

DIFUSION FRONTAL DE DOPANTES EN CELULAS FOTOVOLTAICAS DE CONTACTO TRASERO.

TESINA FIN DE MASTER

MASTER EN INGENIERIA MECANICA Y DE MATERIALES

Miguel Cascant López

Junio 2013

INDICE

1-MOTIVACIÓN Y OBJETIVO	4
2-ANTECEDENTES	6
2.1 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO.....	7
2.2 TECNOLOGIAS EXISTENTES	10
2.2.1 ESTRUCTURAS DE CELULAS SILICIO CRISTALINO.....	11
2.2.2 ANTECEDENTES EN EL DESARROLLO DE CÉLULAS IBC.....	13
2.2.3 PROCESOS DE FABRICACIÓN.....	18
2.2.3.1 PROCESO FABRICACIÓN ESTANDAR	18
2.2.3.2 PROCESO FABRICACIÓN CELULAS IBC.....	19
2.3 DIFUSIÓN DE DOPANTES EN CÉLULAS FOTOVOLTAICAS DE SILICIO	21
2.3.1 DIFUSIÓN DE DOPANTES EN CÉLULAS DE CONTACTO TRASERO.....	24
2.3.2 FUNCION DE LAS AREAS DIFUNDIDAS EN LAS CELULAS CRISTALINAS.....	26
2.4 CARACTERIZACIÓN.....	27
2.4.1 CURVA I-V.....	27
2.4.2 RESPUESTA ESPECTRAL.....	27
2.4.3 TIEMPO DE VIDA DE LOS PORTADORES DE CARGA.....	28
2.4.4 RESISTIVIDAD.....	30
2.4.5 PERFILES DE DIFUSION.....	32
3- DETERMINACIÓN DEL PERFIL DE DIFUSION DEL FSF ÓPTIMO	33
3.1 INFLUENCIA DE LA DISTRIBUCIÓN DEL PERFIL EN EL COMPORTAMIENTO.....	34
3.2 PERDIDAS POR TRANSPORTE LATERAL DE CARGAS.....	37
3.3 DIFUSIÓN EXPERIMENTAL DEL PERFIL	40
4- IMPLEMENTACIÓN DEL FSF EN UNA CELULA DE CONTACTO TRASERO.	45
4.1 CARACTERISTICAS DIMENSIONALES ÓPTIMAS.....	45
4.2 FABRICACIÓN CELULAS TIPO IBC.....	47

5- OPTIMIZACIÓN DEL FSF CONSIDERANDO EL PROCESO DE FABRICACIÓN COMPLETO.....	52
5.1 PLANTEAMIENTO EXPERIMENTAL	53
5.2 RESULTADOS	54
5.3 ANALISIS Y CONCLUSIONES.....	62
6- REFERENCIAS.....	64
7-ARTICULOS PUBLICADOS	70

1-MOTIVACIÓN Y OBJETIVO

Las células interdigitadas de contacto trasero representan una opción para incrementar considerablemente la eficiencia de conversión eléctrica de las células fotovoltaicas comerciales. Este tipo de tecnología ha sido ya introducida en el mercado consiguiendo eficiencias de conversión eléctrica superiores al 20% [1].

Una parte fundamental de la arquitectura de las células de contacto trasero interdigitadas (IBC) es el llamado “Front Surface Field” (FSF). Este consiste en una capa altamente dopada con impurezas de igual signo a las que dopan el sustrato y que se sitúa sobre la superficie de la célula. La difusión del FSF desempeña múltiples funciones fundamentales para el funcionamiento de las células IBC.

Una vez un par electrón hueco es generado en el interior de la célula, debe viajar por el interior de la célula hasta ser recolectado en los contactos. La longitud y las características conductivas de la base determinan en gran medida las pérdidas por resistencia serie. La difusión de un FSF permite crear una capa de elevada conductividad que minimiza las pérdidas derivadas de la resistencia serie.

El hecho de que la unión p-n esté situada en la parte posterior de las células IBC implica unas especificaciones para la zona frontal considerablemente más exigentes a las de las células convencionales. El FSF ayuda a crear un campo eléctrico en la superficie que repela los pares electrón hueco generados en el interior de la base evitando su recombinación en la superficie.

A pesar de sus ventajas, la formación del FSF también puede provocar una respuesta deficiente ante la luz azul. Esta limitada respuesta ante la luz de menor longitud de onda, tiene su origen en una elevada recombinación de los pares electrón-hueco generados junto a la superficie. Para poder evitar dicha recombinación al tiempo que se aprovechan las ventajas del FSF, se hacen necesarias difusiones con unos perfiles de difusión con características concretas.

A su vez, debido la arquitectura de las células IBC, el FSF puede ser introducido en el dispositivo en diferentes estadios del proceso de fabricación. La etapa del proceso donde se crea, determina los pasos térmicos posteriores a los que el FSF va a ser sometido. Si el tiempo y la temperatura de los pasos térmicos superan unos determinados valores, se promueve considerablemente la difusión del FSF creado inicialmente y se modifica de manera determinante el perfil de difusión.

A pesar de que existen diversas investigaciones que han estudiado la influencia del perfil de difusión en el comportamiento de las células fotovoltaicas [2,3], el estudio de la influencia de los pasos térmicos en el FSF y en su comportamiento final es escaso hasta el momento.

La tesina pretende profundizar en este estudio, aportando nuevos resultados y análisis que permitan dotar a la comunidad científica de una mayor comprensión de la aplicación del FSF en el procesado de células IBC. A su vez también se pretende fabricar en el laboratorio células fotovoltaicas de alta eficiencia con la estructura característica de las células IBC, profundizando en la discusión sobre las características que debe poseer un FSF para posibilitar que las células IBC alcancen eficiencias significativamente superiores a las existentes en el mercado.

2-ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE

Como resultado del esfuerzo que se está llevando a cabo en todo el mundo para reducir la dependencia de los combustibles fósiles y disminuir las emisiones de dióxido de carbono, la industria fotovoltaica ha experimentado un crecimiento sin precedentes. Por primera vez, en el año 2012, las inversiones mundiales en tecnologías limpias han superado a las inversiones en tecnologías basadas en hidrocarburos.

Para posibilitar que la industria fotovoltaica siga consolidando su crecimiento, el precio de los módulos solares deben continuar experimentando una bajada de costes de producción hasta alcanzar un precio de la electricidad producida por los mismos de al menos 0.15€/kWh [4].

Para consolidar el crecimiento sostenible de la industria, se hace necesario afrontar importantes retos entre los que destacan la reducción de la cantidad de silicio utilizado por célula, el tránsito a materiales de fabricación completamente reciclables y la reducción del coste en la formación de los contactos metálicos.

Mención especial merece la influencia de la eficiencia de conversión en el futuro de la implantación de la energía fotovoltaica. Un aumento en la eficiencia favorece la reducción de costes aumentando de una manera directa la producción de energía por unidad de superficie, permitiendo reducir a su vez la cantidad de material y suelo necesario para las instalaciones solares.

2.1 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

Los sistemas fotovoltaicos, basándose en las propiedades de los materiales semiconductores, transforman la energía que irradia el sol en energía eléctrica. Este proceso de transformación de energía solar en energía eléctrica se produce en un elemento conocido como célula fotovoltaica.

La conexión de células fotovoltaicas y su posterior encapsulado y enmarcado da como resultado la obtención de los paneles o módulos fotovoltaicos. Estos se utilizan, ya sea para aplicaciones domésticas o industriales, como elementos generadores de electricidad de corriente continua.

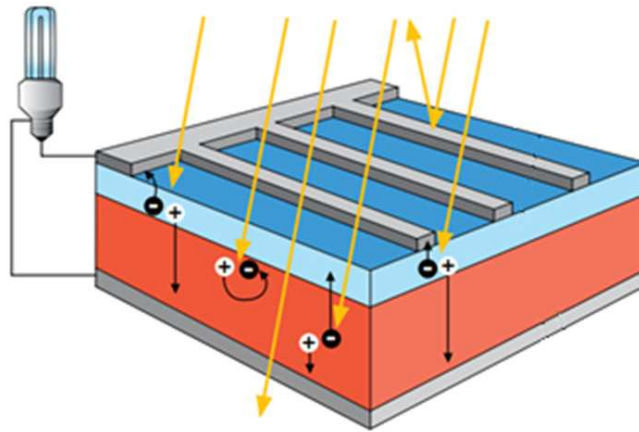


Figura 1- Representación de una célula fotovoltaica cristalina bajo iluminación.

Cuando la luz del sol incide sobre una célula fotovoltaica se produce el efecto fotoeléctrico. Dicho efecto tiene lugar al incidir la radiación solar sobre materiales semiconductores. Cuando éstos la reciben en forma de fotones, provoca una deslocalización de pares electrón-hueco en el interior del material.

Los materiales semiconductores se dopan por lo general con otro material que determina si son de tipo n o de tipo p. Si del dopaje resulta un material base tipo n, el número de electrones es órdenes de magnitud más alto que el número de agujeros. En el caso de las bases tipo p el número de agujeros es órdenes de magnitud más alto que el número de electrones.

Al unirse dos regiones de un semiconductor a los que artificialmente se ha dotado de concentraciones diferentes de electrones se forma lo que se conoce como unión P-N.

Esta unión provoca un campo electrostático constante que reconduce el movimiento de los portadores de carga, en la dirección y sentido que se desee, posibilitando la separación de los portadores de carga y evitando su recombinación.

Los contactos eléctricos necesarios para extraer la electricidad se obtienen depositando dos capas metálicas sobre la superficie de la célula.

El parámetro eléctrico fundamental que caracteriza el comportamiento de los portadores de carga en el interior del semiconductor es el tiempo de vida (τ). Para la comprensión del concepto resulta de utilidad la analogía expuesta por Cuevas y Macdonald [5], donde se equipara los conceptos de tiempo de vida de los portadores de los materiales semiconductores y la esperanza media de vida en la demografía. Al igual que los mortales comunes, los electrones (y huecos) mueren después de un tiempo, y al promedio de este tiempo se le denomina tiempo de vida de portadores de carga.

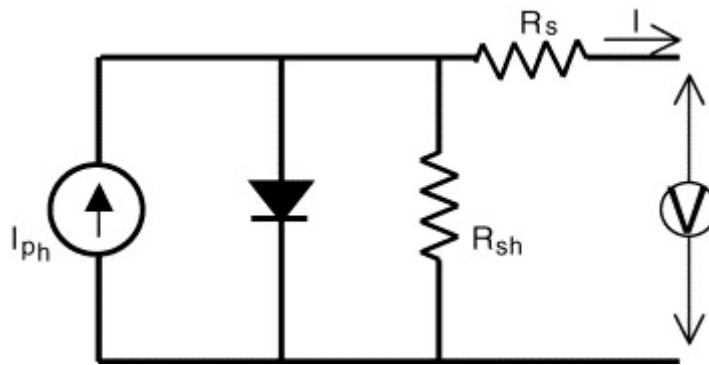


Figura 2- Circuito equivalente para una célula solar conteniendo una fuente de corriente, I_{sc} , en paralelo con un diodo, una resistencia shunt (R_{sh}) y serie (R_s). La corriente de la fuente de luz es equivalente a la luz generada y se supone igual a la corriente de cortocircuito

El comportamiento eléctrico de una célula fotovoltaica se puede modelizar por medio de un circuito equivalente como el mostrado la Figura 2 y descrito por la Ecuación 1 [6]. Asumiendo que la luz generada es igual a la corriente de cortocircuito tenemos:

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{nKT}\right) - 1 \right] - I_{sc} \quad (1)$$

donde I_{sc} es la corriente de cortocircuito, I_0 es la corriente de saturación, k es la constante de Boltzmann, T es la temperatura, q es la carga del electrón y n es el factor de idealidad que varía entre 1 y 2.

La Ecuación 1 a menudo se escribe con I , I_0 y I_{sc} sustituido por J , J_0 y J_{sc} donde J indica la densidad de corriente o la corriente por unidad de área. La ecuación se puede modificar para incluir el efecto de la resistencia serie y shunt.

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{V - IR_s}{nKT/q}\right) - 1 \right] - \left(\frac{V - IR_s}{R_{SH}}\right) - I_{sc} \quad (2)$$

2.2 TECNOLOGIAS EXISTENTES

Existe una amplia variedad de tecnologías introducidas en el mercado a lo largo de la última década. En la gran mayoría utilizan como material principal el silicio, aunque también se comercializan células sobre otros sustratos como el telurio de cadmio o el arseniuro de galio. El silicio utilizado actualmente en la fabricación de las células se presenta en tres formas diferentes:

- a) **Silicio monocristalino.** En este caso el silicio que compone las células de los módulos es un único cristal. La red cristalina es la misma en todo el material y tiene muy pocas imperfecciones. El proceso de cristalización es más complicado y costoso, pero la recombinación de los pares electron-hueco es considerablemente más reducida. Esta reducida recombinación es un requisito indispensable para los nuevos conceptos de células de alta eficiencia.
- b) **Silicio policristalino.** No está formado por un solo cristal. El proceso de cristalización no es tan cuidadoso y la red cristalina no es la misma en todo el material. Este proceso es más barato que el anterior pero las impurezas e imperfecciones aumentan la recombinación en el sustrato y pueden comprometer el funcionamiento de la célula ante determinadas condiciones de servicio.
- c) **Silicio amorfo.** En el silicio amorfo no hay red cristalina y se obtiene un rendimiento inferior a los de composición cristalina. Sin embargo posee la ventaja, además de su bajo coste, de ser un material muy absorbente por lo que basta una fina capa para captar la luz solar.

Las células de silicio cristalino acaparan la mayor parte del mercado y presentan en la actualidad un elevado potencial de desarrollo tecnológico e industrial. El presente trabajo utilizará en el desarrollo experimental sustratos de silicio monocristalino.

2.2.1 ESTRUCTURAS DE CELULAS SILICIO CRISTALINO

Las células más extendidas comercialmente se conocen como “*H-Patterned*” y presentan un rango de eficiencias habitualmente comprendido entre el 16% y el 18%. En estas, los contactos en la cara iluminada tienen forma de rejilla o peine para permitir que la luz pueda incidir directamente sobre la mayor parte de la superficie. La cara opuesta, que no está en contacto directo con la luz solar, es una capa metálica continua que cubre toda la superficie (Fig. 3).

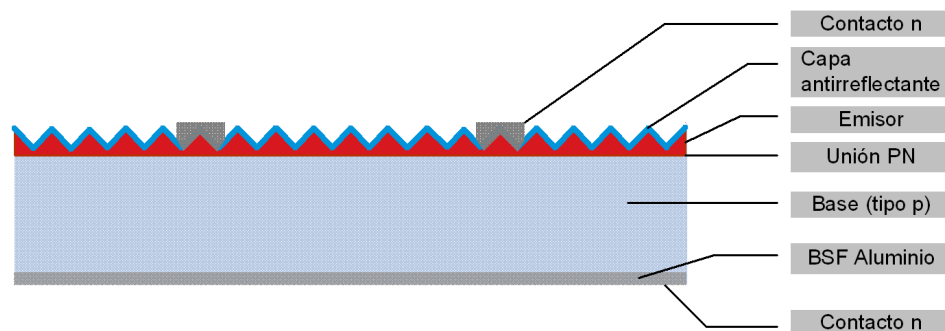


Figura 3- Esquema explicativo de los componentes principales de una célula solar estándar cristalina de silicio

En la última década las células con este tipo de estructura han tenido un gran desarrollo impulsado fundamentalmente por una reducción drástica en los costes de fabricación. Aunque las células *H-Pattern* convencionales han experimentado un aumento apreciable de la eficiencia de conversión, el potencial de aumentar más allá su eficiencia es reducido.

Otros conceptos de células se están abriendo camino en la industria gracias a la posibilidad de considerables aumentos de la eficiencia que presentan. Una estrategia muy extendida para poder obtener células de alta eficiencia supone la formación de ambos contactos en la superficie trasera de la célula. Esto posibilita una mejor integración de las células en un módulo fotovoltaico. A su vez permite la desaparición de los contactos de la superficie iluminada de la célula, al eliminar el sombreado de la misma, con un consecuente aumento de la eficiencia.

Hoy en día existen tres conceptos principales de células de contacto trasero conocidas por sus iniciales en inglés como: “Metal Wrap Through” (MWT) [7], Emitter Wrap-Through (EWT) [8,9] e “Interdigitated Back Contact” (Apartado 2.2.2).

La estructura de las células MWT es la que más se asemeja a la estructura de células *H- Pattern*. En este tipo de células el emisor se encuentra en la parte superficial así como parte de su malla de contactos, aunque los contactos atraviesan el espesor del sustrato hasta su parte posterior. Esto posibilita realizar la conexión a la célula exclusivamente desde la parte posterior. En el caso de las células EWT el emisor sigue presente en la zona frontal aunque se encuentra libre de toda metalización.

Finalmente la estructura de las células IBC, el emisor desaparece de la parte frontal encontrándose en su totalidad, junto con los contactos, en la parte trasera.

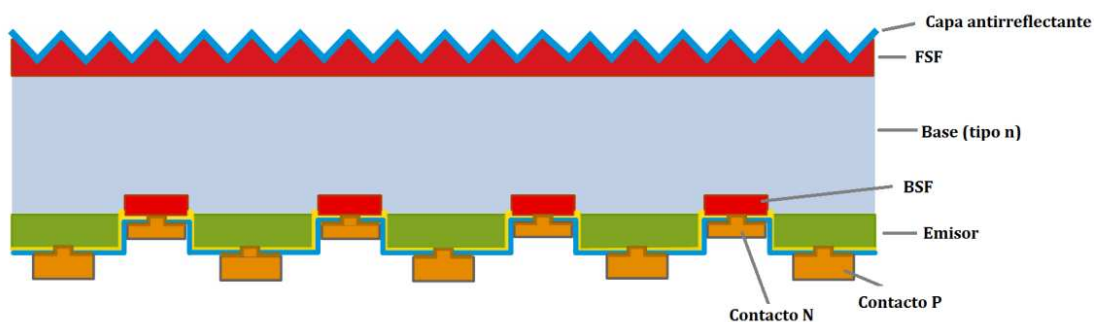


Figura 4- Esquema de los componentes principales de una célula solar tipo IBC

Las células interdigitadas de contacto trasero se han demostrado como una alternativa industrialmente viable y ha sido comercializada con valores de eficiencia superiores al 20% [1]. El trabajo realizado por Siliken y el ECN ha demostrado eficiencias del 19% con secuencias de proceso en las que se han utilizado tecnologías de fabricación estándar para la definición de estructuras y metalización [10, 11].

2.2.2 ANTECEDENTES EN EL DESARROLLO DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS TIPO IBC

En 2009 Granek repasó de manera detallada la evolución en el desarrollo de células de contacto trasero desde su aparición en 1975 hasta nuestros días [12]. Se muestra a continuación un resumen de la evolución de este desarrollo.

El concepto de las células solares de unión y contacto trasero, también conocidas por su denominación en inglés como “*Interdigitated Back Contact solar cells*” (IBC), fue introducido en 1975 por Schwartz y Lammert [13].

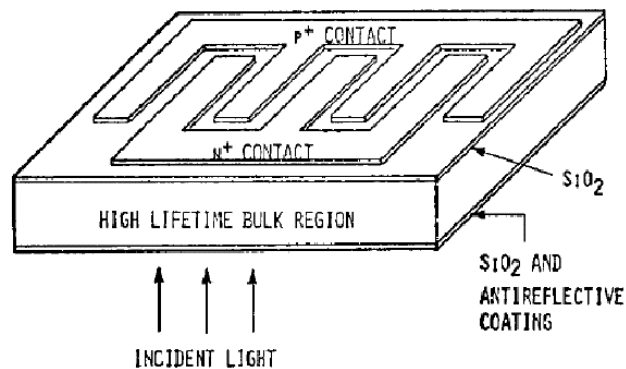


Figura 5- Estructura de células de contacto trasero tipo IBC [13].

En las células IBC, las regiones difundidas asociadas a los contactos se encuentran situadas en la cara posterior intercalándose de manera alterna. Los contactos de signos opuestos se intercalan a su vez en la cara posterior cubriendo parte de las regiones difundidas de signo opuesto.

En un primer momento las células solares IBC se diseñaron para operar sistemas de alta concentración. Bajo concentraciones de 50 soles se logró alcanzar una eficiencia del 17% [13].

En 1983 Swanson *et al.* [14] introdujeron las células de contacto puntual, similares a las células tipo IBC. La principal diferencia es que el punto de contacto con las difusiones traseras se limita a una serie de pequeños puntos, como se muestra esquemáticamente en la Figura 6.

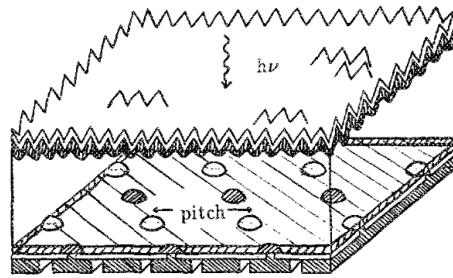


Figura 6- Estructura de una célula de contacto trasero puntual [15]

En este tipo de estructuras la recombinación en las zonas difundidas puede reducirse significativamente mediante la minimización de la zona altamente dopada necesaria para un buen contacto. Por lo tanto, es posible aumentar la tensión de salida y la eficiencia de la célula.

El grupo dirigido por el profesor Swanson en la Universidad de Stanford, ha hecho las contribuciones más significativas en el campo de las células IBC. Sus células no texturadas de concentración con contacto puntual alcanzaron una eficiencia del 19.7% bajo 88 soles en 1984 [15].

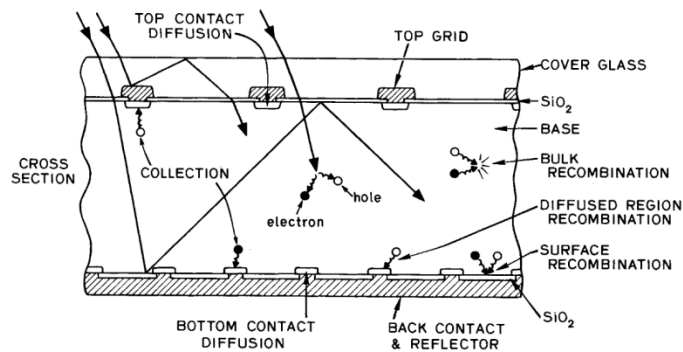


Figura 7- Operación de una célula de contacto trasero puntual [15]

En 1986 una posterior optimización desarrollada por Sinton *et al* [16,17] alcanzó una eficiencia del 27,5% bajo concentración de 100 soles. Poco tiempo después el mismo grupo presentó un dispositivo de mayor superficie que alcanzó el 28% de eficiencia bajo 150 soles. Por último Sinton *et al.* presentaron en 1988 eficiencias del 28,4 % en células de contacto trasero puntual con una superficie de 0.15 cm² bajo concentración de 200 soles [18].

En 1985 el Profesor Swanson fundó SunPower Corporation con el objetivo de comercializar las células de alta eficiencia de contacto trasero desarrolladas por el grupo de la Universidad de Stanford.

La estructura de la célula de unión p-n trasera también se ha optimizado para aplicaciones de bajo nivel de iluminación. En 1985 Verlinden *et al.* presentaron una célula solar tipo IBC con una eficiencia del 21% bajo iluminación de un sol. Un año más tarde Sinton et al. [16] introdujeron una célula solar de contacto puntual con el 22,2% con un área de 0,15 cm².

King et al. [19] presentaron una célula de mayor tamaño (8,5 cm²) con un “Back Surface Field” (BSF), FSF y contacto puntual alcanzando una eficiencia máxima del 22,3%. En esta célula solar se aplicó un novedoso esquema de metalización multinivel, introducido por Verlinden en 1988. Este esquema permitió la metalización de células fotovoltaicas de gran superficie en que la resistencia en serie no dependiera del área de la célula [20].

En 1991, King et al reportó un nuevo record de eficiencia del 22,7% en una célula de 37,5 cm² [21].

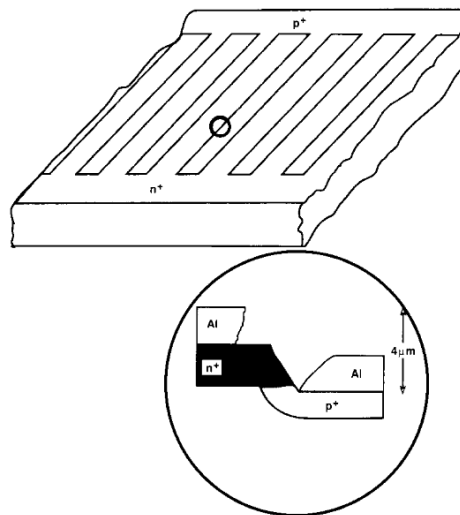


Figura 8- Detalle mostrando el efecto de la introducción de un paso en las primeras etapas del proceso que permite la auto-alineación. Esto elimina la necesidad de la utilización de múltiples mascarar [24]

El procesado de la red interdigitada trasera que contiene las difusiones y contactos intercalados y las aperturas puntuales para los contactos requiere pasos recurrentes de patronado. Esto resulta en una secuencia de proceso larga y compleja lo que aumenta los costes de fabricación. En 1988, se introdujo un método que permitía el auto-alineado de la red de contactos entrelazados [18].

En 1990 Sinton *et al.* [22] presentaron un método simplificado de auto-alineado (Fig. 8), que utiliza este sistema de auto-alineado y permite reducir los pasos de enmascaramiento a uno. Esta secuencia simplificada de procesado consiguió alcanzar una eficiencia del 21,9% en una célula de 10,5 cm².

En 1993 Sinton *et al.* fabricaron un lote de 7.000 células fotovoltaicas de contacto trasero, de área 35 cm² y eficiencia del 21%, para ser instaladas en el prototipo de coche solar desarrollado por Honda para la carrera World Solar Challenge [23,24]. El procesamiento de estas células solares requirió cinco pasos litográficos de enmascaramiento.

Posteriormente el diseño de las células desarrolladas por Sunpower fue optimizado, especialmente en lo que se refiere a la pasivación del contorno de la célula y en el dopado del substrato. Esto permitió a Velinden *et al.* un nuevo record de eficiencia del 23,2% en células en condiciones de iluminación de un sol. En 2002 Cudzino trabajó en la simplificación del proceso de fabricación consiguiendo una reducción de los costes de fabricación de un 30%.

En 2004 Mulligan *et al.* comenzaron la fabricación de células de gran superficie (149 cm²) con una eficiencia máxima de 21,5% [25]. Dicha células utilizaban substratos de espesor de 160 a 280 micras y resistividad de 2 a 10 Ω.cm basado en los estudios realizados por McIntosh *et al.* [26].

Structure	V_{oc} (mV)	J_{sc} (mA/cm ²)	FF	η (%)	V_{mpp} (mV)	J_{mpp} (mA/cm ²)
“baseline cells”: pitch = 2109 μm, n-type diffusion width = 600 μm, finger width = 400 μm, contact width = 200 μm.						
Experimental	668	37.8	0.805	20.3	573	35.5
Simulated	665	38.0	0.809	20.4	566	36.1
finer dimensions: pitch = 1105 μm, n-type diffusion width = 300 μm, finger width = 200 μm, contact width = 100 μm.						
Experimental	666	38.8	0.825	21.3	576	37.0
Simulated	665	38.7	0.826	21.3	576	36.9

Tabla 1- Comparación de los parámetros obtenidos experimentalmente por Sunpower que dieron lugar a la fabricación en serie de células de alta eficiencia sobre substratos de 5*5 pulgadas [30].

Una nueva generación de células consiguió una eficiencia media record de 22,4% introducida por De Ceuster *et al.* Esta nueva generación de células supone las células de mayor eficiencia puestas en el mercado hasta la fecha. La eficiencia a nivel de módulo conseguida utilizando este tipo de células alcanzó el 20,1%.

Recientemente Swanson anunció un nuevo record de eficiencia del 23,4% en células de gran superficie desarrollado por el departamento de I+D de Sunpower. [27,28]

2.2.3 PROCESOS DE FABRICACIÓN

2.2.3.1 PROCESO DE FABRICACIÓN ESTANDAR

En la actualidad existen multitud de rutas de proceso posibles para la realización de células fotovoltaicas sobre sustratos cristalinos. Aunque se pueden encontrar excepciones remarcables [29, 30], los procesos utilizados por la mayoría de la industria giran en torno a un proceso base que destaca por su reducido número de pasos y su simplicidad. Se detallan a continuación los pasos más frecuentemente utilizados en dicho proceso:

Prelimpieza y Texturado: La fabricación comienza con una limpieza que elimina la suciedad e impurezas derivadas del proceso de fabricación de las obleas. Posteriormente se realiza un texturado de la superficie. Dicho proceso consiste en una sucesión de baños diseñados para atacar selectivamente la superficie de la oblea, maximizando la luz atrapada en el dispositivo y consiguiendo la mejora de su eficiencia total. El proceso utiliza habitualmente agua desionizada, IPA, HF, Acido nítrico (HNO_3), ácido sulfúrico, así como hidróxido de potasio (KOH). Previamente a la difusión se realizan una secuencia de baños de limpieza con HF y HCl.

Difusión superficial de dopantes: Dicha difusión tiene como objetivo la creación de la unión p-n que posibilita la separación de cargas en el semiconductor. El proceso de difusión puede llevarse a cabo en un horno en línea a presión atmosférica o en un horno de tubo de cuarzo a presión controlada. En el primer proceso deposita una mezcla de ácido fosfórico y etanol mediante spray mientras que en el segundo se utiliza POCl_3 .

Limpieza post-difusión (PSG Etch). El proceso se realiza en un baño de HF y tiene por objetivo la eliminación de la capa de óxido saturado de fósforo que se crea durante el proceso de difusión. El ataque elimina a su vez una pequeña cantidad de la oblea original.

Deposición de la capa antirreflectante: Se deposita sobre la superficie frontal de una oblea. Se trata de un proceso de deposición en ultra alto vacío y se realiza habitualmente de manera automatizada mediante la técnica de “Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition” (PECVD).

Deposición de los contactos metálicos: Industrialmente la técnica más extendida para su formación es la serigrafía. Se trata de un proceso en línea en tres pasos que

patrona en la parte superior de la oblea, con pasta de plata y aluminio, un circuito que permite a su vez el paso de la luz y la interconexión. En la parte inferior se aplica de manera uniforme una fina capa de aluminio. En el presente trabajo se puede encontrar una descripción de las diferentes alternativas presentes a nivel industrial prestando especial interés en las técnicas basadas en la electrodeposición.

Metalización: Consiste en un paso de calentamiento rápido que permite la correcta unión de los contactos metálicos con la superficie de la oblea altamente dopada [31,32].

Aislamiento eléctrico: Se realiza para evitar posibles cortocircuitos ocasionados por una mala definición del perímetro de la célula. Dicho aislamiento requiere la utilización de un láser que aísla el emisor de la parte posterior de la célula.

Medición y clasificación: Al final del proceso se realiza una medición de los parámetros eléctricos de las células con el objetivo de validar su correcto funcionamiento y clasificarlas para su posterior ensamblado como parte de los módulos fotovoltaicos.

2.2.3.2 PROCESO FABRICACIÓN CELULAS IBC

El proceso de fabricación de las células de contacto trasero resulta más extenso y complejo que el descrito en el proceso estándar, siendo necesaria la introducción de nuevas nuevos procesos y tecnologías de fabricación (Figs. 9 y 10). Si bien es cierto que existen etapas idénticas principalmente en la preparación del substrato, la texturación, formación de la capa anti-reflectante y medición finales.

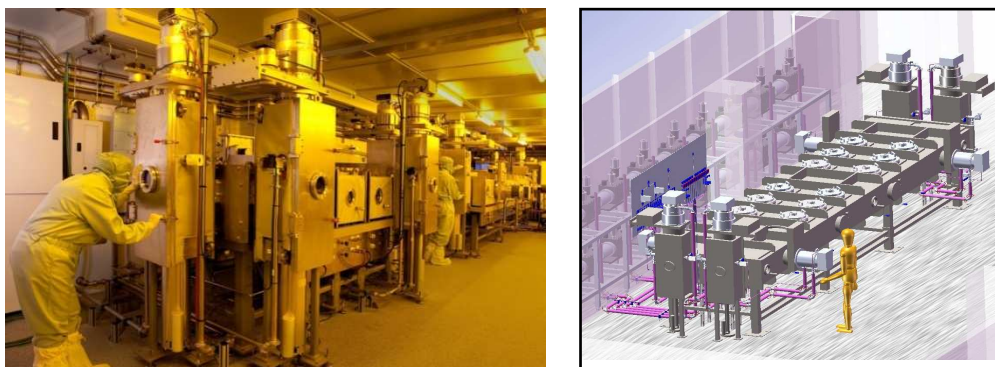


Figura 9- A) Imagen de equipos destinados a la fabricación de células de contacto trasero instalados en la línea piloto de Siliken de la UPV. B) Modelo 3D del diseño de un equipo de pulverización catódica destinado a la formación de contactos y deposición de capas dieléctricas.

Buena parte de las particularidades del proceso derivan de la necesidad de incluir todos los contactos en la misma cara. Este hecho provoca que sea necesario crear en una misma cara una estructura que alterna difusiones y contactos de diferente signo. El hecho de situar los contactos en la misma cara obliga a las cargas a tener que realizar un recorrido considerablemente mayor antes de ser recolectadas en los contactos. Para evitar que se recombinen, se introducen nuevas regiones difundidas que repelen las cargas de la superficie y las direccionan hacia los contactos.

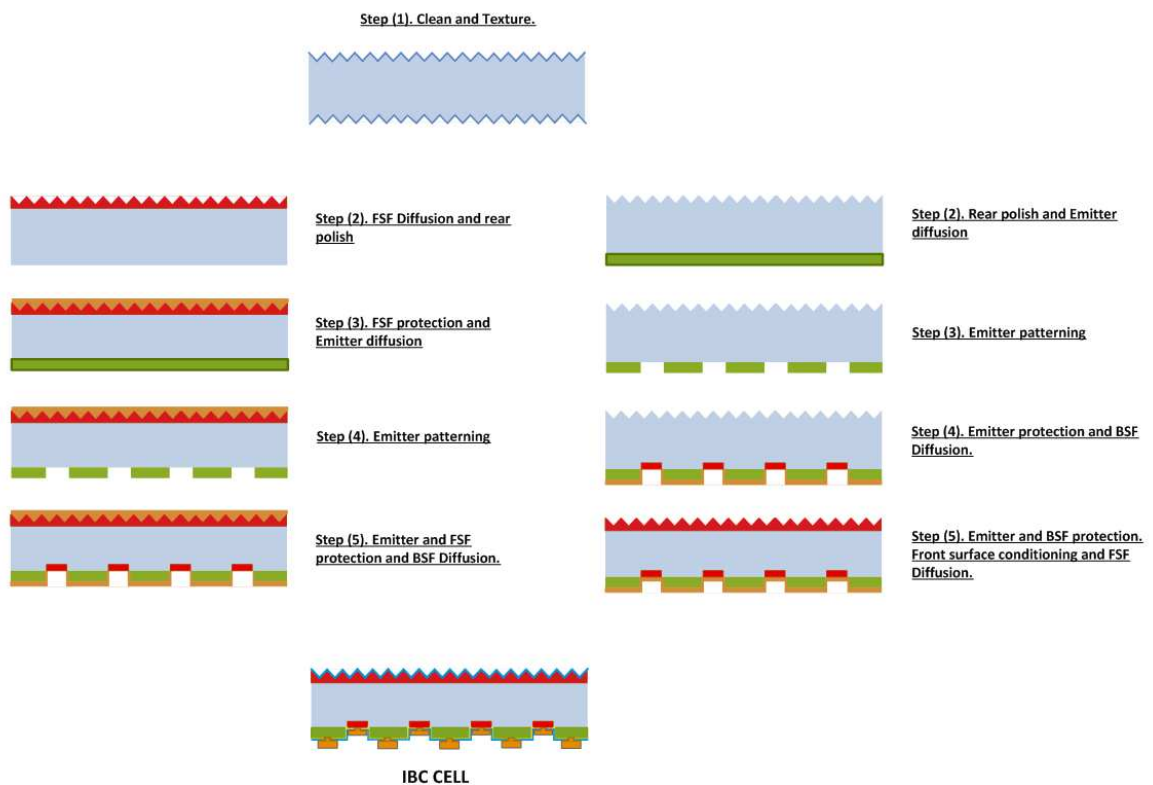


Figura 10- Ejemplos de dos secuencias de proceso que dan lugar a una célula solar tipo IBC.

En contraposición al proceso estándar, que presenta una secuencia de proceso definida en cuanto a los parámetros de proceso, el número de pasos y el orden de los mismos los procesos, el proceso óptimo para la fabricación de células IBC está todavía en discusión (Fig. 10).

Además de las particularidades derivadas de la inclusión de los contactos en una misma cara, la principal diferencia radica en la necesidad de realizar múltiples difusiones, incluyendo una frontal y dos traseras.

2.3 DIFUSIÓN DE DOPANTES EN CÉLULAS FOTOVOLTAICAS DE SILICIO

La física y las aplicaciones de la difusión de dopantes en silicio han recibido un enorme interés durante varias décadas, sobre todo debido a la gran importancia tecnológica de la difusión de dopantes para la fabricación de dispositivos microelectrónicos [33, 34, 35]. A pesar de este interés no se ha establecido una comprensión completa y unificada sobre la difusión de dopantes en silicio.

La difusión puede ser descrita como la homogeneización de materiales en contacto, en la que un gradiente en la composición química tenderá a igualarse naturalmente con el tiempo. Una descripción empírica de difusión fue proporcionada ya en 1855 por Adolf Fick [36].

Para simplificar la difusión de dopantes en el silicio, se utiliza la primera ley de Fick (Eq. 3) en la que se asume que el flujo de átomos de dopante (J) en cualquier punto (x) es proporcional al gradiente de la concentración de dopante en ese punto (ϕ). La constante de proporcionalidad se conoce como coeficiente de difusión (D) y se asume como constante para un dopante a una temperatura dada. En realidad D no es constante ya que depende de la concentración del dopante.

$$(3) \quad J = -D \frac{\partial \phi}{\partial x}$$

La difusión controlada de dopantes en el silicio es la base de la formación de una unión p-n, paso fundamental en la fabricación de dispositivos fotovoltaicos.

Para la introducción de dopantes se pueden encontrar diversos tipos de tecnologías existentes. Merece una mención especial, por su amplio recorrido industrial y su potencial para alcanzar altas eficiencias, la difusión a alta temperatura (800 a 1000 ° C) en un ambiente rico en dopantes en estado gaseoso. También cabe destacar la difusión por implantación de iones ya que está concentrando una parte importante de los esfuerzos en desarrollo de alternativas a la difusión por temperatura [37].

Los sistemas más comúnmente utilizados para introducir dopante en obleas por difusión son los hornos de tubo de cuarzo horizontal, similares a los utilizados para la oxidación térmica de las obleas de silicio.



Figura 11- Imagen del equipo de difusión utilizado en la línea piloto de Siliken suministrado por Tempres Systems.

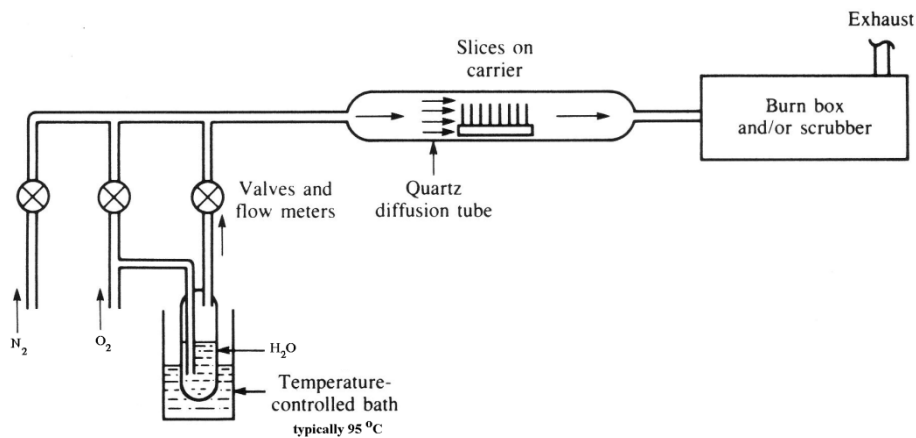


Figura 12- Esquema del sistema de difusión utilizado en la línea piloto de Siliken S.A consistente con una fuente de dopantes líquida por la que se hace pasar un flujo de N_2 que actúa como gas portador. [38]

En general se introducen los átomos dopantes en dos etapas de difusión separadas. La primera etapa se conoce como etapa de deposición en la que se pretende depositar una cantidad controlada de átomos de dopante en la superficie de silicio. La segunda etapa, conocida comúnmente como etapa de “drive-in”, se emplea en introducir los átomos de dopantes en el interior del sustrato provocando la reducción de la concentración cerca de la superficie.

En la etapa de pre-deposición la oblea está expuesta a un exceso de átomos de dopante de manera que la superficie de la oblea supere la máxima concentración admisible por el sustrato para la temperatura de difusión dada (referido como el límite de solubilidad en estado sólido).

En los hornos modernos en lugar de mantener el horno a la temperatura de difusión durante todo el proceso, es posible controlar la temperatura adecuándola a las diferentes etapas del proceso.

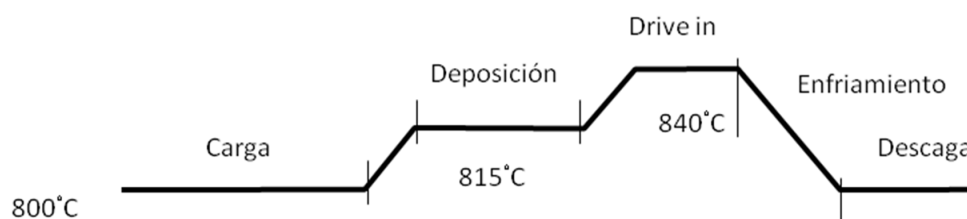


Figura 13- Etapas y perfil de temperaturas típico para un proceso de difusión de dos etapas de fósforo sobre sustrato de silicio.

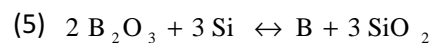
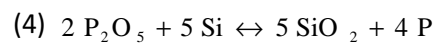
La introducción de átomos de dopante, junto con los altos gradientes térmicos experimentados por las obleas cuando se introducen o extraen del horno, puede causar un daño significativo a la estructura cristalina del sustrato. Estos daños pueden afectar de manera determinante a las propiedades eléctricas del material. Para aliviar estos daños, las obleas son introducidas y retiradas del horno de forma lenta (~ unos pocos cm por minuto) y controlada mediante un extractor mecánico.

2.3.1 DIFUSIÓN DE DOPANTES EN CÉLULAS DE CONTACTO TRASERO

La difusión de dopantes en substratos de silicio cristalino se hace necesaria en diversas fases de la fabricación. En el caso de las células de tecnología estándar se utiliza una única difusión en la que se crea el emisor. Es en este emisor donde se consigue la separación efectiva de los portadores de carga minoritarios, evitando su recombinación.

Los conceptos avanzados de células fotovoltaicas, entre las que se encuentran las células IBC, requieren estructuras más completas que incluyen múltiples difusiones. Además del emisor se incluyen difusiones del Front Surface Field (FSF) [39] y el Back Surface Field (BSF) [40] cuya función se describe a continuación en el Apartado 2.3.2.

Los dopantes más comúnmente utilizados son; el fósforo para la familia de dopantes tipo n y el boro para la familia de dopantes tipo p.



Para el caso de los substratos con dopaje base tipo n, el emisor se crea a partir de una difusión de boro mientras que el BSF y el FSF a partir de una difusión de fósforo. En ambos casos los dopantes son puestos en contacto con la superficie del silicio en forma de óxido (Ecuaciones 4 y 5) con el que reaccionan promovidos por la temperatura.

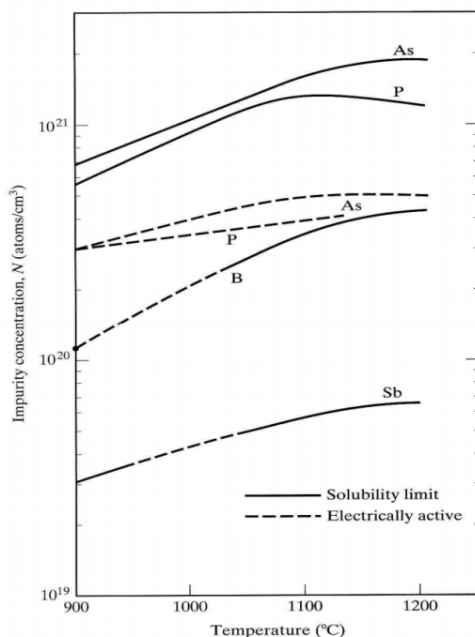


Figura 14- Concentración de impurezas máxima en función de la temperatura para el antimonio, arsénico, boro y fósforo. [38]

El boro presenta una alta solubilidad en el silicio pudiendo alcanzar concentraciones superficiales de hasta $4 \cdot 10^{20}$ átomos/cm³. El fósforo presenta una solubilidad superior al boro y puede alcanzar concentraciones superficiales en silicio superiores a $4 \cdot 10^{21}$ átomos/cm³ (Fig. 14).

2.3.2 FUNCION DE LAS AREAS DIFUNDIDAS EN LAS CELULAS DE SILICIO CRISTALINO

El emisor se crea al difundir un área con un dopante de signo contrario al dopaje de la base. La creación del emisor supone la aparición de una unión p-n. La interfaz de unión entre la región n y la p actúa como separador efectivo de los portadores de carga. Cuando un portador de carga alcanza la unión es recolectado convirtiéndose en un portador de carga mayoritario. Llegado este punto se reduce drásticamente el riesgo de recombinación del portador de carga, pudiéndose ser extraído de la célula.

Tanto el BSF como el FSF consisten en regiones altamente dopadas con un dopante del mismo tipo que el del substrato. Se localizan en la superficie frontal (FSF) y trasera (BSF) de la célula fotovoltaica. Su presencia implica la creación de un interfaz entre las zonas de alto y bajo dopaje que promueve la aparición de un campo eléctrico. Este campo repele el flujo de portadores minoritarios hacia la superficie evitando su recombinación.

La mayoría de los portadores minoritarios se generan cerca de la superficie, por lo que evitar su recombinación antes de que alcance la unión p-n es esencial. Para las células estándar la recombinación frontal se produce en el emisor mientras que en las de contacto trasero se produce en el FSF teniendo que atravesar el espesor de la oblea hasta alcanzar el emisor situado en la cara posterior.

Las difusiones tienen un impacto directo en el comportamiento final de las células influenciando tanto la corriente, como el voltaje y la resistencia serie de las mismas. Cada zona difundida está sometida a diferentes requerimientos que determinarán el perfil de difusión ideal para cada una de ellas. Se hace por tanto necesario adecuar las características de cada una de las difusiones de los diferentes tipos de dispositivos.

2.4 CARACTERIZACIÓN

2.4.1 CURVA I-V

El comportamiento eléctrico de una célula solar se puede caracterizar mediante el análisis de la densidad de corriente en función del voltaje (J-V). Las mediciones que se realizan en el presente trabajo se realizan utilizando un simulador solar suministrado por WACOM. Se trata de un equipo de doble haz, que ha sido calibrado en el espectro de AM1.5, así como en la oscuridad. Una lámpara de xenón ofrece la luz en el espectro ultravioleta y visible mientras que una lámpara de halógeno la ofrece en el espectro infrarrojo.

2.4.2 RESPUESTA ESPECTRAL

La medida de la respuesta espectral proporciona información adicional sobre el comportamiento eléctrico de las células, cuantificando su respuesta frente a la luz de diferentes longitudes de onda.

Como fuente de luz es habitual la utilización de una lámpara de 1000 W de alta presión de xenón. Un monocromador controlado por un ordenador crea un haz de luz monocromática desde los 350 a los 1200 nm. Antes de cada medida, se realiza una medida de referencia por medio de una célula calibrada para medir el flujo de fotones emitido para cada longitud de onda.

La eficiencia cuántica interna (IQE) se define como el número de electrones por fotón que se introduce en el interior de la oblea que contribuyen a la corriente total del dispositivo.

Las mediciones de la respuesta espectrales son particularmente útiles para obtener información sobre las diferentes regiones de una célula: una respuesta baja a pequeñas longitudes de onda (UV y azul) es indicativo de pérdidas por absorción en la parte delantera de la célula. Una baja respuesta en las longitudes de onda más largas sitúa las pérdidas en la parte posterior de la célula.

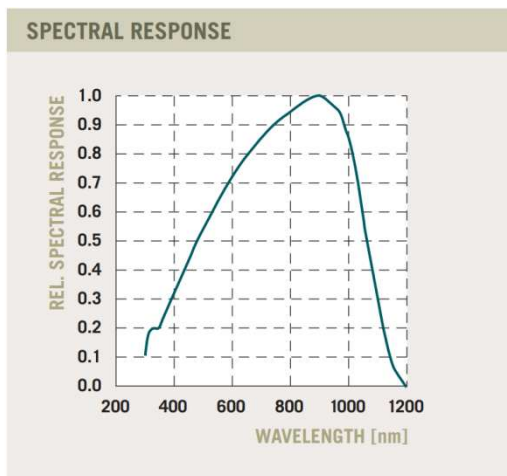


Figura 15- Gráfico mostrando la respuesta espectral de una célula monocristalina comercializada por Q-Cells. Ficha técnica Q6LTT3-G2

2.4.3 TIEMPO DE VIDA DE LOS PORTADORES DE CARGA

El tiempo de vida de los portadores de carga (τ) es uno de los parámetros eléctricos más relevantes a la hora de comprender el comportamiento de los dispositivos semiconductores y desarrollar el proceso de fabricación de células fotovoltaicas.

Dependiendo de la forma en que se crea el exceso de portadores de carga en el semiconductor existen dos enfoques para medir el tiempo de vida. Una posibilidad consiste en mantener una tasa de generación estacionaria de valor conocido. Este método es conocido como el método de estado estacionario.

Una segunda posibilidad consiste en poner fin a la generación bruscamente y medir la velocidad a la que los portadores de carga desaparecen con el paso del tiempo. Dado que la fotogeneración es cero, la única razón para que la concentración de electrones cambie es la recombinación.

Medida del tiempo de vida mediante μ -PCD

El aumento de la concentración de cualquier tipo de portadores de carga influye directamente sobre la conductividad de la material. Por lo tanto, la conductividad del material semiconductor es determinada por la concentración de portadores de carga mayoritarios.

Cuando la luz incide en un semiconductor, los fotones crean pares electrón-hueco. En niveles de baja creación de pares electrón-hueco, llamado "nivel de inyección baja," los portadores de carga adicionales no influyen en la conductividad al no existir ningún cambio detectable en los portadores de carga mayoritarios. En nivel de alta inyección, la conductividad de la muestra cambia en respuesta a la luz.

Cuando se retira la fuente de luz, los portadores de carga en exceso deben recombinarse para restablecer el nivel de equilibrio original existente con la ausencia de luz. En este caso la conductividad decae exponencialmente hasta el valor de equilibrio. La constante de tiempo de este decaimiento exponencial se conoce como el tiempo de vida de los portadores de carga.

Si se emiten microondas por medio de una antena y se dirigen sobre la superficie de un semiconductor, una parte de la señal de microondas se introduce en el semiconductor mientras que otra porción es reflejada [41]. La reflectividad es dependiente de la conductividad de la muestra. Por lo tanto, la señal reflejada en función del tiempo sigue un exponencial, mientras la conductividad de la muestra varía.

Mediante la detección de la señal de microondas reflejada, es posible determinar la constante de tiempo del decaimiento de la conductividad, que es el tiempo de vida de los portadores de carga antes de su recombinación. La medición del tiempo de vida mediante esta técnica es conocido como μ PCD o "micro Photo-Conductance Decay"

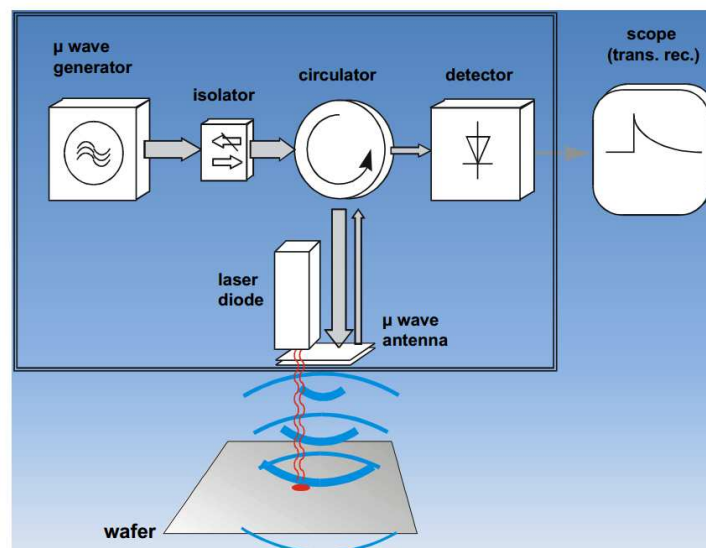


Figura 16- Dibujo esquemático de la configuración del equipo de medida del tiempo de vida mediante μ -PCD.

En el presente trabajo se utilizará el modelo WT-2000 suministrado por Semilab A.G. Para la obtención de la distribución del tiempo de vida, mediante la técnica de μ PCD, a lo largo de la superficie de la oblea.

2.4.4 RESISTIVIDAD

Una propiedad básica de un material semiconductor es su resistividad eléctrica. La resistividad eléctrica es determinada por la disponibilidad de electrones "libres" en el material. A su vez, la disponibilidad de electrones libres está determinada por las propiedades de unión físicas del material a nivel molecular.

Se puede aprender mucho acerca de las propiedades de un material midiendo su resistividad. En concreto la resistividad está fuertemente relacionada con el nivel de impurezas para su dopaje. La medición de la resistividad se utiliza para caracterizar tanto el material, como de parámetro de control de proceso durante la fabricación de células fotovoltaicas.

Sin embargo, la medida de la resistividad no resulta siempre accesible por lo que se ha extendido la utilización de un valor conocido como la "Resistencia de Capa" (R_{sheet}), que depende de la resistividad y del espesor (Eq. 6). El concepto de resistencia de capa se utiliza tanto para caracterizar obleas como capas delgadas dopadas, ya que es normalmente más fácil medir la resistencia de capa que la resistividad. La resistencia de capa de una lámina con resistividad, ρ , y el espesor, t , está dada por su relación:

$$(6) \quad R_{sheet} = \frac{\rho}{t}$$

Con el método de medida mediante dos puntas, la corriente y la tensión se miden en el mismo cable. Por lo tanto, la tensión medida se añade a la diferencia de potencial creada en los cables, causada por la ley de Ohm. Este método es adecuado para la medida de resistividades altas (del orden de 1 M Ω /sq), ya que la resistencias propias de la media son despreciables.

Para la medición de resistividades bajas la medición mediante 2 puntas es desaconsejable ya que las resistencias derivadas de la medida pueden ser del mismo orden de magnitud que la resistencia de la muestra.

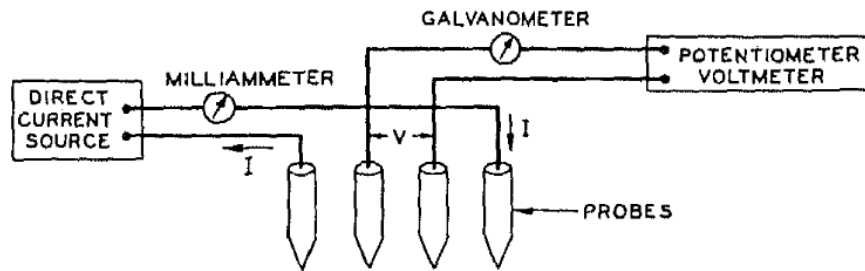


Figura 17- Circuito utilizado para la medida de la resistividad utilizando el método de 4 puntas según L.B Valdes [42].

Para medidas de baja resistividad como las que ocupan el presente trabajo, es aconsejable la medida por el método de 4 puntas [43]. En este método la corriente se mide en un circuito independiente al del voltaje como se puede ver en la Figura 17. Esto garantiza una medida del voltaje sin circulación de corriente que provoque pérdidas de voltaje adicionales.

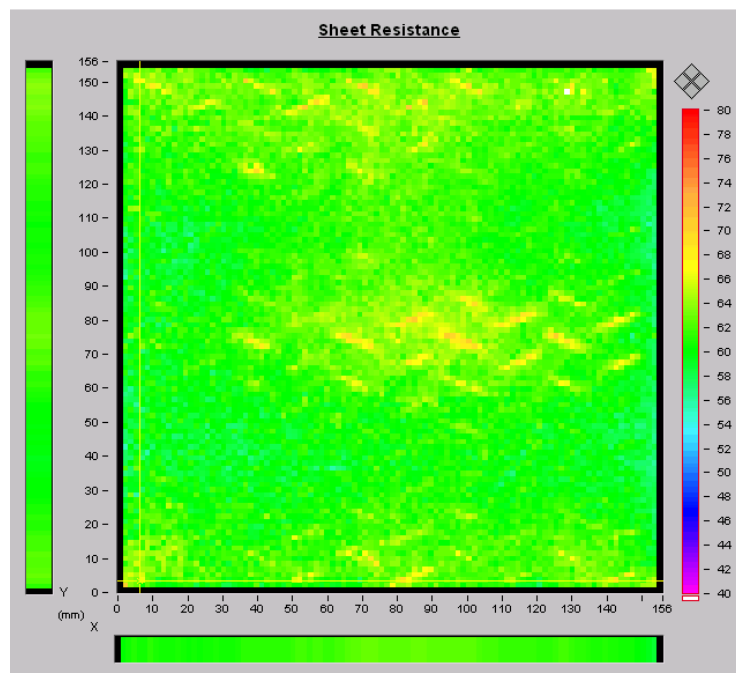


Figura 18- Ejemplo de la medida de la R_{sheet} de un emisor no uniforme en una célula fotovoltaica de tecnología estándar.

Las medidas de la R_{sheet} que se muestran a continuación se han llevado a cabo utilizando un equipo (*Sherescan*) comercializado por *Sunlab A.G* que realiza un barrido de la superficie de la oblea utilizando una sonda de cuatro puntas.

2.4.5 PERFILES DE DIFUSION

La espectrometría de masas de iones secundarios (SIMS) es una técnica de caracterización utilizada con frecuencia para el análisis elemental de la superficie de una muestra sólida. La base de la técnica consiste en la pulverización catódica de una superficie de la muestra por iones energéticos, causando la expulsión de la superficie de la muestra de átomos / moléculas neutras, así como iones positivos y negativos.

Partiendo de una profundidad muy superficial de la pulverización catódica, los iones positivos y / o negativos liberados pueden ser analizados por su masa mediante separación eléctrica y magnética. Esto proporciona información sobre la composición química o la distribución de la concentración relativa de los elementos seleccionados.

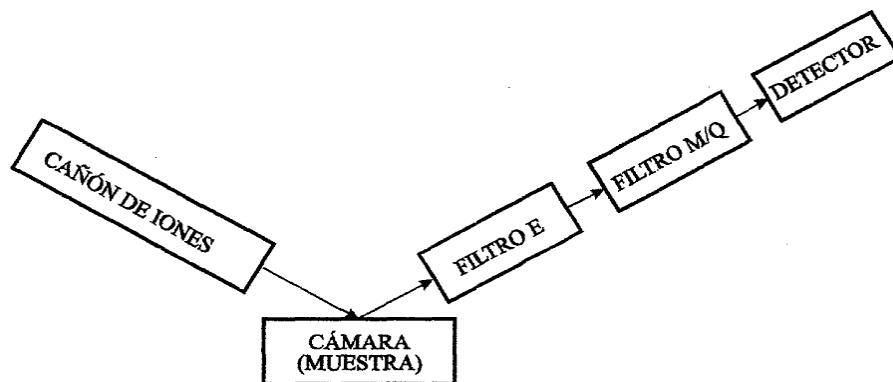


Figura 19. Esquema de las partes de un equipo SIMS [44]

Para medidas de alta sensibilidad en las que la concentración de los átomos a estudiar es reducida cabe prestar especial atención a dos factores; el número total de átomos liberados por cada ion incidente, conocido como rendimiento de pulverización catódica, y la relación entre los átomos expulsados del target que son ionizados, conocida como tasa de ionización.

3- DETERMINACIÓN DEL PERFIL DE DIFUSION DEL FSF ÓPTIMO

Una particularidad relevante de las células de contacto trasero es la presencia de una película de dopantes en la superficie frontal conocida como “*Front Surface Field*”. Su inclusión en la estructura de las células IBC permite alcanzar una pasivación superficial óptima, promover la conducción lateral y disminuir la degradación producida por la luz ultravioleta.

A pesar de las ventajas que presenta, la formación del FSF puede conllevar una respuesta espectral deficiente ante la luz azul producto de una elevada recombinación superficial. Es por lo tanto útil la investigación de las características que ha de presentar un FSF compatible con altas eficiencias [45].

La distribución de la concentración de dopantes es un factor clave en el comportamiento eléctrico de la región difundida, teniendo una influencia determinante en la conductividad, recombinación y efecto pasivante.

3.1 ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA DISTRIBUCIÓN DEL PERFIL EN EL COMPORTAMIENTO

Para investigar la influencia del perfil de difusión del FSF en el comportamiento de las células de contacto trasero se construye un modelo de una célula IBC utilizando el software de simulación de semiconductores MicroTec® 2D [46]. La simulación se utilizará para determinar la forma óptima del perfil de difusión del FSF. Con este objetivo se estudia la influencia de la concentración superficial de dopantes N_{FSF} y la profundidad del perfil de difusión para diferentes valores de velocidad de recombinación superficial (SRV) [47].

Las características dimensionales así como los parámetros principales de entrada se encuentran resumidos en la Figura 20. Los perfiles de difusión del emisor y el BSF han sido extraídos directamente de medidas experimentales realizadas mediante SIMS. Cabe destacar que la resistencia intrínseca de los contactos metálicos no ha sido tomada en cuenta en la simulación.

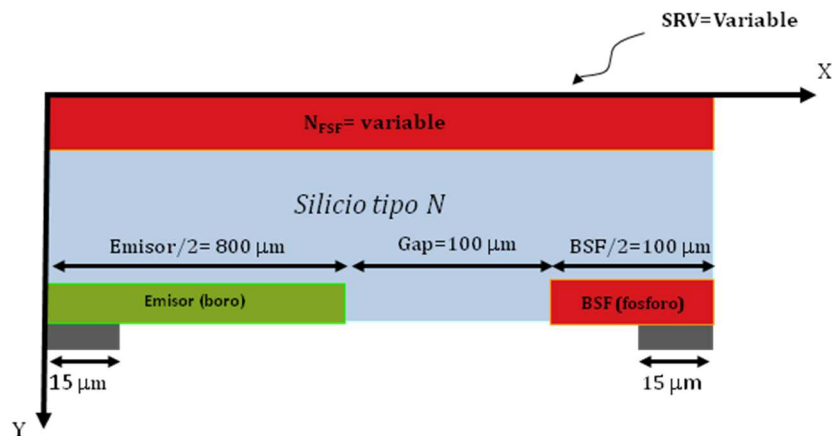


Figura 20- Estructura y dimensiones del modelo construido en MicroTec® en el que se modela el comportamiento de una porción equivalente a la mitad del paso de una estructura interdigitada de células IBC.

Para la evaluación del efecto del perfil de difusión en el comportamiento de la célula, resulta especialmente reveladora la densidad de corriente de cortocircuito (J_{sc}) por tener una influencia directa en la eficiencia y por ser indicadora del nivel de recombinación.

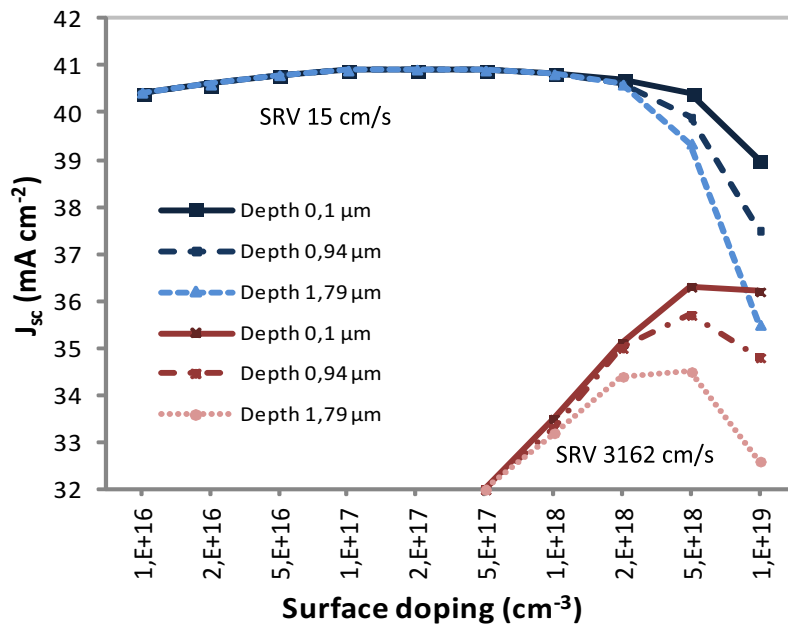


Figura 21: Influencia de la profundidad del perfil de difusión de la corriente de cortocircuito (J_{sc}) para dos valores de velocidad de recombinación superficial (SRV) dados.

Las simulaciones muestran que la corriente generada por la célula está fuertemente influenciada tanto por el dopaje superficial como por la calidad de la pasivación superficial. Se observa que el perfil de difusión óptimo varía en función de la pasivación. En el caso de superficies con pasivación deficiente es preferible una difusión poco profunda y altamente dopada.

El comportamiento pasivante del FSF no está influenciado por la profundidad de la difusión si la superficie está adecuadamente pasivada. Las simulaciones indican que una superficie altamente dopada ($> 1.10^{18}$ átomos/cm³) provoca una pérdida considerable de densidad de corriente generada para ambos valores de SRV. Esta pérdida es característica de las zonas saturadas de impurezas donde predomina la recombinación Auger [48].

Se puede concluir que la concentración óptima de la superficie para mejorar la pasivación se encuentra entre 1.10^{17} y 2.10^{18} átomos/cm³. En lo que se refiere a la profundidad, el comportamiento mejora en el caso de perfiles más superficiales si el dopaje superficial supera los 2.10^{18} átomos/cm³. En el caso de niveles de dopaje inferiores el comportamiento es independiente de la profundidad de los perfiles difundidos.

A pesar de la gran influencia que la pasivación superficial sigue teniendo en el comportamiento final, las simulaciones muestran la capacidad del FSF para reducir esta influencia al repeler los portadores de carga de la superficie.

3.2 PÉRDIDAS POR TRANSPORTE LATERAL DE CARGAS.

En el caso de las células de contacto trasero, las cargas realizan un recorrido considerable al tener que viajar lateralmente antes de ser recolectadas al alcanzar los contactos. En el transporte lateral, la conductividad del FSF y del substrato definen en gran medida la resistencia serie total, pudiéndose considerar como dos resistencias en paralelo.

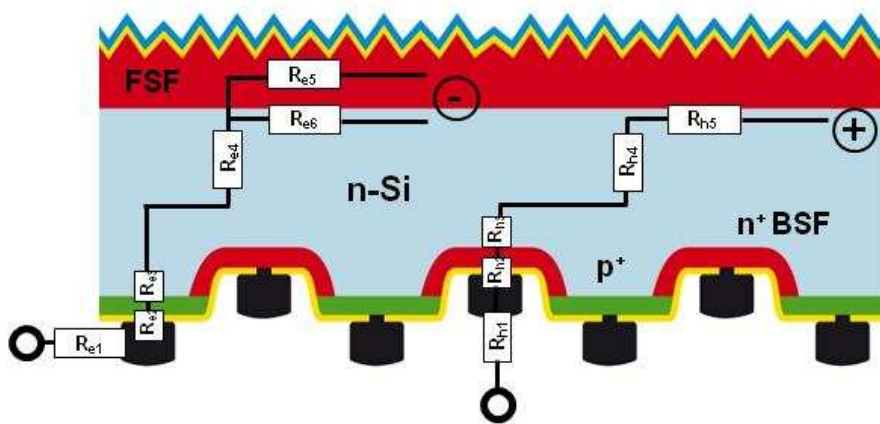


Figura 22- Representación de la arquitectura de una célula tipo IBC incluyendo el circuito equivalente, detallando las regiones que contribuyen a la resistencia serie total.

En este punto resulta de utilidad conocer la conductividad del FSF y del substrato que garanticen una resistencia serie compatible con alta eficiencia. Mediante métodos analíticos se pueden calcular la resistencia serie total y la contribución de cada región a la misma (Fig. 22).

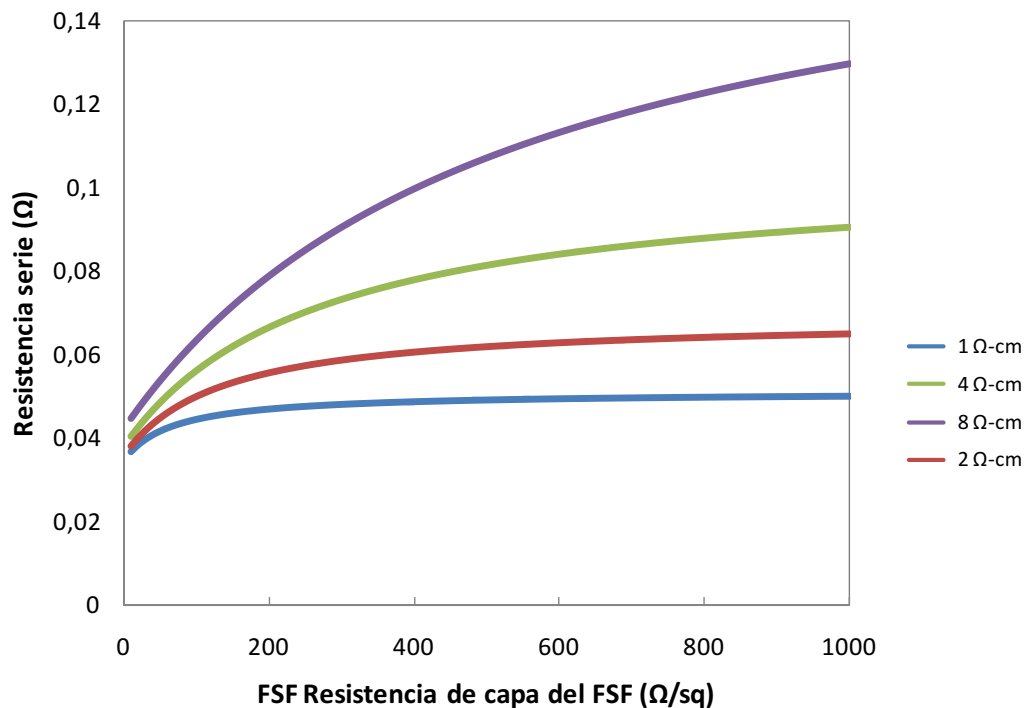


Figura 23- Resistencia serie en función de la resistencia serie para substratos con resistividad comprendida entre 1-8 Ω -cm total [49]

La Figura 23 muestra los resultados de la simulación de la resistencia serie frente a la resistividad del FSF al variar la resistividad de la base entre 1-8 Ω -cm. Cuando la R_{sheet} del FSF es de 1,000 Ω /sq, domina la contribución a la resistencia total del transporte lateral de los portadores de carga en la base. Se puede observar que los valores de R_s convergen para las diferentes bases para las difusiones del FSF más conductoras.

La influencia de la conductividad de la base disminuye considerablemente a medida que la conductividad del FSF aumenta. Este resultado indica que mediante el uso de un FSF de alta conductividad es posible utilizar un substrato de resistividad mayor (por ejemplo, 8 Ω -cm). Esto posibilitaría reducir la recombinación en la base sin obtener una resistencia serie inferior. Esta posibilidad es particularmente interesante para aumentar el Factor de Forma (FF) y por tanto aumentar la eficiencia de la célula.

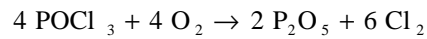
En todo caso es importante considerar el proceso desde un punto de vista industrial. Una mayor conductividad del FSF requeriría o bien una difusión más profunda o bien una mayor concentración de dopaje en la superficie. Si se opta por un FSF más profundo se requerirá aumentar el tiempo de difusión mientras que si desea aumentar el dopaje superficial serán necesarias mayores temperaturas de proceso.

Cabe señalar que un FSF altamente dopado aumentará la recombinación superficial. En este punto se hacen necesarios estudios a nivel de línea piloto de producción para investigar si el aumento de eficiencia obtenido compensa la reducción del volumen de producción.

3.3 DIFUSIÓN EXPERIMENTAL DEL PERFIL DE DIFUSIÓN.

El equipo utilizado para llevar a cabo las difusiones es un horno de difusión de tubo de cuarzo de 300 mm con atmosfera controlada presente en la línea piloto de Siliken SA en la UPV (Fig. 11).

Como fuente de dopantes se utiliza POCl_3 en estado líquido por el que se hace pasar un flujo portador de N_2 que es distribuido por el interior del tubo. El gas entra en contacto con un flujo de O_2 , produciendo una reacción de oxidación que da como resultado la fuente primaria de dopantes (P_2O_5).



Como sustrato se utilizan obleas de silicio monocristalino tipo n con un espesor de 185 μm y una resistividad de 2.5 $\Omega\cdot\text{cm}$. El perfil de temperaturas utilizado tiene en cuenta temperaturas diferenciadas para la fase de deposición y “drive-in” así como un flujo adicional de O_2 para promover la difusión durante la fase de “drive-in” donde la difusión de dopantes es más acusada.

Conociendo las características del perfil de difusión deseado, se busca realizar una difusión con dopaje superficial superior a 1.10^{19} átomos/ cm^3 para investigar la posibilidad de someter a la oblea a un paso adicional de ataque controlado de la superficie difundida. Para la realización de dicho ataque se considera la introducción de un paso de oxidación húmeda in-situ [50,51].

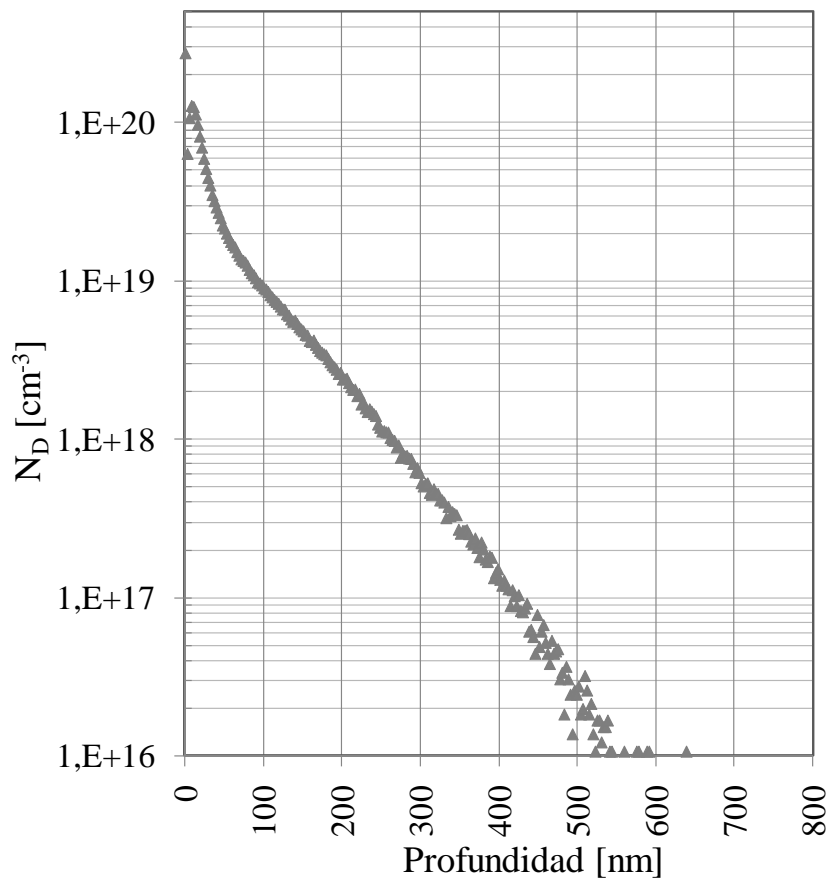


Fig. 24. Medida del perfil de difusión realizada mediante SIMS tras la difusión y la eliminación de la capa superficial de óxido de fósforo.

Se investiga a continuación la profundidad del ataque a aplicar a la difusión obtenida con el objeto de mejorar el comportamiento de la célula. Para investigar dicha influencia se simulan los parámetros eléctricos de la célula obtenidos para una variedad de perfiles de difusión tras un ataque progresivo de la superficie de la difusión inicial.

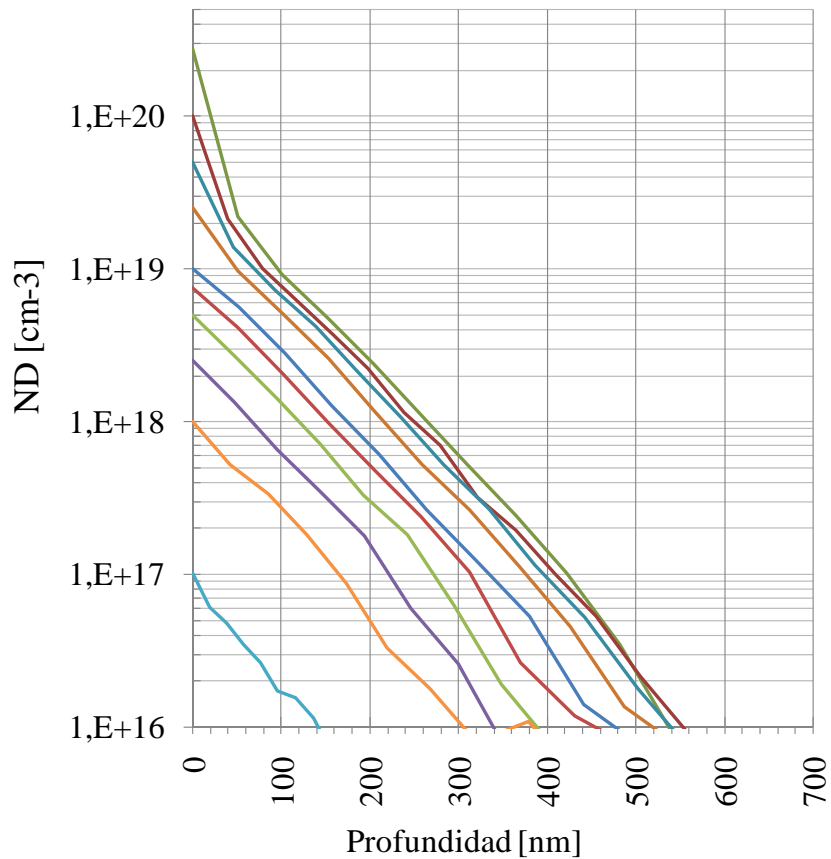


Fig. 25. Perfiles de difusión utilizados en la simulación. Los perfiles simulados provienen de aplicar a la difusión experimental la eliminación sucesiva de las capas superficiales.

Tanto para la corriente de cortocircuito como para el voltaje de circuito abierto, e independientemente de la recombinación superficial, se aprecia un descenso del comportamiento de los parámetros eléctricos para los perfiles con dopaje superficial superior a 1.10^{20} átomos/cm³. Este descenso tiene su origen en el aumento de la recombinación en las zonas altamente dopadas propia de la recombinación dominada por Auger.

Para el caso de dopajes superficiales inferiores a 1.10^{20} átomos/cm³, la evolución de los parámetros está fuertemente influenciada por la velocidad de recombinación superficial. Para células con soluciones avanzadas de pasivación (> 100 cm/s) la superficie no limita el comportamiento eléctrico, por lo que ni la V_{oc} ni la J_{sc} no se ven influenciadas por el perfil de difusión del FSF.

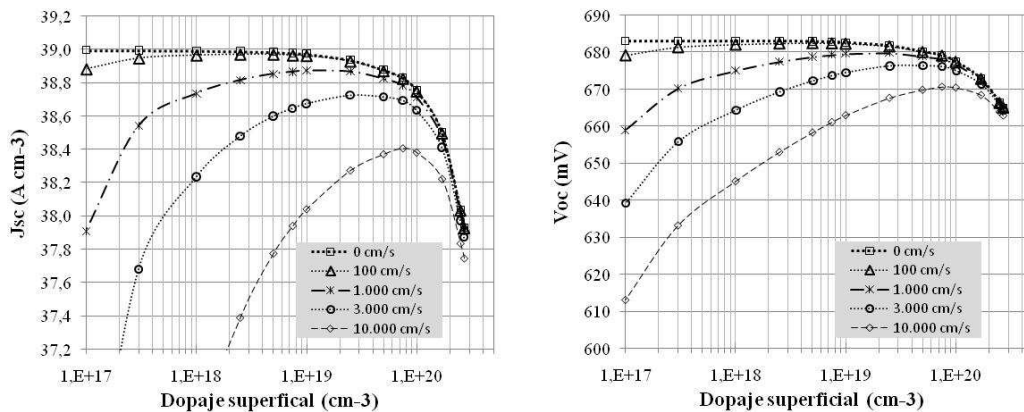


Fig. 26. Evolución de la densidad de corriente de cortocircuito (J_{sc}) y el voltaje de circuito abierto (V_{oc}) para los diferentes perfiles simulados. Se muestran curvas para velocidad de recombinación superficial desde 0 cm/s a 10.000 cm/s.

En los casos en los que existe una recombinación superficial optimizada, el efecto pasivante del FSF afecta positivamente a los parámetros de corriente y voltaje. Se observa que conforme se reduce la concentración superficial del FSF el efecto de la recombinación en la superficie de la célula aumenta. Existe para cada recombinación superficial un valor óptimo de concentración superficial distinto tanto para V_{oc} como para J_{sc} .

Los perfiles de difusión con los que se obtiene una mayor eficiencia dependen del valor de la recombinación superficial. Las simulaciones muestran que es recomendable buscar un perfil de difusión con valores de dopaje superficial entre 1.10^{19} átomos/cm³ y 1.10^{20} átomos/cm³.

La Figura 28 ayuda a prever cómo evolucionará la eficiencia y el FF con la cantidad de silicio eliminada de la superficie frontal de la célula IBC. Las simulaciones indican de nuevo que una superficie altamente dopada ($> 4.10^{19}$ átomos/cm³) será perjudicial para la eficiencia.

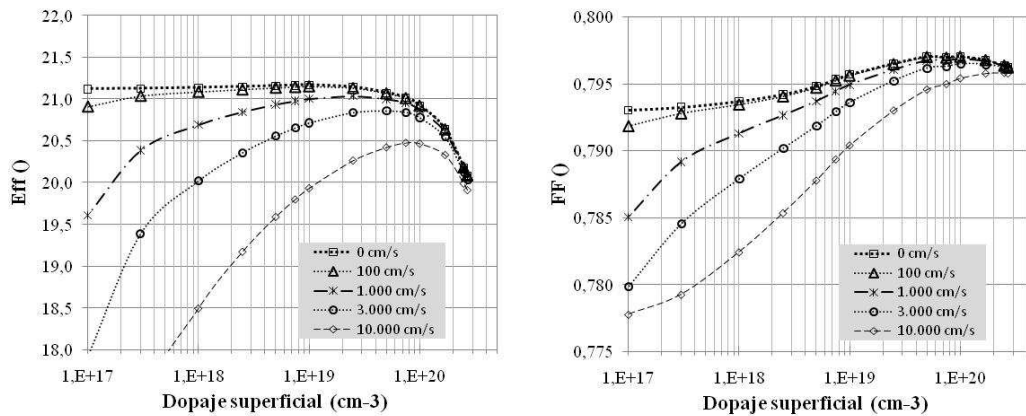


Figura. 27. Evolución de la eficiencia y el Factor de Forma para los diferentes perfiles simulados. Se muestran curvas para velocidad de recombinación superficial desde 0 cm/s a 10.000 cm/s.

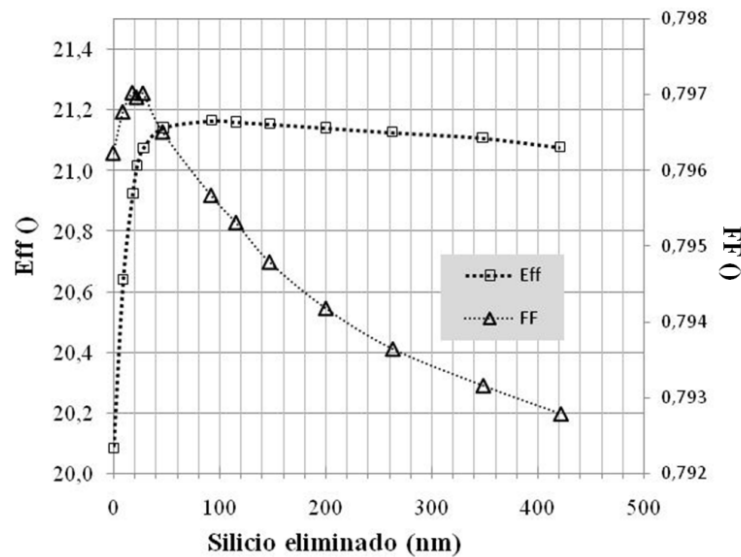


Figura 28. Evolución de la eficiencia y el FF con la eliminación de capas sucesivas del perfil de difusión inicial.

En lo que se refiere a la eficiencia, se puede concluir que un ataque superior a los 30 nm significaría un aumento considerable en el rendimiento de células. Tanto en la Figura 27 como en la Figura 28 se puede observar que el Factor de Forma disminuye al aumentar la profundidad de ataque. Este efecto se produce al eliminarse parte del FSF, reduciendo su conductividad y aumentando por tanto la resistencia en serie global.

4- IMPLEMENTACIÓN DEL FSF EN UNA CELULA DE CONTACTO TRASERO.

Tras el estudio de las características del FSF deseado, se estudia su aplicación en células tipo IBC fabricadas en el laboratorio. Las células se fabrican en la sala blanca de la división solar del Energy research Center of the Netherlands (ECN). Las obleas utilizadas son de 180 μm de silicio monocristalino suministradas por SUMCO.

4.1 DIMENSIONES ESTRUCTURALES ÓPTIMAS

Una vez determinado el FSF óptimo y previamente a la fabricación de una célula, se hace necesario el estudio de las características dimensionales óptimas de las células [10]. Dos parámetros especialmente significativos son la proporción de emisor o “*emitter fraction*” y la región de la base que se repite a lo largo de la superficie trasera, denominada “*gap*”. Otro parámetro a tener en cuenta es el conocido como paso o “*pitch*” y se refiere al tamaño de la estructura unitaria formada por emisor, gap y BSF.

El *emitter fraction* y el *pitch* tienen una gran influencia en la recombinación posterior y en el transporte lateral de las cargas afectando de manera directa a la resistencia lateral, el voltaje y la fotocorriente generada.

Para la determinación de los parámetros dimensionales óptimos se utiliza el modelo 2D construido mediante MicroTec® para simular el comportamiento eléctrico de diferentes estructuras. El modelo incluye un FSF con resistencia de capa de 150 Ω/sq , transferido directamente del perfil de difusión medido mediante SIMS.

Se introducen diferentes velocidades de recombinación para cada región difundida acorde a los valores publicados en la literatura [47, 52]. El tamaño del BSF y el *gap* se mantienen constantes en valores de 250 y 150 micras respectivamente, mientras que se varía el tamaño del emisor. Cabe señalar que en estas simulaciones la fracción del emisor y el paso están, por definición, vinculados entre sí con un paso mayor que implica una fracción de emisor más grande

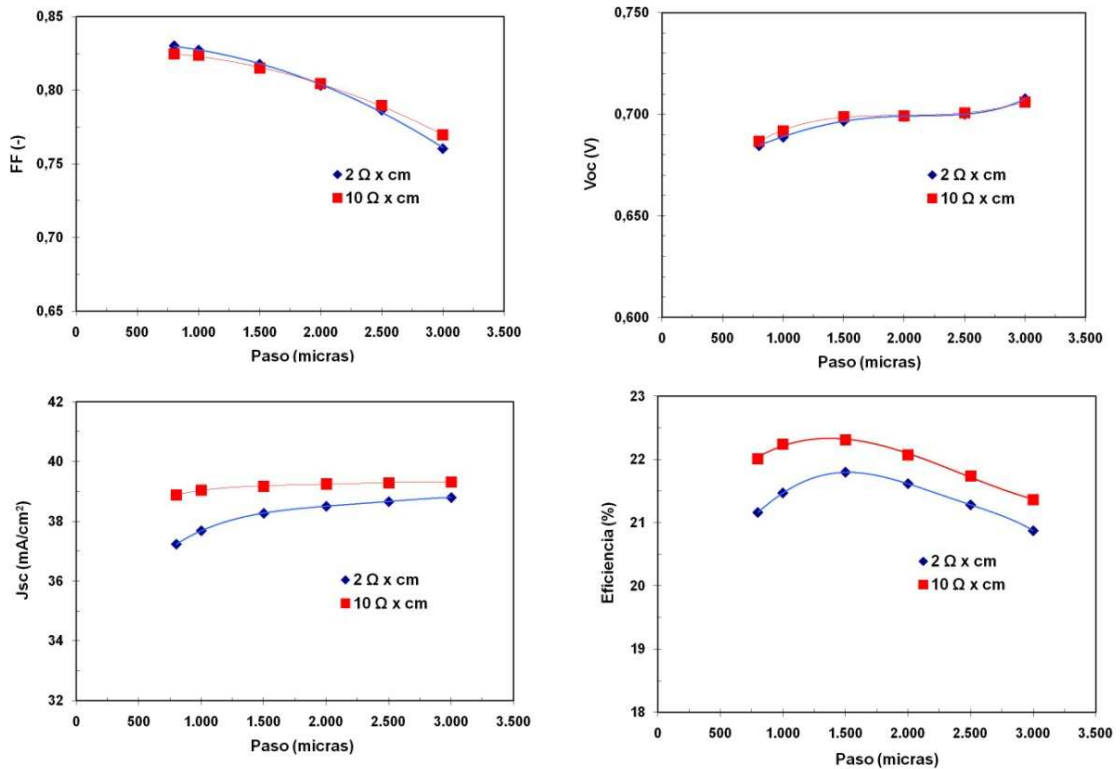


Figura 29. Resultados de las simulaciones 2D mostrando la variación frente al paso de (a) Factor de Forma (FF), (b) Corriente de cortocircuito (J_{sc}), (c) Voltaje de circuito abierto (V_{oc}) y (d) eficiencia para resistividades de la base de $2 \Omega \cdot cm$ y $10 \Omega \cdot cm$.

La Figura 29 (a) muestra que el FF disminuye a medida que el paso aumenta ya que al hacerse la fracción del emisor más grande los portadores de carga tienen que recorrer un camino más largo para llegar al BSF. Las Figura 29 (b) y (c) indican que la corriente (V_{oc}) y el voltaje (J_{sc}) aumentan con el paso siendo la J_{sc} la que muestra una mayor dependencia con la resistividad de la base.

La Figura 29 (d) aúna las contribuciones particulares del FF como de la corriente y el voltaje a la eficiencia, pudiéndose observar una máxima eficiencia con un paso de ~ 1500 micras. Esta eficiencia pico representa el equilibrio entre el aumento de las pérdidas de resistencia serie para pasos más grandes y la reducción de la corriente y el voltaje para pasos más pequeños.

Cuando la resistividad es mayor se puede observar una mejora de la eficiencia, lo que indica que una recombinación reducida en la base, puede superar el efecto perjudicial del incremento de las pérdidas por resistencia en serie de una base menos conductiva.

Las simulaciones muestran que el paso óptimo se encuentra en torno a las 1500 micras, mientras que estudios realizados anteriormente (ver la Figura 4 del Artículo I del Apartado 7) indican que es recomendable maximizar la porción del emisor y minimizar el área del BSF y *gap*.

4.2 FABRICACION CELULAS TIPO IBC

Conocidas las características dimensionales deseadas, se procede a la fabricación de las células. El flujo del proceso utilizado (Fig. 31) incluye una limpieza inicial y texturado de la superficie, seguido de la formación de un FSF, el enmascaramiento, la difusión y el patronado del emisor y BSF.

A continuación se procede a la pasivación frontal utilizando una capa simple de $\text{SiN}_x\text{:H}$ de 80 nm y a la pasivación trasera por medio de una multicapa de $\text{SiO}_2/\text{SiN}_x\text{:H}$ [53]. Finalmente se realiza la formación de los contactos por medio de la metalización utilizando serigrafía y el paso térmico posterior característico.

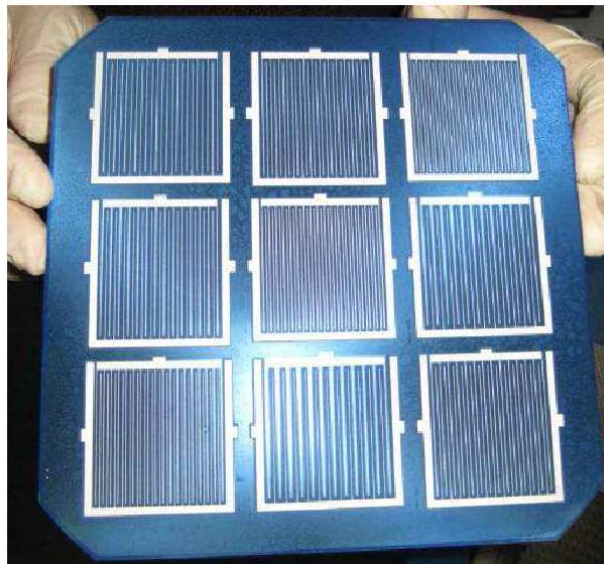


Figura 30. Imagen de una oblea conteniendo la matriz con 9 células IBC fabricadas de diferentes dimensiones.

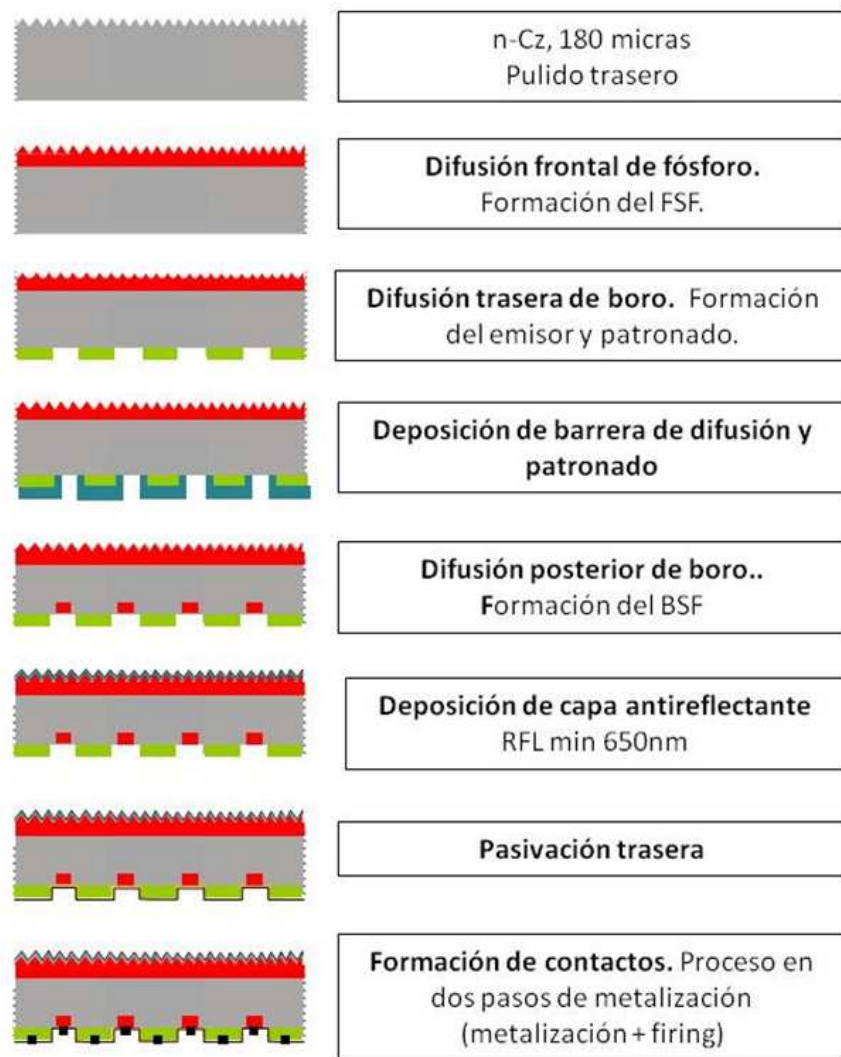


Figura 31. El flujo del proceso utilizado para la fabricación de células de contacto trasero.

Para posibilitar un número mayor de mediciones se configura una matriz de 3×3 células en cada oblea semicuada de 156 mm. mm. Se varían a su vez las dimensiones relevantes para cada célula de la matriz con el objetivo de verificar experimentalmente las dimensiones óptimas.

El paso varía entre 2-3 mm, la distancia entre el emisor y el BSF entre 75-150 micras, y la fracción de emisor entre 67-80%. En total se procesan más de 150 obleas lo que permite la evaluación de más de 1000 células

La célula de mayor eficiencia obtenida alcanza un 19,1%. Dicha célula presenta un paso de 2 mm y una fracción del emisor del 80% lo que confirma la tendencia prevista por las simulaciones. Se obtienen unos resultados de eficiencia cuántica interna (IQE) excelentes ya que se aproximan a la unidad pudiéndose observar una caída característica al acercarse al límite del band gap.

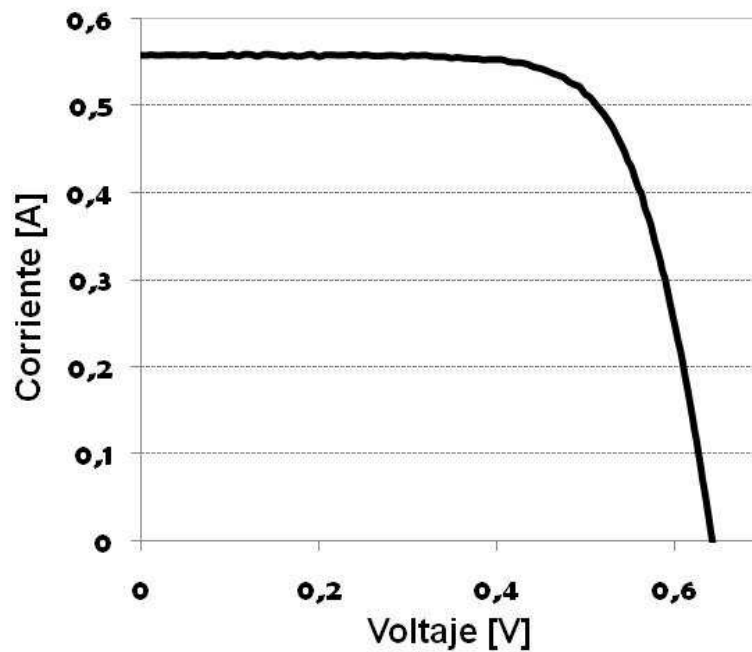


Figura 32. Curva I-V de la célula más eficiente.

Los valores de recolección de corriente son igualmente óptimos con un valor de 41,6 mA/cm². La V_{oc} de 641 mV es aceptable. En todo caso, la literatura le concede margen de mejora (Tabla 1) si se opta por una tecnología de formación de contactos más avanzada y se optimiza la pasivación trasera.

Paso (mm)	Area (cm ²)	J _{sc} (mA/cm ²)	V _{oc} (V)	J _{sc} * V _{oc} (mA* V/cm ²)	FF	Eta (%)
2	13,2	41,6	0,641	26,7	0,72	19,1

Tabla 2. Parámetros eléctricos relevantes de la célula más eficiente fabricada.

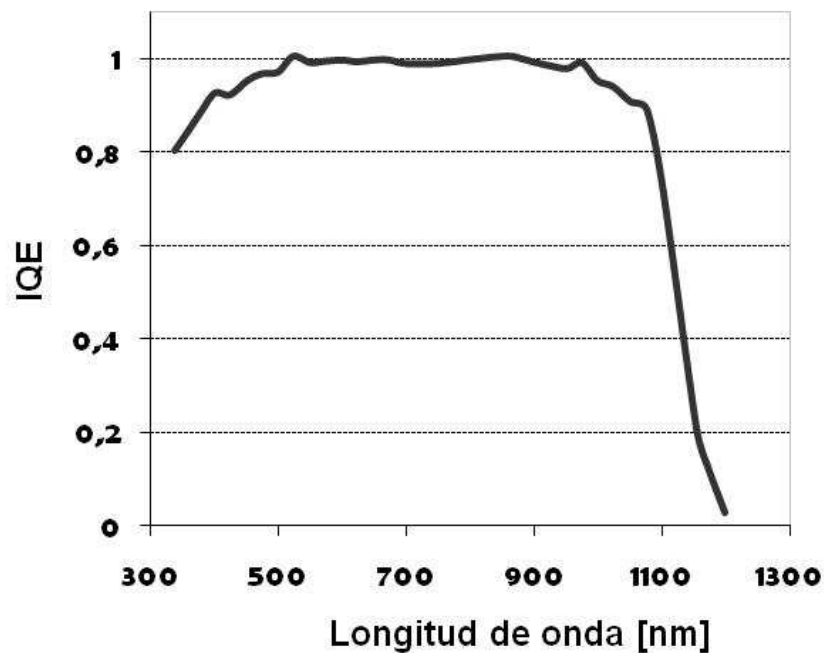


Figura 33. Eficiencia cuántica interna (IQE) de la célula más eficiente fabricada.

Los resultados del FF de un 72% se alejan de los valores más habituales de las células tipo IBC (~80%). Este hecho indica que existe potencial para aumentar la eficiencia si se consigue aumentar el FF hasta valores superiores al 80% sin afectar al resto de parámetros eléctricos de la célula. Esto es indicador del potencial del proceso desarrollado, que puede permitir desarrollar células con eficiencias por encima del 21%.

Como es conocido, el FF está fuertemente influenciado por la resistencia interna de la célula (serie y paralelo). Utilizaremos el Pseudo-FF (PFF) para investigar el origen del reducido FF sabiendo que el PFF muestra el potencial FF si se liberara de los efectos de la resistencia serie. El PFF obtenido es superior al 81% lo que indica una alta incidencia de la resistencia serie en el comportamiento final de la célula y está en concordancia con los valores obtenidos por Swanson *et al.* [30].

Utilizando métodos analíticos es posible estudiar el origen de la elevada resistencia serie, cuantificando la contribución de cada una de las resistencias parciales a la resistencia serie total [11]. Las medidas experimentales realizadas junto a la simulación del circuito eléctrico equivalente concluyen que existe una fuerte contribución de la resistencia lateral de la célula que limita su eficiencia.

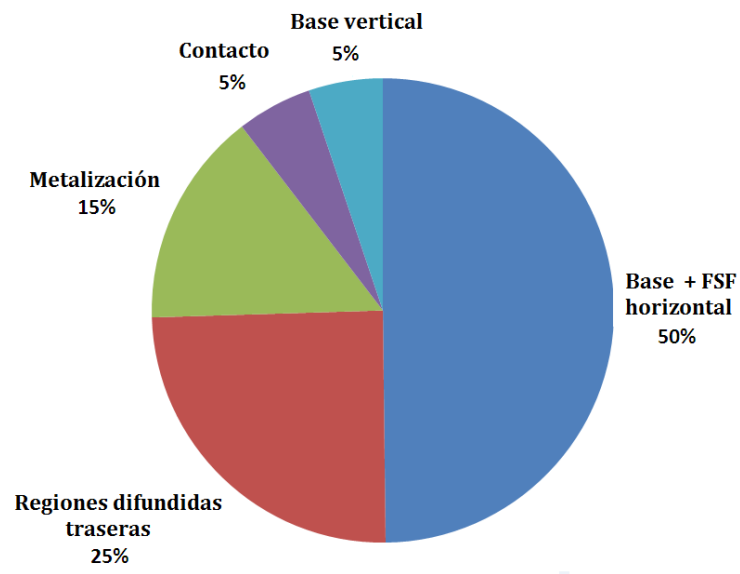


Figura 34. Distribución de la contribución de diferentes componentes a la resistencia serie total.

Si bien es cierto que la base y el perfil de difusión han sido seleccionados para evitar que la resistencia serie sea un factor limitante de la eficiencia, en la fabricación de las células el FSF ha sido difundido durante las primeras etapas del proceso con lo que ha podido ser afectado por los posteriores pasos de proceso.

Se hace por tanto necesario el estudio de la influencia de los pasos de proceso en el perfil de difusión final y la búsqueda de alternativas para conseguir un FSF que cumpla los requisitos necesarios para maximizar la eficiencia al final del proceso de fabricación.

5- OPTIMIZACIÓN DEL FSF CONSIDERANDO EL PROCESO DE FABRICACIÓN COMPLETO.

Debido a la arquitectura de las células IBC, el FSF se puede formar en distintas etapas del flujo de proceso. Una primera alternativa consiste en la inclusión de la difusión FSF al comienzo del proceso (Fig. 10). Esto requiere el uso de barreras de difusión para proteger el FSF de los posteriores pasos, incluyendo etapas que modifican sustancialmente las difusiones como pasos de ataque químico o pasos térmicos como difusiones de dopantes.

Una segunda alternativa consiste en la creación del FSF en una etapa posterior, lo que simplifica el proceso evitando barreras de difusión frontales y permite un mejor control de la pasivación y del perfil de difusión final del FSF.

Por otra parte, el trabajo publicado hasta la fecha, en lo que se refiere a optimización del FSF [2, 54, 55, 56], no considera la influencia de toda la secuencia de proceso en el comportamiento final de la región difundida. El presente apartado presta especial atención a dicha influencia evaluando la viabilidad industrial de la difusión del FSF considerando la secuencia completa de procesado.

5.1 PLANTEAMIENTO EXPERIMENTAL

Para el experimento se utilizarán substratos de silicio monocristalino, tipo n con un espesor de 180 μm ., una resistividad de 2.5 $\Omega\text{-cm}$ y un tiempo de vida de los portadores de carga superior a 1 ms. Todos los experimentos se llevan a cabo en obleas difundidas y texturadas por ambas caras en un horno de tubo de cuarzo en atmosfera controlada. Las obleas son tratadas con los procedimientos de limpieza estándares incluyendo baños alcalinos para la eliminación de residuos y texturado así como limpiezas pre y post difusión (ver Apartado 2.2.3.1).

Todas las obleas han sido difundidas por ambas caras con un FSF y pasivadas con 20 nm de espesor de óxido crecido térmicamente. A continuación han sido sometidas a un proceso de recocido en atmósfera reductora a 450°C durante 30 minutos.

Se evalúan diferentes secuencias de proceso, posicionando el paso de difusión del FSF en diferentes etapas. La Figura 35 muestra un diagrama esquemático de las diferentes secuencias realizadas donde la posición del FSF respecto a las demás etapas de alta temperatura, varía. Para la secuencia FSF1 se posiciona el FSF al comienzo del flujo del proceso; para FSF2 después de que el emisor y antes del BSF; para FSF3 después de la BSF y antes de la difusión del emisor y para el FSF4 después del emisor y el BSF.

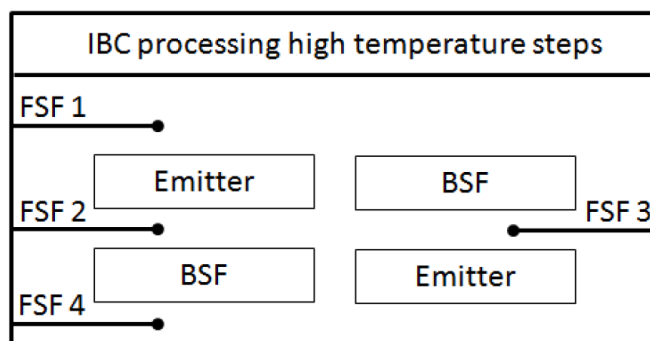


Figura 35. Esquema de los pasos de procesado a alta temperatura en la fabricación de células IBC donde el FSF es difundido en diferentes estadios del proceso.

5.2 RESULTADOS

Tras la realización de la secuencia de procesos experimental, se procede a comparar, con la ayuda de un equipo de SIMS, la diferencia en el perfil de difusión obtenido para un FSF en el comienzo del flujo del proceso y después de someterlo a los pasos térmicos propios de la difusión del BSF y el emisor. La Figura 36 muestra como los pasos de proceso tras la formación del FSF influyen de manera determinante el perfil de difusión, especialmente las difusiones posteriores, la oxidación de la superficie y el ataque químico de la misma.

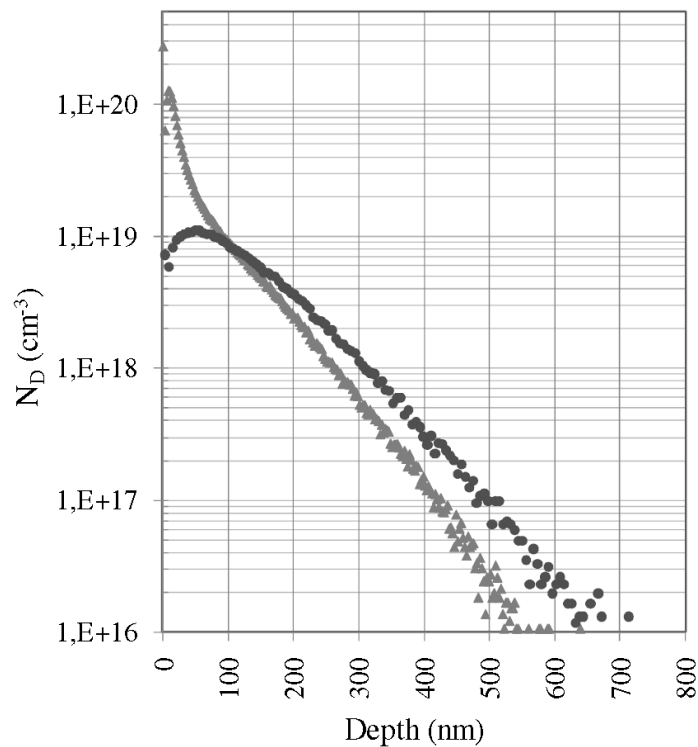


Figura 36. Mediciones de los perfiles de difusión mediante SIMS inmediatamente después de la formación del FSF (triángulos de color gris), y después del emisor y BSF (círculos negros).

Se puede apreciar una diferencia significativa en el dopaje superficial, ya que la concentración de dopantes en la superficie disminuye desde los $\sim 1 \cdot 10^{20}$ átomos/cm³ a los $\sim 5 \cdot 10^{18}$ átomos/cm³, mientras que la forma del perfil tiende a una distribución más gaussiana. La profundidad de la difusión aumenta desde ~ 500 nm a ~ 650 nm debido a la difusión promovida por pasos térmicos posteriores.

Las simulaciones llevadas a cabo con el fin de determinar la potencial generación de corriente de células de cada perfil predicen una J_{sc} 37,93 mA/cm² para el perfil FSF4 mientras que para el perfil FSF1 predicen de 38.94 mA/cm². Esta diferencia puede atribuirse a una mayor recombinación Auger cerca de la superficie de dopaje del perfil obtenido tras las secuencia FSF4.

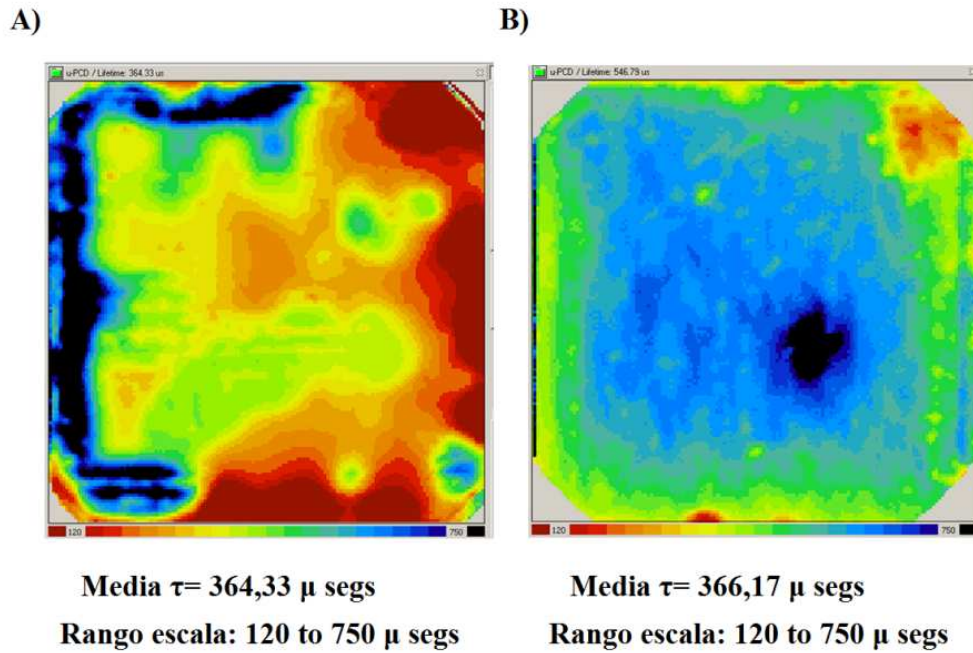


Fig. 37. Medida del tiempo de vida en función de la densidad de portadores de carga minoritarios de las obleas con difusiones simétricas FSF1 a FSF4.

En primer lugar se realiza la difusión de un FSF sobre una oblea simétrica con el objetivo de comprobar la efectividad de la difusión frontal como elemento pasivante de la superficie. Este primer FSF presenta una resistencia de capa de 95 Ω / sqr . Como se ha descrito anteriormente en el Apartado 3.2 este valor, en combinación con una base conductora (<3 $\Omega\text{-cm}$), puede conducir a una baja contribución a la resistencia serie del transporte lateral de las cargas.

Los mapas de la distribución del tiempo de vida (Fig. 37) muestran que la uniformidad mejora considerablemente cuando se difunde el FSF. La mejora en la pasivación se puede explicar por el efecto pasivante de campo eléctrico creado por las cargas negativas del FSF. Se pueden identificar áreas con pasivación sensiblemente mejorada donde antes existía una elevada recombinación.

Se utilizó un equipo A-120 WTC SINTON para determinar la recombinación en la región difundida por medio del cálculo de la densidad de corriente saturada (J_0). Con una oblea con concentración de dopantes del orden de $1,8 \cdot 10^{15}$ átomos/cm³, la J_0 se puede calcular con el método de la pendiente si se alcanza la condición de una alta densidad de portadores de carga (MCD).

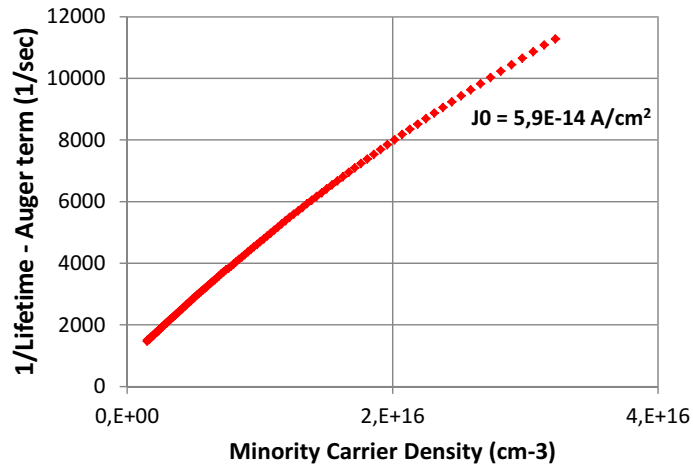


Figura 38. Medida de la fotoconductancia en régimen quasi-permanente para una difusión de un FSF con R_{sheet} de $95 \Omega/sqr$. Inversa del tiempo de vida en función de la densidad de portadores de carga. J_0 calculado acorde al método de la pendiente.

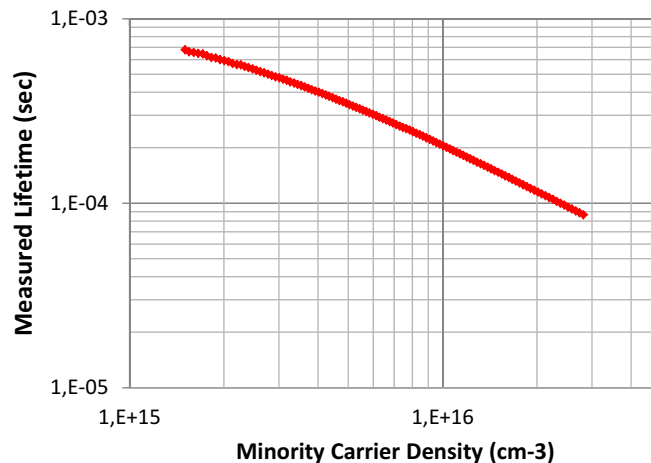


Figura 39. Para una difusión de un FSF con R_{sheet} de $95 \Omega/sqr$, medida del tiempo de vida en función de la densidad de portadores de carga.

La densidad de corriente saturada obtenida a partir de la Figura 38 se ha calculado en un MCD de $2,5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$. A su vez en las mediciones realizadas se alcanzaron valores de $V_{OC\text{-implícita}}$ de 681 mV. Estos valores indican que para esta primera difusión de un FSF se ha conseguido una pasivación superficial avanzada que puede permitir fabricar células fotovoltaicas de alta eficiencia.

Tras comprobar la efectividad del primer FSF, se procede a implementar experimentalmente las secuencias propuestas en la Figura 35 con el objetivo de evaluar el efecto de intercalar la misma difusión a diferentes niveles de la secuencia de proceso.

Además de la caracterización de los niveles de pasivación y recombinación superficial, resulta de interés la caracterización de la resistencia de capa de la difusión. Dicha caracterización se llevó a cabo realizando un barrido, por medio de una sonda de cuatro puntas, de la superficie de la oblea utilizando un equipo (*Sberescan*) suministrado por la empresa *Sunlab A.G.*

Se someten cuatro obleas tipo p a los pasos químicos y térmicos principales para poder comparar la conductividad final del FSF tras ser sometido a la secuencia de proceso propuesta (Fig. 35). A su vez, se mide la R_{sheet} en diferentes etapas del proceso con el objetivo de conocer la evolución de la conductividad del FSF.

			FSF 4	FSF 3	FSF 2	FSF 1
1. Difusión FSF	Proceso	Difusión con gas	x	x	x	x
	Caracterización	Rsh [Ohm/sqr]				
2. PSG/ Native oxide Removal	Proceso	Baño HF	x	x	x	x
	Caracterización	Rsh [Ohm/sqr]				
3. Oxidación térmica	Proceso	Oxido termico	x	x	x	x
	Caracterización	Rsh [Ohm/sqr]				
4. Eliminación barrera SiOx	Proceso	Baño HF				
	Caracterización	Rsh [Ohm/sqr]	171			
5. Paso termico emisor	Proceso	Paso termico sin gas	x	x		x
	Caracterización	Rsh [Ohm/sqr]		145		
6. Paso termico BSF	Proceso	Paso termico sin gas	x	x	x	x
	Caracterización	Rsh [Ohm/sqr]	144	146,6	159,7	
7. Eliminación oxido	Proceso	Baño HF	x	x	x	x
	Caracterización	Rsh [Ohm/sqr]	188,8	166		
8. Pasivación	Proceso	Oxido termico	x	x	x	x
	Caracterización	Rsh [Ohm/sqr]	183,9	181,7	211,6	
9. Eliminación oxido	Proceso	Baño HF	x	x	x	x
	Caracterización	Rsh [Ohm/sqr]	188,6	179	214,4	189,6

Tabla 3. Resultado de la medida de la R_{sheet} media de las obleas dedicadas a caracterizar la evolución de la conductividad del FSF en función de los pasos térmicos y químicos

A priori cabría esperar que cuanto antes se introduzca el FSF en el proceso, mejor sea la pasivación. Esta previsión tiene su origen en el hecho de que, como se puede observar en la Figura 36, la difusión será previsiblemente más profunda y la concentración superficial será menor al reducir la recombinación Auger.

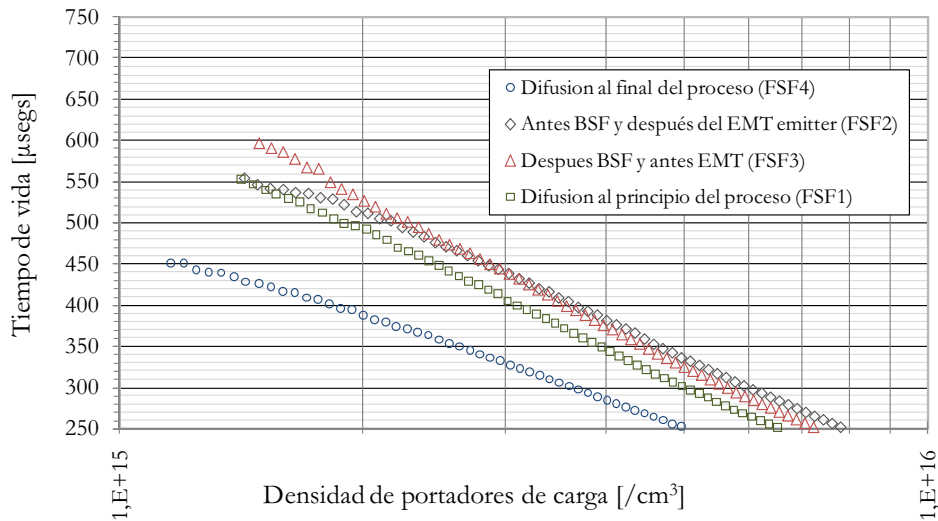


Figura 40. Medida del tiempo de vida en función de la densidad de portadores de carga minoritarios de las obleas con difusiones simétricas FSF1 a FSF4 [57].

Los resultados de la media del tiempo de vida mostrados en la Figura 40, indican que la previsión no se cumple para la secuencia FSF1, especialmente para densidades de portadores de carga del orden de los $2 \cdot 10^{16}$ átomos/ cm^3 . En este caso es la secuencia de proceso FSF3 la que muestra los mejores resultados de pasivación en vez de la secuencia FSF1.

Esta tendencia se confirma tras la medida del tiempo de vida de los portadores de carga minoritarios (Fig. 40). Para investigar en profundidad las posibles causas de un deterioro en el tiempo de vida en el caso del FSF1 se estudiará la distribución del tiempo de vida a lo largo de la superficie de la oblea por medio de la técnica de μ -PCD.

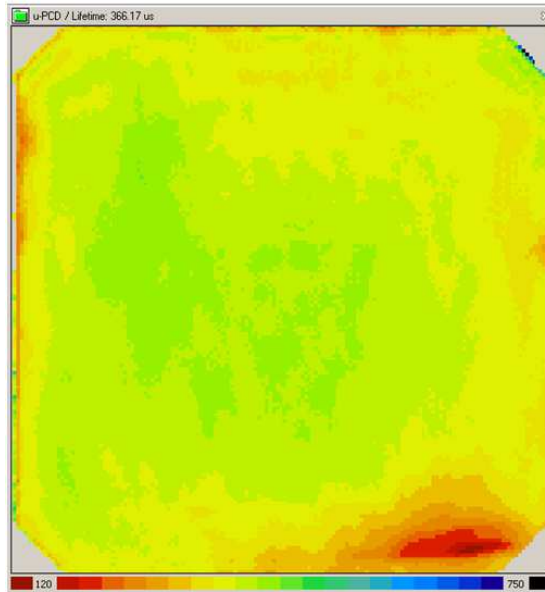


Figura. 41. Mapeado mostrando la distribución del tiempo de vida de los portadores de carga minoritarios obtenida mediante la técnica de μ -PCD para la secuencia de proceso FSF4. Rango de escala 120-750 μ segs. Resultados de tiempo de vida medio (τ_{medio}) de 366,17 μ segs

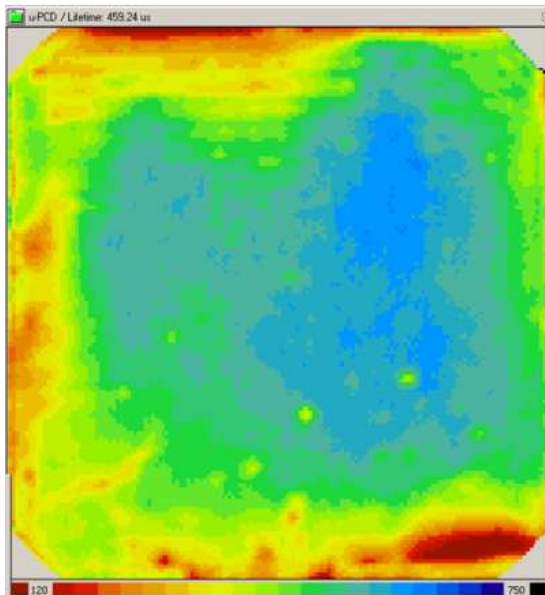


Figura 42. Resultados obtenidos por medio de μ -PCD para la secuencia de proceso FSF3 con un τ_{medio} de 458,24 μ segs.

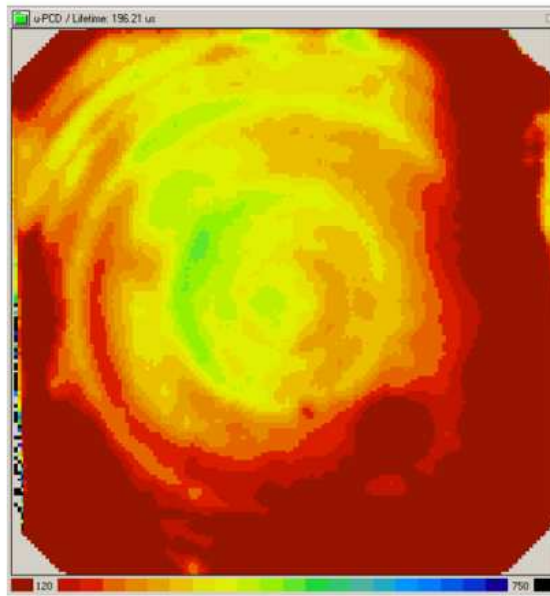


Figura 43. Resultados obtenidos por medio de μ -PCD para la secuencia de proceso FSF1 con un τ_{medio} de 196,21 μ segs.

Los valores de tiempo de vida medios (Tabla 4) muestran que a medida que el número de etapas de calentamiento se incrementa de FSF4 a FSF2 o FSF3, el tiempo de vida aumenta, para luego disminuir significativamente para el caso del FSF1.

En términos generales las mediciones muestran una mayor uniformidad tras la inclusión del FSF. (Figs. 41, 42). En el caso del FSF1 la reducción del tiempo de vida promedio viene acompañada por la aparición de áreas de menor tiempo de vida en forma de anillos concéntricos. Estos anillos han sido previamente identificados en la literatura como defectos inducidos por inclusiones de oxígeno en la oblea conocidos por su denominación en inglés como “Oxygen Induced Stacking Faults (OISF)”. Estos defectos han sido atribuidos a la inclusión de aglomeraciones de oxígeno intersticial durante la etapa de crecimiento del lingote Czochralski. Las aglomeraciones tienden a desarrollarse durante el procesamiento térmico [58, 59, 60] aumentando cuando la carga térmica a la que es sometida la oblea se incrementa.

Es por tanto importante considerar en el futuro como un factor relevante la degradación del tiempo de vida en el interior del material debido al incremento de la carga térmica.

En lo que se refiere al análisis de los resultados, las obleas de los diferentes procesos del experimento han sido sometidas a diferente carga térmica lo que puede distorsionar el análisis de la influencia de la posición de la inclusión del FSF en el resultado final.

Las obleas procesadas siguiendo la secuencia FSF1 son las únicas que han sido sometidas a las secuencias térmicas propias de las tres difusiones previstas en un proceso para fabricar una célula IBC. En cambio las obleas procesadas según la secuencia FSF2 y FSF3 han sido sometidas a dos perfiles de difusión mientras que las del FSF4 han sufrido únicamente una secuencia térmica. El descenso inesperado del tiempo de vida de las obleas del FSF1 puede ser atribuido a un aumento en la recombinación en el interior de la oblea.

	R_{sheet} [Ω/sqr]	J_{oe} [fA/cm ²]	$V_{oc\ limit}$ [mV]	Implied V_{oc} [mV]
FSF4	171,0	96	687	675
FSF3	145,0	43	708	685
FSF2	159,7	72	695	679
FSF1	189,6	72	695	678

Tabla 4. Resumen de la resistencia de capa (R_{sheet}), del voltaje de circuito abierto implícito ($V_{oc\ Impla}$) y de la corriente de saturación (J_{oe}), para el FSF difundido tras ser sometido a diferentes secuencias de proceso FSF1-4.

5.3 ANALISIS Y CONCLUSIONES

Los resultados muestran que es factible simplificar el IBC proceso difundiendo el FSF en una etapa posterior, en lugar de en el inicio del proceso. Esto puede ayudar a reducir el número de barreras de protección frente a la difusión, aumentando el rendimiento y reduciendo el coste. Los resultados muestran que la recombinación en el interior de la oblea puede ser un factor limitante si la carga térmica es alta.

La oblea producto de la secuencia de proceso FSF3 alcanzará valores de $V_{OC_Implícitas}$ de 685 mV y de $V_{oc-límite}$ de 708 mV con 1 sol de iluminación solar. Estos valores muestran una pasivación de la superficie frontal compatibles con las células de alta eficiencia.

Sometiendo al FSF a pasos de alta temperatura posteriores a su creación, se puede mejorar la pasivación gracias a la reducción de la concentración superficial de dopantes así como la uniformidad de la pasivación.

Otro método para reducir el dopaje superficial frontal es llevar a cabo un paso químico de ataque superficial, que se puede lograr experimentalmente mediante diversos métodos industriales. Ejemplos de estos métodos con amplio recorrido en su aplicación industrial son la utilización de un baño de ataque químico alcalino o ácido, el ataque mediante iones reactivos o “*Reactive Ion Etching*” (RIE) o la oxidación superficial seguidas de un baño ácido de HF para eliminar la capa oxidada.

Si se coloca la difusión del FSF en las primeras etapas del proceso, la pasivación frontal puede verse mejorada al beneficiarse del efecto positivo de los pasos térmicos de alta temperatura sobre el FSF. Estos pasos térmicos puede difundir los dopantes superficiales hacia el interior de las obleas minimizando la recombinación superficial tipo Auger. El inconveniente de este enfoque es el aumento de las barreras de protección para proteger el FSF durante las difusiones y pasos químicos posteriores. Esto implica un aumentando el número de pasos de proceso lo que puede implicar un aumento del coste y un reducción de la productividad de las líneas de producción.

Los resultados experimentales muestran que la inclusión de un FSF permite alcanzar unos excelentes resultados de pasivación tras la difusión del BSF y el emisor, con lo que se consigue simplificar el proceso y reducir el número de pasos. Los resultados

experimentales también indican que es importante tener en cuenta la disminución del tiempo de vida de los portadores de carga debida a la formación de aglomeraciones de oxígeno producidos por un elevada carga térmica.

6- REFERENCIAS

[1] P. J. Cousins et al, "Gen III: Improved Performance at Lower Cost", 35th IEEE PVSC, 2010, Hawaii (USA), pp 275-277

[2] Guo, J.-H. and Cotter, J. E., "Optimizing the diffused regions of interdigitated backside buried contact solar cells". *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 2007, 15: 211–223. doi: 10.1002/ppp.730.

[3] Julio César Durán, et al, *Optimization of the junction depth and doping of solar cell emitters*, *Solar Cells*, Volume 31, Issue 6, December 1991, Pages 497-503, ISSN 0379-6787, 10.1016/0379-6787(91)90092-4.

[4] *Global Market Outlook for Photovoltaics 2013-2017*, European Photovoltaic Industry Association, May 2011.

[5] [lifetime] Cuevas, Andrés, and Daniel Macdonald. "Measuring and interpreting the lifetime of silicon wafers." *Solar Energy* 76.1 (2004): 255-262.

[6] Stuart R. Wenham, Martin A. Green, Muriel E. Watt "Applied Photovoltaics" Centre for Photovoltaic Devices and Systems 1996

[7] Gee, James M., W. Kent Schubert, and Paul A. Basore. "Emitter wrap-through solar cell." *Photovoltaic Specialists Conference, 1993., Conference Record of the Twenty Third IEEE. IEEE, 1993.*

[8] Kress, A., et al. "Low-cost back contact silicon solar cells applying the emitter-wrap through (EWT) concept." *Proceedings of the 2nd WCPSEC, Vienna. Vol. 547. 1998.*

[9] Hacke, P., et al. "Current status of technologies for industrial emitter wrap-through solar cells". *National Renewable Energy Laboratory (NREL), Golden, CO., 2006.*

[10] Castaño, F. J., Morecroft, D., **Cascant, M.**, Yuste, H., Lamers, M. W. P. E., Mewe, A. A., ... & Cesar, I. (2011, June). "Industrially feasible > 19% efficiency IBC cells for pilot line processing". In *Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), Seattle, 2011.*

[11] Lamers, M.W.P.E.; Mewe, A.A.; Romijn, I.G.; Bende, E.E.; Komatsu, Y.; Koppes, M.; Morecroft, D.; **Cascant, M.**; Castano, F.J.; Weeber, A.W.; Cesar, I.; Towards 21% efficient n-Cz IBC based on screen printing ECN-M-11-010. September 2011; 4 pag. Presented at: 26th EU PVSEC European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Hamburg, Germany, 5-9 september 2011.

[12] Granek, Filip. *High-efficiency back-contact back-junction silicon solar cells*. Verlag Dr. Hut, 2009.

[13] Schwartz, R.J.; Lammert, M.D., "Silicon solar cells for high concentration applications," *Electron Devices Meeting, 1975 International*, vol.21, no., pp.350,352, 1975

[14] Richard M. Swanson, "Point-contact silicon solar cells", *Electric Power Research Institute, Interim Report*, May 1983.

[15] R. R. King, R. A. Sinton, and R. M. Swanson, "Doped surfaces in one sun, pointcontact solar cells" *Appl. Phys. Lett.* 54, 1460 (1989); doi: 10.1063/1.101345

[16] R. A. Sinton, Young Kwark, J. Y. Gan, and Richard. M. Swanson, "27.5-Percent Silicon Concentrator Solar Cells," *IEEE Electron Device Letters*, Vol. EDL-7, No. 10, October 1986

[17] R.A. Sinton and R.M. Swanson, *Design criteria for Si point-contact concentrator solar cells*, *IEEE Transactions on Electron Devices*, ED-34 (10), 2116-23, (1987).

[18] R.A. Sinton, P. Verlinden, D.E. Kane, and R.M. Swanson, *Development efforts in silicon backside-contact solar cells*, in *Proceedings of the 8th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Florence, Italy, 1472-6 (1988)*.

[19] R.R. King, R.A. Sinton, and R.M. Swanson, *Front and back surface fields for point-contact solar cells*, in *Proceedings of the 20th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Las Vegas, Nevada, USA, 538-44 (1988)*.

- [20] Verlinden, P.; Swanson, R.M.; Sinton, R.A.; Kane, D.E., "Multilevel metallization for large area point-contact solar cells," *Photovoltaic Specialists Conference, 1988., Conference Record of the Twentieth IEEE*, vol., no., pp.532,537 vol.1, 1988
- [21] R.R. King, R.A. Sinton, and R.M. Swanson, *One-Sun, Single-Crystalline Silicon Solar Cell Research. Solid State Electronics Laboratory, Stanford University, Stanford, (1991).*
- [22] R.A. Sinton and R.M. Swanson, *Simplified backside-contact solar cells, IEEE Transactions on Electron Devices*, 37 (2), 348-52, (1990).
- [23] R.A. Sinton, P.J. Verlinden, R.A. Crane, R.M. Swanson, C. Tilford, J. Perkins, and K. Garrison, *Large-area 21% efficient Si solar cells, in Proceedings of the 23rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Louisville, Kentucky, USA, 1490, 157-61 (1993).*
- [24] P.J. Verlinden, R.M. Swanson, and R.A. Crane, *7000 high efficiency cells for a dream, Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 2 (2), 143, (1994).
- [25] W.P. Mulligan, D.H. Rose, M.J. Cudzinovic, D.M. De Ceuster, K.R. McIntosh, D.D. Smith, and R.M. Swanson, *Manufacture of solar cells with 21% efficiency, in Proceedings of the 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Paris, France, 387-90 (2004).*
- [26] K.R. McIntosh, M.J. Cudzinovic, D.D. Smith, W.P. Mulligan, and R.M. Swanson, *The choice of silicon wafer for the production of low-cost rearcontact solar cells, in Proceedings of the 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Osaka, Japan, 971-4 (2003).*
- [27] K.R. McIntosh, N.C. Shaw, and J.E. Cotter, *Light trapping in Sunpower's A-300 solar cell, in Proceedings of the 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Paris, France, 844-7 (2004).*
- [28] R.M. Swanson, *Device physics for backside-contact solar cells, in Proceedings of the 33rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference, San Diego, USA, (2008)*
- [29] P. J. Cousins et al, "Gen III: Improved Performance at Lower Cost", *35th IEEE PVSC, 2010, pp 275-277.*

- [30] K. Nakamura et al, "Development of back contact Si solar cell and module in pilot production line", 23rd EUPVSEC, 2008, pp 1006–1009.
- [31] Taylor, W. E. "Solar cell metallization: Historical perspective" In JPL Proc. of the Flat-Plate Solar Array Res. Forum on Photovoltaic Metallization Systems p 9-18 (SEE N84-21980 12-44)"
- [32] Erath, D. "Printing techniques in the c-Si PV industry - a brief technological overview", 2010
- [33] Wortman, J. J., and R. A. Evans. "Young's modulus, shear modulus, and Poisson's ratio in silicon and germanium." *Journal of Applied Physics* 36 (1965): 153.
- [34] Stevie, F. A., et al. "Boron contamination of surfaces in silicon microelectronics processing: characterization and causes." *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films* 9.5 (1991): 2813-2816.
- [35] Clemens, James T. "Silicon microelectronics technology." *Bell Labs Technical Journal* 2.4 (1997): 76-102.
- [36] Fick, A. (1855). Ueber diffusion. *Annalen der Physik*, 170 (1), 59-86.
- [37] Spitzer, Mark B., Stephen P. Tobin, and Christopher J. Keavney. "High-efficiency ion-implanted silicon solar cells." *Electron Devices, IEEE Transactions on* 31.5 (1984): 546-550.
- [38] Griffin, Peter, M. D. Deal, and J. D. Plummer. "Silicon vlsi technology." (2000): 215.
- [39] Granek, Filip, et al. "Enhanced lateral current transport via the front N+ diffused layer of n type high efficiency back junction back contact silicon solar cells." *Progress in photovoltaics: research and applications* 17.1 (2009): 47-56.
- [40] Fossum, Jerry G. "Physical operation of back-surface-field silicon solar cells." *Electron Devices, IEEE Transactions on* 24.4 (1977): 322-325.
- [41]. Theory of μ -PCD for Measuring Lifetime. Technical note 200. Semilab A.G.
- [42] Valdes, Leopoldo B. "Resistivity measurements on germanium for transistors." *Proceedings of the IRE* 42.2 (1954): 420-427.

[43] Smits, F. M. "Measurement of sheet resistivities with the four-point probe." *Bell Syst. Tech. J* 37.3 (1958): 711-18.

[44] Guzmán de la Mata, Berta "Modelo dinámico de incorporación de oxígeno incidente sobre sustratos de silicio durante análisis de espectrometría de masas de iones secundarios". Tesis (Doctoral), E.T.S.I. Telecomunicación (UPM), (2002)

[45] De Rose, Raffaele, et al. "Understanding the Impact of the Doping Profiles on Selective Emitter Solar Cell by Two-Dimensional Numerical Simulation." (2013): 1-9.

[46] User Manual Microtec 4.22, Siborg Systems Inc. From <http://www.siborg.ca>

[47] Cuevas, Andrés, et al. "Surface recombination velocity of highly doped n type silicon." *Journal of Applied Physics* 80.6 (1996): 3370-3375.

[48] Dżiewior, J., and W. Schmid. "Auger coefficients for highly doped and highly excited silicon." *Applied Physics Letters* 31.5 (1977): 346-348.

[49] **M. Cascant** et al "Development Towards Pilot Line Efficiency Improvements of >19% Industrially Viable IBC Solar Cells", in 26th EU-PVSEC. 2011. Hamburg (Germany).

[50] Komatsu, Yuji, et al. "Sophistication of doping profile manipulation-emitter performance improvement without additional process step." *Proc. 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Valencia, Spain. Vol. 6. 2010.*

[51] Komatsu, Yuji, et al. "Innovative Diffusion Processes for Improved Efficiency on Industrial Solar Cells by Doping Profile Manipulation." *Proceedings of the 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition. 2009.*

[52] King, R. R., R. A. Sinton, and R. M. Swanson. "Studies of diffused phosphorus emitters: saturation current, surface recombination velocity, and quantum efficiency." *Electron Devices, IEEE Transactions on* 37.2 (1990): 365-371.

[53] V. D. Mibailetschi, Y. Komatsu, and L. J. Geerlings, "Nitric acid pretreatment for the passivation of boron emitters for n-type base silicon solar cells", *Appl. Phys. Lett.*, 92, 2008, pp 063510.

- [54] C. Gong et al, "High Efficient N-type Interdigitated Back Contact Silicon Solar Cells with Screen-Printed Al-Alloyed Emitter", IEEE (2010)
- [55] F. Granek et al. "Positive Effects of Front Surface Field in High-Efficiency Back-Contact Back-Junction Ntype Silicon Solar Cells", IEEE (2008)
- [56] F. Granek, C. Reichel, "Back-contact back-junction silicon solar cells under UV illumination", *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 94, pgs 1734-1740 (2010)
- [57].Sinton, R. A., and A. Cuevas. "A quasi-steady-state open-circuit voltage method for solar cell characterization." *16th European Photovoltaic Solar Energy Conference. Vol. 25.* 2000.
- [58] Porrini, M., and P. Rossetto. "Influence of thermal history during Czochralski silicon crystal growth on OISF nuclei formation." *Materials Science and Engineering: B* 36.1 (1996): 162-166.
- [59] Ponce, F. A., T. Yamashita, and S. Hahn. "Structure of thermally induced microdefects in Czochralski silicon after high temperature annealing." *Applied physics letters* 43.11 (1983): 1051-1053.
- [60] Chiou, Heng Der. "The effects of preheatings on axial oxygen precipitation uniformity in czochralski silicon crystals." *Journal of The Electrochemical Society* 139.6 (1992): 1680-1684.

7-ARTICULOS PUBLICADOS

FRONT SURFACE FIELD FORMATION AND DIFFUSION PROFILES FOR INDUSTRIAL INTERDIGITATED BACK CONTACT SOLAR CELLS

M. Cascant¹, D. Morecroft¹, K. Boulif¹, L. Vauche¹, H. Yuste¹, J. P. Ballester¹, I. Gonzalez¹, J. R. Rovira¹, J. J. Sierra¹, C. Castillo¹, E.E. Bende², and F. J. Castaño¹.

¹Siliken, High efficiency solar cell pilot line, R&D department, Ciudad Politécnica de la Innovación- UPV Camino de Vera 14, 46022 Valencia, Spain.

²ECN Solar Energy, P.O. Box 1, NL-1755 ZG Petten, the Netherlands.

ABSTRACT: Optimization of the Front Surface Field (FSF) for IBC cells is important for passivation, lowering series resistance and reducing UV light degradation. This work presents results for optimizing the FSF diffusion from an industrial perspective, focusing on optimizing the process flow to achieve excellent FSF performance, whilst at the same time reducing the number of process steps. The ideal FSF profile is a compromise since a lightly doped deep diffusion reduces recombination losses close the cell surface where the light is captured, whilst increased doping reduces series resistance. This work investigates diffusing the FSF (1) at the beginning, (2) in the middle and (3) towards the end of the IBC process flow. The advantage of the first option is that the diffusion depth can be increased by subsequent thermal steps. However a diffusion barrier is required to protect the FSF throughout the subsequent processing, which increases the number of process steps and results in increased costs. By placing the FSF diffusion later in the process flow it is possible to simplify the process reducing the number of steps. Experimental results show excellent FSF diffusion passivation performance over 156mm, with lifetime values of over 500 μ s. Simulations confirm that high current generation can be achieved with a short circuit current of around 39 mA cm^{-2} .

Keywords: Interdigitated Back Contact (IBC), high-efficiency, silicon solar cell, n-type.

1 PURPOSE OF THE WORK-INTRODUCTION

Interdigitated Back Contact (IBC) solar cells can achieve high efficiency (>24%) since the p-n junction and metallization are on the rear side, enabling the full front side of the cell to capture light [1,-3]. Previous authors have discussed the importance of using an n+ diffused Front Surface Field (FSF) to improve front surface passivation [4-6], lower series resistance [7], and improve UV stability [8]. The surface recombination is reduced since the n+ diffusion repels minority carriers, and series resistance is reduced since the doped region acts as a parallel low resistance channel for majority carriers to reach the contacts.

While improved current collection and passivation can be achieved if the FSF is lowly doped near the surface, high doping is often needed to avoid conduction problems. A deep doping profile will also help to reduce series resistance, although the temperature and time of the process will be increased. The optimum FSF profile will also need to consider the pitch and emitter fraction of the IBC cell design as well as the conductivity of the base. Previous work has investigated different FSF profiles including error function dopant profiles (erfc) and gaussian profiles [9]. Results have shown that shallow highly-doped or deep lightly-doped profiles can achieve an acceptable blue response in combination with enhanced lateral transport.

The FSF can be formed at different stages of the process flow. A first alternative is to include the FSF diffusion at the beginning of the process flow. This would allow a drive-in of the FSF profile during subsequent diffusions, lowering surface recombination and series resistance. The disadvantage is that it is necessary to protect the FSF with diffusion barriers, increasing processing steps and cost and lowering throughput. A second alternative would be to create the FSF at a later stage, which simplifies the process flow by avoiding front diffusion barriers. A drawback is that from an industrial perspective it is difficult to obtain a lowly doped deep diffusion profile. The present work aims at assessing the industrial feasibility of placing the FSF

diffusion at different stages of the IBC process flow. Most previously reported work on FSF formation for IBC cells has been focused on small laboratory cells, while few reports exist using 156mm silicon substrates.

2 EXPERIMENTAL METHODS

The substrates were 180 micron thick n-type CZ wafers with a resistivity of 2.5 Ohm-cm and bulk lifetimes exceeding 1 ms. All experiments were carried out on symmetrical wafers that had been processed with saw damage removal, texturing and pre/post-diffusion cleaning, and the diffusions were carried out in a tube furnace. Figure 1 is a schematic diagram showing the high temperature steps of the IBC process flow, and the different process sequences tested including: FSF diffusion at the beginning of the process flow (FSF1); after the emitter and before the BSF diffusion (FSF2); after the BSF and before the emitter diffusion (FSF3); after the emitter and BSF diffusion (FSF4).

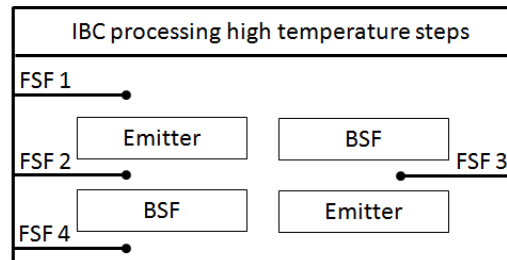


Fig. 1. Schematic diagram showing the high temperature steps of the IBC process flow, where the FSF is diffused at different stages of the process.

All of the FSF profiles tested were passivated with 20nm thick thermally grown oxide, followed by a forming gas anneal (FGA) of 450°C for 30 mins. Characterisation was carried out using a four-point probe to measure sheet resistance, microwave induced Photoconductance Decay

(μ PCD) for lifetime mapping, and Quasi-Steady-State Photoconductance (QSSPC) to measure the lifetime with Minority Carrier Density (MCD). Emitter saturation current density (J_{oe}) and the implied open circuit voltage ($V_{oc\ Impld}$) were also measured. Two-dimensional simulations were carried out using the simulation software MicroTec [10] to evaluate the influence of the FSF profile on the final cell parameters.

3 RESULTS

Figure 2 shows Secondary Ion Mass Spectrometry (SIMS) profiles for the FSF at the beginning of the process flow, and after the BSF and emitter diffusions. A significant difference in surface doping can be observed. The doping concentration at the surface decreases from $\sim 1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ to $\sim 5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, and the profile tends to a more Gaussian distribution. The depth of the diffusion increases from $\sim 500 \text{ nm}$ to $\sim 650 \text{ nm}$ due to the subsequent thermal steps. Processing steps after the FSF formation influence the initial doping profile, especially subsequent diffusions, surface oxidation and chemical etching.

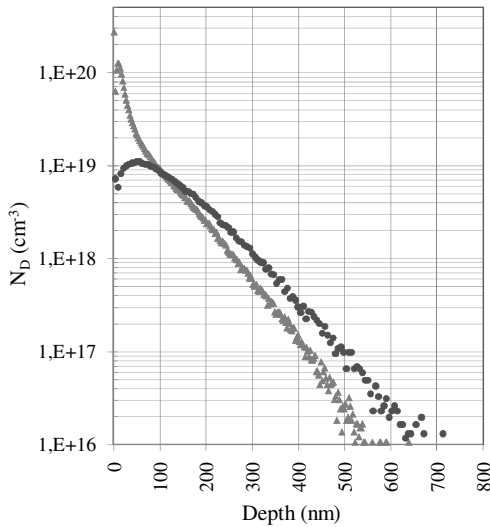


Fig. 2. Secondary Ion Mass Spectrometry (SIMS) measurements for diffusion profiles directly after FSF formation (grey triangles), and after emitter and BSF diffusions (black circles).

Simulations have been carried out in order to determine the current collection of cells containing the FSF profiles depicted in Fig 2. A short circuit current density (J_{sc}) of 37.93 mA/cm^2 is obtained for the FSF4 profile while a higher J_{sc} of 38.94 mA/cm^2 is obtained for the FSF1 profile. This difference can be attributed to higher Auger recombination near the surface for doping profile FSF4.

	R_{sheet} [Ω/sqr]	J_{oe} [fA/cm^2]	$V_{oc\ limit}$ [mV]	Implied V_{oc} [mV]
FSF4	171,0	96	687	675
FSF3	145,0	43	708	685
FSF2	159,7	72	695	679
FSF1	189,6	72	695	678

Table I. A table summarizing the sheet resistance (R_{sheet}), emitter saturation current density (J_{oe}), the open circuit

voltage limit $V_{oc\ limit}$, and implied open circuit voltage ($V_{oc\ Impld}$) for FSF diffusion profiles 1-4.

Table 1 summarizes the experimental results for R_{sh} , J_{oe} , $V_{oc\ limit}$ and Implied V_{oc} . Sheet resistance variations are mainly due to variations in diffusion depth. However, it is also influenced by the reduction in the surface concentration of Phosphorus. Previous work indicates that these values of sheet resistance in combination with a conductive base ($< 3 \text{ Ohm-cm}$) can lead to a low contribution of lateral transport to series resistance [3]. Considering that the wafer doping was less than $1.8 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, the dark saturation current density was calculated with the slope method as the high injection level condition was met. The values of J_{oe} and $V_{oc\ Impld}$ obtained indicate that the front of the cell has been effectively passivated for every process flow proposed.

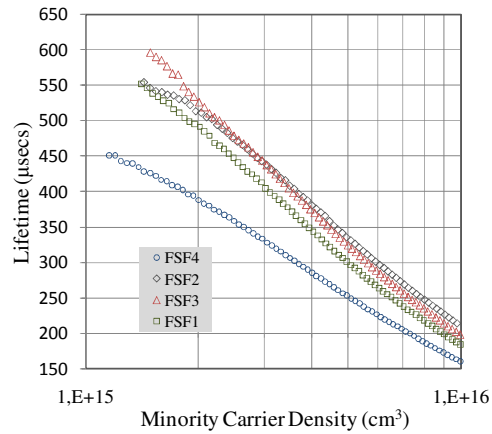


Fig. 4. Quasi-Steady-State-Photoconductance (QSSPC) measurements taken for FSF profiles 1-4.

One would expect that the closer the FSF diffusion is to the beginning of the process flow, the better the passivation would be since as shown in Fig. 2, the surface is more lightly doped with a deeper diffusion profile. The results in Table I indicate that this is not the case, with the lowest J_o and highest $V_{oc\ Impld}$ for FSF3- placing the FSF before the emitter and after the BSF. The lifetime measurements also show the same trend, as shown in Figure 4. Average lifetime values obtained by μ PCD measurements depicted in Figure 5 show that as the number of heating steps are increased from FSF4 to FSF2 or FSF3, the lifetime increases, but then decreases significantly for FSF1. Figure 5 shows that the uniformity of the front surface passivation is much better with an FSF than without (Figs. 5A and B). Increasing the number of heating steps increases the lifetime as shown by Figs. 5B and C. FSF1 in Fig. 5D shows a significantly reduced average lifetime, and the appearance of ‘rings’ in the lifetime map. These rings have been previously identified as “Oxygen Induced Stacking Faults (OSF)”. These defects have been traced to the seed end of the Czochralski ingot, where the interstitial oxygen concentration is the highest and the cooling rate during crystal growth is the slowest, allowing point defects to agglomerate. These stacking are known to develop during thermal processing [1]. These results indicate that it is important to consider not only the front surface passivation, but also the bulk lifetime which can be

reduced by high temperature processing.

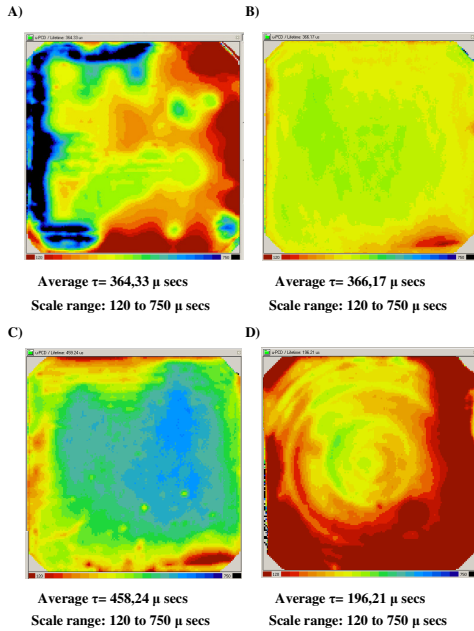


Fig. 5. Microwave Photoconductance Decay (μ PCD) maps for A) a passivated n-type wafer without FSF, B) FSF4, C) FSF3 and D) FSF1. Shown below the images are the average lifetime, τ , and the scale range of the image in micro-seconds.

The results show that it is feasible to simplify the IBC process by diffusing the FSF at a later stage, instead of at the beginning of the process. This can help to reduce the number of diffusion protection barriers, increasing throughput and reducing cost. The results show that the bulk lifetime can be a limiting factor if the thermal budget is high. Implied V_{oc} values of 685 mV and $V_{oc-limit}$ of 708 mV were reached under 1 sun illumination. These values indicate that an improved front surface passivation compatible with high efficiency cells has been obtained. High temperature processing of the FSF improves passivation by reducing the doping surface concentration and improving uniformity of the passivation.

Another method of reducing the front surface doping concentration is to carry out a simple etch back step, which can be achieved experimentally by a number of different methods, e.g. an alkaline/acid chemical etch, Reactive ion etching (RIE) or surface oxidation followed by an HF acid etch. Simulations exploring this method of enhancing front surface passivation are shown below.

4 SIMULATIONS

Simulations were carried out on IBC cell structures with 2mm pitch, 80% emitter fraction, and 75 μ m gap. The diffusion profiles for the emitter, BSF and FSF4 were transferred directly from the measured SIMS profiles. Figure 6 shows how (a) the open circuit voltage (V_{oc}) and short circuit current (J_{sc}) and (b) the efficiency and Fill Factor (FF) change with the amount of silicon etched away from the front surface of the IBC cell. The simulations clearly indicate that a highly doped surface

($>4 \times 10^{19}$ dopants/cm³) will be detrimental for J_{sc} , V_{oc} , and efficiency mainly due to enhanced Auger recombination in this region. The simulations show that etching >30 nm would mean a significant increase in cell performance. The Fill Factor decreases with increasing etch depth because the FSF is etched away, increasing the series resistance. The simulation results indicate that it is also possible to place the FSF diffusion at the end of the IBC process flow, and include a short etch-back step to achieve good front surface passivation.

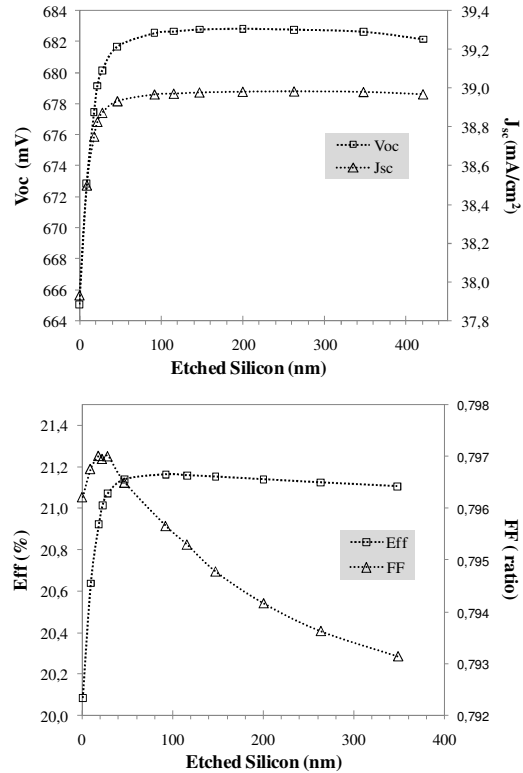


Fig. 6. Simulation results showing how (a) the open circuit voltage (V_{oc}) and short circuit current (J_{sc}) and (b) the efficiency and Fill Factor (FF) change with increasing silicon etch depth.

5 CONCLUSION

This work investigates the industrial feasibility of placing the FSF diffusion at different stages of the IBC cell process flow. If the FSF diffusion is placed at the beginning of the process flow, the front surface passivation can benefit from subsequent high temperature diffusions of the emitter and BSF. The high temperature steps can drive-in the surface dopants reducing Auger recombination close to the surface. The drawback of this approach is that additional diffusion protection barriers are required to protect the FSF during subsequent diffusions, increasing the number of processing steps and cost, and decreasing the throughput. The experimental results show that excellent passivation results can be achieved by placing the FSF diffusion after the BSF or emitter diffusions, thus simplifying the IBC process flow. The experimental results also indicate that it is important to take into consideration the decrease in bulk lifetime with thermal processing, due to the formation of oxygen

induced stacking faults. The simulation results indicate that it may also be possible to place the FSF diffusion at the end of the IBC process flow, and include a short etch-back step. Excellent front surface passivation can be achieved by etching just the first 30 nm of silicon on the front side.

REFERENCES

- [1] P. J. Cousins *et al.*, "*Gen III: Improved Performance at Lower Cost*", 35th IEEE PVSC, Hawaii (USA), pgs 275-277, (2010)
- [2] F.J Castano *et al.*, "*Industrially feasible >19% efficiency IBC cells for pilot line processing*", IEEE PVSEC Seattle June (2011)
- [3] M. Cascant *et al* "*Development Towards Pilot Line Efficiency Improvements of >19% Industrially Viable IBC Solar Cells*", in 26th EU-PVSEC, Hamburg (2011)
- [4] Guo, J.-H. and Cotter, J. E., "*Optimizing the diffused regions of interdigitated backside buried contact solar cells*". Progress in Photovoltaics: Research and Applications, **15**, pgs 211–223 (2007)
- [5] C. Gong *et al*, "*High Efficient N-type Interdigitated Back Contact Silicon Solar Cells with Screen-Printed Al-Alloyed Emitter*", IEEE (2010)
- [6] F. Granek *et al.* "*Positive Effects of Front Surface Field in High-Efficiency Back-Contact Back-Junction N-type Silicon Solar Cells*", IEEE (2008)
- [7] F. Granek *et al.* "*Enhanced lateral current transport via the front N+ diffused layer of n-type high-efficiency back-junction back-contact silicon solar cells*", Progress in photovoltaics: research and applications, **17**, pgs 47-56 (2009)
- [8] F. Granek, C. Reichel, "*Back-contact back-junction silicon solar cells under UV illumination*", Solar Energy Materials & Solar Cells, **94**, pgs 1734-1740 (2010)
- [9] Granek thesis "*High Efficiency Back-Junction Back-contact Silicon Solar Cells*", Fraunhofer Institute for Solar Energy (ISE) (2009)
- [10] User Manual Microtec 4.22, Siborg Systems Inc. From <http://www.siborg.ca>

DEVELOPMENT TOWARDS PILOT LINE EFFICIENCY IMPROVEMENTS OF >19% INDUSTRIALLY VIABLE IBC SOLAR CELLS

M. Cascant¹, D. Morecroft¹, H. Yuste¹, M.W.P.E. Lamers², A.A. Mewe², I.G. Romijn², E.E. Bende², Y. Komatsu², A.W. Weeber², I. Cesar² and F. J. Castaño^{1*}.

¹Siliken, High efficiency solar cell pilot line, R&D department, Ciudad Politécnica de la Innovación- UPV Camino de Vera 14, 46022 Valencia, Spain. *Email: fernando.castano@siliken.com

²ECN Solar Energy, P.O. Box 1, NL-1755 ZG Petten, the Netherlands.

ABSTRACT: Interdigitated Back Contact (IBC) solar cells with >19% efficiencies have been fabricated using n-type silicon wafers and well-demonstrated high-volume solar cell process technologies alone. An optimized Front Surface Field (FSF) allows excellent current collection with J_{sc} values as high as 41.5 mA/cm². High Pseudo Fill Factors (*PF*) of above 81% and reduced Fill Factors (*FF*) of below 72%, have been obtained. Modelling of series resistance indicates a major contribution of the lateral transport of the carriers, mainly limited by low FSF and bulk conductivities. The process flow described is currently being transferred to a pilot production line and further possible process improvements are discussed.

Keywords: Interdigitated Back Contact (IBC), high-efficiency, silicon solar cell, n-type.

1 INTRODUCTION

Vertical integration through the Photovoltaic (PV) value chain is a well-proven strategy for overall cost-reductions in the silicon PV industry, which still faces challenges to reach a cost of PV-generated power comparable with the price of power produced using solid fuels. Further cost-reduction approaches at the cell level include decreasing the wafer thickness, which is today the most expensive part of the solar cell. Nevertheless thinning the cells is proving difficult in today's high-volume PV manufacturing and therefore increasing cell conversion efficiencies remains as the most pursued cost-reduction strategy. A higher-power-generating solar cell without a significant increase in production costs can allow for powerful cost-reductions throughout the entire PV value chain.

Interdigitated back contact (IBC) solar cells offer an attractive solution for achieving high conversion efficiency, since the contacts are placed on the back-side of the cell allowing more capture of sunlight on the front side. Several research institutions and companies have already demonstrated high efficiencies using prototype small sized IBC cells [1-4], however there are many challenges with the scale-up to a full size production cell, which is reflected by the fact that there is currently only one company worldwide which produces these types of solar cells. To date Sunpower's IBC cells have demonstrated the highest efficiency for production c-Si solar cells with values of 24.2% [1]. With this in mind, Siliken has worked in collaboration with the Energy Research Centre of the Netherlands (ECN) to develop a novel industrially viable IBC process which could then be transferred to a pilot production line based on custom designed tools with throughputs exceeding 200 wafers/hour. Efficiencies of >19% have been achieved using well established processing technologies such as screen printing, wet processing and PECVD.

In this article we first describe the process used to fabricate the cells, report on most recent best cell results, and finally discuss in detail the major loss mechanisms to the series resistance, deduced from both experimental results and simulations. This manuscript concludes discussing how cell design could be improved using conventional solar cell processing technologies.

2 EXPERIMENT DESCRIPTION

IBC cells were fabricated at ECN laboratories using n-type Cz wafers supplied by SUMCO with a thickness of 180 μ m, resistivity in the range of 3-4 Ω -cm and bulk (or base) lifetime values of ~1 ms.

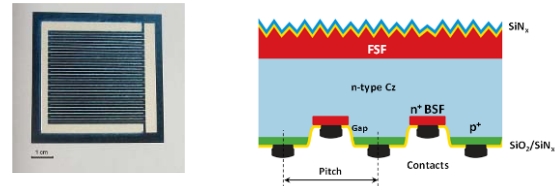


Figure 1: (At left) Image of the rear side of a 13,2 cm² IBC solar cell prototype. The image on the right shows a schematic of the IBC cell architecture, indicating the Front Surface Field (FSF), n+-Back Surface Field (BSF), p+ -emitter, contacts and passivating layers. The definition of pitch and gap are also included.

Figure 1 (left) shows an optical image corresponding to the rear side of one of the investigated IBC cells. It should be noted that the large busbars facilitated electrical contact and where outside of the illuminated region for the IV measurements. Figure 1 (right) shows a cross-sectional diagram (not to scale) of the IBC cell tested, which includes emitter and Back Surface Field (BSF) with contacts on the back of the cell, and the Front Surface Field (FSF) on the front side. The role of the FSF is both to decrease the recombination on the front side of the cell, and to aid lateral transport of the carriers within the cell [3]. The cells are passivated with SiO₂/SiN_x-H stack on the back-side and SiN_x-H layer on the front using an optimized recipe [5]. To enable more measurements to be carried out, 3 × 3 array of IBC cells were fabricated on each 156 mm semi-square wafer. Relevant dimensions of the cell design were varied for each cell of the matrix. Over 150 wafers were processed allowing >1000 cells to be evaluated. The pitch was varied between 2-3 mm, the gap between the emitter and BSF varied between 75-150 μ m, and the emitter fraction between 67-80%.

The process flow (shown in Fig. 2) included initial wet cleaning and texturing, followed by Front Surface Field (FSF) diffusion, masking, diffusion and patterning of the emitter and BSF, passivation of both the front and back surfaces of the cell, and finally metallization with screen printing and firing. The rear fingers were fired-through the dielectric layer to contact the diffused surfaces over the full metal print area. Characterization was carried out using standard techniques such as Photoluminescence/ Electroluminescence (PL/EL), Light Beam Induced Current (LBIC), Quasi-Steady-State Photoconductance (QSSPC) and spectral response, as well as by means of 2D simulations to support the experimental work.

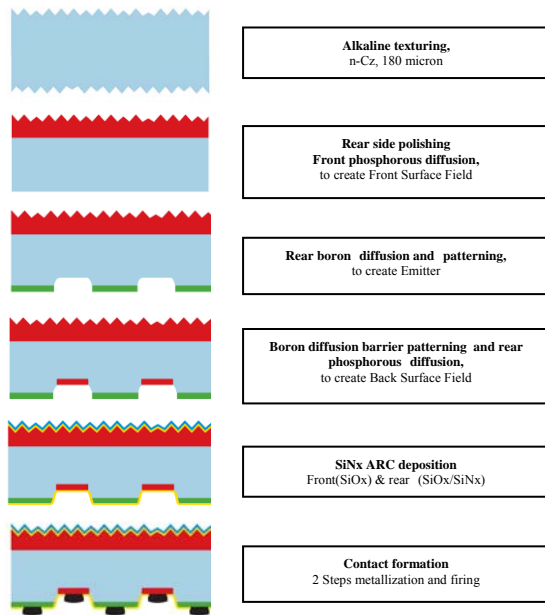


Figure 2: Process flow used for fabricating >19% interdigitated back contact solar cells.

3 RESULTS

3.1 Experimental results

Internal Quantum Efficiency (IQE) and a table summarizing measured parameters corresponding to a best cell of 19.1% efficiency are presented in Figure 3 and Table I. For this cell the emitter fraction was 80%, the pitch was 2 mm and the gap was 75 μm . In this article we present the best cell results, but a more detailed analysis of the experimental results can be found elsewhere [6]. The IQE results are very good approaching unity, with characteristic drops in the blue response mainly due to absorption of the nitride layer, and in the red close to the band gap limit. Superb current collection is shown by a J_{sc} value as high as 41.5 mA/cm^2 , measured using an in-house technique with reference cells allowing for a standard error of $\pm 2\%$. The V_{oc} achieved in this best cell was 641 mV. This value may be limited by the fire through contacts, or non-optimal passivation of the emitter, BSF and gap. Alternative advanced passivation schemes may further improve the V_{oc} . The results also show high Pseudo Fill Factors (PFF) of above 81% but lower Fill Factors (FF) of below 72%, the origin of this significant loss is the topic of our simulations, which will be discussed later.

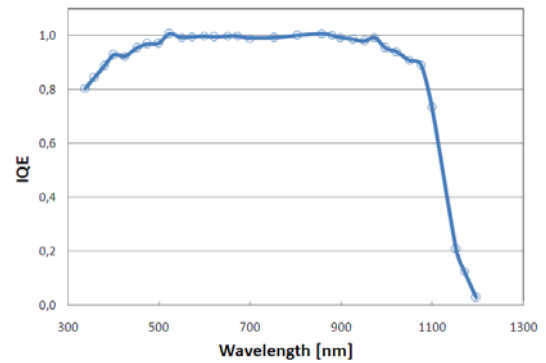


Figure 3: IQE results corresponding to the best IBC cell fabricated.

Pitch (mm)	Area (cm^2)	I_{sc} (A)	J_{sc} (mA/cm^2)	V_{oc} (V)	$J_{sc} * V_{oc}$ ($\text{mA} * \text{V}/\text{cm}^2$)	FF	Eta (%)
2	13,2	0,551	41,5	0,641	26,7	0,715	19,1

Table I: Measured parameters of the best IBC cell.

Although IBC cells avoid optical shading losses by placing the metal grids on the backside of the cell, electrical shading losses still exist. This is due to rear side recombination in the regions of the base fingers. Figure 4 presents the light beam induced current (LBIC) maps on the back of one of the cells. The highest IQE is seen in the region of the emitter, the lowest in the BSF, with intermediate values in the gap. The BSF regions act to electrically shade the minority carriers from travelling to the emitter. Both the experimental and simulation results indicate that reducing the size of the BSF and gap will help to increase the efficiency of the cell, although this can be a challenge for screen printing since the resolution is limited.

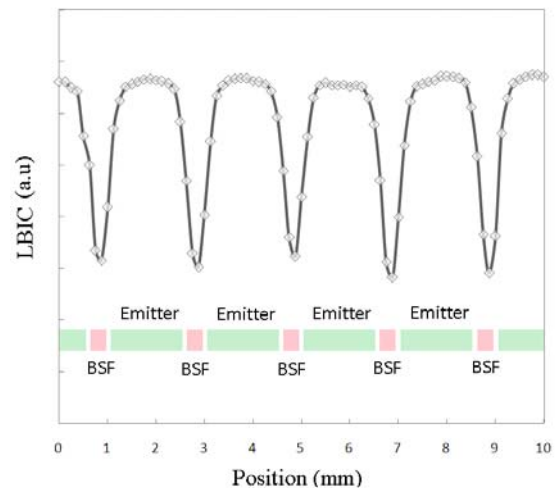


Figure 4: LBIC measurement showing the emitter, gap and BSF regions.

3.2 Simulation results

As shown in Fig. 5, series resistance is present in many forms within the cell, including in the emitter and BSF contact resistance, the emitter and BSF internal resistance, the base resistance through the thickness and parallel to the plane, as well as the series resistance through the FSF.

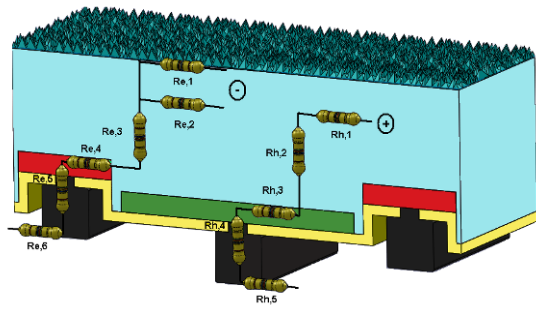


Figure 5. Schematic 3D architecture of the device with a superimposed circuit model showing resistors corresponding to each contribution to the series resistance along the electron and hole paths, respectively. The resistors in the electrons path represent: Re6 (n-metal finger), Re5 (n-contact), Re4 (lateral BSF), Re3 (vertical bulk), Re2 (lateral bulk), and Re1 (lateral FSF); and in the case of the hole path: Rh5 (p-metal finger), Rh4 (p-contact), Rh3 (lateral emitter), Rh2 (vertical base), and Rh1 (lateral bulk). Adapted from [7].

Simulations were carried out analytically to model the total series resistance, R_s , considering relative contributions from individual resistance components within the cell. Model input parameters included a thickness of $150\ \mu\text{m}$, bulk resistivity of $4\ \Omega\text{-cm}$ and experimental sheet resistance values of diffused regions as well as screen-printed line and contact resistances. Figure 6 shows a plot of series resistance versus pitch, including both experimental measurements and the simulations. As expected, the series resistance decreases as the pitch decreases since the carrier path length is shorter. The results indicate that the simulations are in good agreement with the experimental data.

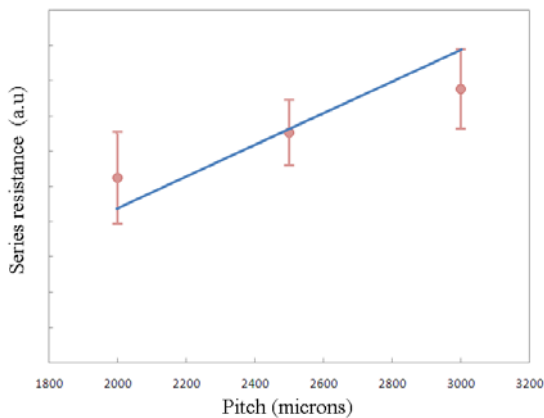


Figure 6: Series resistance versus pitch, showing the experimental data (red dots with standard deviation bars) and the simulation model (blue line).

Figure 7 shows a chart depicting the major contributions to the series resistance deduced from the modeling of a 2 mm pitch cell suggesting that the largest corresponds to the bulk horizontal contribution, which includes the FSF. The second largest contribution is from the sheet resistance of the rear diffused regions, and the third largest from the metallization, with the contact resistance and bulk vertical playing a relatively small role.

If we consider just the three largest contributions; decreasing the resistance of the metallization can be achieved by changing the dimensions of the metal contacts, or lowering the resistivity by using higher conductivity metal. Decreasing the resistance of the back diffused regions is limited by the low recombination needed to obtain a high V_{oc} . However, optimization of the diffusion profile may allow a lower resistance without forfeiting the V_{oc} .

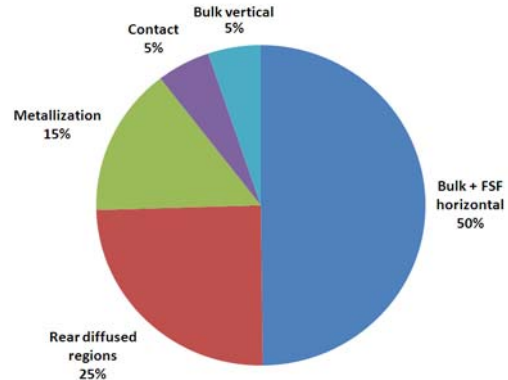


Figure 7: Pie chart showing the relative contributions to the total series resistance corresponding to different series resistance elements within the 2 mm pitch IBC cell. The resistance of the metallization, the semiconductor/metal contact and the resistance of the bulk vertical are also included.

One option to decrease the resistance of the horizontal bulk is to decrease the resistivity of the wafer, although this also increases the recombination, which has previously been shown to lead to a significant reduction of J_{sc} and hence the efficiency of the cell [8]. Another option is to decrease the pitch, since this would decrease the path length for the carriers. However, this would require higher resolution patterning than is currently achievable with screen printing. One final option is to use a high resistivity wafer and maintain low recombination in the base, but to increase the conductivity of the FSF, which acts as a parallel conduction channel.

Figure 8 shows simulation results for the series resistance versus FSF resistivity, varying the base resistivity between $1\text{-}8\ \Omega\text{-cm}$. For these simulations, the resistance due to the back diffused regions, metallization, and contact resistance are kept constant. When the sheet resistance of the FSF is $1000\ \Omega/\square$, the contribution of the lateral transport of the carriers in the base dominates. The graph shows that R_s values for different base conductivities converge for lower sheet resistance FSF values. We can therefore conclude that the influence of bulk resistivity decreases considerably as the conductivity of the FSF increases. This result indicates that by using a FSF with a high conductivity it may be possible to use a high bulk resistivity (e.g. $8\ \Omega\text{-cm}$) with a low recombination, but still obtain a lower series resistance (similar to $1\ \Omega\text{-cm}$). This result is of great interest to increase the fill factor and hence augment the efficiency of the cell, but it is also important to consider the process from an industrial perspective. A higher conductivity FSF would require either a deeper or a higher concentration surface doping. If a deeper FSF is chosen, longer processing times will be required while if

the surface doping is increased higher processing temperatures will be necessary. It should be pointed out that a highly doped FSF will increase front side recombination. Pilot line studies would need to be carried out to evaluate if the efficiency increase obtained by using a higher conductivity FSF out ways a lower production throughput.

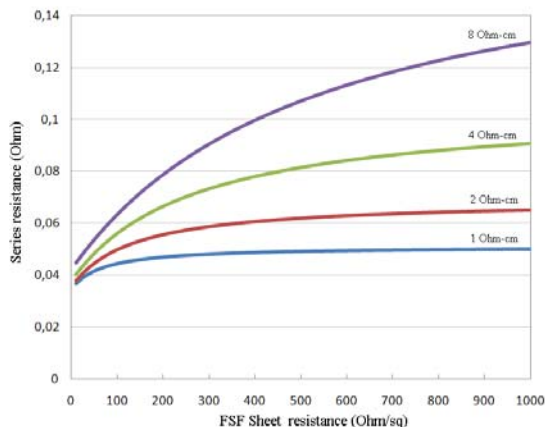


Figure 8: Simulation results showing sheet resistance versus FSF sheet resistance for wafer bulk resistivity varying between 1-8 Ω -cm.

4 CONCLUSIONS AND DISCUSSION

The results show that 19.1% efficiency IBC cells have been successfully fabricated using conventional production techniques such as screen printing for patterning and metallization, wet processing and PECVD. In general the results show higher efficiencies for larger emitter fraction and smaller pitch, with optimum results in this study obtained for an emitter fraction of 80%, and a pitch of 2 mm. The cell was passivated with $\text{SiO}_2+\text{SiN}_x:\text{H}$ for the emitter, BSF and gap, and excellent J_{sc} values of 41.5 mA/cm^2 have been achieved. The IQE results show values approaching unity, which is to be expected for an IBC cell with all the contacts positioned on the back-side and minimal electrical shading losses. The high PFF and low FF indicate that further work needs to be done to optimize the FF , and if the fill factor can be increased to 79% efficiencies of $>21\%$ can be expected.

The results show that the series resistance is dominated by the resistance from the lateral transport of the carriers through the bulk and FSF. Results indicate that it may be possible to significantly lower the series resistance and therefore increase the FF if a low resistance FSF is used, although the diffusion profile would need to be optimized to minimize recombination. Pilot line studies will be carried out to evaluate the feasibility of the low resistance FSF in terms of the increased efficiency versus throughput and production yield.

Although R_s has a direct impact on FF , it may also be influenced by other parameters [9]. Further work needs to be done in order to quantify the relative contribution of R_s to FF and to suggest additional routes that will bring it close to 80%.

In summary the results indicate that two factors may significantly increase the efficiency of these IBC cells: (1) decreasing series resistance, (2) increasing the resolution of the BSF and gap.

As previously discussed, optimizing the process parameters and device configuration can improve the cell performance, particularly by means of reducing series resistance. However, new process technology approaches need to be used if higher efficiency threshold wants to be reached. Improvements such as advanced contact passivation schemes which are essential to boost V_{oc} [1], innovative electrical contact procedures or high resolution patterning can be implemented if alternative process techniques are used. These factors will be investigated at the Siliken high-efficiency pilot production line, which is designed to evaluate both conventional and advanced process technologies for the high-volume fabrication of $>20\%$ efficiency IBC cells. Work at the pilot line is aimed at establishing high-volume production routes that will allow Siliken to integrate production of high-efficiency solar cells as part of current manufacturing activities.

REFERENCES

- [1] P. J. Cousins *et al*, "Gen III: Improved Performance at Lower Cost", 35th IEEE PVSC, 2010, pp 275-277.
- [2] K. Nakamura *et al*, "Development of back contact Si solar cell and module in pilot production line", 23rd EUPVSEC, 2008, pp 1006-1009.
- [3] F. Granek *et al*, "Enhanced Lateral Current Transport Via the Front N^+ Diffused Layer of N-Type High-Efficiency Back-Junction Back-Contact Silicon Solar Cells" Progress in Photovoltaics, **17**, 2009, pp 47-56.
- [4] C. Gong *et al*, "Screen-Printed Aluminum-Alloyed P^+ Emitter on High-Efficiency N-Type Interdigitated Back- Contact Silicon Solar Cells" IEEE Electron Device Letters **31**, 2010, pp 576-578.
- [5] V. D. Mihailetchi, Y. Komatsu, and L. J. Geerlings, "Nitric acid pretreatment for the passivation of boron emitters for n-type base silicon solar cells", Appl. Phys. Lett., **92**, 2008, pp 063510.
- [6] Lamers M.W.P.E *et al*. "Towards 21% Efficient n-CZ IBC Based on Screen Printing" in 26th EU-PVSEC. 2011. Hamburg (Germany).
- [7] S. Kluska *et al*. "Loss Analysis of High-Efficiency Back-Contact Back-Junction Silicon Solar Cells" in 23th EU-PVSEC. 2008. Valencia (Spain).
- [8] F. J Castano *et al*. "Industrially Feasible $>19\%$ Efficiency IBC Cells for Pilot Line Processing", Seattle June 2011.
- [9] M. A. Green, "Solar Cells: Operating Principles, Technology and System Applications", UNSW, Kensington, (1986).