, 2016.
- [3] C. Honsberg, «PV Education,» 2016. [En línea]. Available: <http://www.pveducation.org/pvcdrom/characterisation/jsc-voc-and-suns-voc>.
- [4] National Instruments, «Part II Photovoltaic Cell I-V Characterization Theory and LabVIEW Analysis Code,» [En línea]. Available: <http://www.ni.com/white-paper/7230/en/>.
- [5] O. Breitenstein, M. Rakotoniaina y H. Al Rifai, «Shunt Types in Crystalline Silicon Solar Cells,» *Program Photovoltaic*, pp. 529-538, 2004.
- [6] Breitenstein, «Understanding Shunting Mechanisms in Silicon Cells: A Review,» *Max Planck Institute of Microstructure Physics Halle*, 2006.
- [7] M. Paire, . L. Lombez, J. Guillemoles y D. Lincot, «Measuring sheet resistance of CIGS solar cell's window layer by spatially resolved electroluminescence imaging,» *Thin Solid Films*, vol. 519, pp. 7493-7496, 2011.
- [8] CENER, «Ensayos de diagnóstico de módulos FV,» 2008.
- [9] C. Honsberg y S. Bowden, «PV Education,» 2012. [En línea]. Available: <http://www.pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/spectral-response>.
- [10] Y.-Y. L. Wen-Jeng Ho, «NCBI,» 2014. [En línea]. Available: <http://www.pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/spectral-response>.
- [11] S. B. a. C. Honsberg, «Photovoltaics: Devices, Systems and Applications.,» 2006. [En línea]. Available: Z:\Basico\05 CURSO UNSW\PVCDROMMAIN.HTM.
- [12] Electric Power Research Institute, «Bifacial Solar Photovoltaic Modules».
- [13] M. Ezquer, . I. Petrina, J. M. Cuadra y A. R. Lagunas, «Design of a Special Set Up for I-V Characterization of Bifacial Photovoltaic Solar Cells».
- [14] IEC, «Measurement of current-voltage characterization of bifacial photovoltaic (PV) devices,» 2017.

- [15] J. Hohl-Ebinger y W. Warta, «Bifacial Solar Cells In STC Measurement,» de *25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, Valencia, 2010.
- [16] K. Hong, S. Cho, . J. You, . J. Jeong, S. Bea y J. Hu, «Mechanism for the formation of Ag crystallinities in the Ag thick film contacts of crystalline Si solar cells,» *Solar Energy Materials & Solar Cells*, pp. 898-904, 2009.
- [17] . S. W. Glunz, . R. Preu y . B. D, «Crystalline silicon solar cells- state of the art and future developments,» *Comprehensive Renewable Energy*, vol. 1, pp. 978-0-08-087873-7, 2012.
- [18] A. Frey, S. Fritz , J. Engelhardt y G. Hahn, «Influence of contact firing conditions on the characteristics of bi-facial n-type silicon solar cells using Ag/Al pastes”,» de *6th International Conference on Silicon Photovoltaics, SiliconPV*, 2016.
- [19] Heraeus, *SOL9641B_RevG01*.
- [20] Heraeus, *SOL9350C_RevG02*.
- [21] A. Martínez de Narvajás y C. y. U. , *Complemento a la Integración de células solares fotovoltaicas de c-Si bifaciales*.
- [22] S. Simayi, Y. Kida, K. Shirasawa y H. Takato , «Understanding the Impact of Boron Diffusion on n-type Silicon Bifacial Solar Cells,» de *31st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*.
- [23] Jaeger, «Doping and Silicon,» de *Chapter 4*.
- [24] P. Rothhardt, «Co-diffusion for N-type Bifacial Solar Cell,» *Fraunhofer ISE*, 2014.
- [25] Filmtronics, «Start Up Boron».
- [26] J. Y. Lee, «Rapid Thermal Processing of Silicon Solar Cells-Passivation and Diffusion,» *Fraunhofer Institut*, 2003.
- [27] G. Poulain, D. Blanc, A. Focsa y B. Bazer-Bachi, «Laser Induced Boron Diffusion For Selective Emitter N-Type Solar Cells,» de *27th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, 2014.
- [28] Murakami, *Murakami Screen Sample Order*, 2017.
- [29] Berkeley, *Electrons and holes in semiconductor*.

-
- [30] I. O. Orquiñena, Contact Optimization on Crystalline Silicon Solar Cells, 2017.
- [31] O. P. Lamigueiro, Energía Solar FV, 2013.
- [32] J. Chen, «Recent Development on Silicon Based Solar Cell Technologies and their Industrial Applications,» *Intech*, 2015.
- [33] M. Kerrthesis, «Surface, Emitter and Bulk Recombination in Silicon and Development of Silicon Nitride Passivated Solar Cells,» 2015.
- [34] M. Hermle, «Silicon Solar Cells - Current production and future concepts,» *Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE*, 2017.
- [35] C. Duran, Bifacial Solar Cells, High Efficiency Design, Characterization, Modules and Applications, Konstanz University, 2012.
- [36] Y. Veschetti, «Cell Sesion Introduction,» Miyazaki, 2016.
- [37] B. megacell.
- [38] L. Kreinin, «p-PERT Bifacial Solar Cell Technology Past and Future,» de *BIFI Workshop* , Konstanz, 2017.
- [39] Imec. [En línea]. Available: <https://www.imec-int.com/en/articles/imec-demonstrates-highly-efficient-bifacial-solar-cells-with-near-100-bifaciality>.
- [40] J. Appelbaum, «Bifacial photovoltaic panels field,» *Elsevier*, 2016.
- [41] IHS Markit, «Solar and Energy Storage trends for 2018,» 2018.
- [42] Electric power research institute, «Bifacial Solar Photovoltaic Modules,» 2016.
- [43] International Technology Roadmap for Photovoltaic (ITRPV), «2017 Results,» 2018.
- [44] Photovoltaics International, «The Technology Resource for PV Professionals,» 2018.
- [45] J. Y. Lee, Rapid Thermal Processing of Silicon Solar Cells-Passivation and Diffusion, Freiburg: Fraunhofer Institut, 2003.
- [46] J. S. W, Diffusion in Silicon, ISC Knowledge, 2000.

- [47] M. Razeghi, *Semiconductor Device Technology, Technology of Quantum Devices*, Boston, 2010.
- [48] S.Kotermann, «Charpert 4,» de *Characterization and Modeling of Contacting Crystalline Silicon Solar Cells*.
- [49] Apuntes Máster en Energías Renovables, *Parámetros eléctricos de la célula solar*, Elche, 2018.
- [50] R. G. Lemus, «Bifacial solarphotovoltaics-A technology review,» *Elsevier*, 2016.
- [51] R. Kopècek, Y. Veschetti, . E. Gerritsen y A. Schneider, «Bifaciality: one small step for technology, one giant leap for kWh cost reduction,» *Photovoltaics International*, 2014.
- [52] A. Weeber, B. Geerligs, R. Naber y N. Guilevin, «Status of N-type Solar Cells for Low-Cost Industrial Production,» de *24th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, Petten, The Netherlands, 2009.
- [53] K. Chundur y M. Schmela, «Metallization Pastes 2017,» Taiyang News.
- [54] P. Verlinden, . A. Blakers , K. Weber, J. Babei, M. F. Stuckings y D. Gordeev, «Silver solar cells: A new thin-crystalline silicon photovoltaic technology,» *Elsevier*, 2005.
- [55] A. Munzer y N. Dirk-Holger , «Industrial Silicon Wafer Solar Cells,» *SolarWorld Industries*, 2007.
- [56] I. Romijn, B. van Aken, . J. Anker, A. Burgers, A. Gutjahr, B. Heurtault y M. Koppes, «Industrial Implementation of Efficiency Improvements in N-type Solar Cells and Modules,» de *27th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, Vaassen, The Netherlands.
- [57] A. El Amrani, A. Boucheham, Y. Belkacem y R. a. B. Boufenik, «M. Design of Solar Cells p+/n Emitter by Spin-On Technique.,» de *3rd International Conference on Computational and Experimental Science and Engineering (ICCESEN).*, 2016.
- [58] E. Cornagliott, . L. Tous, R. Russell, A. Uruena y P. Choulat, «High efficiency bifacial n-PERT cells with co-plated Ni/Ag contacts for multi-wire interconnection,» *Elsevier*, 2017.
- [59] C. Honsberg y S. Bowden, *Photovoltaics: Devices, Systems and Applications*, University of New South Wales, 1999.

-
- [60] P. Preisa, H. Chua, J. Lossena, E. Wefi y F. Buchholza, «Progress in the development of industrial nPERT cells,» de *7th International Conference on Silicon Photovoltaics, SiliconPV*, Konstanz, Germany, 2017.
- [61] S. Chucndur y M. Schmela, «It's time to produce solar power on both module sides,» *Bifacial solar module technologyTaivang news*, 2017.
- [62] . H. Wang, J. Bultman, . A. Vlooswijk , P. Venema, J. Ciu, T. Roessler, K. Sauer, K. Borden, D. Song, J. Xiong, Z. Hu, G. Li, H. Wang, H. An, B. Yu y B. Grenko, «Progress in N-type Si Solar Cell and Module Technology for High Efficiency and Low Cost,» de *IEEE 38th Photovoltaic Specialists Conference*, Austin, USA, 2012.
- [63] I. Romijn, J. Aker, . A. Burgers y A. Gutjahr, «Industrial n-type solar cells with>20% cell efficiency,» de *China PV Technology International Conference*, Shanghai, China, 2013.
- [64] B. Yu, . D. Song y . Z. Sun, «A study on electrical performance of N-type bifacial PV modules,» *Elsevier*, 2016.