PROJECTE FINAL DE CARRERA

Modelos de simulación para células solares HiT con efecto S-Shape

(*Simulation models for HiT solar cells with S-Shape effect*)

Estudis: Enginyeria Electrònica

Autor: Carlos Montemayor Escudero

Director/a: Santiago Silvestre Berges

Any: 2016

Índice general

Listado de figuras 3
Agradecimientos 5
Resum del Projecte 6
Resumen del Proyecto 7
Abstract 8
Objetivo y alcance 9
1. Introducció 10
1.1 La energía solar fotovoltaica 10
1.2 La célula solar 12
1.3 Tecnologías actuales 13
2. Células solares HIT 15
2.1 Fundamentos principales 17
2.2 Proceso de fabricación 19
2.2.1 Proceso de fabricación de una estructura HIT(p) c-Si con implantación de titanio 20
2.3 Eficiencia energética de las células HIT 28
2.3.1 Pérdidas energéticas 34
2.4 Efecto S-Shape 36
3. Simulación del efecto S-Shape en células solares HIT 39
3.1 Características de las células solares comprendidas en el trabajo 40
3.1.1 Grosor de la capa intrínseca 41
3.1.2 Resistividad del sustrato 42
3.2 Modelos teóricos de simulación PSPICE 43
3.3 Medidas y resultados prácticos de las simulaciones de células HIT con resistividad 0,4 52
3.3.1 Resultados de simulación en células HIT sin implantación de titanio (R=0,4Ω·cm) 53

3.3.2 Resultados de simulación en células HIT con implantación de titanio (R=0,4Ω·cm)..... 61

3.4 Medidas y resultados prácticos de las simulaciones de células HIT con resistividad 1,7..... 69

3.4.1 Resultados de simulación en células HIT sin implantación de titanio (R=1,7Ω·cm)..... 70

3.4.2 Resultados de simulación en células HIT con implantación de titanio (R=1,7Ω·cm)..... 76

3.5 Respuestas en oscuridad de las muestras con implantación de Titanio 82

4. Conclusiones..... 84

5. Referencias..... 88

Listado de figuras

FIGURAS

FIGURA 1.1: CAPACIDAD DE GENERACIÓN DE POTENCIA DE RED INSTALADA EN LA UNIÓN EUROPEA ENTRE 2000-2013 [1]. 11
FIGURA 1.2: EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LA POTENCIA FOTOVOLTAICA INSTALADA EN EL MUNDO DEL AÑO 2000 AL 2013 (MW) [1]. 12
FIGURA 1.3: GRÁFICA QUE MUESTRA LA EVOLUCIÓN DE LA EFICIENCIA DE LAS CÉLULAS SOLARES POR TECNOLOGÍA Y FABRICANTE HASTA 2015 [2].....13
FIGURA 2.1: DATASHEET DE MÓDULO SOLAR HIT COMERCIAL DE SANYO ELECTRIC. 16
FIGURA 2.2: MODELO DE CÉLULA CON ESTADOS INTERMEDIOS EN LA BANDA PROHIBIDA. SE APRECIAN LAS DOS VÍAS PARA LA CREACIÓN DEL PAR ELECTRÓN-HUECO: MEDIANTE LA ABSORCIÓN DE UN SOLO FOTÓN PARA UNA TRANSICIÓN DE LA BANDA DE VALENCIA A LA BANDA DE CONDUCCIÓN; Y MEDIANTE LA ABSORCIÓN DE DOS FOTONES DE MENOS ENERGÍA, QUE EXCITARÍAN EL ELECTRÓN DE LA BANDA DE VALENCIA AL ESTADO INTERMEDIO, Y DEL ESTADO INTERMEDIO A LA BANDA DE CONDUCCIÓN. 17
FIGURA 2.3: MODELO DE BANDAS DE UNA CÉLULA SOLAR DE BANDA INTERMEDIA. LOS CONECTORES SE ENCUENTRAN EN LOS EMISORES DE N Y P. SE MUESTRAN LOS POSIBLES PROCESOS DE EXCITACIÓN Y LAS DIFERENCIAS ENTRE BANDAS ENERGÉTICAS.18
FIGURA 2.4: ESTRUCTURA CONVENCIONAL DE UNA CÉLULA DE ESTRUCTURA HIT [6].....19
FIGURA 2.5: ESTRUCTURA HIT SOBRE SUSTRATO C-SI TIPO P CON IMPLANTACIÓN DE TITANIO [6]. 21
FIGURA 2.6: SECUENCIA DE PROCESOS QUE INTERVIENEN EN EL PASO 5 [6]. 22
FIGURA 2.7: SECUENCIA DE PROCESOS QUE INTERVIENEN EN EL PASO 6 [6]. 23
FIGURA 2.8: PERFIL DE CONCENTRACIÓN DE TI EN LOS SUSTRATOS C-SI TIPO P DE LAS MUESTRAS ELABORADAS [6]. 24
FIGURA 2.9: EQE DE LAS MUESTRAS CON SUSTRATO C-SI TIPO P DE 0.4Ω Y UN ESPESOR DE 5NM DE LA CAPA INTRÍNSECA A-SICX:H [6]. 25
FIGURA 2.10: A LA IZQUIERDA: CARACTERÍSTICA I-V EN ILUMINACIÓN DE LAS CÉLULAS HIT_PSI SOBRE SUSTRATO DE 0,4 Ω CON UN ESPESOR DE 5 NM DE LA CAPA INTRÍNSECA. A LA DERECHA: CARACTERÍSTICA I-V EN OSCURIDAD DE LAS MISMAS CÉLULAS [6]. 26
FIGURA 2.11: EVOLUCIÓN DEL PARÁMETRO N_D PARA LAS MUESTRAS HIT_PSI SOBRE SUSTRATO DE 0,4 Ω CON UN ESPESOR DE 5 NM DE LA CAPA INTRÍNSECA [6]. 27
FIGURA 2.12: EVOLUCIÓN TEMPORAL APROXIMADA DE LA EFICIENCIA DE LAS CÉLULAS HIT [14].....28
FIGURA 2.13: ESQUEMAS DE LAS DIFERENTES CÉLULAS HETEROUNIÓN Y HIT USADAS EN EL ESTUDIO DE N. DWIVEDI, S. KUMAR, A. BISHT, K. PATEL, S. SUDHAKAR EN EL AÑO 2012 [14]. 29
FIGURA 2.14: PARÁMETROS DE LAS CÉLULAS OPTIMIZADAS CON LOS MEJORES GROSORES DE CAPAS. SIMULACIÓN REALIZADA CON LA HERRAMIENTA AFORS-HET. [14].....30
FIGURA 2.15: ESTRUCTURA DE LA CÉLULA SIMULADA EN EL TRABAJO "*SIMULATION AND OPTIMIZATION OF THE PERFORMANCE IN HIT SOLAR CELL*" DE BOUZAKI MOHAMMED Y BENYOUCEF BOUMEDIENE [15].....32
FIGURA 2.16: EN LAS GRÁFICAS SE MUESTRAN LOS EFECTOS DE LA CONCENTRACIÓN DE DOPADOS EN EL RENDIMIENTO DE LA CÉLULA HIT. CAPAS DE IZQUIERDA A DERECHA Y DE ARRIBA ABAJO: C-SI (P), A-SI:H(N), A-SI:H(P) [15]. 33
FIGURA 2.17: PÉRDIDAS ÓPTICAS, DE RECOMBINACIÓN Y RESISTIVAS QUE PUEDEN PRODUCIRSE EN UNA CÉLULA HIT. 34
FIGURA 2.18: RESPUESTA I-V EN OSCURIDAD E ILUMINACIÓN DE LAS MUESTRAS HT-PGAAS CON CAPAS INTRÍNSECAS DE A-GAAS O GAASTI DE 5NM DE ESPESOR Y DEPOSITADAS A 200 ºC [6] 36
FIGURA 2.19: REPRESENTACIÓN SEMI-LOGARITMICA DE LAS RESPUESTAS PRESENTADAS EN LA FIGURA 11. 36
FIGURA 2.20: CURVA J-V SIMULADA BAJO ILUMINACIÓN AM1.5, EN UNA CÉLULA ITO/(P)A-SI:H / (I)A-SI:H /(N)C-SI/METAL. A: OFFSET DE BANDA ΔEC = 0, ΔEV = 0.6; B: OFFSET DE BANDA ΔEC = 0.4, ΔEV = 0.2 [10] 37
FIGURA 2.21: ESQUEMA DE UNA CÉLULA A-SI:H (N) / A-SI:H (I) / C-SI (P) / A-SI:H (P+) /AG [11] 37
FIGURA 2.22: CURVA J-V DE LA CÉLULA SOLAR HIT CON DIFERENTE CONCENTRACIÓN DE DOPADO EN LA CAPA EMISORA A-SI:H (N). EN EL CUADRO INTERNO SE OBSERVA EL DIAGRAMA DE BANDAS DE LA CÉLULA CON BAJA Y ALTA CONCENTRACIÓN DE DOPADO BAJO UNA ILUMINACIÓN DE 100 MW/CM2 [11]. 38

FIGURA 3.1: IZQUIERDA: DIAGRAMA DE BANDAS DE LAS CÉLULAS HIT_PSI CON IMPLANTACIÓN DE TI PARA DOS ESPESORES DISTINTOS DE LA CAPA INTRÍNSECA DONDE SE MUESTRA EL EFECTO TÚNEL ENTRE LA BI Y LA BC. DERECHA: EFECTO DEL GROSOR DE LA CAPA INTRÍNSECA EN VOC EN CONDICIONES STC DE ILUMINACIÓN. [6] 41
FIGURA 3.2: IZQUIERDA: DIAGRAMA DE BANDAS DE LAS CÉLULAS HIT_PSI CON IMPLANTACIÓN DE TI CON VARIACIÓN DE LA RESISTIVIDAD DEL SUSTRATO C-SI. DERECHA: INFLUENCIA DE LA RESISTIVIDAD DEL SUSTRATO EN CONDICIONES STC EN ILUMINACIÓN. [6] 42
FIGURA 3.3: ESQUEMA DE UNA CÉLULA FOTOVOLTAICA PARA PODER SER REPRESENTADA EN PSICE. 43
FIGURA 3.4: ESQUEMA DE UNA CÉLULA FOTOVOLTAICA CON DIODO EN INVERSA. 44
FIGURA 3.5: ESQUEMA DE UNA CÉLULA FOTOVOLTAICA CON DIODO EN INVERSA EN SERIE CON D1. 44
FIGURA 3.6: ESQUEMA DE UNA CÉLULA SOLAR CON COMBINACIÓN DE CIRCUITO DE DIODO INVERSA MÁS RESISTENCIA *SHUNT*. 45
FIGURA 3.7: REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE UN EFECTO *S-SHAPE* DONDE PUEDE OBSERVARSE QUE LA DISTORSIÓN SOLO SE PRODUCE DURANTE UN INTERVALO DE TENSIÓN. 46
FIGURA 3.8: ESQUEMAS DE CÉLULAS SOLARES CON FUENTES CONTROLADAS CONMUTADAS. 47
FIGURA 3.9: ESQUEMA DE CÉLULA SOLAR CON FUENTE DE CORRIENTE CONTROLADA POR TENSIÓN. 47
FIGURA 4.1: CIRCUITO EQUIVALENTE ESTÁNDAR DE UNA CÉLULA FOTOVOLTAICA. 85
FIGURA 4.2: MODELO CIRCUITAL EQUIVALENTE TENIENDO EN CUENTA LAS PÉRDIDAS POR RECOMBINACIÓN PRODUCIDAS EN LAS CÉLULAS CON HETEROUNIÓN C-SI / A-SI COMO EL CASO DE LAS CÉLULAS HIT [19] 86

TABLAS

TABLA 3.1: LISTADO DE CÉLULAS HIT ESTUDIADAS DE LA TESIS DE ALFRED BORONAT, CON CADA UNA DE SUS CARACTERÍSTICAS. PUEDE OBSERVARSE UNA CÉLULA CON ORIENTACIÓN DE LUZ RADIADA IZQUIERDA, DADO QUE NO SE DISPONÍA DE UNA CON ORIENTACIÓN DERECHA. 40
TABLA 3.2: LISTADO DE CÉLULAS HIT ESTUDIADAS, CON LA DIFERENCIA DE RESISTIVIDAD DEL SUSTRATO ENTRE CADA UNA. 42

GRÁFICAS

GRÁFICA 3.1: CARACTERÍSTICA I-V Y CURVA DE POTENCIA DE UNA CÉLULA SOLAR TÍPICA. SIMULACIÓN REALIZADA CON LA HERRAMIENTA PSPICE Y GRAFICADO MEDIANTE EXCEL. 39
GRÁFICA 3.2: SIMULACIÓN DE CÉLULA HIT CON FUENTES DE CORRIENTE CONMUTADAS EN FUNCIÓN DE LA TENSIÓN DE SALIDA. 48
GRÁFICA 3.3: SIMULACIÓN PSPICE DE DIVERSAS CÉLULAS HIT DE DIFERENTE GROSOR Y ORIENTACIÓN DE LA ILUMINACIÓN, MEDIANTE EL CIRCUITO DE LA FUENTE CONTROLADA POR TENSIÓN. 49
GRÁFICA 3.4: FUNCIÓN POLINÓMICA DE TERCER GRADO DEL EFECTO *S-SHAPE* DE LA MUESTRA HIT_PSI_9FZSINTI_5NM_ASI_DCH_LUZ 50
GRÁFICA 3.5: RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DE LA CÉLULA HIT_PSI_9FZSINTI_5NM_ASI_DCH_LUZ CON FUENTE CONTROLADA POR UNA FUNCIÓN POLINÓMICA. 51

Agradecimientos

Primero, quería agradecer este trabajo especialmente a mis padres y hermano, por su paciencia y apoyo continuo que han mostrado hacía mí estos últimos años. También a Marina por estar a mi lado y darme toda la fuerza que necesitaba.

Tambíen quiero agradecer a mi tutor Santiago Silvestre, por ofrecerme este proyecto, por ayudarme a hacerlo realdiad y por apoyarme en todas las dudas que me han surgido al respecto. También quería agradecer su paciencia y comprensión por el tiempo que me ha supuesto cerrar el trabajo.

Por último, y no por ello menos importante, agradecer a mis compañeros de clase por los buenos años que hemos pasado juntos durante la carrera, tanto dentro como fuera de las aulas.

Resum del Projecte

En projecte consisteix en un estudi de models elèctrics per a la simulació de la característica corrent-tensió de les cèl·lules solars HiT (*Heterojunction with Intrinsic Thin Layer)* que presenten un efecte *S-Shape*. Aquest efecte redueix el factor de forma de la característica I-V, i com a conseqüència, també es redueix l'eficiència de conversió.

El treball s'estructura principalment en tres parts. Una primera part d'introducció teòrica a l'energia fotovoltaica i a les cèl·lules solars de tipus HiT, així com el seu procés de fabricació i les seves característiques principals.

La segona part representa l'estudi realitzat sobre els models elèctrics per a la simulació de la característica corrent-tensió per aquest tipus de cèl·lula solar que presenta l'efecte *S-Shape*.

Per últim, es mostren els resultats de les simulacions de la característica corrent-tensió realitzades a partir dels circuits elèctrics dissenyats. Es comparen els resultats amb les característiques I-V reals de les cèl·lules solars i es calcula l'error entre les dues.

Resumen del Proyecto

El proyecto consiste en un estudio de modelos eléctricos para la simulación de la característica corriente-tensión de las células solares HiT (*Heterojunction with Intrinsic Thin Layer*) que presentan un efecto *S-Shape*. Este efecto reduce el factor de forma de la característica I-V, y consecuentemente, la eficiencia de conversión.

El trabajo se estructura principalmente en tres partes. Una primera parte de introducción teórica a la energía fotovoltaica y a las células solares de tipo HiT, así como su proceso de fabricación y sus características principales.

La segunda parte representa el estudio realizado sobre los modelos eléctricos para la simulación de la característica corriente-tensión para este tipo de célula solar que presenta el efecto *S-Shape*.

Por último, se muestran los resultados de las simulaciones de la característica corriente-tensión realizadas a partir de los circuitos eléctricos diseñados. Se comparan los resultados con las características I-V reales de las células solares y se calcula el error entre las dos.

Abstract

The project is a study of electrical models for the simulation of the current-voltage characteristic in HiT solar cells (Heterojunction with Intrinsic Thin Layer) with S-Shape effect. This effect reduces the form factor of the characteristic, and consequently, the conversion efficiency.

This work is mainly divided in three parts. The first one, is a theoretical introduction to photovoltaics and HiT solar cells, its manufacturing process and its main characteristics.

The second one, is a study of models of electric circuits for the simulation of the current-voltage characteristic in HiT solar cells with S-Shape effect.

In the last one, you can see the simulation results of the current-voltage characteristic from the designed models. The results are compared with the I-V characteristics of the real solar cells and the mathematical error between them.

Objetivo y alcance

El objetivo del trabajo es principalmente diseñar unos modelos eléctricos que permitan representar la característica corriente-tensión de unas células solares HiT que presentan un efecto en la forma conocida como *S-Shape*.

El efecto *S-Shape* ha sido estudiado por muchas personas desde su descubrimiento, y aun en la actualidad se tienen dudas de porqué se produce y cómo se mitiga. Mediante el diseño de circuitos eléctricos se espera también ofrecer un acercamiento a este efecto para su posterior estudio y que pueda utilizarse como objeto de posteriores trabajos en la materia.

Para realizar las simulaciones se ha utilizado la versión estudiante y libre de la herramienta OrCad PSpice 9.1. Esta versión representa algunas limitaciones respecto a la versión de completa de dicho *software*, como puede ser en librerías, caracterización de dispositivos, generadores, optimización de circuitos o número de dispositivos disponibles. El uso de la versión completa de PSpice podría permitir la simulación de efectos parásitos y resultados más cercanos a la realidad. No obstante, la versión estudiante ha permitido realizar las simulaciones deseadas y cumplir con el objetivo del trabajo.

1. Introducció

1.1 La energía solar fotovoltaica

La electricidad es una de las principales formas de energía utilizadas en la sociedad actual. Gracias a ella podemos disponer de iluminación, comunicaciones, transporte y métodos de refrigeración, entre otros.

Debido al incremento del número de dispositivos electrónicos y al desarrollo de la tecnología, existe cada vez más demanda de energía eléctrica. En la actualidad, toda esta electricidad se obtiene principalmente de combustibles fósiles, que son fuentes de energía que presentan diversos inconvenientes como el decremento de sus reservas, la desigual distribución geográfica y la contaminación ambiental.

Por todo esto, en las últimas décadas se ha planteado el uso de recursos energéticos alternativos que resulten más sostenibles. Podemos diferenciar, entonces, entre fuentes de energía renovable y no renovable:

- Las energías renovables son aquellas que se obtienen de fuentes naturales virtualmente inagotables, porque contienen una gran cantidad de energía o porque se regeneran a la misma velocidad o más de la que se consume. Dentro de este grupo podemos encontrar las energías que se obtienen por ejemplo de la iluminación solar, del viento, de las corrientes de agua, de las mareas o de la biomasa.

- Las energías no renovables pueden definirse como las energías que utilizan recursos que se encuentran en la naturaleza en cantidades limitadas y que pueden llegar a agotarse con el tiempo. Las principales son las obtenidas por combustibles fósiles o nucleares.

En la siguiente gráfica obtenida del estudio del mercado global de EPIA (European Photovoltaic Industry Association), puede observarse la cantidad de GW instalada en la Unión Europea desde el año 2000 hasta el 2013 para las diferentes fuentes energéticas:

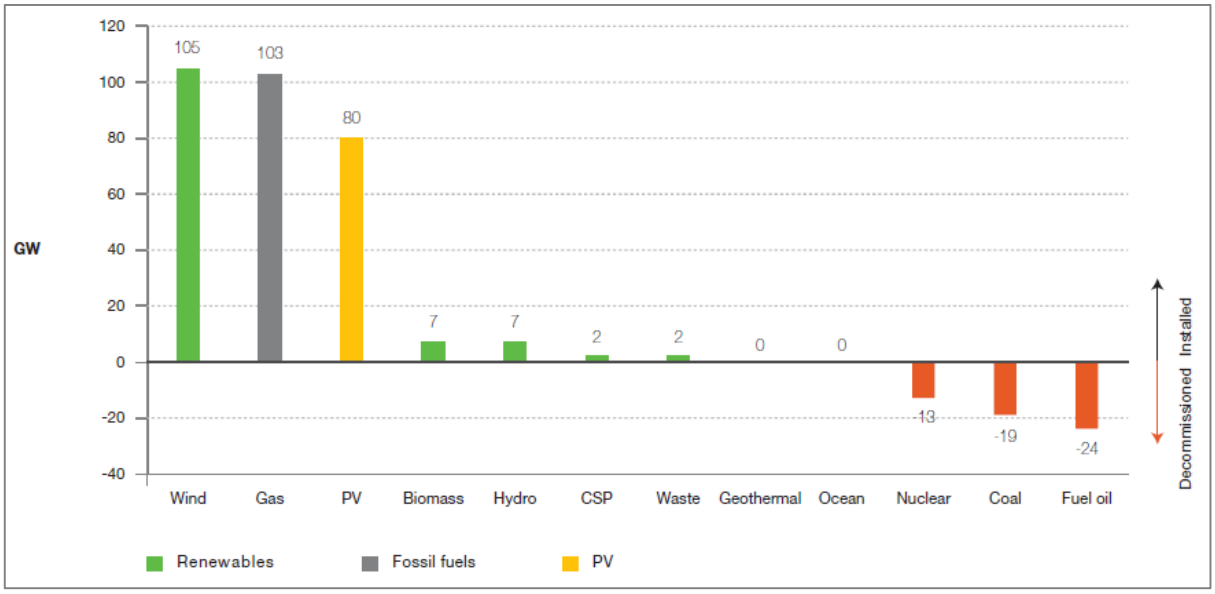


Figura 1.1: Capacidad de generación de potencia de red instalada en la Unión Europea entre 2000-2013 [1].

En la gráfica pueden verse tres energías claramente destacables durante este periodo del siglo XXI, la energía eólica, la energía fósil obtenida del gas, y la energía solar fotovoltaica (PV).

La energía solar fotovoltaica es aquella que genera energía eléctrica a partir de la iluminación solar, haciendo uso de materiales semiconductores. Los dispositivos que captan los fotones de la iluminación solar se llaman células solares.

Las principales ventajas de la energía solar fotovoltaica son que utiliza una fuente natural virtualmente inagotable, es modular, puede instalarse casi en cualquier sitio y es segura y no contamina durante su funcionamiento. En cambio, presenta algunos inconvenientes como su alto coste de instalación, que la luz solar es una energía relativamente de baja densidad y problemas en su almacenaje y uso en periodos donde no hay sol. A pesar de estos inconvenientes, y gracias a los incentivos que ha dado el gobierno para convertirlo en un negocio rentable, la energía solar fotovoltaica ha tenido un gran crecimiento en los últimos años, sobre todo en Europa.

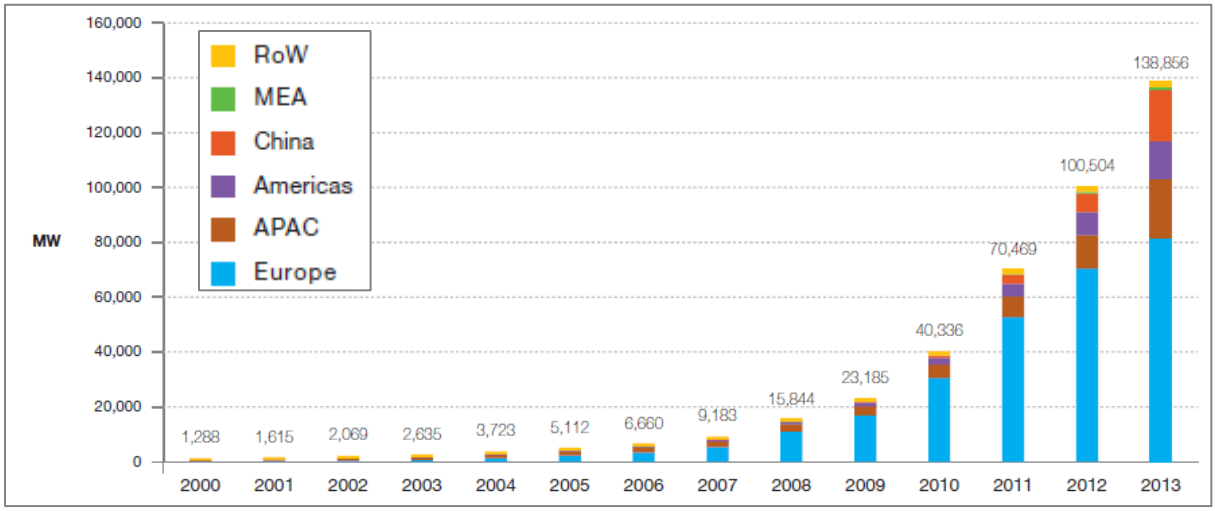


Figura 1.2: Evolución temporal de la potencia fotovoltaica instalada en el mundo del año 2000 al 2013 (MW) [1].

1.2 La célula solar

Las células solares están formadas por materiales semiconductores. La misión principal de estos dispositivos es transformar la energía solar en energía eléctrica.

Cuando incide sobre la célula una radiación luminosa con una energía en los fotones suficiente, dependiendo del material semiconductor, los electrones de valencia se desprenden del átomo. Este efecto es conocido como efecto fotovoltaico.

Una vez producida la ruptura del par electrón-hueco del átomo causada por el efecto fotovoltaico, es posible la recombinación por la existencia de un defecto en la estructura cristalina del material. Para evitarlo, se crea en el interior un campo eléctrico que separa los dos tipos de portadores. Esto se consigue mediante una unión P-N. De esta forma, se crea una corriente eléctrica que atraviesa la célula solar.

Para poder aprovechar todas las cargas libres posibles, debe trabajarse con una estructura cristalina con el menor número de defectos posibles. Por este motivo se utilizan normalmente obleas de silicio puro cristalino.

Las cargas libres generadas se desplazan mediante difusión por el material. A causa de la radiación solar, en la zona de carga espacial de la

unión P-N también se generan cargas libres, que son movidas a su respectivo lugar (zona P o N) mediante el campo eléctrico existente.

Cuando la célula solar se encuentra en circuito abierto, la acumulación de cargas genera una tensión, llamada tensión de circuito abierto (VOC).

Por otro lado, si la célula está cortocircuitada, se genera una corriente en sentido interno N-P llamada corriente de cortocircuito (ISC). Esta corriente tiene el mismo sentido que la corriente de saturación inversa de algunos dispositivos semiconductores, como la del diodo, solo que en este caso se trata de un dispositivo generador.

1.3 Tecnologías actuales

Con el fin de reducir costes en la tecnología fotovoltaica, hace falta que se desarrolle de forma continua y se encuentren nuevas formas de implantación y se investiguen nuevos materiales. Uno de los puntos más importantes a tener en cuenta en el desarrollo de la tecnología fotovoltaica, es el aumento de la eficiencia de conversión energética.

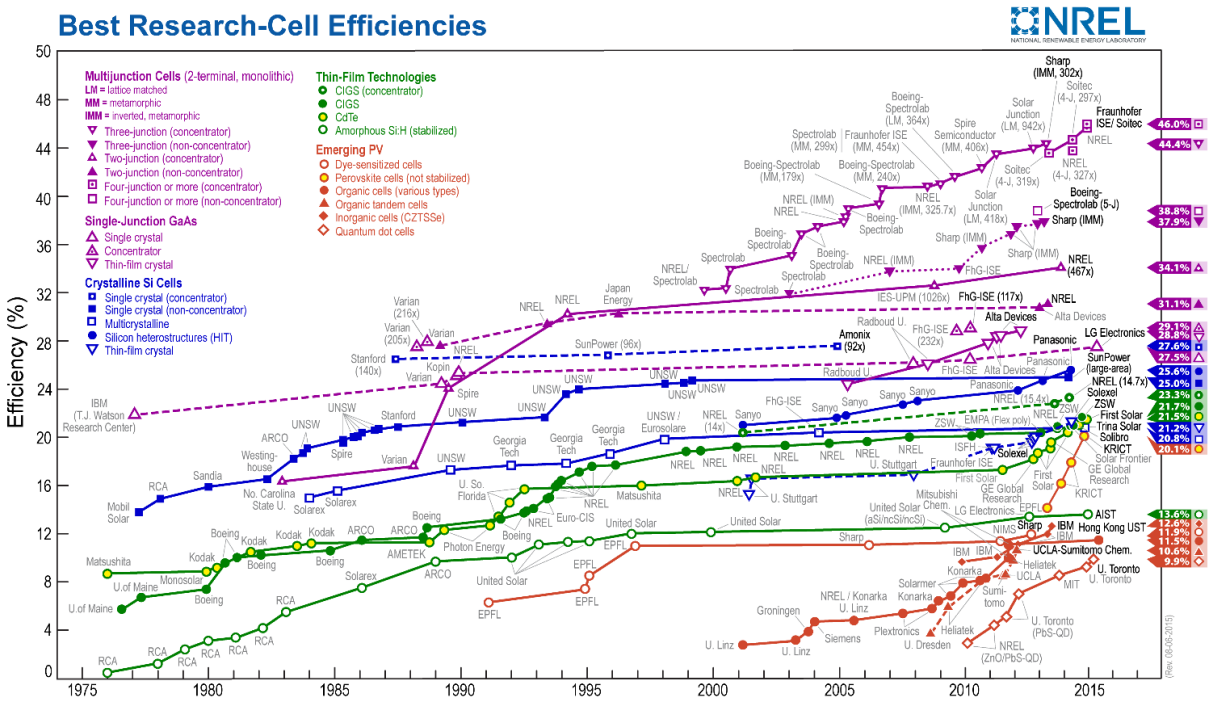


Figura 1.3: Gráfica que muestra la evolución de la eficiencia de las células solares por tecnología y fabricante hasta 2015 [2].

A continuación se detallan algunas de las tecnologías más importantes actualmente.

- **Célula fotovoltaica multiunión**. Célula solar formada por múltiples uniones p-n de distintos materiales semiconductores. En principio de funcionamiento se basa en que cada material semiconductor produce corriente eléctrica a una longitud de onda distinta, por lo que la eficiencia de conversión es mayor.
  El record en 2015 lo obstenta la empresa Soitec con una célula solar formada por cuatro uniones, con la cual se ha conseguido una eficiencia del 46%.

- **Célula fotovoltaica de película fina**. Célula solar formada por el depósito de una o más capas delgadas de material fotovoltaico en un sustrato. El record en esta tecnología lo tiene una célula solar CIGS a una concentración de 14,7 soles, fabricada por US NREL, obteniendo una eficiencia de 23,3%.

- **Célula fotovoltaica de silicio cristalino**. Son células solares formadas por obleas de cristales o granos cristalinos de silicio. Estas células han llegado a alcanzar una eficiencia de hasta el 27,6% usando concentración (Amonix) y de 25,6% sin concentración (célula HIT de Panasonic).

- **Tecnologías emergentes**. Otras tecnologías solares formadas por materiales como la perovskita, materiales orgánicos o con tintas sensibilizadas. La mayor eficiencia en estas tecnologías se ha encontrado en las células de perovskita, con un record de 20,1% (KRICT).

2. Células solares HIT

Dentro de las células solares de silicio cristalino encontramos las células de heterounión con capa intrínseca (HIT).

Esta tecnología fue desarrollada en un primer momento por SANYO Electric, con la idea de aumentar la capacidad de producción de energía a partir de las células solares [3]. Los cuatro objetivos principales eran:

1. Mejorar la eficiencia de conversión energética.
2. Usar sustratos finos de forma eficiente.
3. Mejorar la eficiencia del coeficiente de temperatura de estos materiales.
4. Desarrollar un módulo bifacial.

El resultado fue una estructura que ha conseguido llamar la atención por varios motivos:

1. Posibilita de forma simultánea una excelente pasivación de la superficie y una unión p-n, resultado en una gran eficiencia.
2. Requiere procesos de fabricación de baja temperatura (<200º), lo que previene cualquier degradación de la calidad del sustrato cristalino (bulk), cosa que ocurre con los procesos que requieren una temperatura elevada.
3. Comparada con otras células solares convencionales, posee un mejor coeficiente de temperatura en altas tensiones de circuito abierto.

En las siguientes imágenes, puede verse uno de los módulos comerciales de SANYO con esta tecnología:

HIT-N235SE10
HIT-N230SE10
HIT-N225SE10

The HIT cell and module have very high conversion efficiency in mass production.

Model	Cell Efficiency	Module Efficiency
HIT-N235SE10	21.1%	18.6%
HIT-N230SE10	20.7%	18.2%
HIT-N225SE10	20.2%	17.8%

HIT cell technology

The SANYO HIT(Heterojunction with Intrinsic Thin layer) solar cell is made of a thin mono crystalline silicon wafer surrounded by ultra-thin amorphous silicon layers. This product provides the industry's leading performance and value using state-of-the-art manufacturing techniques.

Environmentally-Friendly Solar Cell

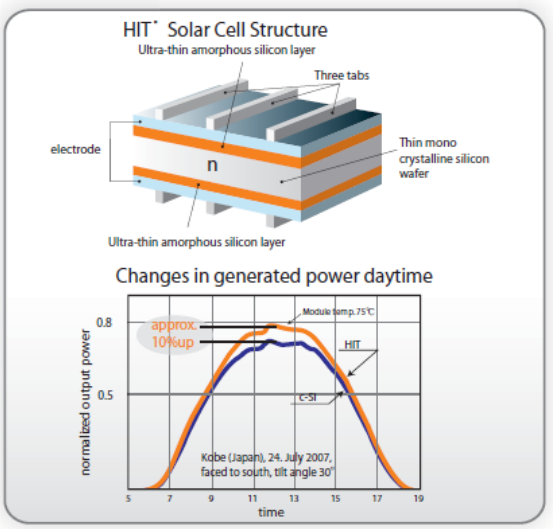
More Clean Energy
HIT can generate more clean Energy than other conventional crystalline solar cells.

Special Features

SANYO HIT solar modules are 100% emission free, have no moving parts and produce no noise.The dimensions of the HIT modules allow space-saving installation and achievement of maximum output power possible on given roof area.

High performance at high temperatures

Even at high temperatures, the HIT solar cell can maintain higher efficiency than a conventional crystalline silicon solar cell.



Electrical data (at STC)

	Models HIT-NxxxSE10		
	235	230	225
Maximum power (Pmax) [W]	235	230	225
Max. power voltage (Vmp) [V]	43.0	42.3	41.6
Max. power current (Imp) [A]	5.48	5.45	5.42
Open circuit voltage (Voc) [V]	51.8	51.2	50.6
Short circuit current (Isc) [A]	5.84	5.83	5.83
Maximum over current rating [A]		15	
Output power tolerance [%]		+10/-5	
Maximum system voltage [V]		1000	

Note: Standard Test Conditions: Air mass 1.5, Irradiance = 1000W/m², cell temperature = 25°C

Temperature charcteristics	235	230	225
Temperature (NOCT) [°C]	44.0	44.0	44.0
Temperature coefficient of Pmax [%/°C]	-0.30	-0.30	-0.30
Temperature coefficient of Voc [V/°C]	-0.130	-0.128	-0.127
Temperature coefficient of Isc [mA/°C]	1.75	1.75	1.75

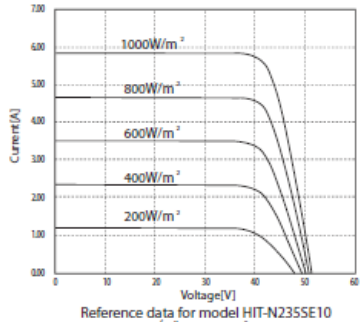
At NOCT	235	230	225
Maximum power (Pmax) [W]	178	174.3	170.1
Max. power voltage (Vmp) [V]	40.5	39.9	39.2
Max. power current (Imp) [A]	4.41	4.38	4.34
Open circuit voltage (Voc) [V]	48.9	48.3	47.7
Short circuit current (Isc) [A]	4.70	4.70	4.70

Note:Nominal Operating Cell Temperature : Air mass 1.5 spectrum, Irradiance = 800W/m², Air temperature = 20°C , wind speed 1 m/s

At low irradiance	235	230	225
Maximum power (Pmax) [W]	44.9	43.8	42.9
Max. power voltage (Vmp) [V]	41.0	40.6	40.1
Max. power current (Imp) [A]	1.09	1.08	1.07
Open circuit voltage (Voc) [V]	48.4	47.8	47.2
Short circuit current (Isc) [A]	1.17	1.17	1.17

Note: Low Irradiance: Air mass 1.5 spectrum, Irradiance = 200W/m², cell temperature = 25°C

Dependence on irradiance



Reference data for model HIT-N235SE10
(Cell temperature: 25°C)

SANYO

SANYO Electric Co.,Ltd.
Solar Division
http://www.sanyo.com/solar/

Figura 2.1: Datasheet de módulo solar HIT comercial de SANYO Electric.

2.1 Fundamentos principales

Las células HIT son células solares de múltiples niveles de energía, que generan portadores libres a partir de la absorción de fotones con energía inferior a la de la banda prohibida del semiconductor. Esto se consigue creando estados energéticos intermedios dentro de la banda prohibida del material.

Como bien indica el nombre, la célula de heterounión con capa intrínseca está compuesta por la unión de materiales semiconductores diferentes con otro material intrínseco que crea una banda intermedia.

El concepto de las células solares de banda intermedia (IBSC) radica en la teoría de Wolf en el año 1960 sobre la inserción de impurezas en las células solares. La teoría consistía en incrementar la eficiencia mediante la inserción de estados intermedios dentro de la banda prohibida del semiconductor. Esto permitiría la absorción de fotones de baja energía y causaría que estos contribuyeran en la generación de la corriente fotogenerada.

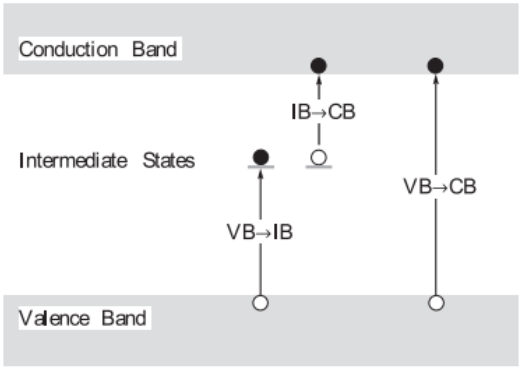


Figura 2.2: Modelo de célula con estados intermedios en la banda prohibida. Se aprecian las dos vías para la creación del par electrón-hueco: mediante la absorción de un solo fotón para una transición de la banda de valencia a la banda de conducción; y mediante la absorción de dos fotones de menos energía, que excitarían el electrón de la banda de valencia al estado intermedio, y del estado intermedio a la banda de conducción.

Sin embargo, más tarde otros estudios [4] demostraron que la inserción de estados intermedios mediante impurezas, creaban centros de recombinación no radiativas que causaban la degradación de la eficiencia. Se llegó a la conclusión [5] que los problemas existentes podrían solventarse si las impurezas interactuaran lo suficientemente fuerte como

para crear una banda en el material. En esas condiciones, los estados energéticos asociados a los niveles intermedios estarían deslocalizados, causando que las recombinaciones radiativas predominen sobre las no radiativas.

Antonio Luque propuso en 1997 el concepto de la Banda Intermedia (BI) [5]. El hecho de crear una banda intermedia en el material implica que los estados energéticos intermedios están deslocalizados, por lo que no actúan como centros de recombinación Shockley Read Hall. Este concepto es importante para la creación exitosa de células solares de banda intermedia.

Es igualmente importante que la BI esté térmicamente separada de la banda de valencia y la banda de conducción, de manera que el número de electrones en la BI solo puedan ser cargados a través de la absorción o emisión de fotones. Este argumento permite introducir tres niveles de cuasi-Fermi, uno por cada banda, como puede verse en la siguiente figura. Se asume que estos niveles cuasi-Fermi con constantes a lo largo de todo el dispositivo.

Asimismo, la BI debe estar aislada de los contactos externos para evitar que la corriente fluya directamente por esta. Como el voltaje de salida de una célula depende de la diferencia entre los niveles de cuasi-Fermi, el voltaje de salida estaría determinado por la energía de la banda prohibida EG. Este hecho permitiría la preservación del voltaje de salida del dispositivo [6].

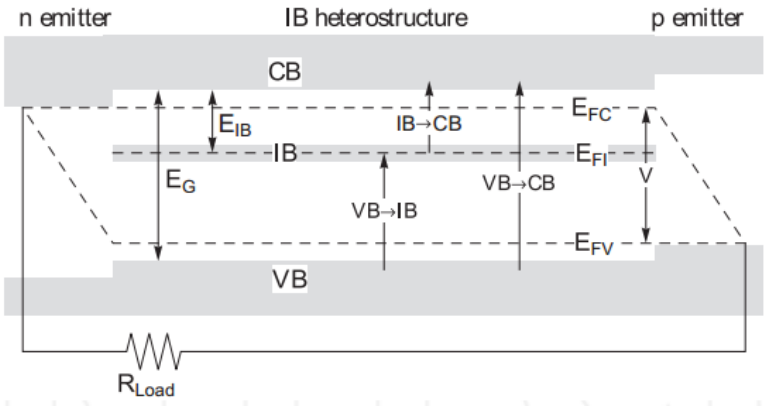


Figura 2.3: Modelo de bandas de una célula solar de banda intermedia. Los conectores se encuentran en los emisores de N y P. Se muestran los posibles procesos de excitación y las diferencias entre bandas energéticas.

Según el estudio de A. Luque y A. Martí de 1997 [5], aún pueden identificarse dos conceptos fundamentales más de las células solares de BI.

Para conseguir un funcionamiento óptimo de la célula solar de BI, la banda intermedia debe estar semi-llena de portadores. De esta manera, existen estados vacíos que pueden aceptar los electrones desde la banda de valencia, y contiene electrones que pueden ser movidos hacia la banda de conducción. Para ello, es necesario que el nivel de cuasi-Fermi E_{FI} se encuentre en el interior de la BI. El otro concepto, explica que para obtener la máxima eficiencia, debe trabajarse con valores E_G de 1,95 eV y de valores E_{FI} a 0,7 eV de distancia de una de las dos bandas (BC o BV). Además, cada fotón solo debe ser absorbido por una de las dos bandas, evitando solapamiento entre coeficientes de absorción.

2.2 Proceso de fabricación

En esta sección se describirá el proceso de fabricación de las estructuras de heterounión con capa intrínseca (HIT).

La fabricación de estas células se basa en la deposición de capas amorfas sobre sustratos cristalinos, formando la unión pn. La incorporación de la capa intrínseca entre el emisor y el sustrato cristalino (bulk) permite mejorar la calidad de la célula reduciendo la recombinación. A parte de la ventaja de estas células de tener una gran eficiencia (alrededor del 20%), el proceso de fabricación de una estructura HIT de silicio puede realizarse a temperaturas relativamente bajas, a unos 200ºC [6]. Esto convierte a esta estructura en una de las mejores a la hora de fabricar una célula de banda intermedia.

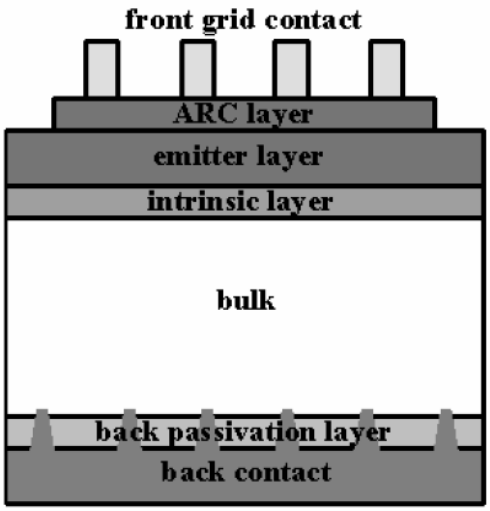


Figura 2.4: Estructura convencional de una célula de estructura HIT [6].

En la figura superior puede verse la estructura de una célula solar HIT de silicio. La inserción de una capa pasiva trasera y una capa frontal anti-reflejo (ARC) mejoran significativamente la respuesta de la estructura. Los contactos óhmicos están formados por la malla metálica frontal y la capa metálica trasera.

2.2.1 Proceso de fabricación de una estructura HIT(p) c-Si con implantación de titanio

El proceso de fabricación mostrado será el de una estructura HIT sobre sustrato c-Si tipo p, llevado a cabo en la tesis doctoral de Alfredo Boronat [6]. La elección del sustrato tipo p sobre el de tipo n se ha basado en los siguientes argumentos:

1. Debido a la dificultad de obtención de buenos emisores tipo p.
2. Se obtienen mayores eficiencias en estructuras HIT.
3. Buenos resultados en trabajos anteriores.

La elección de la implantación de titanio se basa en unos estudios realizados en 2008 [7], que destaca unos resultados prometedores en cuando al tiempo de vida de los portadores cuando las concentraciones de Ti superan 1020 cm^{-3}.

El titanio se introduce mediante implantación iónica en un sustrato c-Si, y posteriormente se realiza un proceso de PLM (Pulsed Laser Melting) para recristalizar la estructura afectada por la implantación [7].

Los sustratos de c-Si tipo p son obleas crecidas con el método de zona flotante y un espesor de 285 µm. A continuación se describen los pasos llevados a cabo durante el proceso de fabricación:

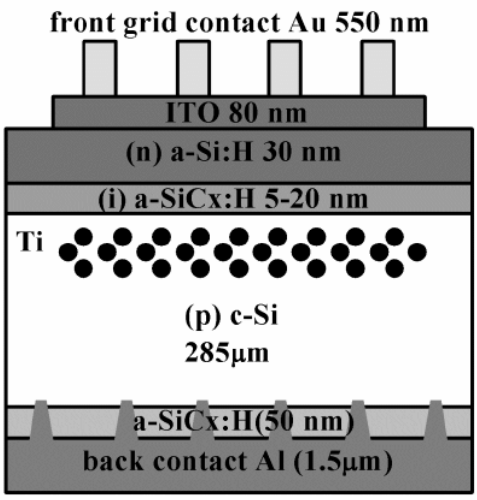


Figura 2.5: Estructura HIT sobre sustrato c-Si tipo p con implantación de titanio [6].

1. **Limpieza inicial**: Una vez cortadas las muestras, se han sometido a un baño de ultrasonidos en acetona seguido de un baño de ultrasonidos de isopropanol y se han secado con N2, eliminando restos de polvo que podrían haberse generado durante el corte.
2. **Depósito de capas activas en la parte frontal**: Las muestras limpias se han introducido en el equipo PECVD (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition) para el depósito de las capas de silicio amorfo. Se ha realizado el depósito de las capas (i) a-SiCx:H y (n) a-Si:H de forma consecutiva. La temperatura del sustrato durante el proceso se ha mantenido por debajo de los 200º.
3. **Pasivación trasera**: Una vez retiradas las muestras de la cámara del PECVD, se han girado y se han vuelto a introducir, con el fin de depositar la capa pasivante trasera a-SiCx:H, también a una temperatura inferior a 200ºC. El espesor de esta capa se ha diseñado para minimizar las reflexiones de la luz que entran por la parte frontal y rebotan en el contacto trasero, atravesando la estructura.
4. **Depósito de la capa ARC**: Se introducen las muestras en el equipo de *sputtering* para realizar la deposición de una capa de ITO (Idium tin oxide), que cumplirá la función de capa anti-reflejo. La temperatura de este proceso es inferior a 50ºC.
5. **Definición del área activa frontal**: En la siguiente imagen se muestra la secuencia de procesos llevados a cabo en este paso. Ninguno de estos procesos supera los 120ºC.

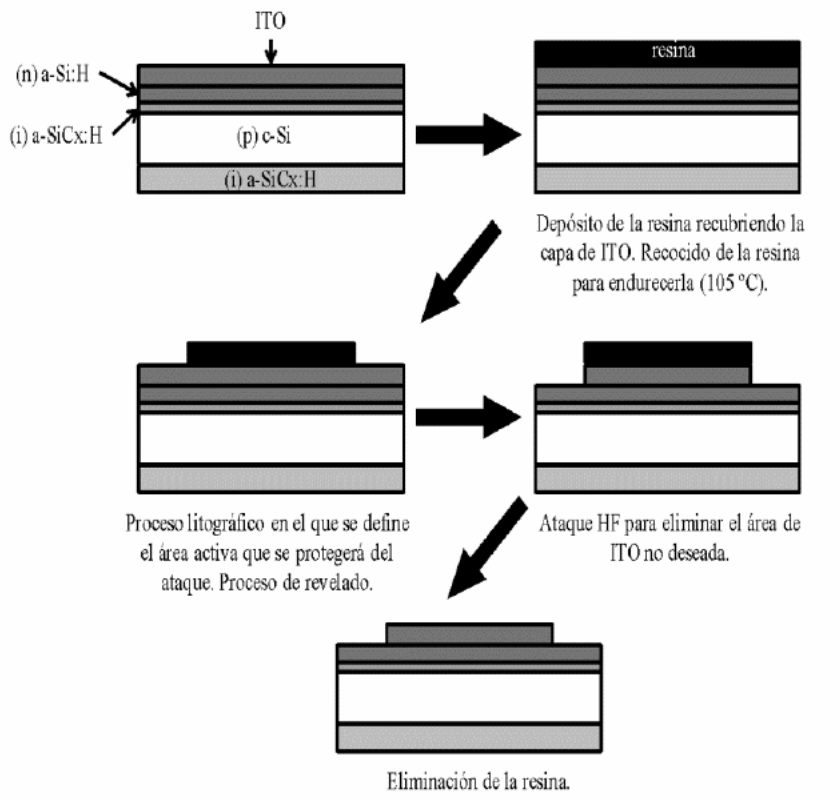


Figura 2.6: Secuencia de procesos que intervienen en el paso 5 [6].

6. **Depósito del contacto óhmico frontal**: Los procesos llevados a cabo en este paso se muestran en la imagen siguiente. No se superan los 65ºC.

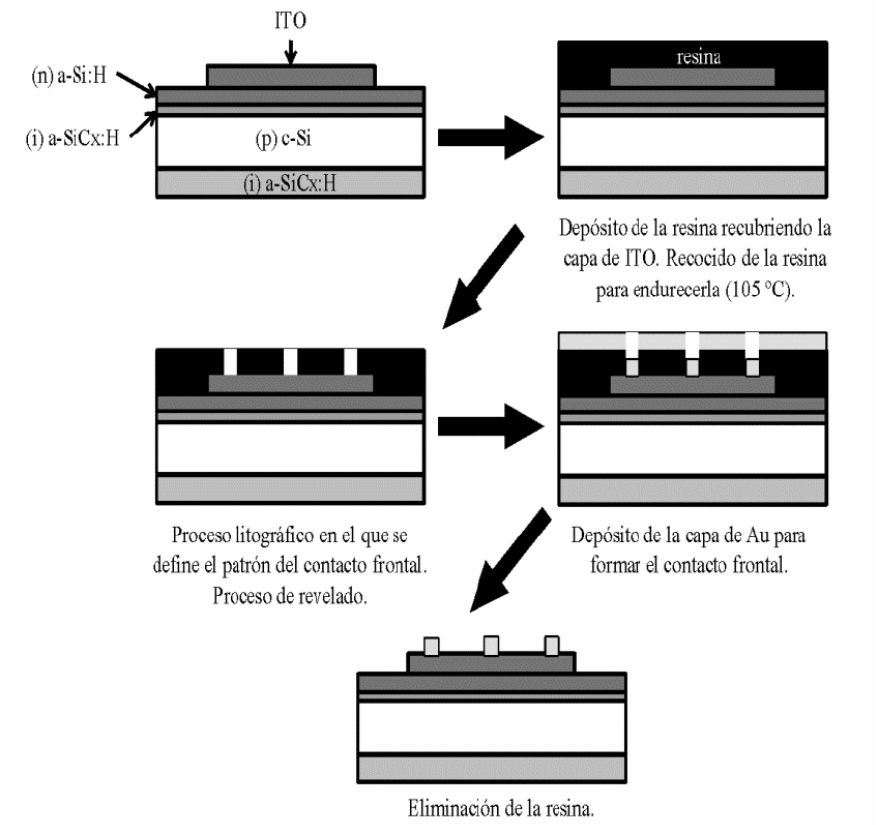


Figura 2.7: Secuencia de procesos que intervienen en el paso 6 [6].

7. **Depósito del contacto posterior**: El último paso es la deposición de una capa de aluminio de 1,5 µm por evaporación térmica en la parte posterior. Seguidamente, se ha realizado un proceso de *laser-firing* para crear el contacto óhmico.

Como se puede apreciar, el proceso de fabricación no ha superado una temperatura de 200ºC en ninguno de los pasos, con lo que consigue evitarse la alteración de las características de la capa de silicio implantada con Ti.

En la figura siguiente puede verse el perfil de concentración de Ti en las muestras elaboradas en la tesis de A. Boronat, antes y después del proceso de PLM. Se observa una concentración superior al límite de Mott (6x1019 cm^{-3}) en los primeros 150 nm respecto a la superficie frontal. Por otro lado, una concentración no deseada de 2x1018 cm^{-3} se extiende más allá de los 350 nm respecto a la superficie.

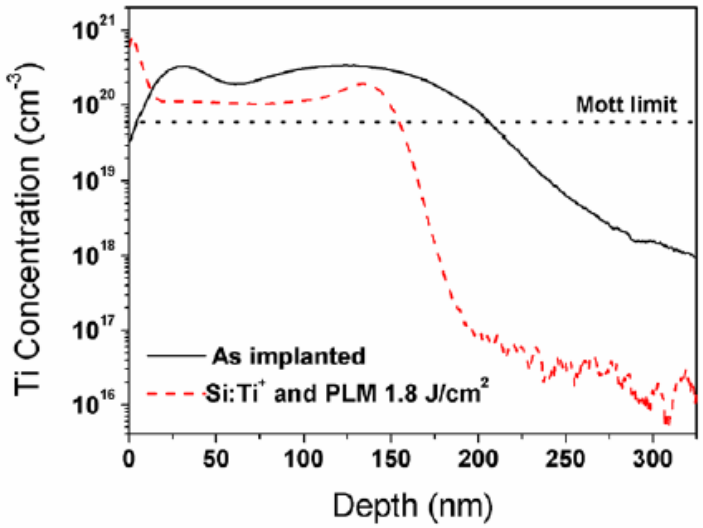


Figura 2.8: Perfil de concentración de Ti en los sustratos c-Si tipo p de las muestras elaboradas [6].

También se realizaron medidas de Eficiencia Cuántica Externa (EQE) para evaluar posibles problemas relacionados con la recombinación y obtener información relacionada con la banda intermedia.

La EQE mide la probabilidad de que un fotón que incide a una longitud de onda determinada, cree un par electrón/hueco que contribuya a la corriente extraída del dispositivo. Esta medida se realiza mediante la iluminación del dispositivo con una fuente de luz monocromática que barre todo el rango espectral de interés mientras se monitoriza la corriente generada por el dispositivo.

En la siguiente figura se muestran los resultados obtenidos con las respuestas EQE en las dos muestras con las que se ha trabajado: HIT_pSi_REF es un dispositivo de referencia que presenta la misma estructura y mismo proceso de fabricación que HIT_pSi_IBSC, solo que no contiene Ti.

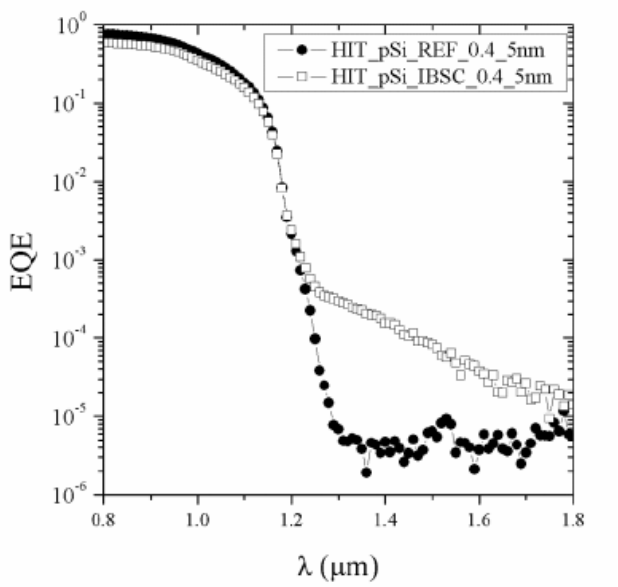


Figura 2.9: EQE de las muestras con sustrato c-Si tipo p de 0.4Ω y un espesor de 5nm de la capa intrínseca a-SiCx:H [6].

Se puede observar cómo la muestra de referencia HIT_pSi_REF presenta una respuesta superior en el rango espectral por encima del bandgap. Sin embargo, lo sorprendente es la respuesta por debajo del bandgap de la muestra HIT_pSi_IBSC. Este resultado indica que la muestra es capaz de absorber fotones entre 0,75 eV y 1,12 eV, los cuales contribuyen a la corriente fotogenerada.

En la tesis de A. Boronat se explica que el decremento de la respuesta EQE en la región por encima del bandgap de puede explicar por la presencia de la cola de implantación de Ti más allá de los primeros 150 nm respecto a la superficie frontal, que degradarían el tiempo de vida de esta región.

También se obtuvo una respuesta de tensión VOC para comprobar su preservación, como punto clave en el funcionamiento ideal de un dispositivo que presenta BI. A continuación se muestran las respuestas I-V que se obtuvieron para las muestras al incorporar el Ti.

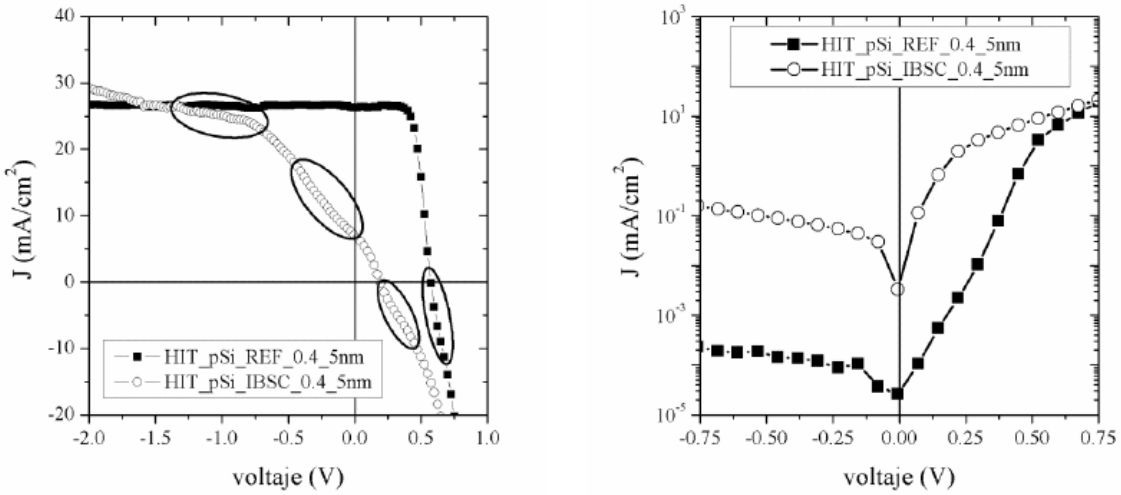


Figura 2.10: A la izquierda: característica I-V en iluminación de las células HIT_pSi sobre sustrato de 0,4 Ω con un espesor de 5 nm de la capa intrínseca. A la derecha: característica I-V en oscuridad de las mismas células [6].

Puede verse que las respuestas I-V, especialmente la muestra IBSC, presentan una curvatura en forma de "S", conocida como "S Shape". Algunos autores [8-12] defienden que este efecto es debido a la barrera de potencial que se crea en la interfaz (i) a-SiCx:H/(p) c-Si. Este comportamiento no deseado dificultó la extracción de los parámetros del modelo circuital en las muestras.

Asimismo, la respuesta de la muestra IBSC presenta una disminución del parámetro JSC y la extracción de la corriente fotogenerada de la muestra se ve dificultada por los problemas de no saturación en la zona inversa de saturación, también reflejados en la respuesta en oscuridad.

Respecto a la corriente inversa de saturación, la muestra HIT_pSi_IBSC es significativamente superior a la muestra HIT_pSi_REF, como se ve en la respuesta en oscuridad.

Por otro lado, también se obtuvo la respuesta de la variabilidad del factor n_d (factor de idealidad del diodo) en función de la tensión de polarización para la muestra IBSC.

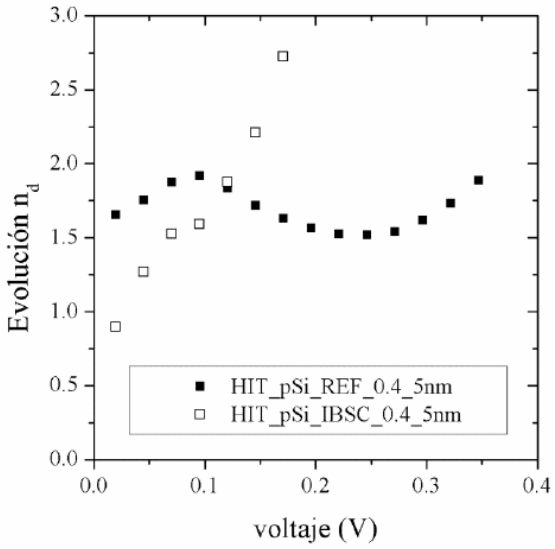


Figura 2.11: Evolución del parámetro n_d para las muestras HIT_pSi sobre sustrato de 0,4 Ω con un espesor de 5 nm de la capa intrínseca [6].

Se calcularon los valores de tensión V_{OC} a partir de un factor de idealidad de 1,55 y con la I_O extraída, y se observó que difería mucho del valor medido. A. Boronat propuso diversas interpretaciones, que serán de utilidad para el posterior análisis del presente trabajo:

- La relación utilizada entre el parámetro V_{OC} y I_O derivada del modelo de un solo diodo no funciona con las muestras IBSC.

- El factor de idealidad del diodo en las muestras IBSC difiere significativamente del de las muestras REF.

- El parámetro I_O no refleja todos los mecanismos que intervienen en la reducción del parámetro V_{OC} en las muestras IBSC.

- La recombinación limita la máxima tensión V_{OC} para esta muestra IBSC trabajando con la I_O extraída.

2.3 Eficiencia energética de las células HIT

Con el fin de incrementar la eficiencia energética de las células HIT, se han hecho diversas investigaciones y modificaciones en estos dispositivos.

En el año 1991, SANYO diseñó una célula HIT con una eficiencia de más del 16%. Más tarde, en 2005, después de empezar a producir en masa las células HIT, SANYO alcanzó el 21,5% de eficiencia. En el año 2011, SANYO consiguió llegar hasta el 23% de eficiencia energética, todo un record para aquellos tiempos.

En la actualidad, se han llegado a obtener células solares HIT con una eficiencia energética mayor que cualquier otro tipo de célula de silicio cristalino. Concretamente, la empresa Panasonic, consiguió el año 2014 una eficiencia de conversión del 25,6% para modelos comerciales, mejorando su anterior record de 24,7% de 2013 [13].

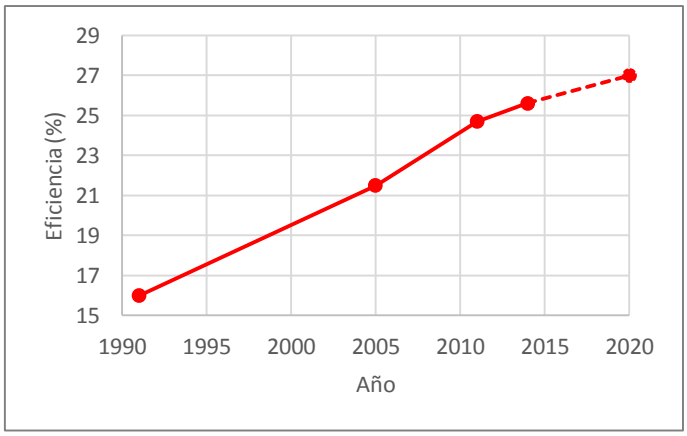


Figura 2.12: Evolución temporal aproximada de la eficiencia de las células HIT [14].

Cabe destacar, por otra parte, en el año 2012, Neeraj Dwivedi, Sushil Kumar, Atul Bisht, Kamlesh Patel y S. Sudhakar [14], hicieron una aproximación simulada para acercarse a una eficiencia alrededor del 27% en una célula solar HIT bifacial. Para conseguirlo, se centraron en la optimización del grosor de la capa del emisor de tipo N a-Si:H del dispositivo.

En su trabajo, crearon hasta cinco tipos de células de heterounión y células HIT.

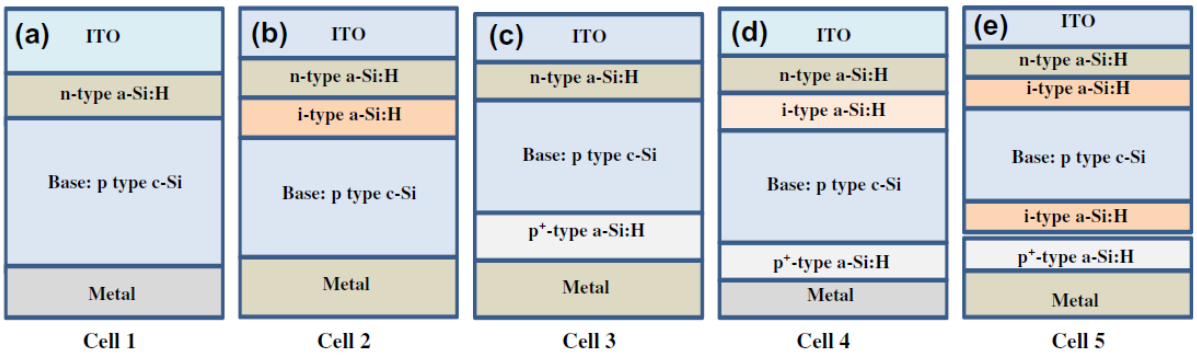


Figura 2.13: Esquemas de las diferentes células heterounión y HIT usadas en el estudio de N. Dwivedi, S. Kumar, A. Bisht, K. Patel, S. Sudhakar en el año 2012 [14].

Los resultados fueron los siguientes:

- ¿Por qué una base tipo-p para las células?
    - El coste de la fabricación en masa de las obleas tipo-p son significativamente más bajas que las de tipo-n.
    - En una estructura heterounión a-Si:H tipo-n/c-Si tipo-p, los electrones fotogenerados deben alcanzar la región N y los huecos la región P. Debido al bajo offset de bandas en el lado de la banda de conducción, los electrones pueden alcanzar fácilmente la región N, mientras que en esta estructura, el offset de bandas en el lado de la banda de valencia no afectará al transporte de huecos. Por el otro lado, la estructura a-Si:H tipo-p/c-Si tipo-n, presenta un offset de bandas mayor en la banda de valencia que dificultará el transporte de huecos fotogenerados. Por lo tanto, una base tipo-p c-Si presentará mejor eficiencia en una célula HIT.
- Optimización del grosor de la capa emisora tipo-n a-Si:H.
    - Se tienen en cuenta las variables de V_{OC}, J_{SC}, factor de forma y rendimiento. Se observa como el rendimiento disminuye a medida que aumenta el grosor de la capa emisora, debido al decremento de V_{OC} y J_{SC}.
    - El mejor resultado se obtiene con la célula 5, 25,6% de eficiencia, con un grosor de 6 nm.

- Optimización del grosor de la capa intrínseca a-Si:H.

  - En la célula HIT número 2, el incremento del grosor de la capa intrínseca de 3 nm a 6 nm hace disminuir V_{OC}. Pero a partir de 6 nm, V_{OC} se mantiene constante. En las células 4 y 5, no se aprecia decremento de la V_{OC}. La disminución de la eficiencia es muy pequeña.

  - Observando los resultados, la variación del grosor de la capa intrínseca no produce un efecto pronunciado en el rendimiento. No obstante, la célula 5 presenta un mayor rendimiento, 24,14%, con un grosor de 3 nm de esta capa.

- Optimización del grosor de la capa base c-Si tipo p.

  - Se desea reducir lo máximo posible el grosor de la capa c-Si para reducir costes.

  - Se observa que, las células 1 y 2, incrementan V_{OC} y J_{SC}, por lo tanto el rendimiento, con el aumento del grosor de la capa base c-Si. Por otro lado, las células que presentan la capa BSF (Back Surface Field) presentan un decremento de V_{OC} con el aumento del grosor de esta capa.

  - El mejor resultado vuelve a ser para la célula bifacial 5 con 26,45% de eficiencia con 58 µm de grosor de la capa base.

- Influencia de la estructura de la célula.

  - Después de optimizar los grosores de las tres capas, obtuvieron la siguiente tabla de resultados:

Cell no.	Cell structure	V_{oc} (mV)	J_{sc} (mA/cm^2)	FF (%)	η (%)
Cell-1	HJ	630.6	37.28	82.48	19.39
Cell-2	HIT	637.3	38.33	83.92	20.38
Cell-3	HJBSF	763.6	39.49	84.75	25.56
Cell-4	HITBSF	766.7	38.47	84.23	24.85
Cell-5	BIFACIAL	769	41.71	84.24	27.02

Figura 2.14: Parámetros de las células optimizadas con los mejores grosores de capas. Simulación realizada con la herramienta AFORS-HET. [14]

  - Puede comprobarse como la introducción de la capa BSF mejora significativamente la eficiencia, tanto en células heterounión como en células HIT. Esto es debido a que se establece una barrera para los portadores de polaridad opuesta al tipo de BSF y se reduce la posibilidad de recombinación

- Análisis de la alta tensión de circuito abierto V_{OC}.

  - Para obtener una buena célula solar, es necesaria una V_{OC} alta. La tensión V_{OC} mínima se obtiene de la célula de heterounión básica (célula 1). Esto se debe a la densidad de defectos en la interfaz. Las células HIT mejoran la tensión V_{OC}. Sin embargo, la tensión V_{OC} más alta se encuentra en las células con capa BSF, donde disminuye con el aumento de grosor de las capas emisor y base.

  - La mayor tensión V_{OC} se encuentra en la célula de heterounión con capa BSF. Esto es debido a la reducción de la recombinación de electrones y huecos, la generación de barrera para electrones para alcanzar la región P y la mejora de colección de huecos en la región P.

Como conclusión de este estudio, pueden identificarse los siguientes puntos:

1. La eficiencia mejora con la optimización de la capa emisora tipo-n a-Si:H y la capa intrínseca a-Si:H.

2. La introducción de una capa BSF aumenta significativamente la tensión VOC.

3. Para las células heterounión y HIT sin BSF, la mejor eficiencia se obtiene con grosores de la capa c-Si base altos (~200 µm). Para las células heterounión y HIT con BSF, las mejores eficiencias se obtienen con grosores bajos (~58 µm).

Respecto al dopado de las capas, hay otros estudios que demuestran que también puede afectar al rendimiento. En concreto, Bouzaki Mohammed y Benyoucef Boumediene, en su trabajo "*Simulation and Optimization of the Performance in HIT Solar Cell*" del 2013 [15], realizan una simulación utilizando la herramienta AFORS-HET de una célula HIT formada por una

capa emisora, una capa intrínseca, una capa base y una capa BSF de composición a-Si:H(n), a-Si:H(i), c-Si(p) y a-Si:H(p), respectivamente.

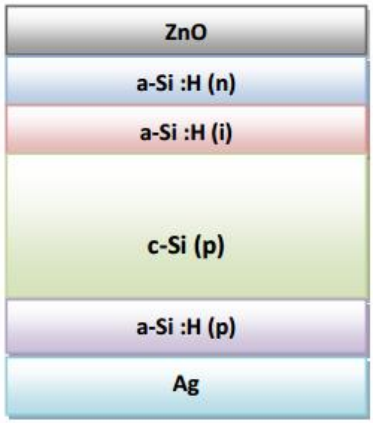


Figura 2.15: Estructura de la célula simulada en el trabajo "*Simulation and Optimization of the Performance in HIT Solar Cell*" de Bouzaki Mohammed y Benyoucef Boumediene [15].

Los resultados (ver siguiente figura), indican un claro efecto en el rendimiento de la célula solar.

Los efectos de la concentración de dopado en la capa c-Si (p) influye principalmente en la tensión V_{OC}, el factor de forma y la eficiencia. El valor deseado de NA debe ser mayor a 8x1016cm^{-3} para obtener el mejor resultado en la eficiencia.

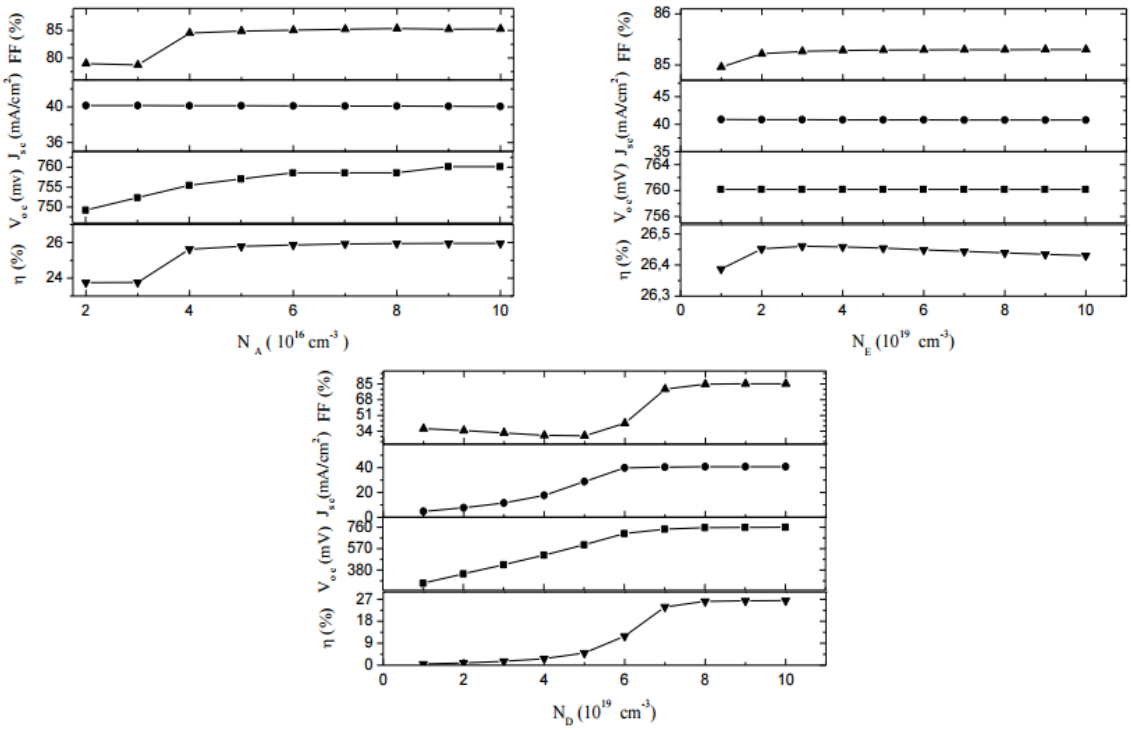


Figura 2.16: En las gráficas se muestran los efectos de la concentración de dopados en el rendimiento de la célula HIT. Capas de izquierda a derecha y de arriba abajo: c-Si (p), a-Si:H(n), a-Si:H(p) [15].

En el caso de la capa emisora a-Si:H(n), se requiere también una alta concentración de dopado debido al pequeño offset que presenta la banda de conducción entre a-Si:H y c-Si, así como a la distribución de huecos en a-Si:H y la interfaz de estados entre a-Si:H/c-Si. Puede verse como, al aumentar N_E, el factor de forma aumenta, así como la eficiencia. Sin embargo, a partir de 3x1019cm^{-3}, estas variables se saturan.

Por último, la concentración de dopado de la capa BSF ayuda significativamente al rendimiento de la célula solar. El incremento de N_D aumenta la eficiencia hasta llegar al límite de 8x1019cm^{-3}, donde permanece constante.

En el trabajo mostrado anteriormente, con la optimización de la concentración de dopado junto a la concentración del grosor de las capas, se pudo simular una célula solar HIT con una eficiencia de 28,1%.

2.3.1 Pérdidas energéticas

Las pérdidas energéticas producidas en el dispositivo y posibles defectos de fabricación, pueden hacer que el rendimiento de la célula HIT disminuya.

En la siguiente figura pueden apreciar-se las posibles pérdidas energéticas dadas en una célula HIT.

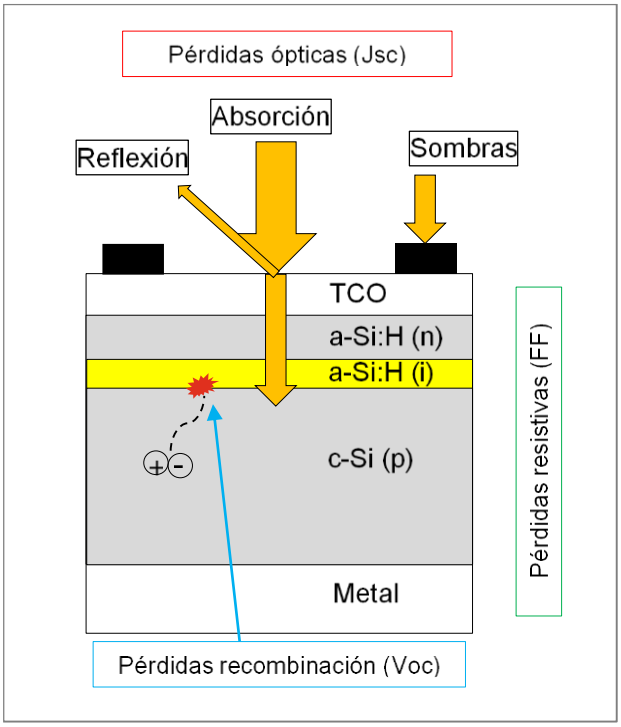


Figura 2.17: Pérdidas ópticas, de recombinación y resistivas que pueden producirse en una célula HIT.

Pérdidas ópticas

Son las pérdidas producidas por la reflexión de la radiación solar o el no traspaso a causa de elementos que interfieren, como conectadores o impurezas. También pueden producirse por capas a-Si o TCO (Oxido Conductor Transparente, como por ejemplo el ITO) que tengan baja absorción.

Para disminuir estas pérdidas, pueden realizarse las siguientes acciones:

1. Eliminar partículas contaminantes en la superficie.

2. Optimizar la superficie de los conectores al mínimo ancho posible.

3. Reducir las pérdidas de absorción en las capas a-Si y TCO. Se producen pérdidas ópticas en bajas longitudes de onda por la absorción de a-Si, y pérdidas ópticas en altas longitudes de onda por la absorción de portadores libres en TCO. Estas pérdidas pueden reducirse utilizando aleaciones de alta calidad como a-SiC:H o materiales TCO de baja densidad y gran movilidad de portadores.

Pérdidas de recombinación

Son las pérdidas producidas en el efecto de recombinación que pueden reducir la corriente de corto-circuito y la tensión de circuito abierto.

Para disminuir estas pérdidas, pueden realizarse las siguientes acciones:

1. Usar capas a-Si de gran calidad sobre la superficie de la capa c-Si para reducir las pérdidas por recombinación.

2. Limitar el daño causado en la capa c-Si durante los procesos de fabricación y limpiar las impurezas de su superficie con tratamientos, por ejemplo de plasma hidrogenado.

Pérdidas resistivas

Son las pérdidas que se dan al paso de la corriente eléctrica por la red de electrodos de la célula solar y en la interfaz entre el contacto óhmico y la célula. Estas pérdidas pueden afectar al factor de forma (FF).

Para disminuir estas pérdidas, pueden realizarse las siguientes acciones:

1. Usar una capa TCO de gran conductividad. Pasivación de la capa frontal y trasera de la célula solar.

2. Utilizar un buen contacto óhmico entre las diferentes capas afectadas. El uso de zonas altamente dopadas bajo los contactos óhmicos mantienen alejados a los portadores minoritarios de la recombinación que pueda producirse en estos puntos.

3. Utilizar capas BSF para evitar la recombinación producida en el contacto con la capa óhmica trasera.

2.4 Efecto S-Shape

El comportamiento *S-Shape* que se da en las células HIT en determinadas circunstancias, afecta la característica I-V, reduciendo el factor de forma (FF) y, consecuentemente, la eficiencia de conversión.

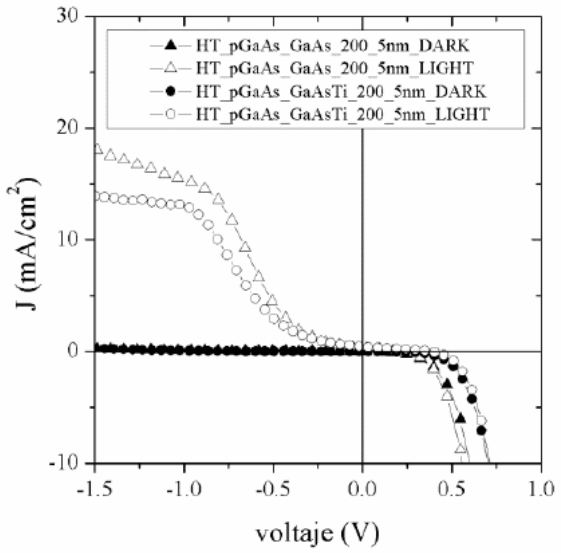


Figura 2.18: Respuesta I-V en oscuridad e iluminación de las muestras HT-pGaAs con capas intrínsecas de a-GaAs o GaAsTi de 5nm de espesor y depositadas a 200 ºC [6]

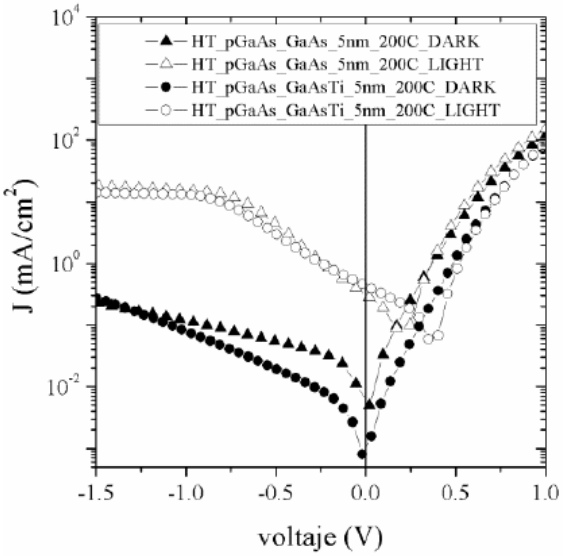


Figura 2.19: Representación semi-logarítmica de las respuestas presentadas en la figura 11.

El comportamiento *S-Shape* se le atribuye al desbalanceo de las movilidades de los electrones y los huecos del dispositivo fotovoltaico [8]. Asimismo, los autores explican que el comportamiento *S-Shape* puede deberse a la fuerte recombinación molecular cerca del cátodo. Otras explicaciones que se dan están basadas en las barreras energéticas entre la capa activa y el electrodo, los efectos de degradación de los contactos, y la acumulación de cargas alrededor de la interfaz. Es esencial llegar a comprender el origen de esta característica con el fin de diseñar células solares evitando los efectos no deseados.

En el trabajo "*Influence of the band offset on the performance of photodevices based on the c-Si/ a-Si:H heterostructure*" [10], se estudia el comportamiento *S-Shape* en una célula solar HIT p-i-n.

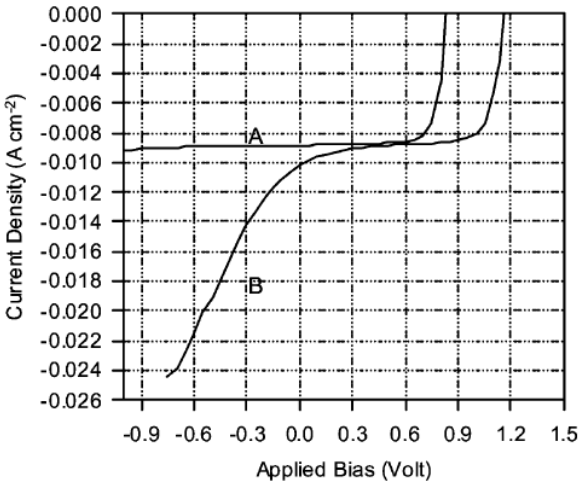


Figura 2.20: Curva J-V simulada bajo iluminación AM1.5, en una célula ITO/(p)a-Si:H / (i)a-Si:H /(n)c-Si/metal. A: offset de banda ΔEC = 0, ΔEV = 0.6; B: offset de banda ΔEC = 0.4, ΔEV = 0.2 [10]

En la gráfica simulada, se observó que cuando las bandas de conducción de la heterounión están alineadas, la curva J-V presenta el perfil característico de un fotodiodo. En cambio, un offset en las bandas de conducción hace aparecer el perfil *S-Shape*, llegando a la conclusión de que este comportamiento podría estar relacionado con dicho parámetro. El *S-Shape* es detectado en la región de polarización inversa y se prolonga en la región de polarización directa hasta que el valor aplicado de bias es igual a la diferencia de afinidad electrónica entre las capas Si:H y c-Si.

Por otro lado, en el año 2015, Liu Jian, Huang Shihua y He Lü, simularon una célula solar HIT n-i-p de gran eficiencia basada en silicio, como la mostrada a continuación [11].

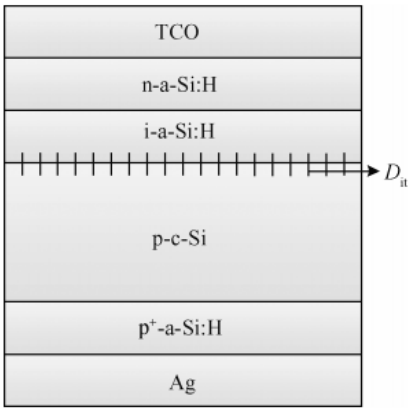


Figura 2.21: Esquema de una célula a-Si:H (n) / a-Si:H (i) / c-Si (p) / a-Si:H (p+) /Ag [11]

En la simulación llevada a cabo por la herramienta AFORS-HET, se observó que cuando la capa emisora a-Si:H (n) tenía una baja concentración de dopado (<1x1019 cm-3), se comenzaba a observar la *S-Shape* en la característica J-V de la célula, llevando a esta a un pobre factor de forma (FF).

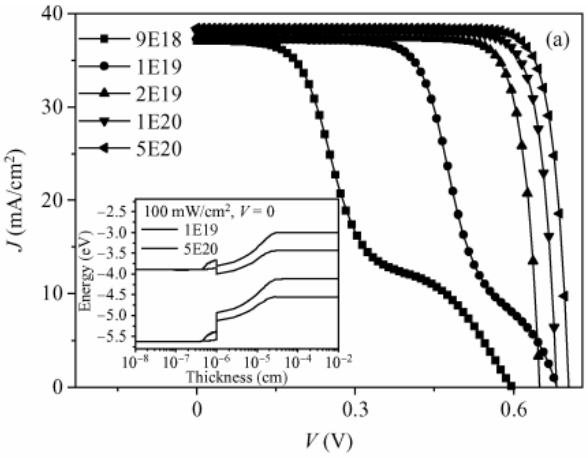


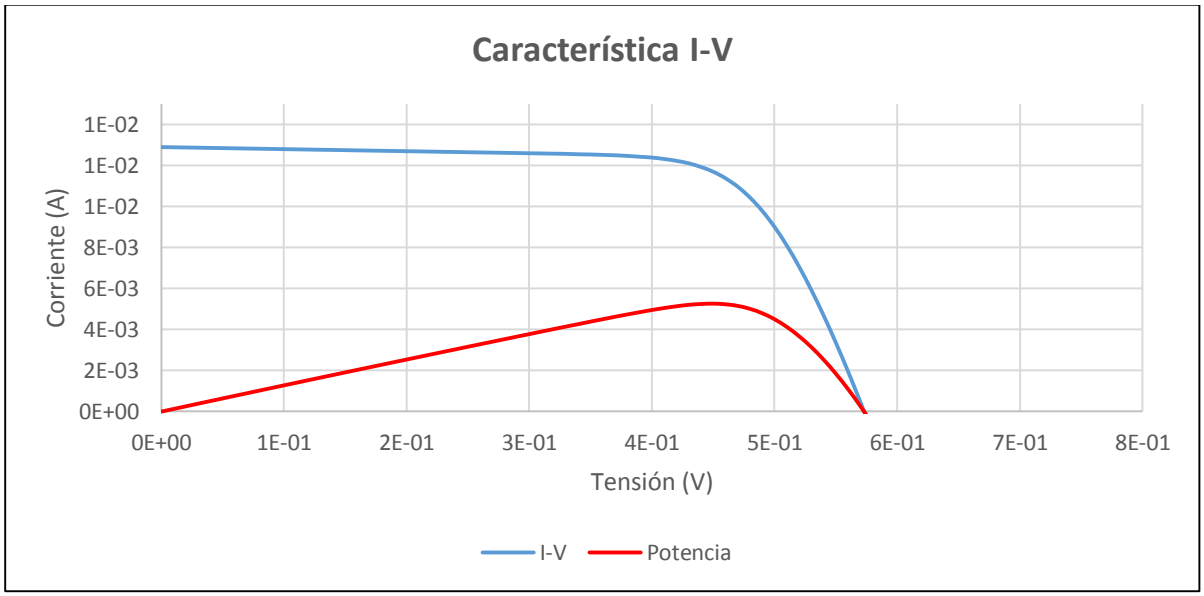
Figura 2.22: Curva J-V de la célula solar HIT con diferente concentración de dopado en la capa emisora a-Si:H (n). En el cuadro interno se observa el diagrama de bandas de la célula con baja y alta concentración de dopado bajo una iluminación de 100 mW/cm² [11].

Cuando la capa emisora tiene una alta concentración de dopado, el transporte de portadores a través de la unión p-n se encuentra con una alta barrera energética. En el caso de tener una baja concentración de dopado, la barrera es menor, lo que resulta en una gran acumulación de electrones cerca de la interfaz c-Si (p). Además, cuando la concentración de dopado en la capa emisora es muy baja, el campo eléctrico en la zona de carga espacial (ZCE) de la capa c-Si será más débil. Estos dos factores, el campo eléctrico reducido y la gran acumulación de electrones, conllevan un incremento de las pérdidas de recombinación que hace que aparezca la región *S-Shape* en la característica J-V de la célula. Asimismo, sucede algo similar cuando es la capa BSF la que tiene una baja concentración de dopado.

3. Simulación del efecto S-Shape en células solares HIT

En este punto se describe el trabajo realizado en relación al estudio del efecto *S-Shape* en células solares HIT.

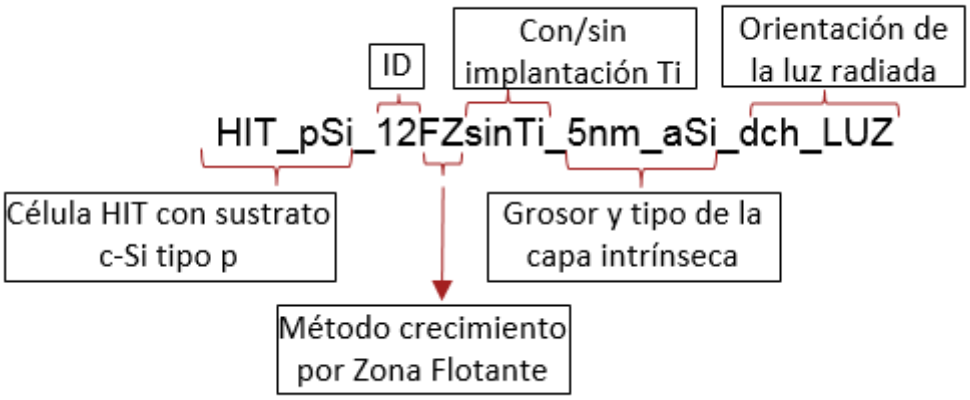
Para ello, se realizaran simulaciones mediante la herramienta PSpice de las células HIT de sustrato de silicio cristalino tipo p fabricadas en la Tesis de Alfred Boronat. La manera más sencilla de ver el comportamiento de las células es mediante su característica I-V.



Gráfica 3.1: Característica I-V y curva de potencia de una célula solar típica. Simulación realizada con la herramienta PSpice y graficado mediante Excel.

3.1 Características de las células solares comprendidas en el trabajo

El proceso de fabricación de las células estudiadas es el descrito en el punto 2.2.1. Las células en cuestión, están identificadas mediante la siguiente nomenclatura, según sus características:



	ID	Sustrato	Método crecimiento obleas	Implantación TI	Capa intrínseca	Grosor capa intrínseca	Orientación luz radiada
HIT_pSi_12FZsinTi_5nm_aSi_dch_LUZ	12	c-Si p 285µm	Zona Flotante	sin	a-SiCx:H	5nm	derecha
HIT_pSi_12FZsinTi_10nm_aSi_izq_LUZ	12	c-Si p 285µm	Zona Flotante	sin	a-SiCx:H	10nm	izquierda
HIT_pSi_12FZsinTi_20nm_aSi_dch_LUZ	12	c-Si p 285µm	Zona Flotante	sin	a-SiCx:H	20nm	derecha
HIT_pSi_02FZTi_5nm_aSi_dch_LUZ	02	c-Si p 285µm	Zona Flotante	con	a-SiCx:H	5nm	derecha
HIT_pSi_02FZTi_10nm_aSi_dch_LUZ	02	c-Si p 285µm	Zona Flotante	con	a-SiCx:H	10nm	derecha
HIT_pSi_02FZTi_20nm_aSi_dch_LUZ	02	c-Si p 285µm	Zona Flotante	con	a-SiCx:H	20nm	derecha
HIT_pSi_9FZsinTi_5nm_aSi_dch_LUZ	09	c-Si p 285µm	Zona Flotante	sin	a-SiCx:H	5nm	derecha
HIT_pSi_9FZsinTi_10nm_aSi_dch_LUZ	09	c-Si p 285µm	Zona Flotante	sin	a-SiCx:H	10nm	derecha
HIT_pSi_9FZsinTi_20nm_aSi_dch_LUZ	09	c-Si p 285µm	Zona Flotante	sin	a-SiCx:H	20nm	derecha
HIT_pSi_9FZsinTi_40nm_aSi_dch_LUZ	09	c-Si p 285µm	Zona Flotante	sin	a-SiCx:H	40nm	derecha
HIT_pSi_3FZTi_5nm_aSi_dch_LUZ	03	c-Si p 285µm	Zona Flotante	con	a-SiCx:H	5nm	derecha
HIT_pSi_3FZTi_10nm_aSi_dch_LUZ	03	c-Si p 285µm	Zona Flotante	con	a-SiCx:H	10nm	derecha
HIT_pSi_3FZTi_20nm_aSi_dch_LUZ	03	c-Si p 285µm	Zona Flotante	con	a-SiCx:H	20nm	derecha
HIT_pSi_3FZTi_40nm_aSi_dch_LUZ	03	c-Si p 285µm	Zona Flotante	con	a-SiCx:H	40nm	derecha

Tabla 3.1: Listado de células HIT estudiadas de la Tesis de Alfred Boronat, con cada una de sus características. Puede observarse una célula con orientación de luz radiada izquierda, dado que no se disponía de una con orientación derecha.

Las células listadas en la tabla anterior son las células simuladas en este trabajo, cuyo objetivo será estudiar el efecto *S-Shape* que presentan y encontrar un patrón de comportamiento.

Se utilizan células con y sin implantación de Titanio con el fin de comparar las respuestas. Los distintos dispositivos comparten la estructura y el mismo proceso de fabricación.

Las diferencias que presentan estas células en el proceso de fabricación son las siguientes:

3.1.1 Grosor de la capa intrínseca

Las diferentes células solares HIT tienen un aumento del grosor de la capa intrínseca (i) a-SiCx:H, reduciendo así el efecto túnel que se produce.

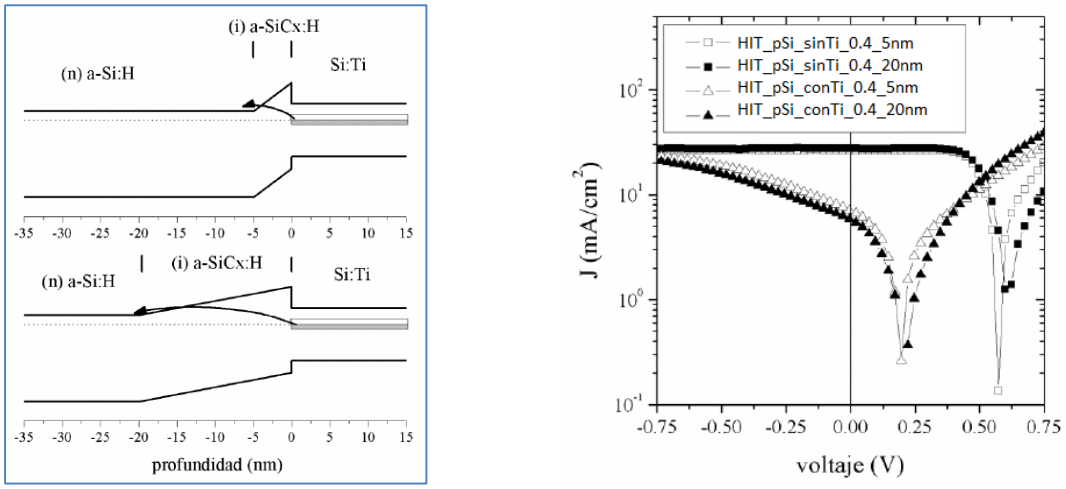


Figura 3.1: Izquierda: diagrama de bandas de las células HIT_psi con implantación de Ti para dos espesores distintos de la capa intrínseca donde se muestra el efecto túnel entre la BI y la BC. Derecha: efecto del grosor de la capa intrínseca en Voc en condiciones STC de iluminación. [6]

Al aumentar el grosor de la capa intrínseca, aumenta el ancho de la barrera de potencial y se reduce así el efecto túnel producido en las células HIT. Este suceso comporta un incremento de la V_{OC} según aumenta el grosor de la capa intrínseca, teniendo mayor efecto en las células con implantación de titanio. Sin embargo, el incremento del grosor de la capa intrínseca también reduce la densidad de corriente de cortocircuito J_{SC}, teniendo así mismo, más influencia en las células con implantación de titanio.

3.1.2 Resistividad del sustrato

Las diferentes células HIT estudiadas también tienen una diferencia en forma de aumento de la resistividad del sustrato c-Si.

	ID	Resistividad del sustrato
HIT_pSi_12FZsinTi_5nm_aSi_dch_LUZ	12	1,7 Ω·cm
HIT_pSi_12FZsinTi_10nm_aSi_izq_LUZ	12	1,7 Ω·cm
HIT_pSi_12FZsinTi_20nm_aSi_dch_LUZ	12	1,7 Ω·cm
HIT_pSi_02FZTi_5nm_aSi_dch_LUZ	02	1,7 Ω·cm
HIT_pSi_02FZTi_10nm_aSi_dch_LUZ	02	1,7 Ω·cm
HIT_pSi_02FZTi_20nm_aSi_dch_LUZ	02	1,7 Ω·cm
HIT_pSi_9FZsinTi_5nm_aSi_dch_LUZ	09	0,4 Ω·cm
HIT_pSi_9FZsinTi_10nm_aSi_dch_LUZ	09	0,4 Ω·cm
HIT_pSi_9FZsinTi_20nm_aSi_dch_LUZ	09	0,4 Ω·cm
HIT_pSi_9FZsinTi_40nm_aSi_dch_LUZ	09	0,4 Ω·cm
HIT_pSi_3FZTi_5nm_aSi_dch_LUZ	03	0,4 Ω·cm
HIT_pSi_3FZTi_10nm_aSi_dch_LUZ	03	0,4 Ω·cm
HIT_pSi_3FZTi_20nm_aSi_dch_LUZ	03	0,4 Ω·cm
HIT_pSi_3FZTi_40nm_aSi_dch_LUZ	03	0,4 Ω·cm

Tabla 3.2: Listado de células HIT estudiadas, con la diferencia de resistividad del sustrato entre cada una.

Se decidió duplicar la resistividad para observar el efecto en la posición de la zona de conducción de la BI respecto a la BC [6].

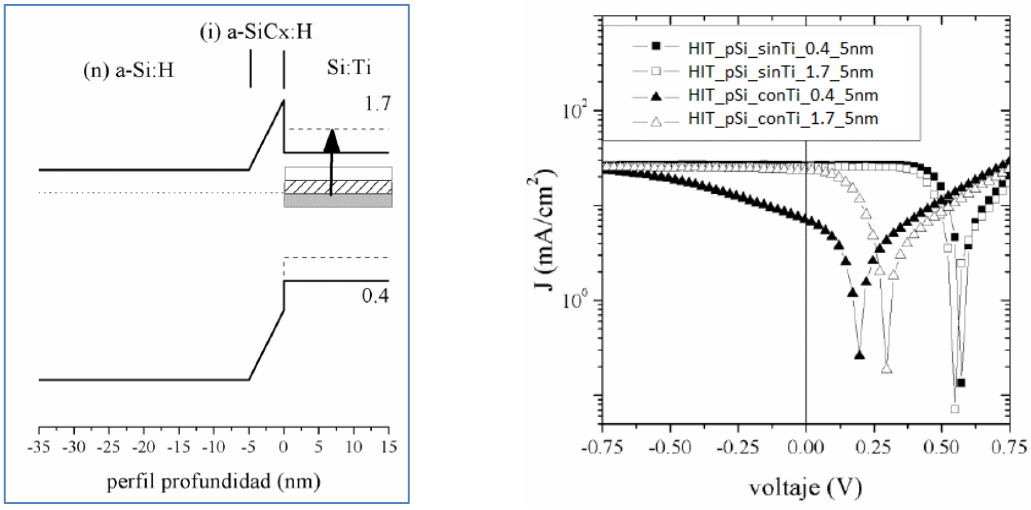


Figura 3.2: Izquierda: diagrama de bandas de las células HIT_psi con implantación de Ti con variación de la resistividad del sustrato c-Si. Derecha: Influencia de la resistividad del sustrato en condiciones STC en iluminación. [6]

En este caso, puede observarse una reducción de la V_{OC} en la célula sin titanio, pero un aumento significativo de la V_{OC} en la célula con implantación de titanio.

3.2 Modelos teóricos de simulación PSPICE

Con el fin de representar mediante el software PSpice de la mejor manera posible el efecto *S-Shape* producido en una célula HIT, se han consultado diversas fuentes [16-18] y se han realizado varias pruebas que se detallan en este apartado.

El modelo básico de una célula fotovoltaica en PSPICE se compone de una fuente de corriente controlada por la irradiancia, un diodo, una resistencia en serie y otra en paralelo.

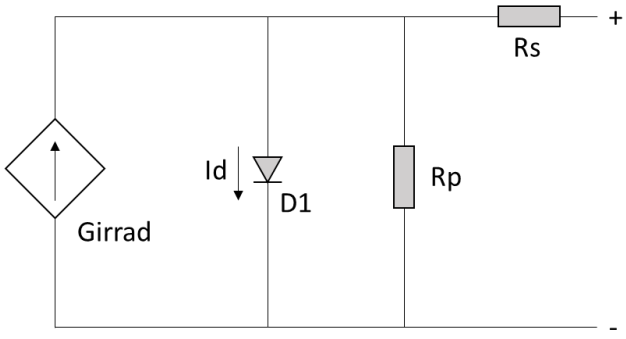


Figura 3.3: Esquema de una célula fotovoltaica para poder ser representada en PSICE.

A este modelo anterior puede incorporarse un segundo diodo en paralelo con el primero, para obtener más exactitud con una célula solar real y poder representar las perdidas. No obstante, en este trabajo se utilizará un solo diodo en paralelo debido a la limitación que presenta la edición estudiante del software PSPICE a la hora de simular las pérdidas.

Teniendo en cuenta la curvatura del efecto *S-Shape*, en primera instancia se ha buscado crear una corriente en sentido opuesto para producir una disminución de ésta en la característica V-I. Para ello, se ha utilizado un diodo en serie con la resistencia paralelo Rp por el que circulará la corriente en sentido negativo.

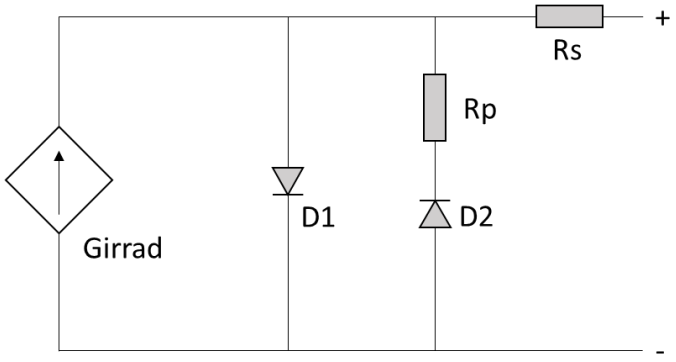


Figura 3.4: Esquema de una célula fotovoltaica con diodo en inversa.

Sin embargo, a la hora de representar el esquema en PSPICE, los resultados no fueron satisfactorios, no pudiendo observar el efecto *S-Shape* con las células HIT de prueba que sí lo presentaban.

Seguidamente, basándonos en la misma teoría, se desarrolló otro esquema pero utilizando el diodo en inversa en serie con el diodo D1 principal, junto con una resistencia *shunt*.

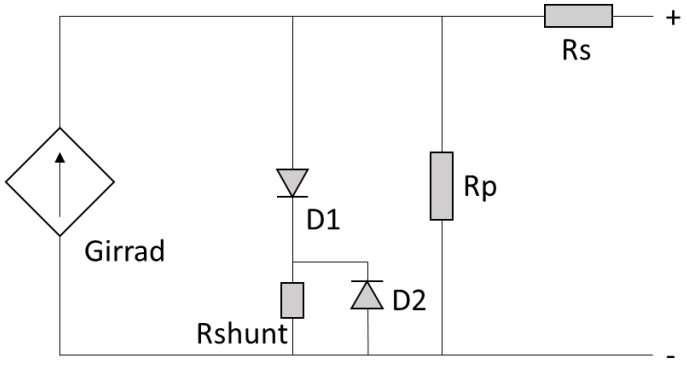


Figura 3.5: Esquema de una célula fotovoltaica con diodo en inversa en serie con D1.

Con este esquema se obtuvieron, no obstante, los mismos resultados que con el esquema anterior.

A continuación, basándonos en los estudios hipotéticos de N. Singh, A. Jain y A. Kapoor [17] y buscando otra manera de representar la

disminución de corriente ocasionada en el efecto *S-Shape*, se propuso un circuito con una combinación de diodo en inversa y resistencia *shunt* con el circuito convencional de la célula solar. En este caso, cuando la corriente no fluya por el diodo en inversa D2, el circuito se comportará como una célula solar convencional con resistencia en serie Rs+Rp2.

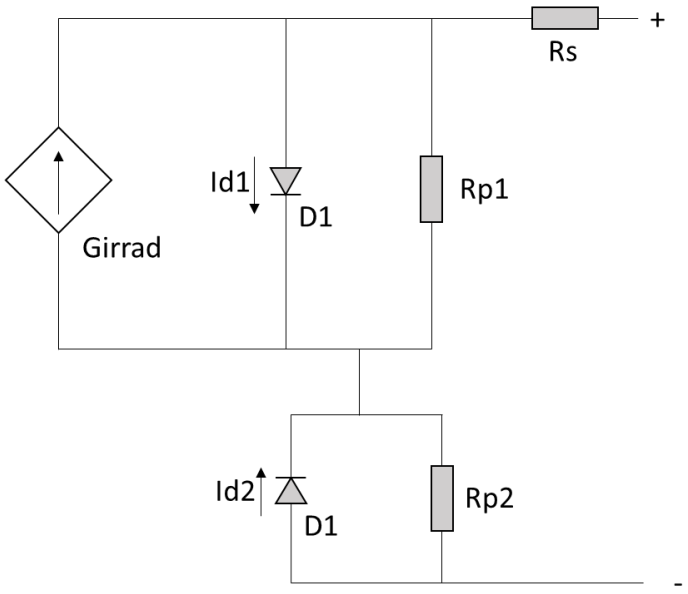


Figura 3.6: Esquema de una célula solar con combinación de circuito de diodo inversa más resistencia *shunt*.

A pesar de que en la teoría desarrollada por los autores descritos se obtuvieron buenos resultados a la hora de representar el efecto *S-Shape* en células orgánicas usando STFT, la simulación en PSPICE de este modelo no permitió obtener dicho efecto.

Como última opción, se pensó en los modelos con fuentes de corriente controladas por tensión. Se ha observado que el efecto *S-Shape* solo se produce durante un intervalo concreto de tensión. Antes y después de dicho intervalo, la característica V-I se comporta como una célula fotovoltaica convencional. Basándonos en esta teoría, puede diseñarse un circuito para PSPICE basado en conmutadores que reduzcan la corriente entre los intervalos de tensión deseados.

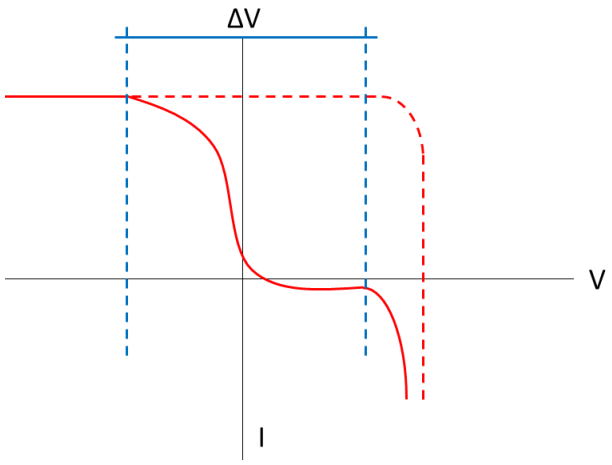
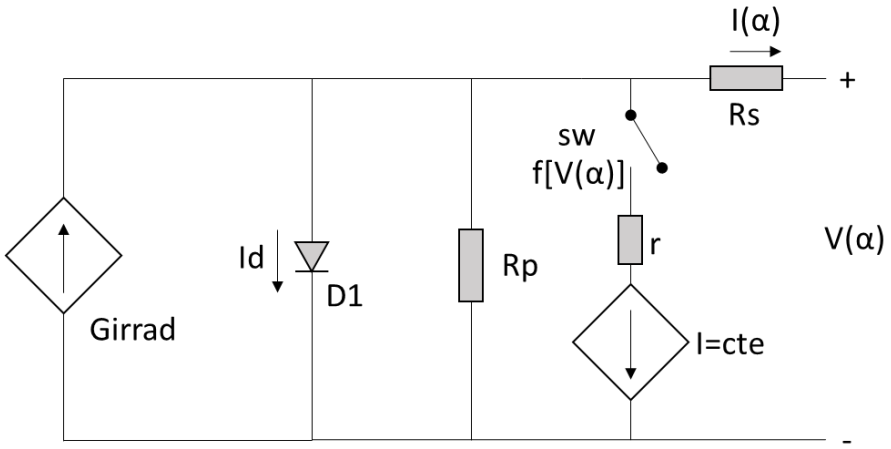


Figura 3.7: Representación gráfica de un efecto *S-Shape* donde puede observarse que la distorsión solo se produce durante un intervalo de tensión.

Para poder representar este efecto en PSPICE, se diseñaron dos esquemas diferentes.



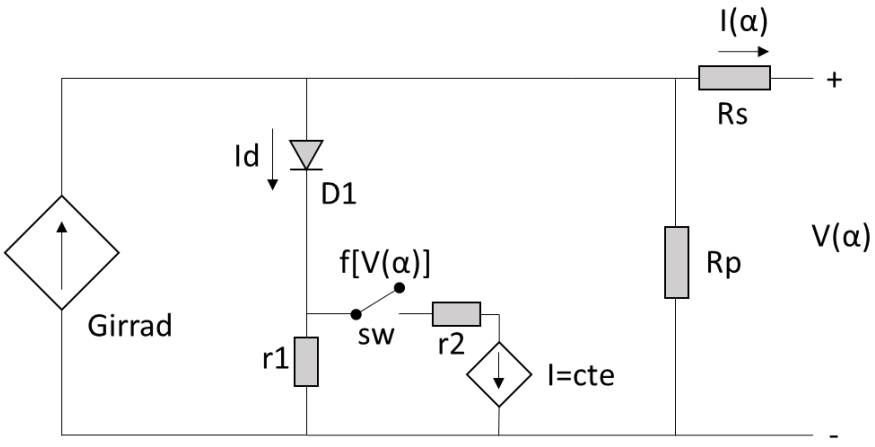


Figura 3.8: Esquemas de células solares con fuentes controladas conmutadas.

La simulación de interruptores en la versión estudiante de PSPICE requería de librerías de las cuales no se disponían, por lo que se desarrolló un nuevo circuito en el que la fuente controlada por tensión sería la *Girrad*.

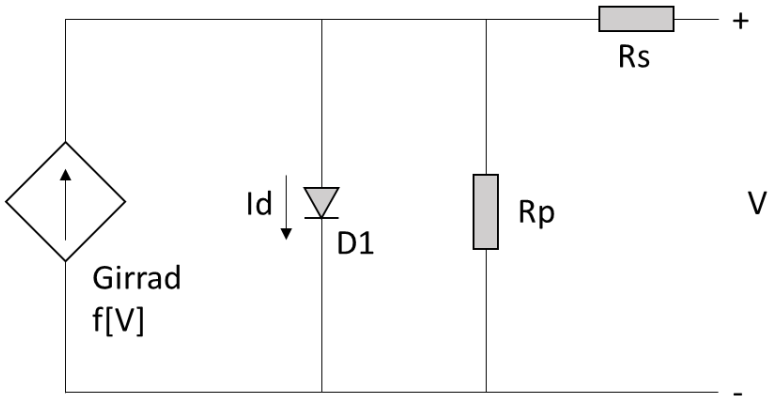
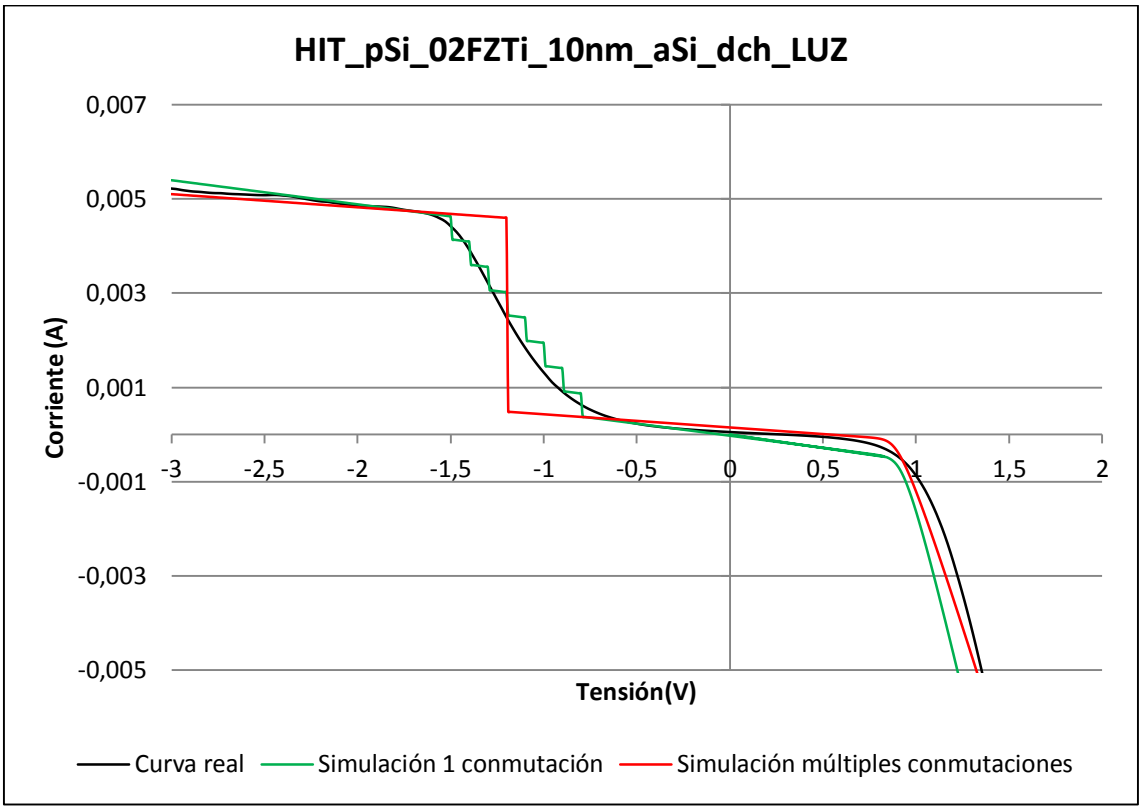


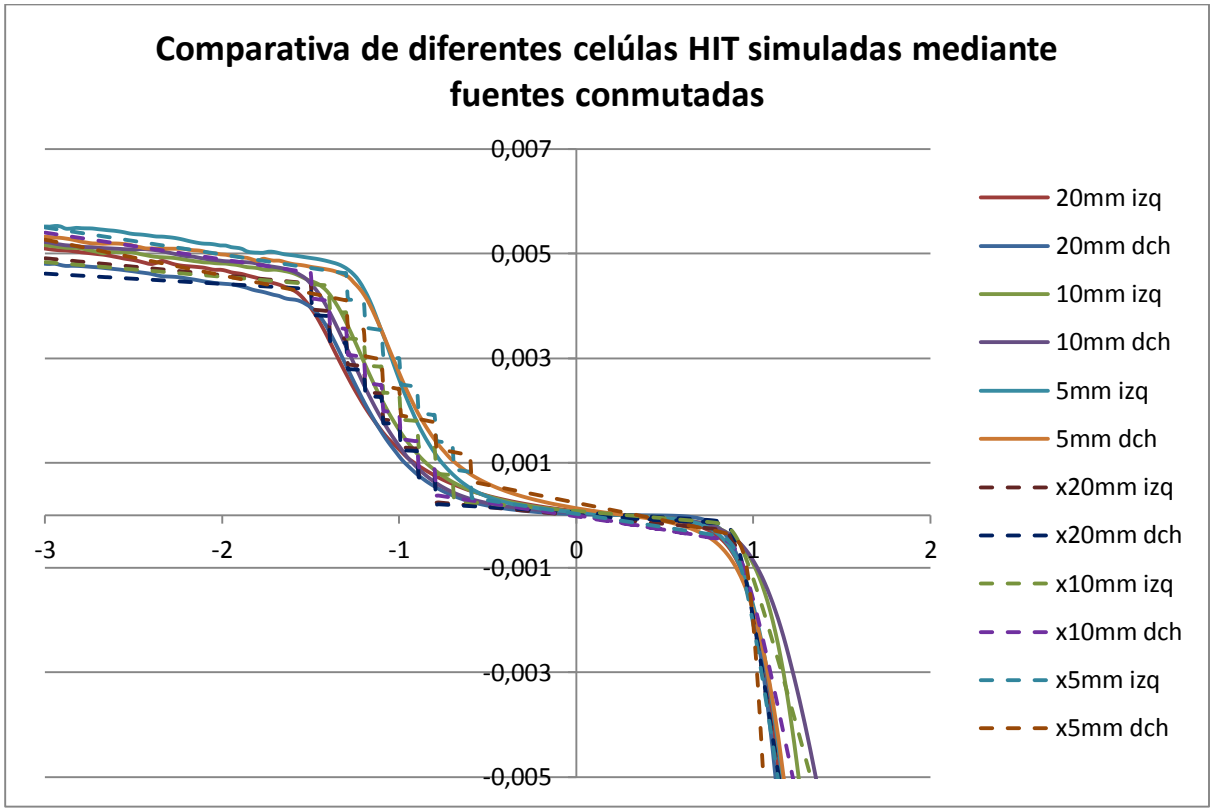
Figura 3.9: Esquema de célula solar con fuente de corriente controlada por tensión.

Mediante la simulación de este circuito se pudo simular un efecto similar a la de una célula HIT con *S-Shape*, obteniendo los siguientes resultados:



Gráfica 3.2: Simulación de célula HIT con fuentes de corriente conmutadas en función de la tensión de salida.

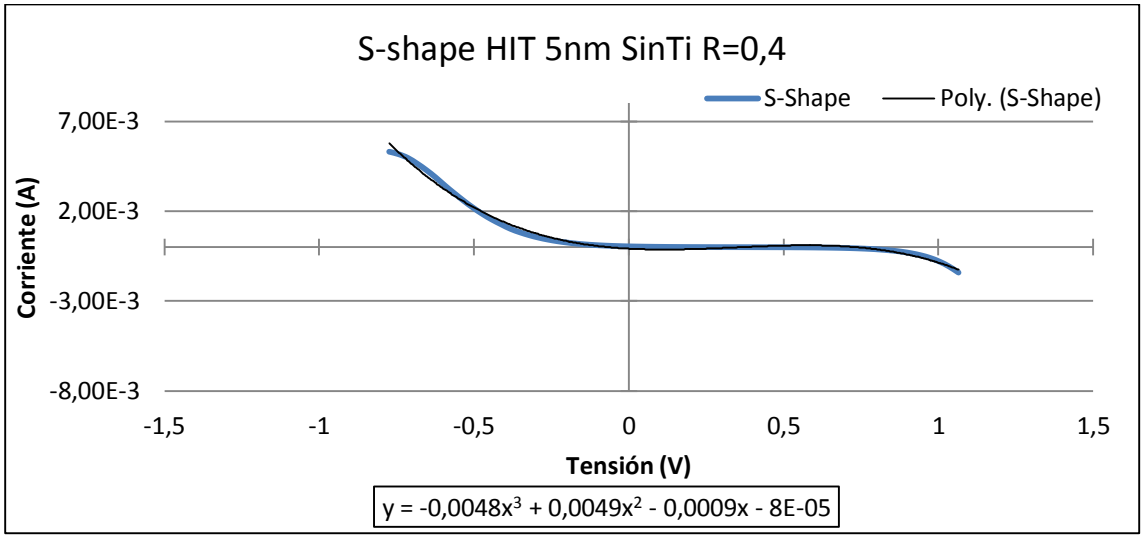
Se simularon en PSPICE dos tipos de circuitos: uno con fuente de corriente conmutada por tensión en punto medio de la S-Shape; y otro con fuente de corriente conmutada por tensión en intervalos regulares durante la *S-Shape*.



Gráfica 3.3: Simulación PSPICE de diversas células HIT de diferente grosor y orientación de la iluminación, mediante el circuito de la fuente controlada por tensión.

Los resultados obtenidos fueron satisfactorios, pero no lo suficiente exactos como para poder obtener una teoría sobre el efecto *S-Shape* producido en las células HIT.

Gracias a los resultados obtenidos por fuentes controladas por tensión, se quiso dar un paso más y realizar fuentes de corriente controladas por una función polinómica extraída directamente de una *S-Shape*. Para conseguir esto, a partir de las características V-I de las células HIT de muestra, se obtuvo la ecuación polinómica de la curva. A continuación puede verse un ejemplo:



Gráfica 3.4: Función polinómica de tercer grado del efecto *S-Shape* de la muestra HIT_pSi_9FZsinTi_5nm_aSi_dch_LUZ.

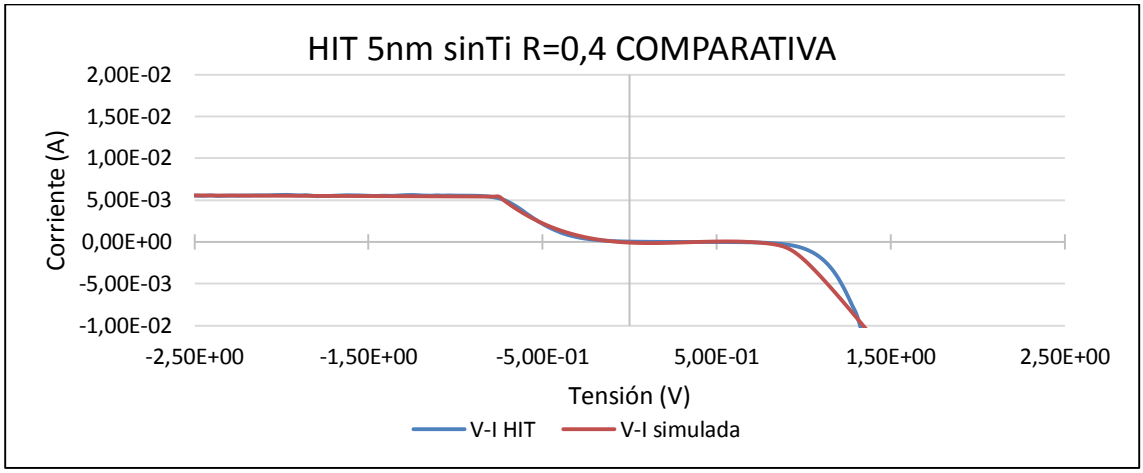
La ecuación polinómica obtenida, se utilizó para controlar la fuente de corriente de la célula solar simulada en PSPICE. De esta manera, la célula solar simulada trabajará de forma convencional hasta el inicio del efecto *S-Shape*. A partir de entonces, la célula empezará a trabajar con una fuente de corriente controlada por la tensión de salida, la cual será un polinomio de tercer grado. En el caso del ejemplo:

$$\text{Girrad } (V<Vs) = (Jsc/1000)\cdot A\cdot V$$

$$\text{Girrad } (V>Vs) = -0{,}0048\cdot V^3 + 0{,}0049\cdot V^2 - 0{,}0009\cdot V - 8\cdot 10^{-5}$$

Vs = punto de tensión en el que la curva empieza a comportarse con *S-Shape.*

La simulación de este circuito de célula fotovoltaica en PSPICE obtuvo resultados muy satisfactorios como se muestra a continuación, siguiendo con el mismo ejemplo:



Gráfica 3.5: Resultados de la simulación de la célula HIT_pSi_9FZsinTi_5nm_aSi_dch_LUZ con fuente controlada por una función polinómica.

En la gráfica anterior, puede observarse como la característica V-I simulada es muy parecida a la característica V-I real de la célula HIT de muestra, llegando a obtener un error RMS en tensión de 1,04% un error RMS en corriente del 1,35%, mayormente debido al último cuadrante de la gráfica X-Y.

Como conclusión, se ha decidido utilizar el modelo de fuente de corriente controlada por función polinómica de tensión debido a la exactitud de los resultados. En todo momento se calculará el error RMS para comprobar que se mantiene dentro de un margen estable. Por último, se extrapolarán las ecuaciones polinómicas de la característica V-I real y simulada para estudiar su relación.

En el ejemplo que nos ocupa, las ecuaciones de las características V-I han sido:

- Ecuación característica V-I de la célula HIT de muestra:

$y = -1{,}74E\text{-}04x^6 - 1{,}47E\text{-}03x^5 - 3{,}52E\text{-}03x^4 - 5{,}69E\text{-}04x^3 + 4{,}71E\text{-}03x^2 - 1{,}26E\text{-}03x + 4{,}73E\text{-}04$

- Ecuación característica V-I de la célula HIT simulada:

$y = 1{,}01E\text{-}04x^6 + 1{,}59E\text{-}04x^5 - 1{,}24E\text{-}03x^4 - 2{,}40E\text{-}03x^3 + 2{,}28E\text{-}04x^2 - 1{,}70E\text{-}03x + 1{,}22E\text{-}03$

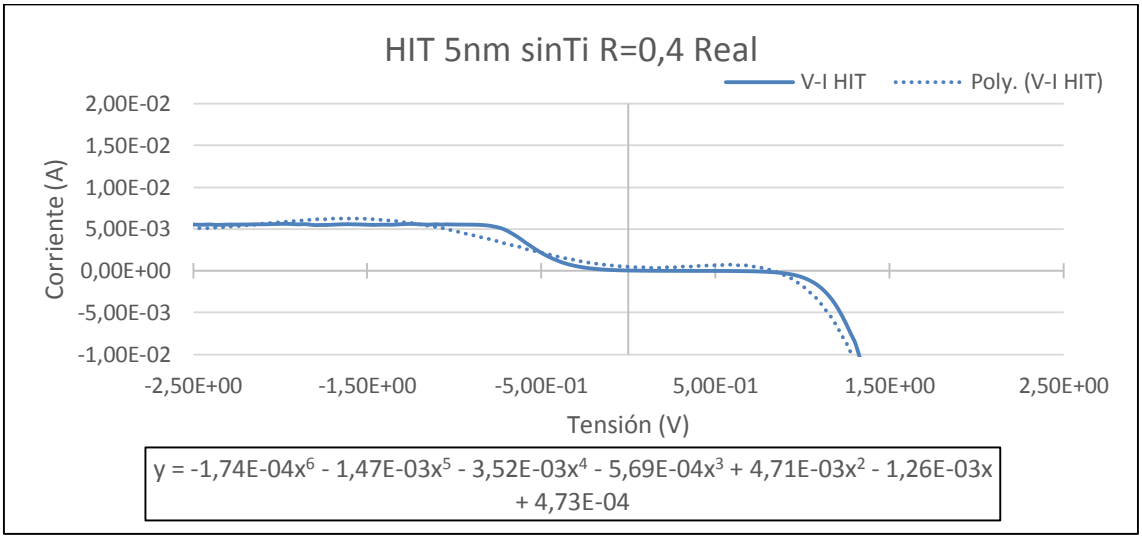
Puede observarse como, a pesar que los dos primeros factores difieren, los demás son parecidos. Estas ecuaciones podrán utilizarse para estudios matemáticos posteriores con el fin de encontrar una ecuación que las relacione.

3.3 Medidas y resultados prácticos de las simulaciones de células HIT con resistividad 0,4

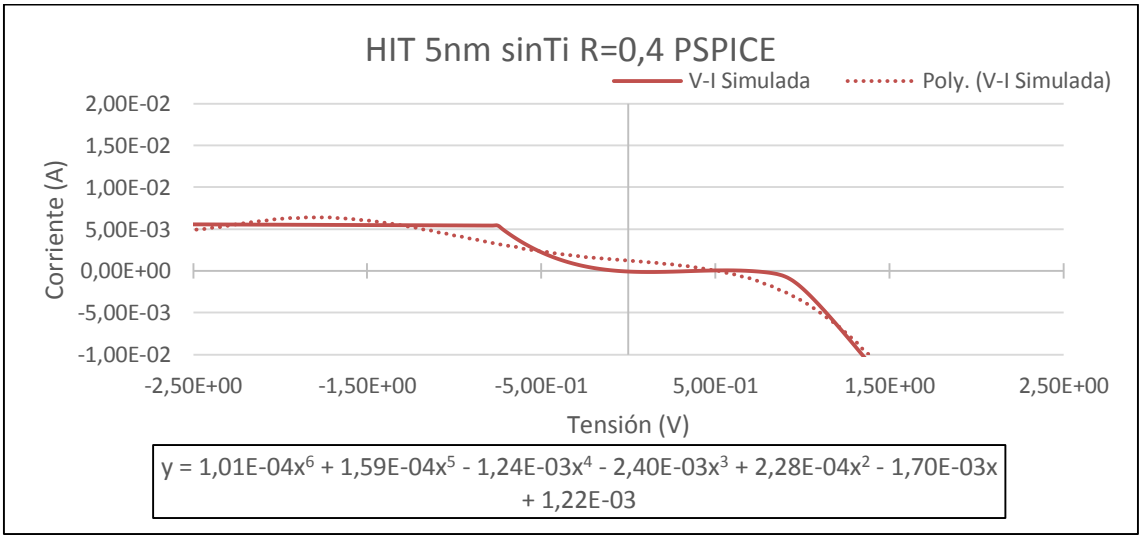
A continuación se muestran los resultados obtenidos en las simulaciones PSpice de las células HIT con resistividad 0,4Ω·cm, con y sin implantación de titanio, comparándolas con las características reales de las células obtenidas las mediciones realizadas en el trabajo Tecnología de fabricación de células solares con materiales candidatos a presentar banda intermedia. [6].

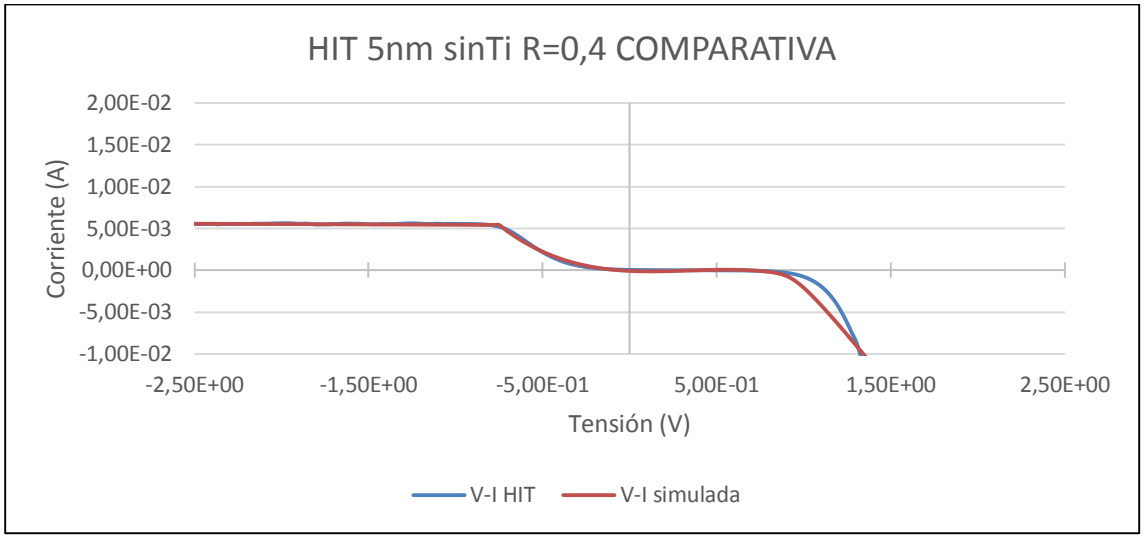
3.3.1 Resultados de simulación en células HIT sin implantación de titanio (R=0,4Ω·cm)

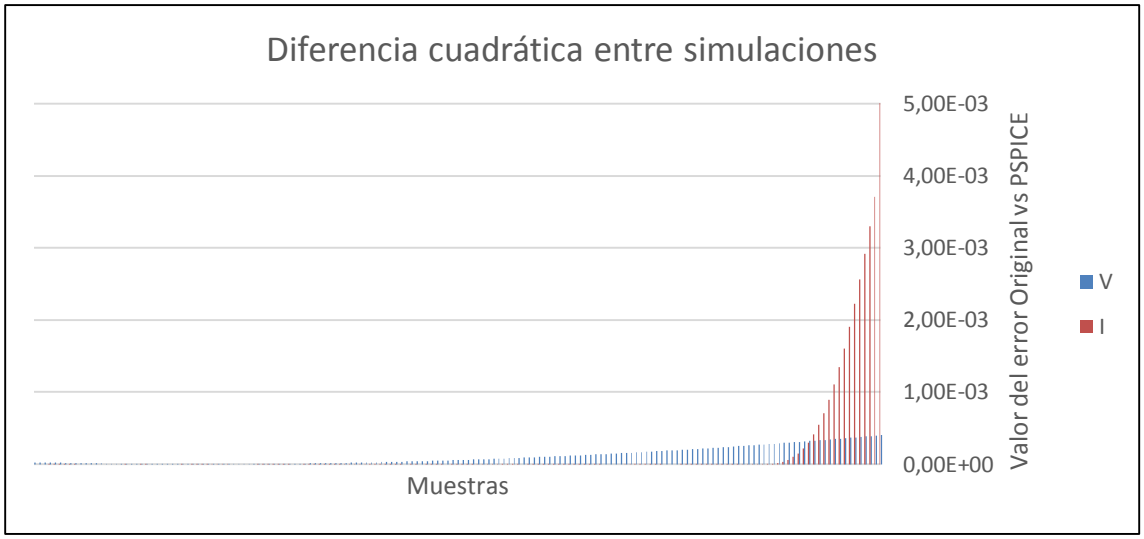
HIT_pSi_9FZsinTi_5nm_aSi_dch_LUZ - Real	
A (cm^2)	0,25
Isc (A)	0,000040898
Voc (V)	0,37185929648
Rsh (Ω)	775,193798449612
Rs (Ω)	5,93507033058342



HIT_pSi_9FZsinTi_5nm_aSi_dch_LUZ - PSPICE	
A (cm^2)	0,25
Isc (A)	-0,00007975
Voc (V)	0,393162
Rsh (Ω)	12000
Rs (Ω)	38







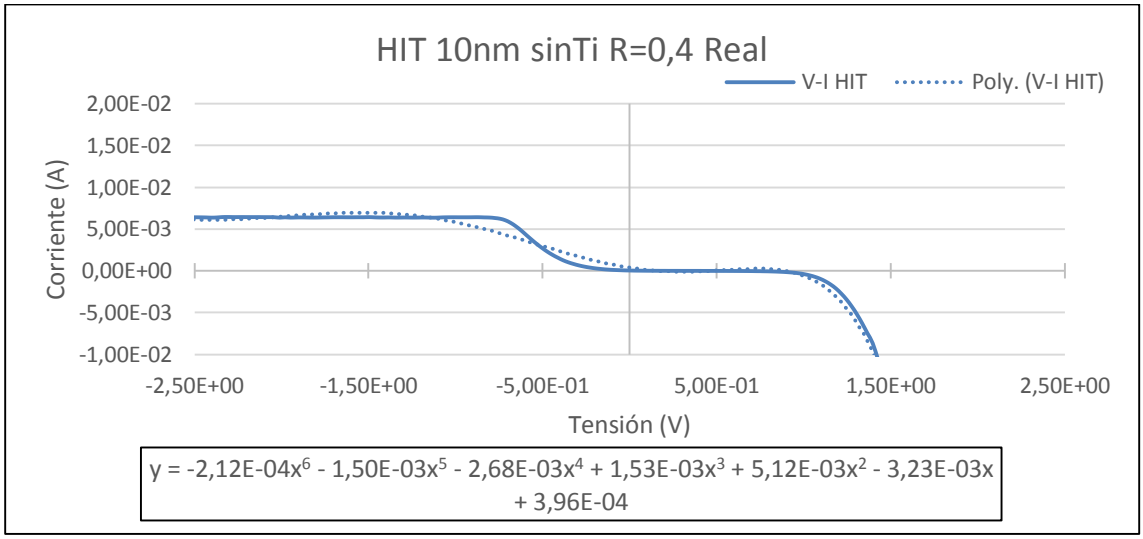
RMS (V)	1,04%	RMS (I)	1,35%

Como puede observarse, el resultado simulado es bastante similar a la característica V-I de la célula de muestra. La única desviación significativa se encuentra en el último cuadrante de la gráfica x-y, donde la simulación PSPICE se desvía y no cae exponencialmente.

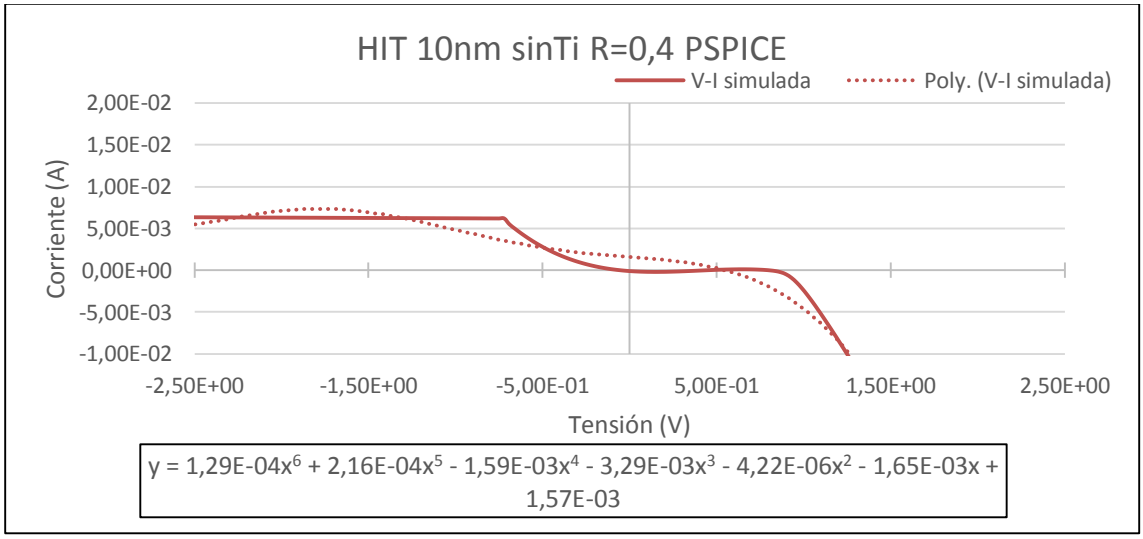
La corriente de cortocircuito obtenida es negativa debido a que en la simulación, la característica V-I corta dos veces el eje de las x mediante una pequeña ondulación.

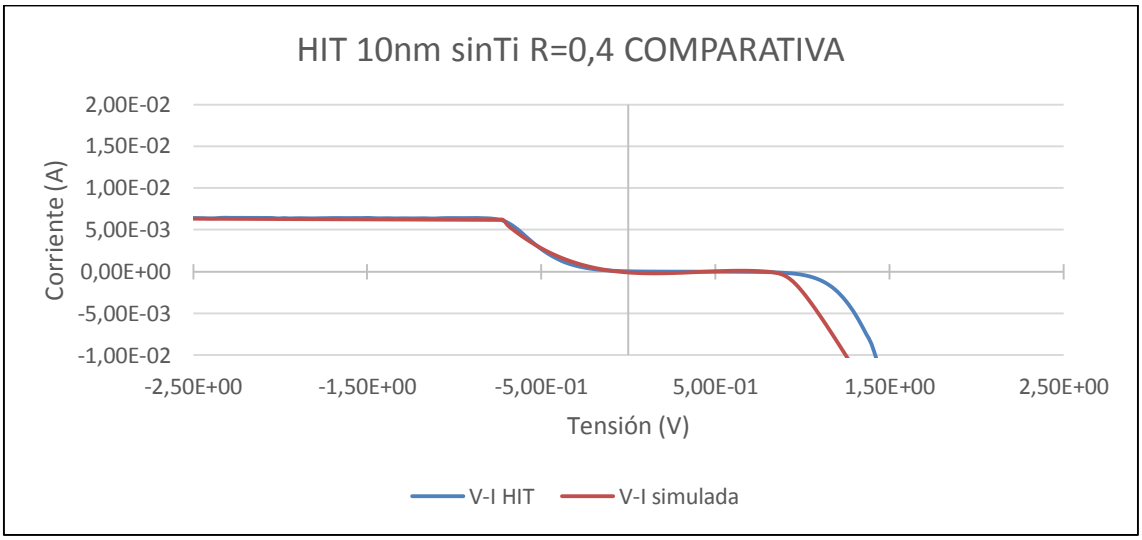
El efecto *S-Shape* se produce alrededor de los -750mV.

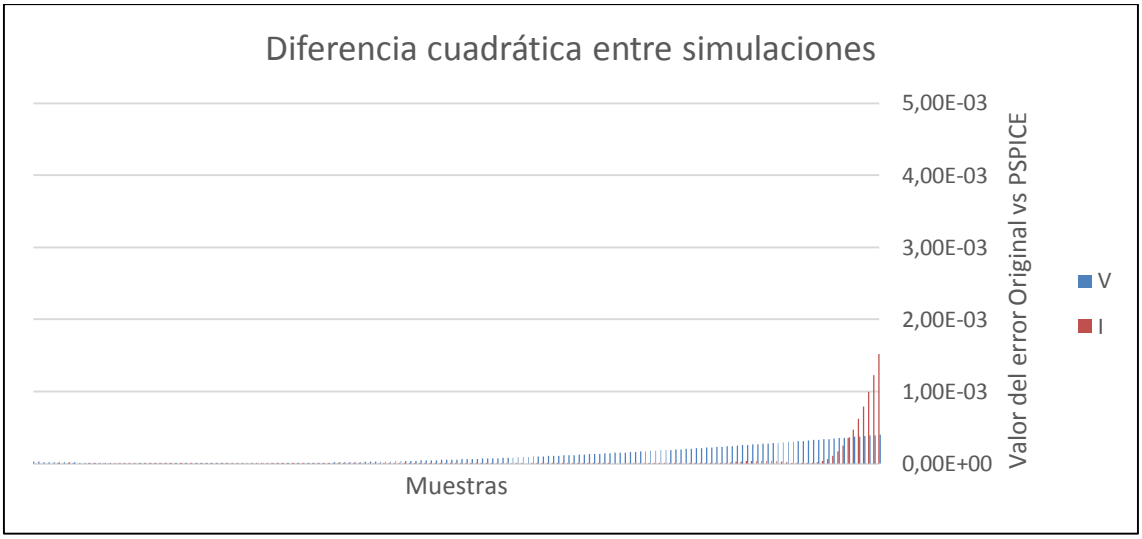
HIT_pSi_9FZsinTi_10nm_aSi_dch_LUZ - Real	
A (cm^2)	0,25
Isc (A)	0,000040768
Voc (V)	0,37185929648
Rsh (Ω)	1265,82278481013
Rs (Ω)	5,88824118235883



HIT_pSi_9FZsinTi_10nm_aSi_dch_LUZ - PSPICE	
A (cm^2)	0,25
Isc (A)	-0,00009977
Voc (V)	0,444915
Rsh (Ω)	12000
Rs (Ω)	28



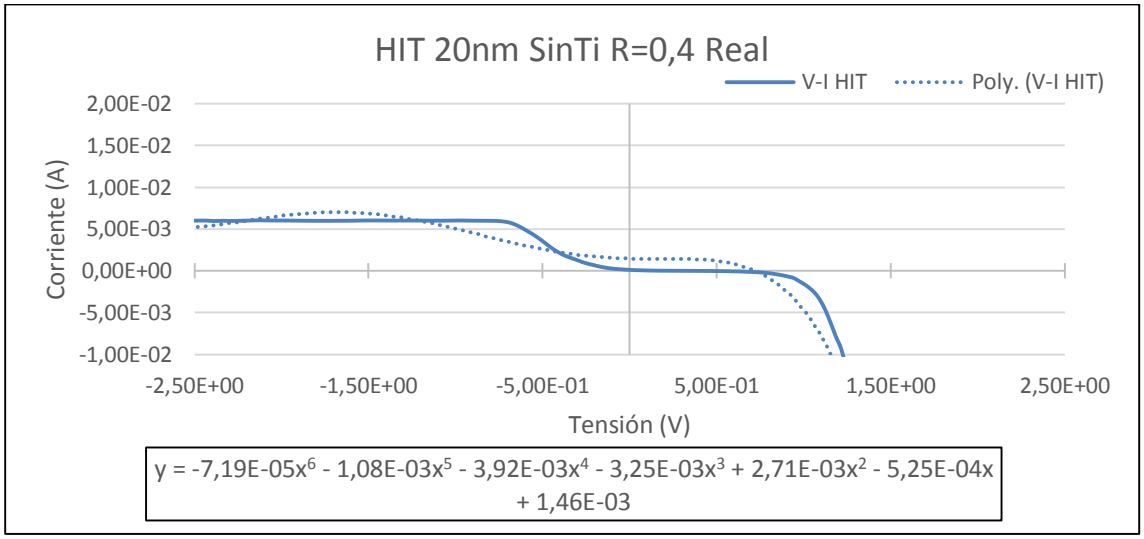




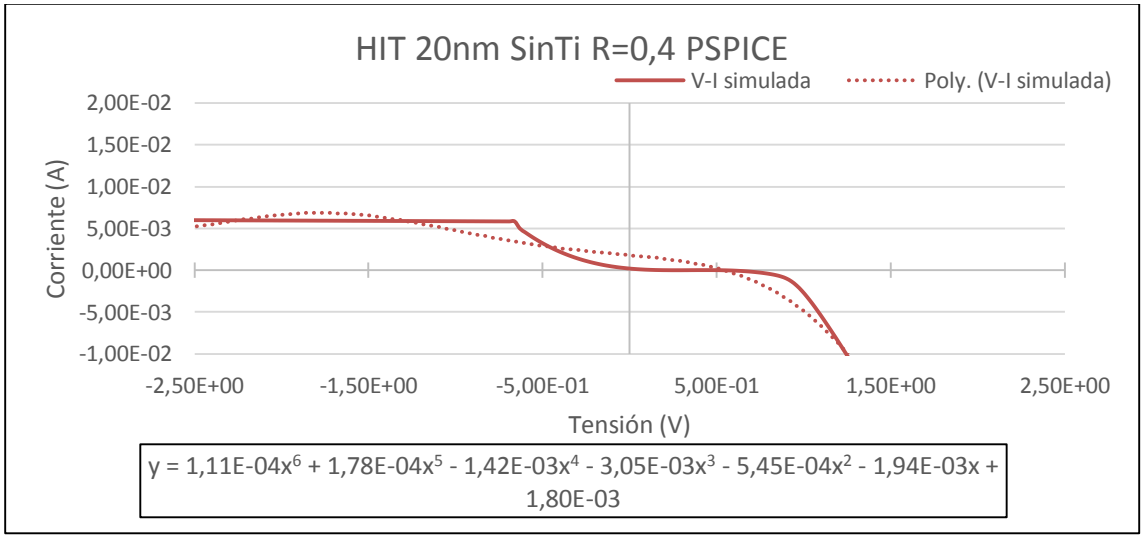
RMS (V)	1,04%	RMS (I)	0,65%

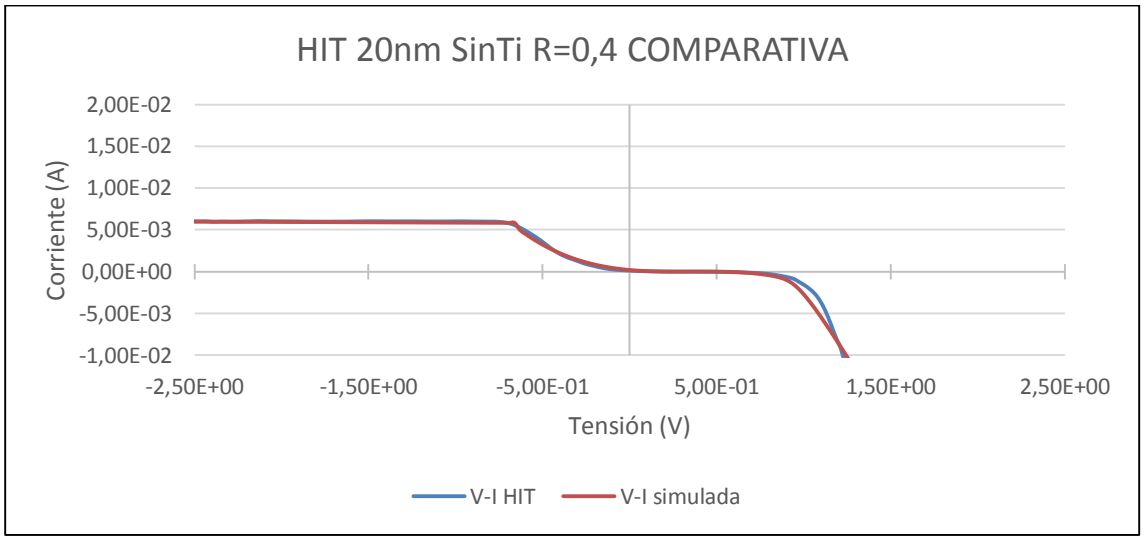
En este caso, el aumento de grosor no implica un cambio significativo en la respuesta. En esta simulación, el decremento de la corriente en el último cuadrante se ha obtenido en un valor inferior, no obstante el error RMS resultante es menor.

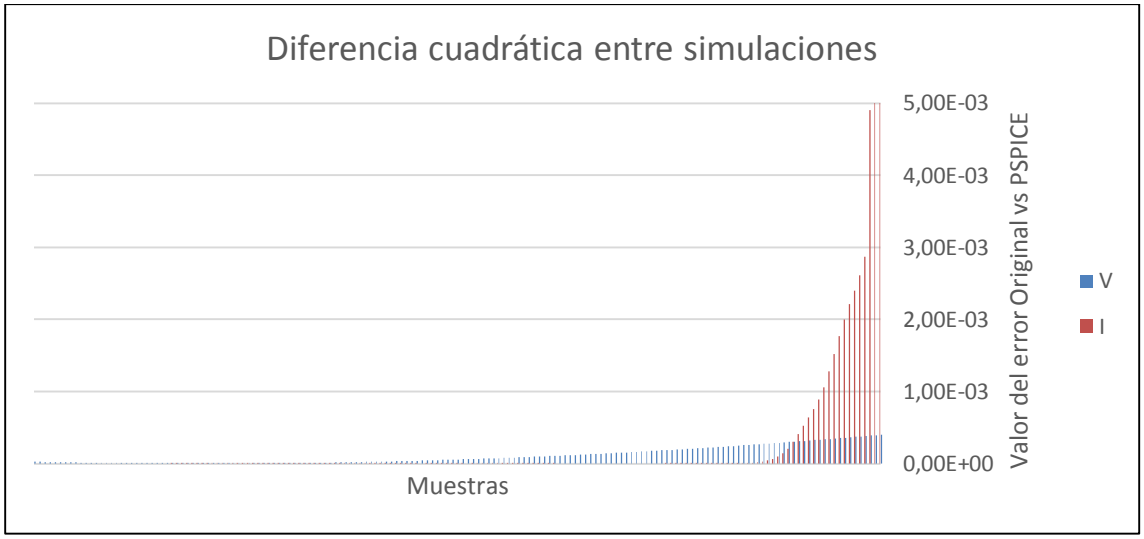
HIT_pSi_9FZsinTi_20nm_aSi_dch_LUZ - Real	
A (cm^2)	0,25
Isc (A)	0,00011538
Voc (V)	0,37185929648
Rsh (Ω)	462,962962962963
Rs (Ω)	9,3711929528629



HIT_pSi_9FZsinTi_20nm_aSi_dch_LUZ - PSPICE	
A (cm^2)	0,25
Isc (A)	0,0001995
Voc (V)	0,525862
Rsh (Ω)	12000
Rs (Ω)	28



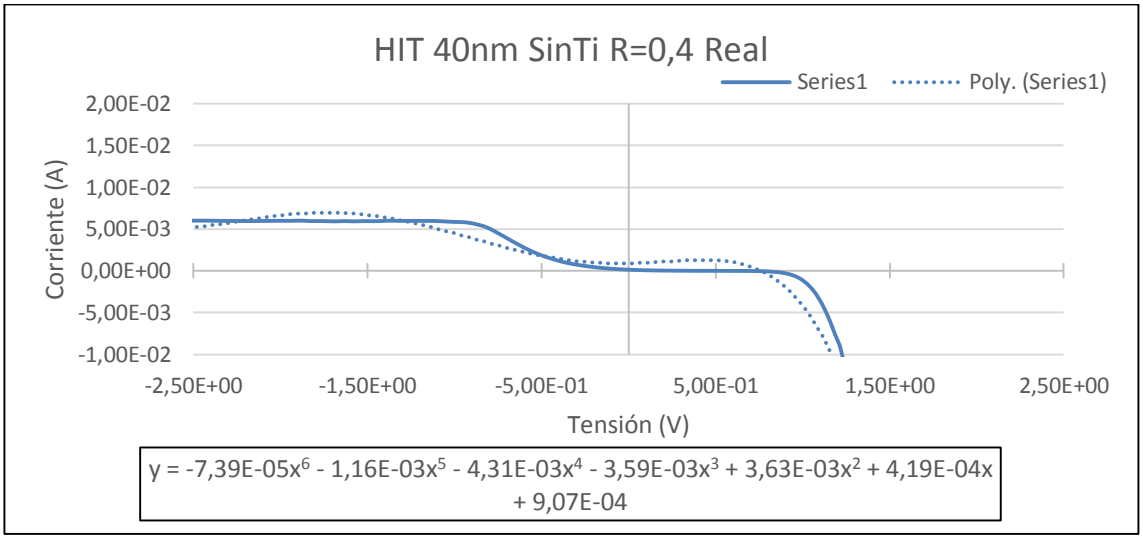




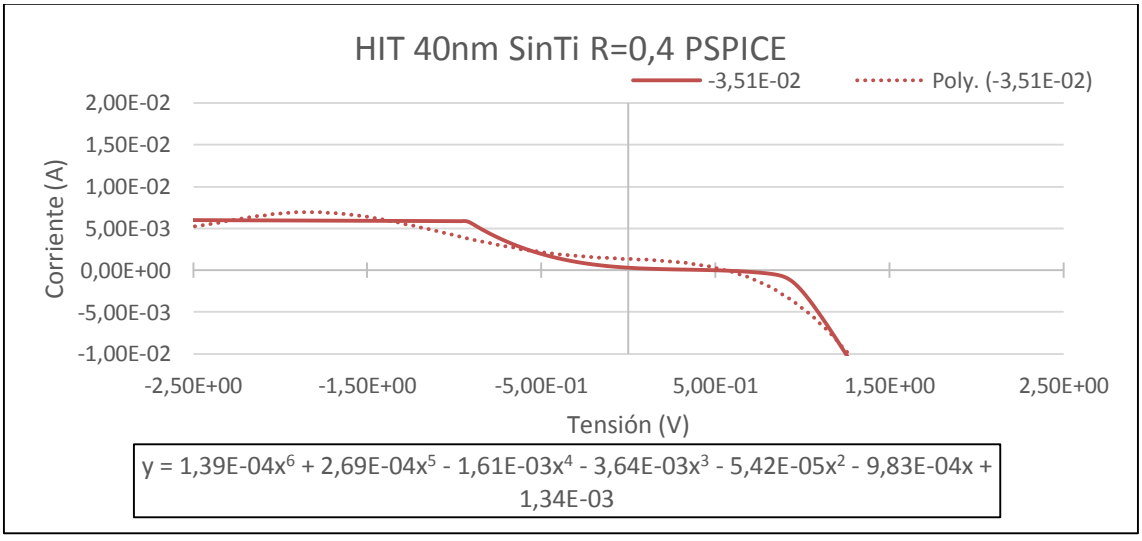
RMS (V)	1,04%	RMS (I)	1,53%

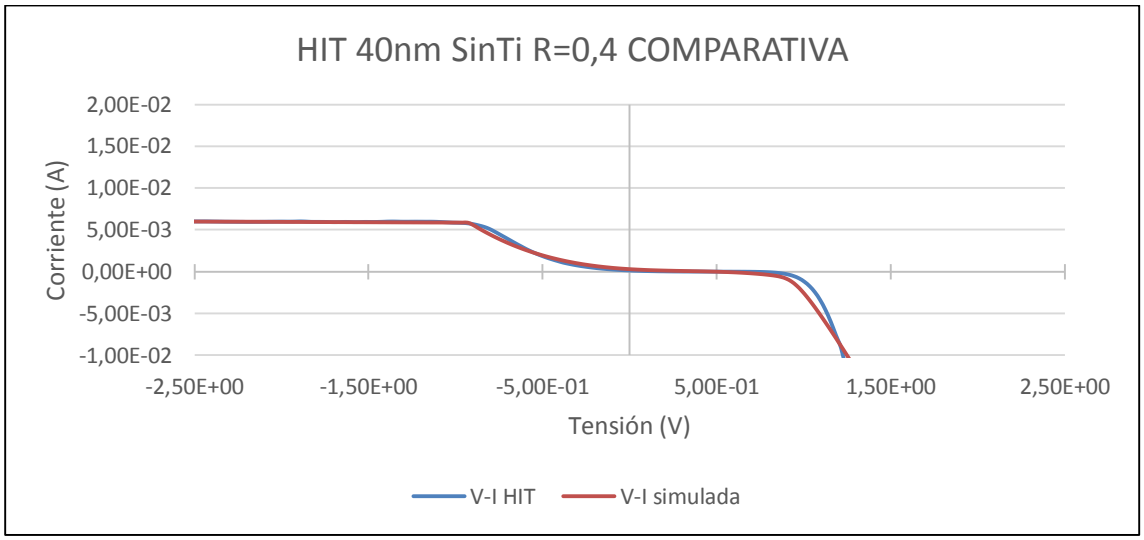
No hay cambios significativos respecto a las gráficas anteriores.

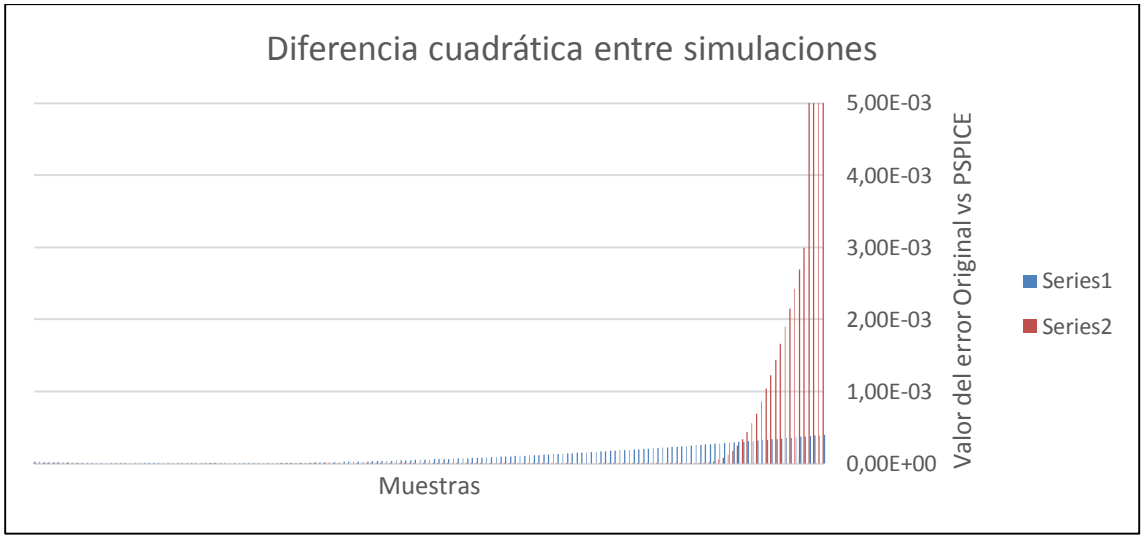
HIT_pSi_9FZsinTi_40nm_aSi_dch_LUZ - Real	
A (cm^2)	0,25
Isc (A)	0,000133
Voc (V)	0,5527638191
Rsh (Ω)	386,100386100386
Rs (Ω)	10,0170289492137



HIT_pSi_9FZsinTi_40nm_aSi_dch_LUZ - PSPICE	
A (cm^2)	0,25
Isc (A)	0,0002993
Voc (V)	0,491379
Rsh (Ω)	12000
Rs (Ω)	28





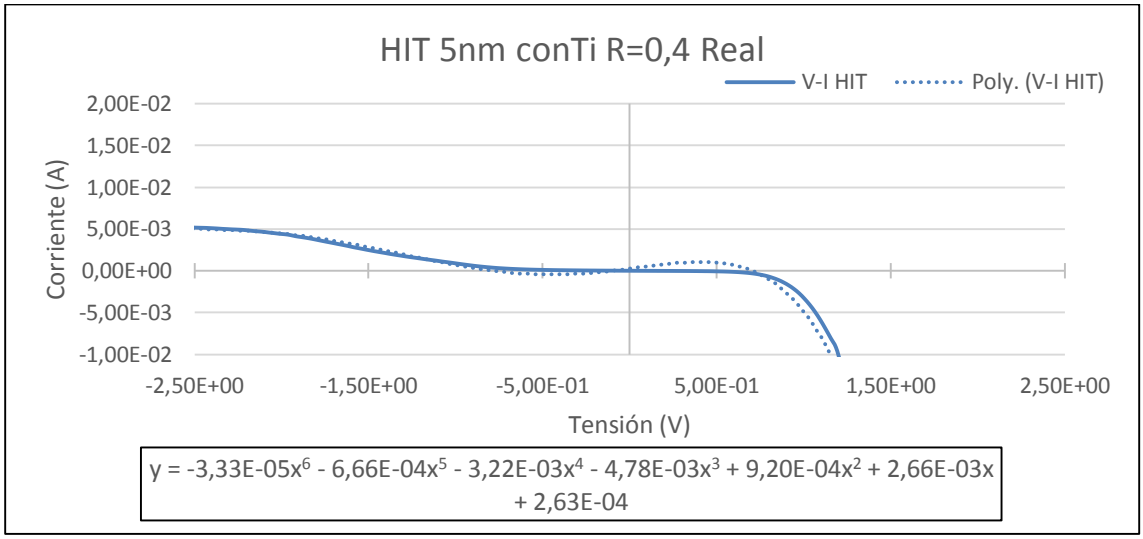


RMS (V)	1,04%	RMS (I)	1,66%

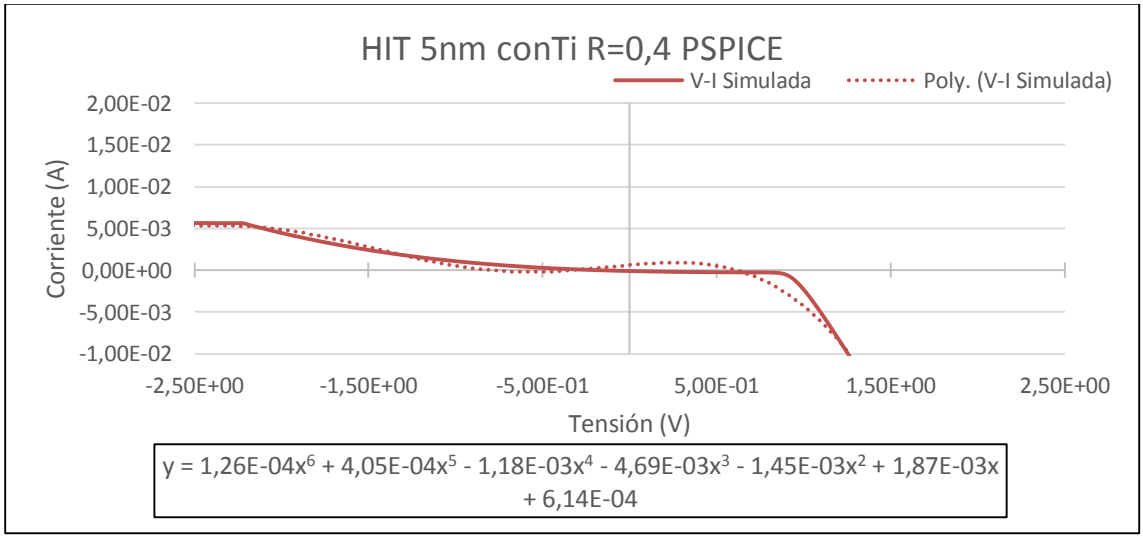
En esta simulación, puede apreciarse como con el aumento del grosor, el efecto *S-Shape* empieza a producirse antes, a los -900mV.

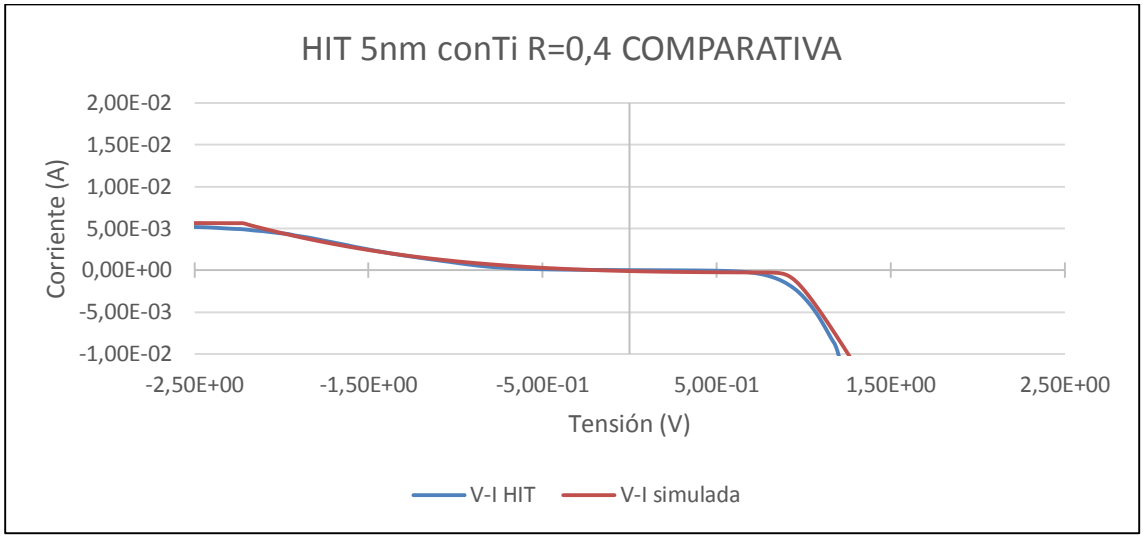
3.3.2 Resultados de simulación en células HIT con implantación de titanio (R=0,4Ω·cm)

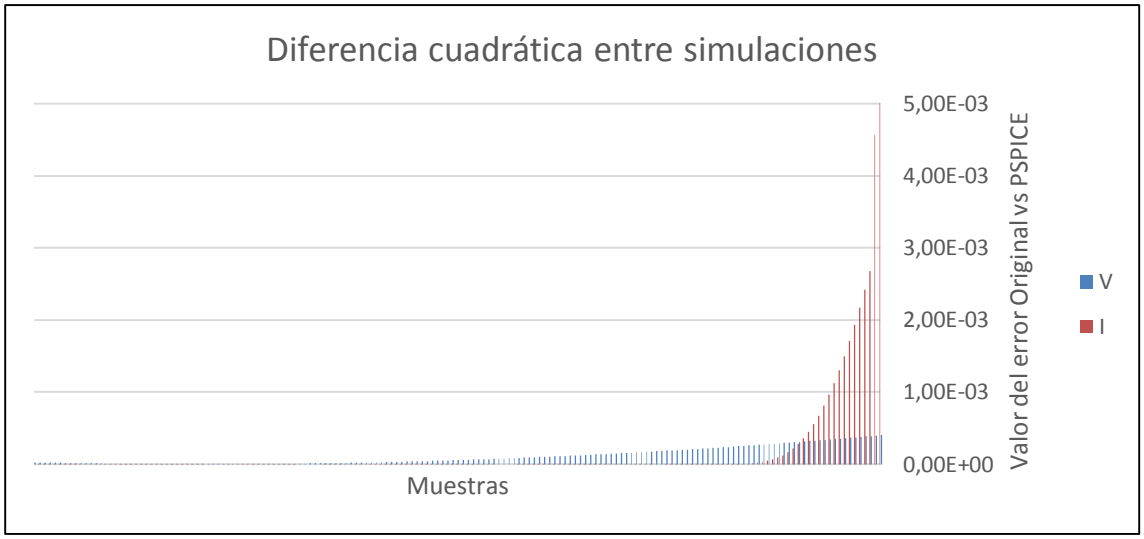
HIT_pSi_3FZTi_5nm_aSi_dch_LUZ - Real	
A (cm^2)	0,25
Isc (A)	0,000013234
Voc (V)	0,1608040201
Rsh (Ω)	775,193798449612
Rs (Ω)	5,93507033058342



HIT_pSi_3FZTi_5nm_aSi_dch_LUZ - PSPICE	
A (cm^2)	0,25
Isc (A)	-0,00009977
Voc (V)	-0,173729
Rsh (Ω)	12000
Rs (Ω)	28



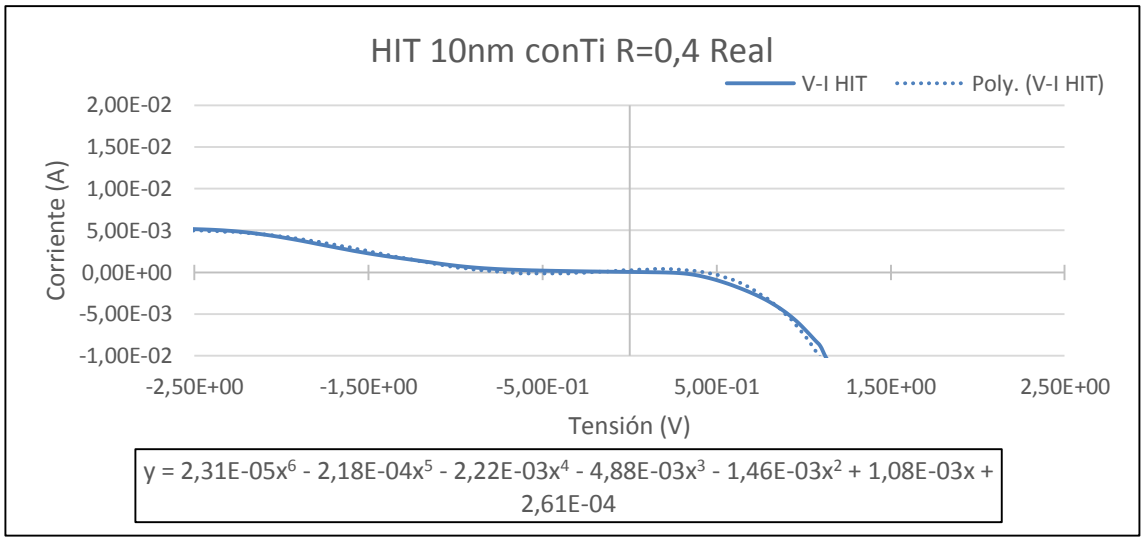




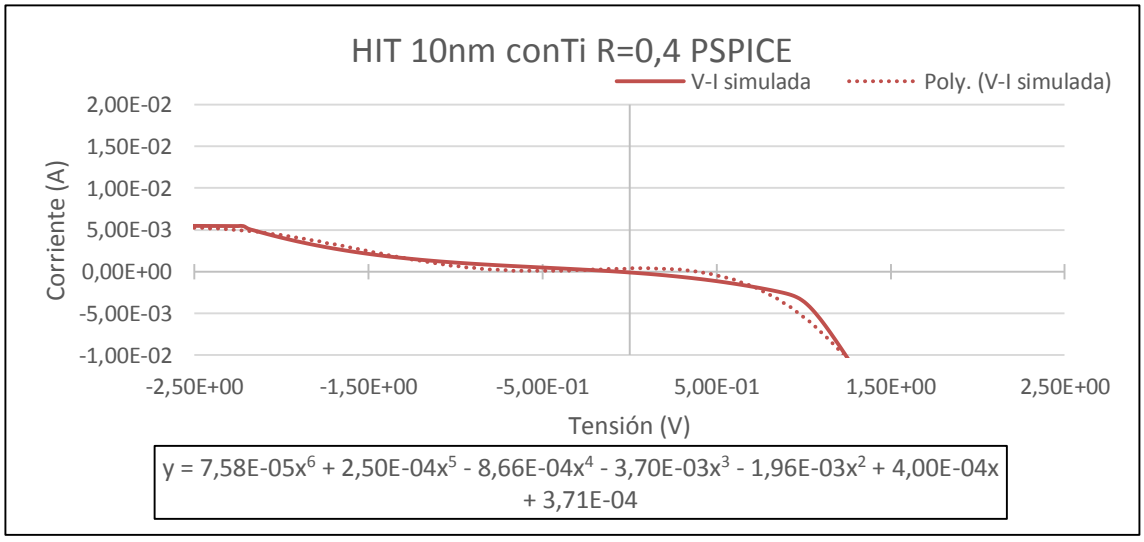
RMS (V)	1,04%	RMS (I)	1,33%

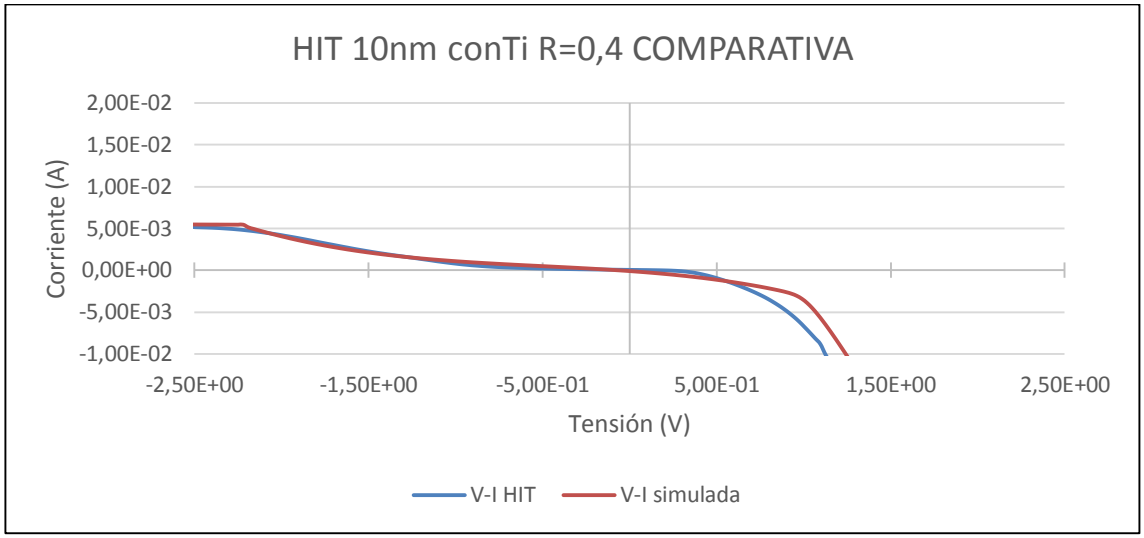
La implantación de titanio produce que la *S-Shape* sea una curva más plana y se produzca mucho antes, a los -2,4V aproximadamente de la característica V-I. Consecuentemente, también existe un tramo más largo en la característica V-I donde la corriente es muy pequeña.

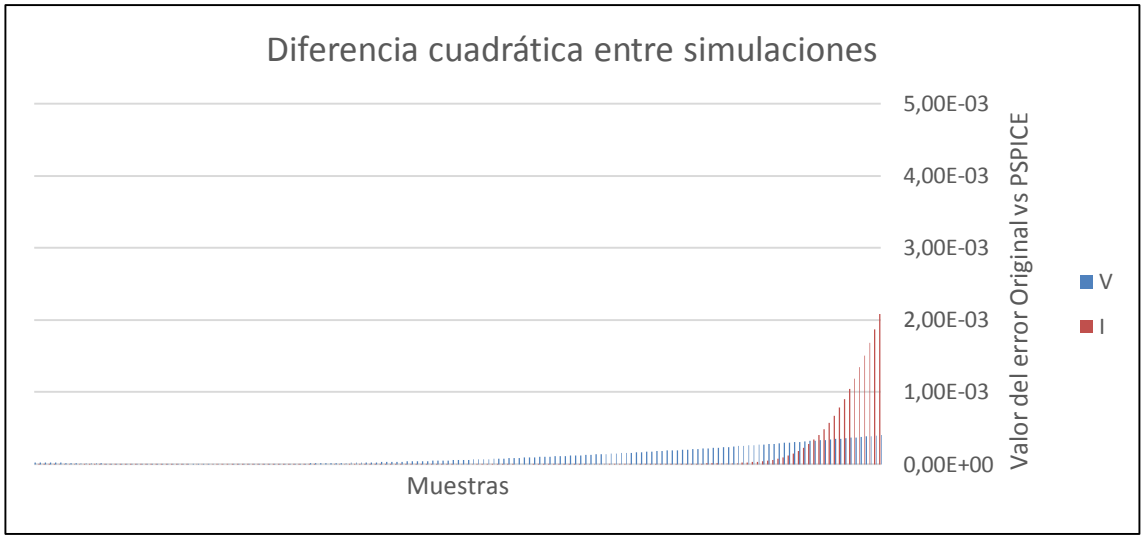
HIT_pSi_3FZTi_10nm_aSi_dch_LUZ - Real	
A (cm^2)	0,25
Isc (A)	0,000040506
Voc (V)	0,1608040201
Rsh (Ω)	1265,82278481013
Rs (Ω)	5,88824118235883



HIT_pSi_3FZTi_10nm_aSi_dch_LUZ - PSPICE	
A (cm^2)	0,25
Isc (A)	-0,00009977
Voc (V)	-0,072034
Rsh (Ω)	12000
Rs (Ω)	28



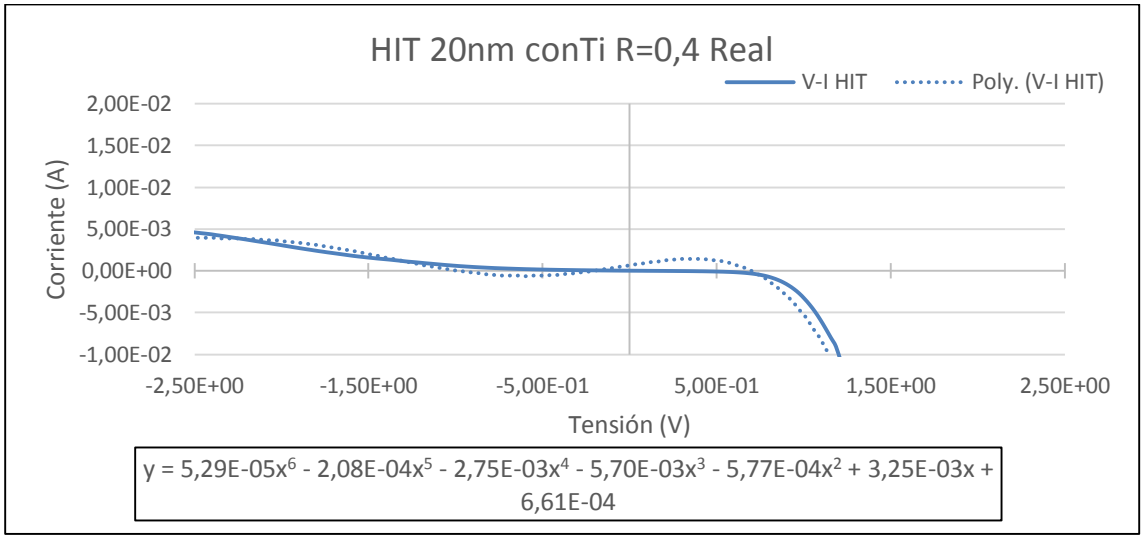




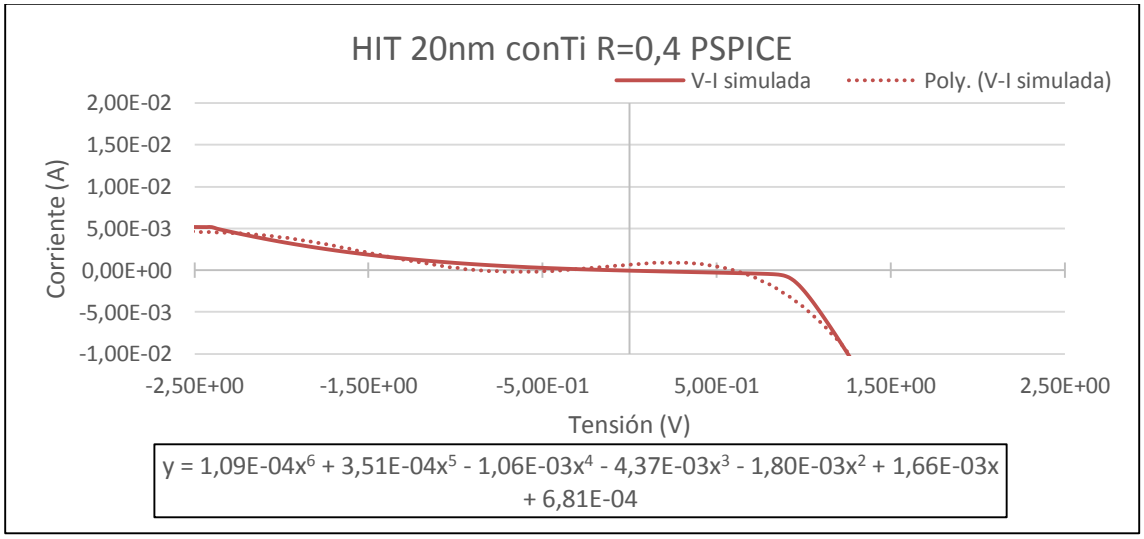
RMS (V)	1,04%	RMS (I)	0,99%

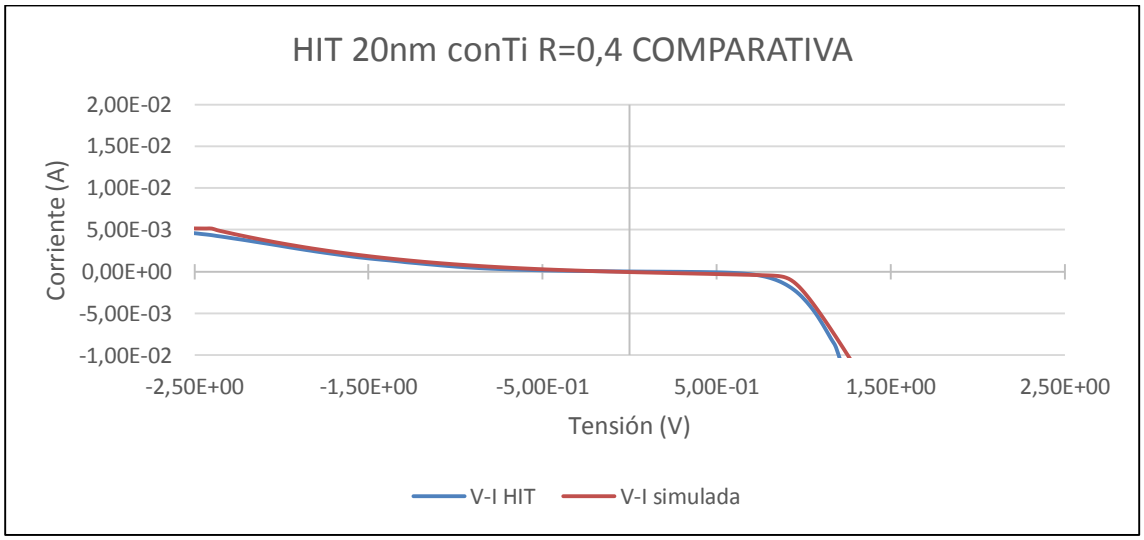
En este caso, se produce un efecto similar al anterior. La única diferencia apreciable es que el aumento de corriente inversa en el último cuadrante se produce con una tensión menor.

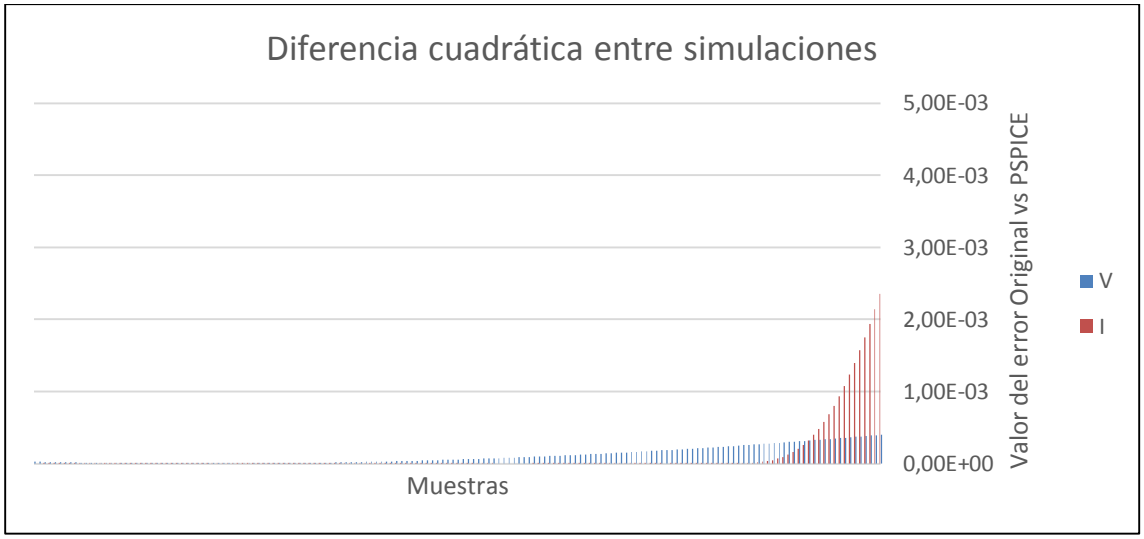
HIT_pSi_3FZTi_20nm_aSi_dch_LUZ - Real	
A (cm^2)	0,25
Isc (A)	0,000020608
Voc (V)	0,1608040201
Rsh (Ω)	462,962962962963
Rs (Ω)	9,3711929528629



HIT_pSi_3FZTi_20nm_aSi_dch_LUZ - PSPICE	
A (cm^2)	0,25
Isc (A)	-0,00004983
Voc (V)	-0,091463
Rsh (Ω)	8000
Rs (Ω)	28



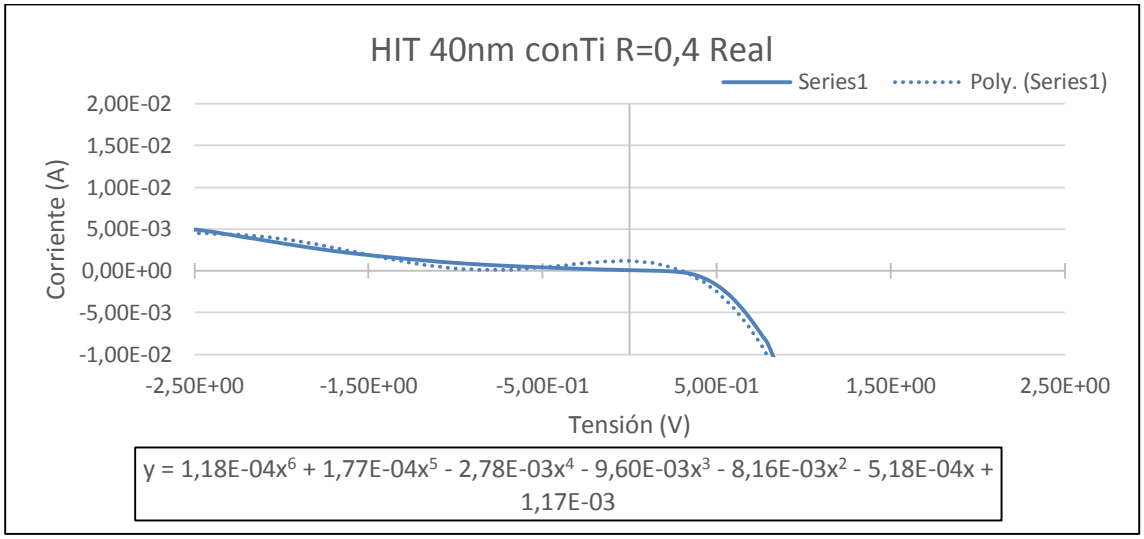




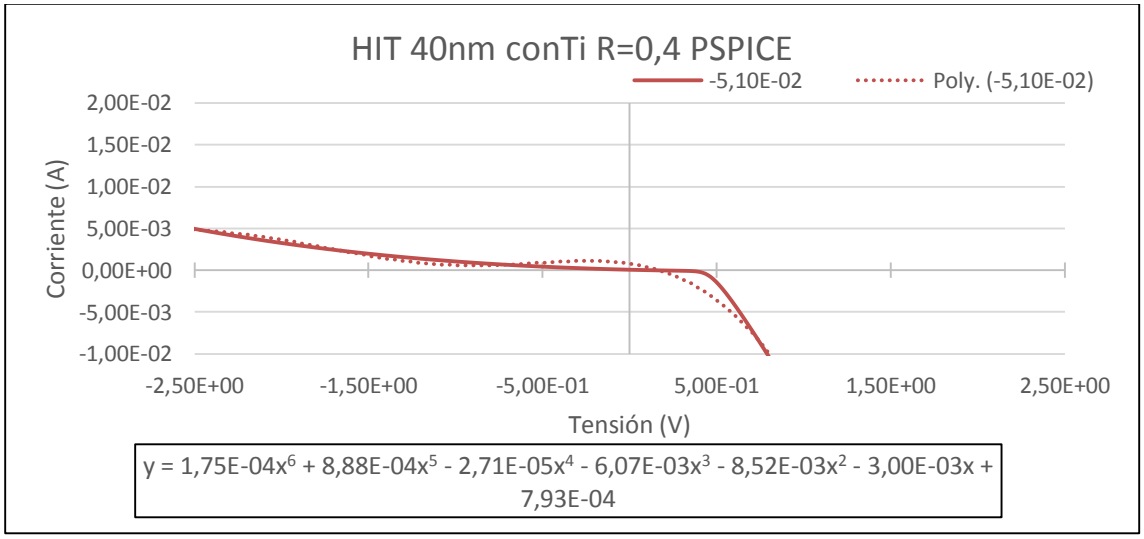
RMS (V)	1,04%	RMS (I)	1,06%

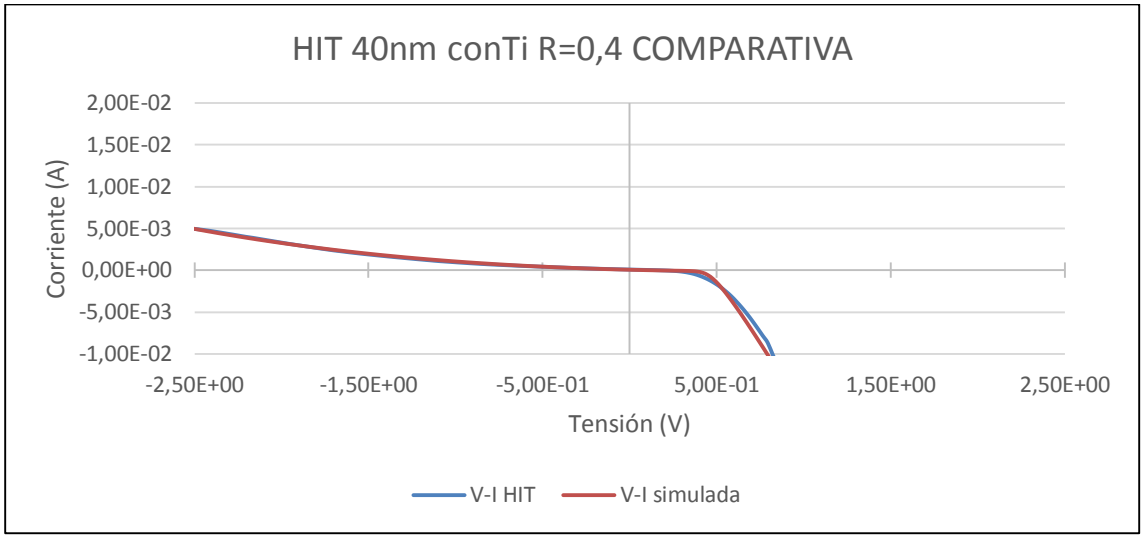
En esta simulación no se han encontrado diferencias significativas con el primer caso.

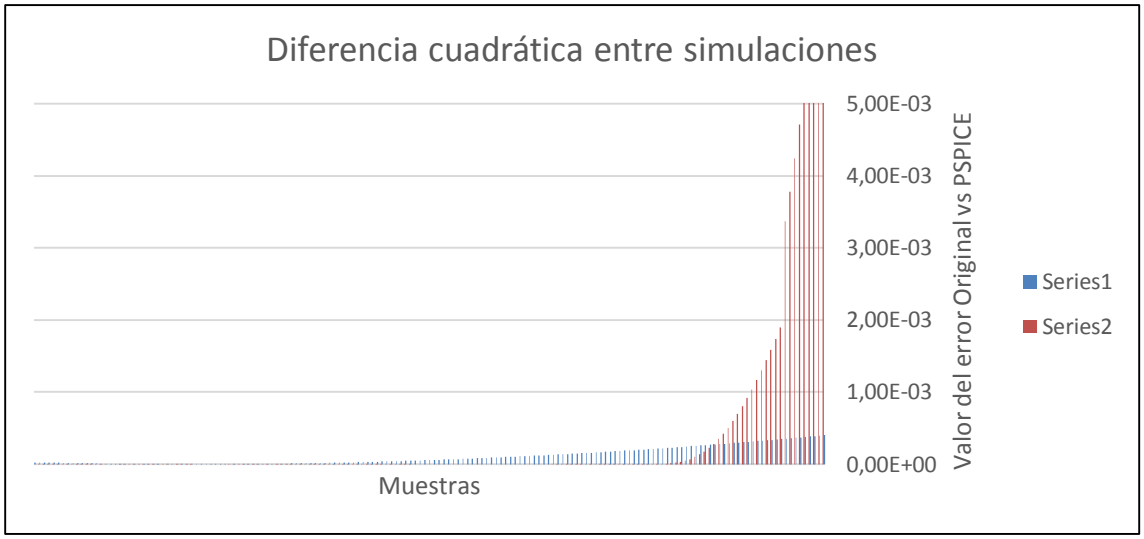
HIT_pSi_3FZTi_40nm_aSi_dch_LUZ - Real	
A (cm^2)	0,25
Isc (A)	0,00007914
Voc (V)	0,1608040201
Rsh (Ω)	386,100386100386
Rs (Ω)	10,0170289492137



HIT_pSi_3FZTi_40nm_aSi_dch_LUZ - PSPICE	
A (cm^2)	0,25
Isc (A)	0,00005979
Voc (V)	0,128049
Rsh (Ω)	8000
Rs (Ω)	28







RMS (V)	1,04%	RMS (I)	1,96%

A diferencia de las otras simulaciones, en este caso, ha sido necesario ajustar la densidad de corriente en oscuridad a 2·10-9 A/cm^2 para poder obtener los resultados deseados. Aun así, en esta simulación se ha obtenido el peor resultado en cuanto a similitud con los resultados reales, llegando a obtener un RMS en los datos de corriente del 1,96%.

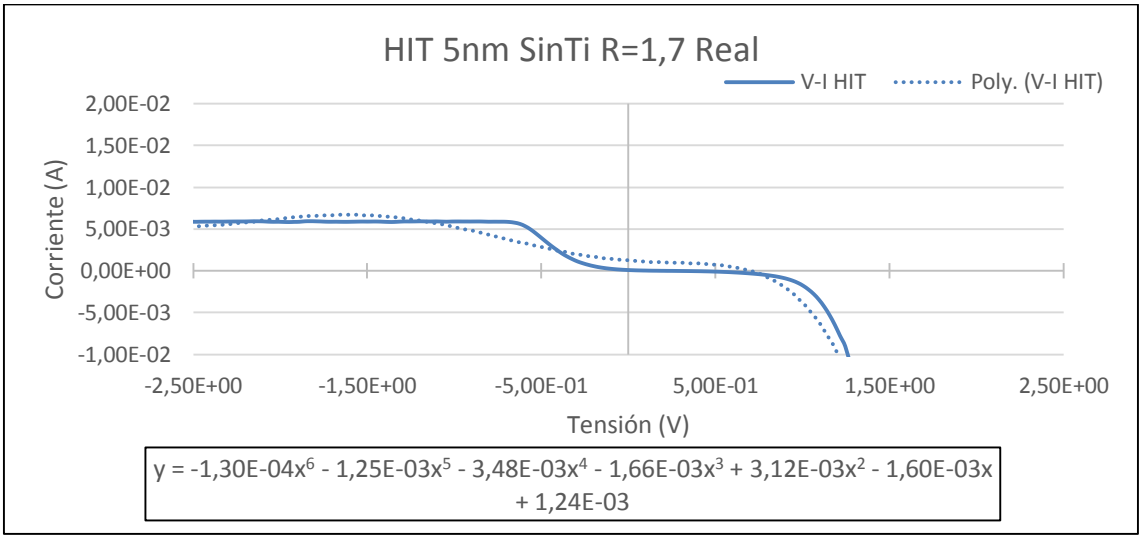
Asimismo, puede observarse como, en el caso de la muestra sin implantación de titanio, conforme aumenta el grosor de la célula, el efecto *S-Shape* se produce con una tensión negativa mayor, llegando a casi -2,7V.

3.4 Medidas y resultados prácticos de las simulaciones de células HIT con resistividad 1,7

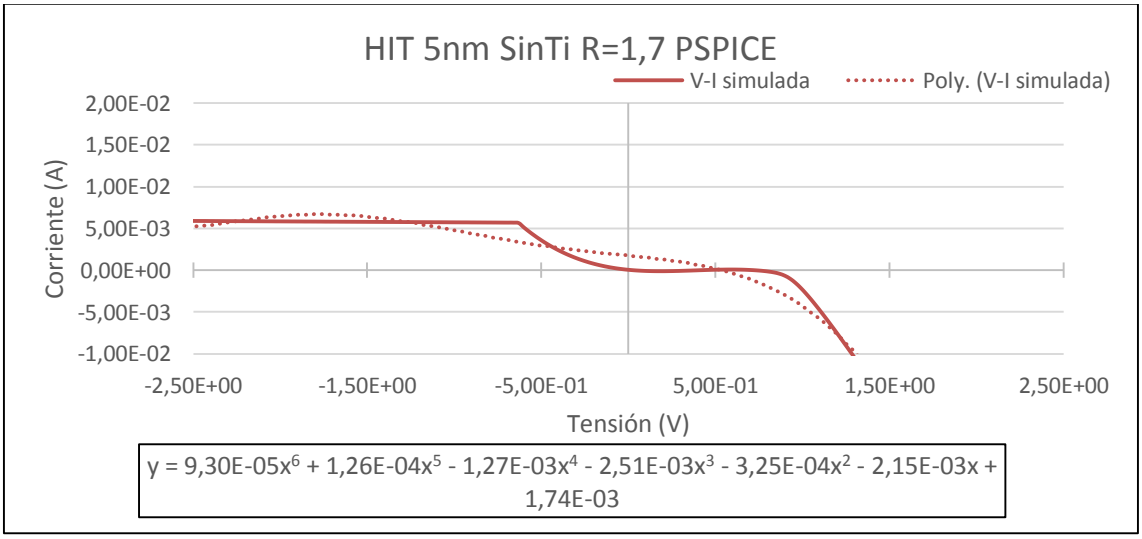
A continuación se muestran los resultados obtenidos en las simulaciones PSpice de las células HIT con resistividad 1,7Ω·cm, con y sin implantación de titanio, comparándolas con las características reales de las células obtenidas las mediciones realizadas en el trabajo "*Tecnología de fabricación de células solares con materiales candidatos a presentar banda intermedia*" [6].

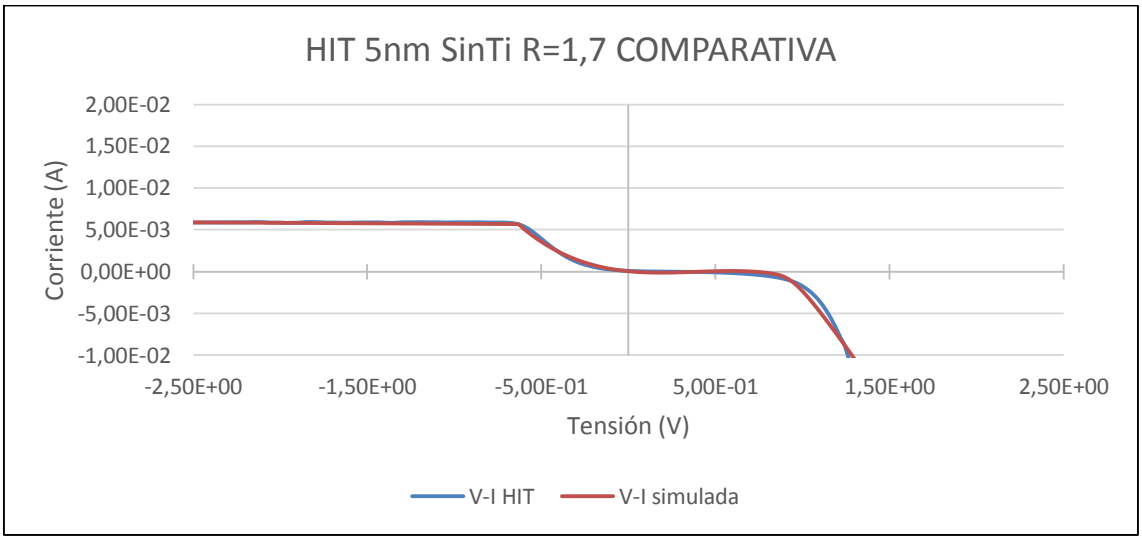
3.4.1 Resultados de simulación en células HIT sin implantación de titanio (R=1,7Ω·cm)

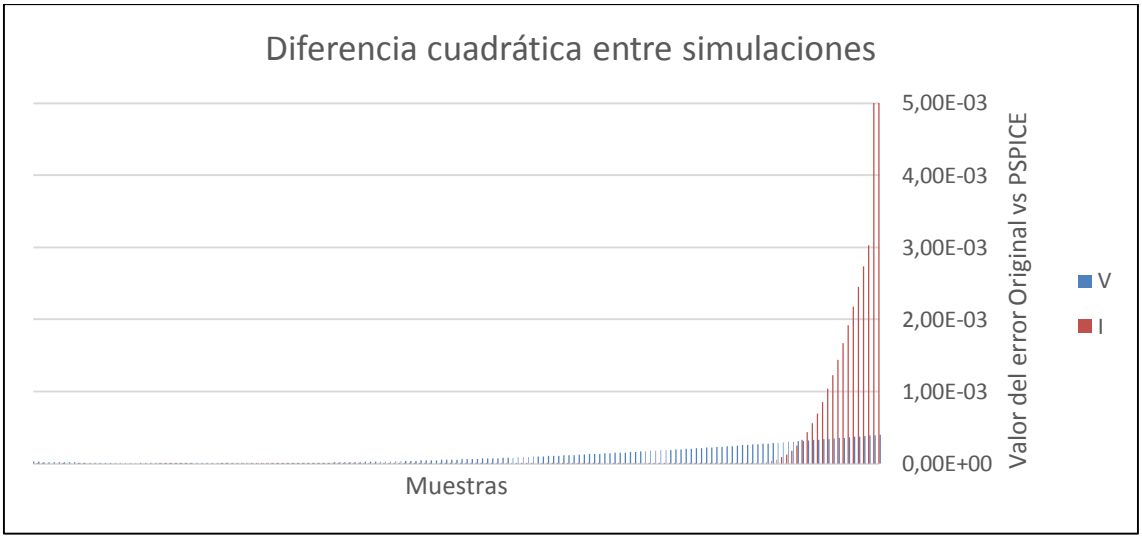
HIT_pSi_12FZsinTi_5nm_aSi_dch_LUZ - Real	
A (cm^2)	0,25
Isc (A)	0,00008898
Voc (V)	0,25125628141
Rsh (Ω)	775,193798449612
Rs (Ω)	5,93507033058342



HIT_pSi_12FZsinTi_5nm_aSi_dch_LUZ - PSPICE	
A (cm^2)	0,25
Isc (A)	0,00004982
Voc (V)	0,413375
Rsh (Ω)	9000
Rs (Ω)	32



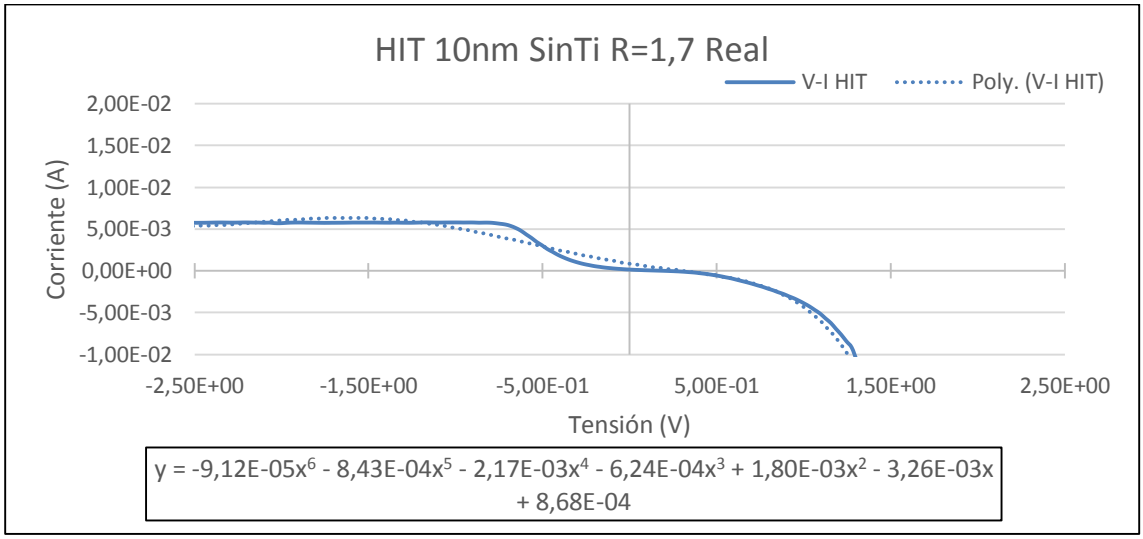




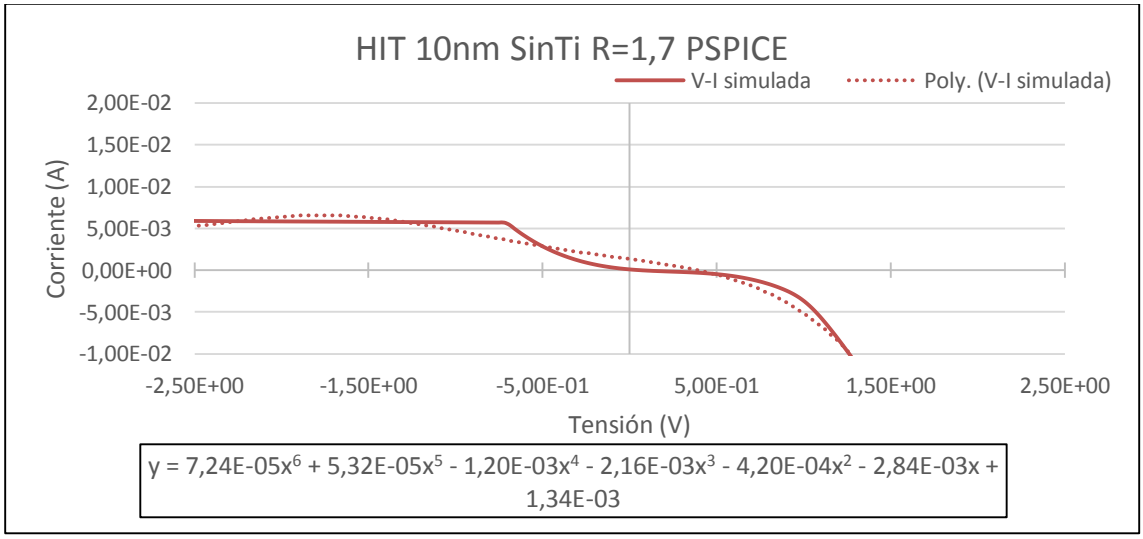
RMS (V)	1,04%	RMS (I)	1,39%

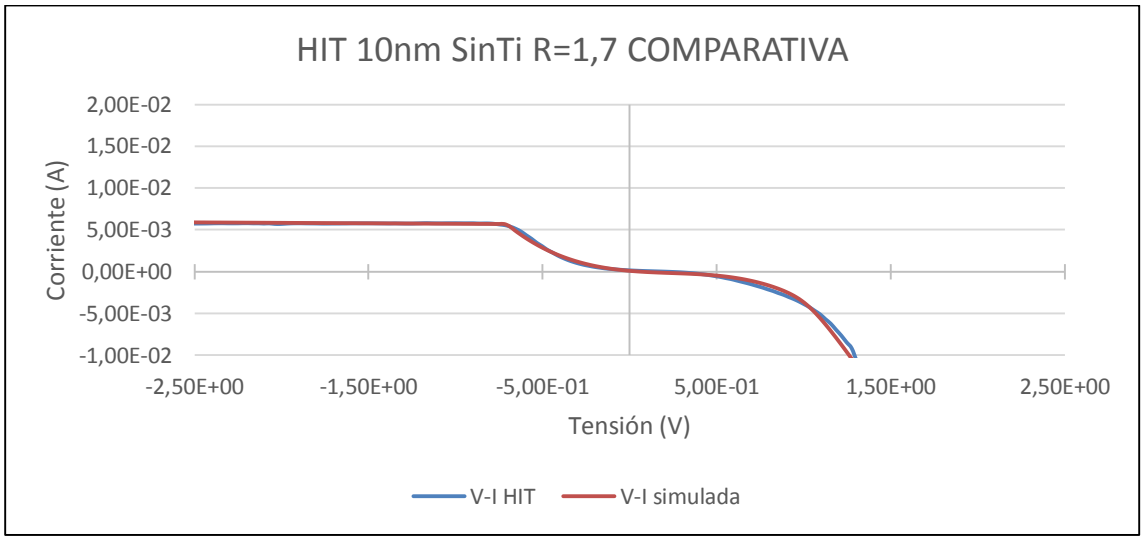
En las células con resistividad 1,7Ωcm no se aprecian grandes diferencias respecto a las de 0,4Ωcm. El único aspecto destacable es que el efecto *S-Shape* es ligeramente menor, empezando a producirse en -630mV.

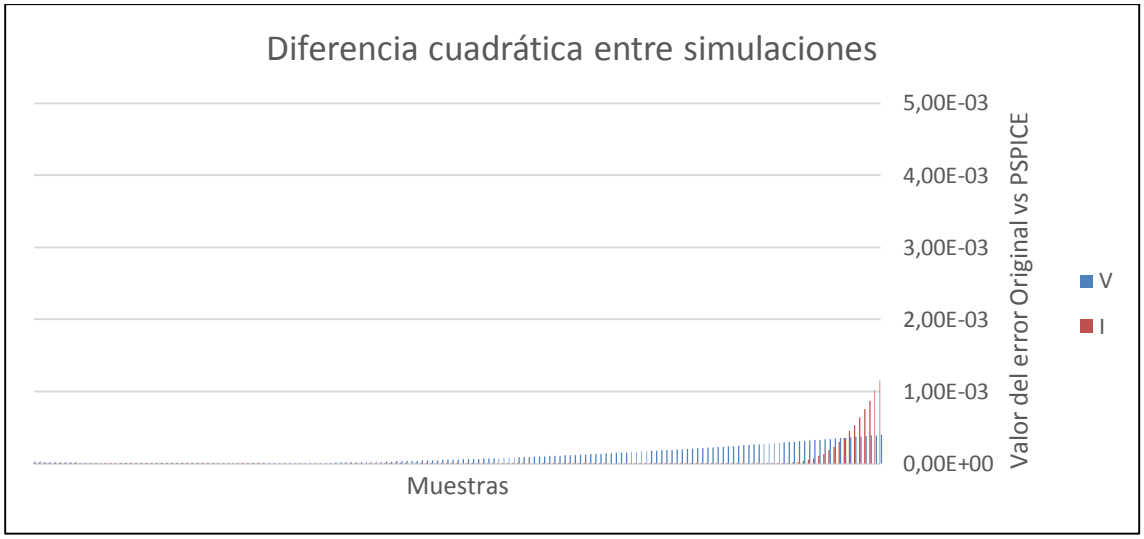
HIT_pSi_12FZsinTi_10nm_aSi_izq_LUZ - Real	
A (cm^2)	0,25
Isc (A)	0,0001461
Voc (V)	0,22110552764
Rsh (Ω)	1265,82278481013
Rs (Ω)	5,88824118235883



HIT_pSi_12FZsinTi_10nm_aSi_izq_LUZ - PSPICE	
A (cm^2)	0,25
Isc (A)	0,00009965
Voc (V)	0,063291
Rsh (Ω)	9000
Rs (Ω)	32



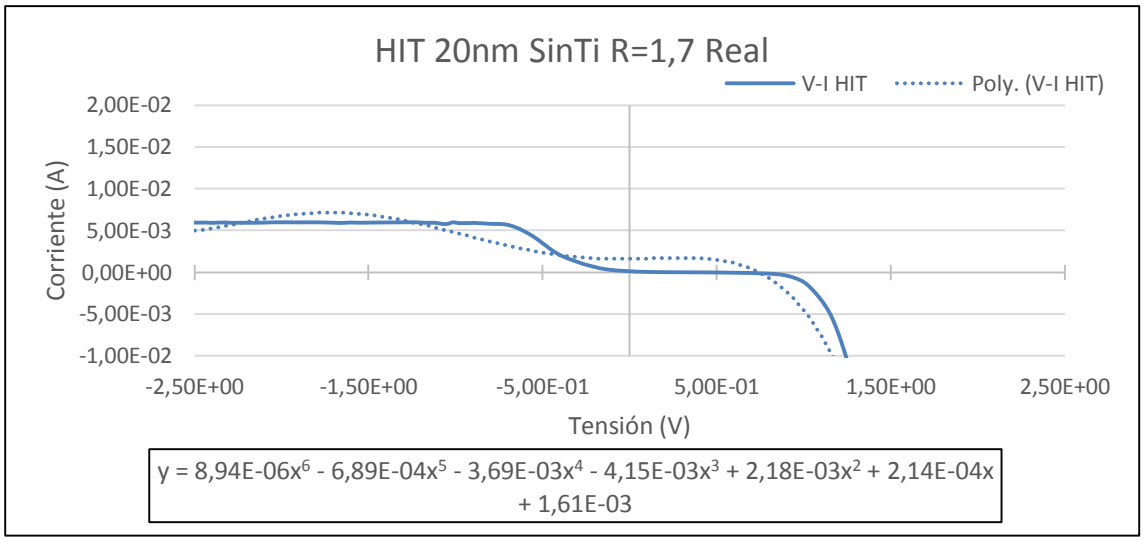




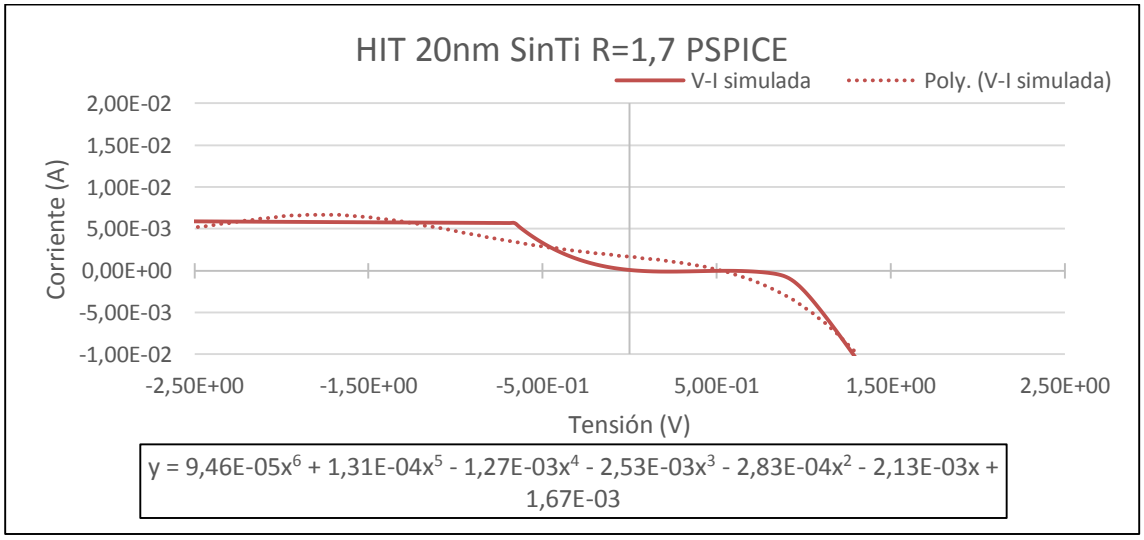
RMS (V)	1,04%	RMS (I)	0,65%

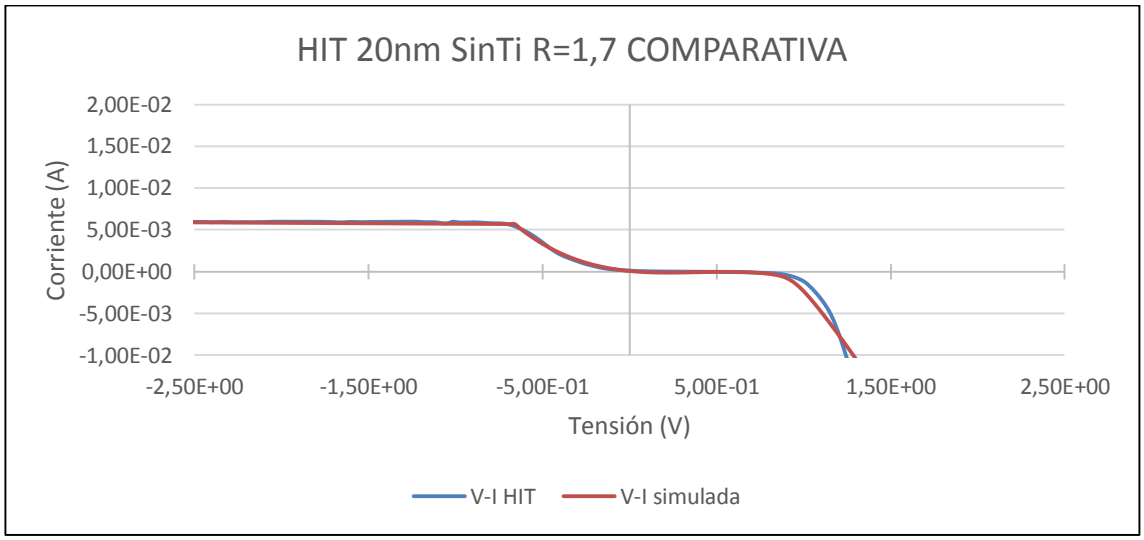
En esta simulación, ha podido observarse como el efecto *S-Shape* ha disminuido y se produce en un rango de tensión menor. Se han obtenido una de las mejores representaciones en PSPICE.

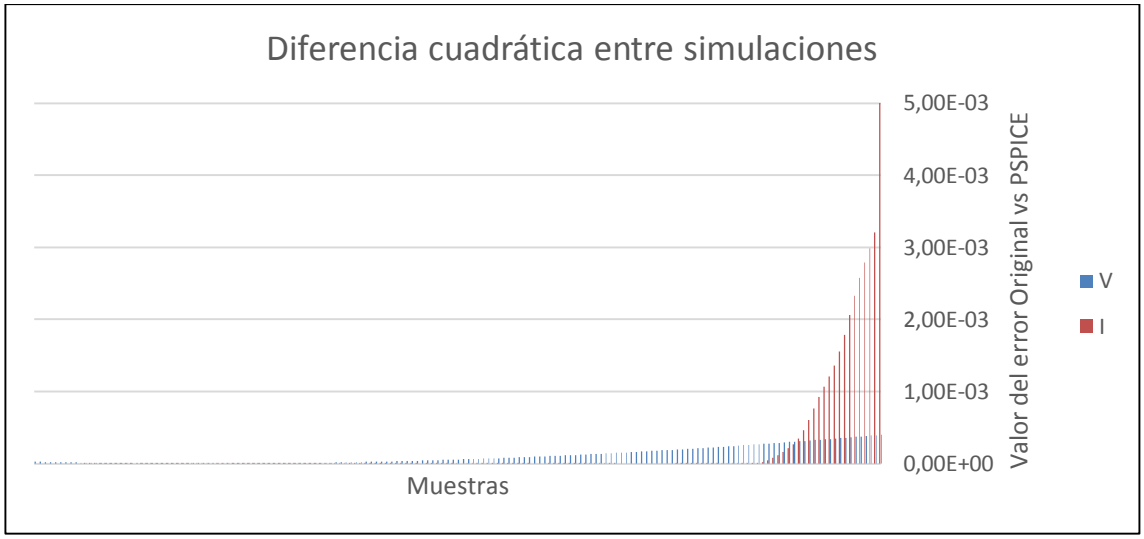
HIT_pSi_12FZsinTi_20nm_aSi_dch_LUZ - Real	
A (cm^2)	0,25
Isc (A)	0,00011464
Voc (V)	0,34170854271
Rsh (Ω)	462,962962962963
Rs (Ω)	9,3711929528629



HIT_pSi_12FZsinTi_20nm_aSi_dch_LUZ - PSPICE	
A (cm^2)	0,25
Isc (A)	0,00007972
Voc (V)	0,046
Rsh (Ω)	9000
Rs (Ω)	32







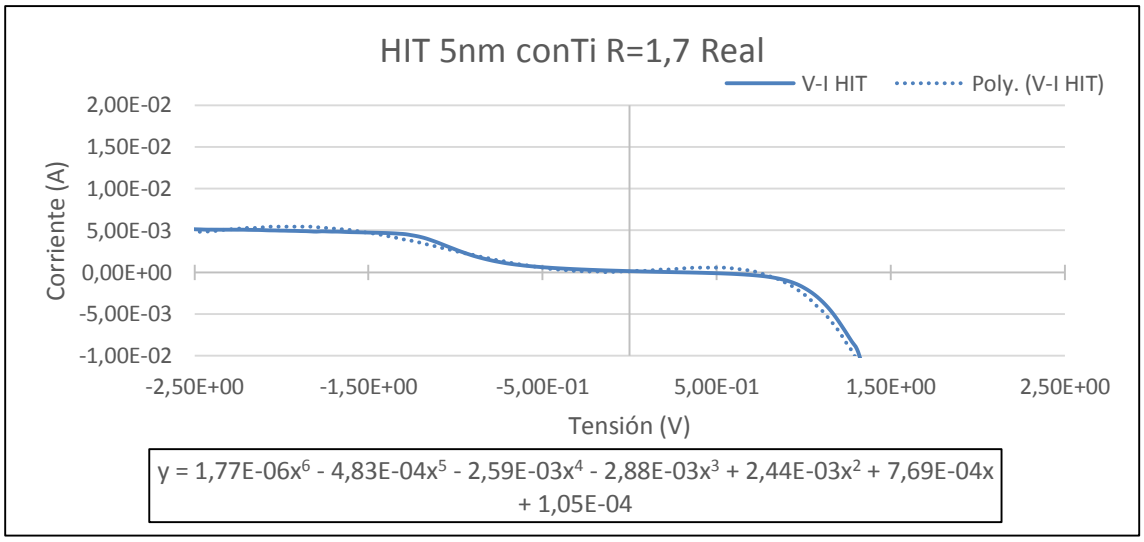
RMS (V)	1,04%	RMS (I)	1,40%

En este caso no se han observado diferencias significativas con la célula de 5nm.

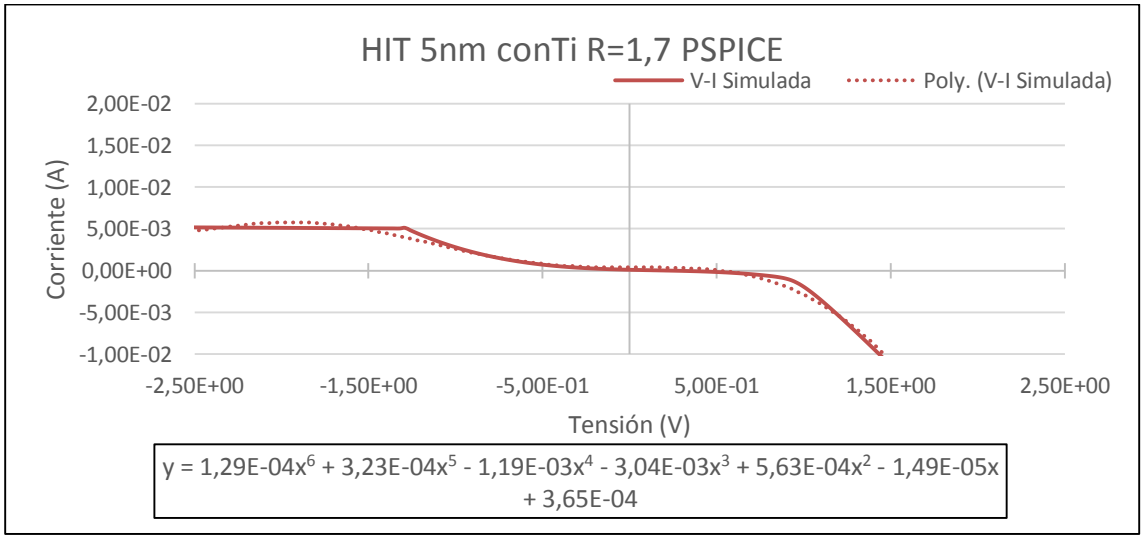
En el caso de las muestras con resistividad de 1,7Ωcm, no se disponía de células con grosor de 40nm.

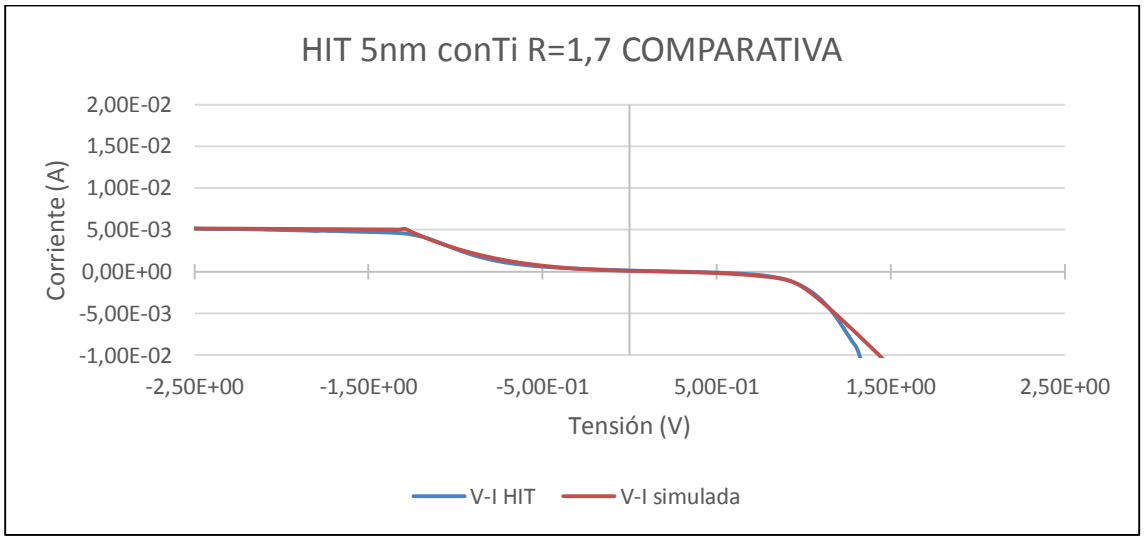
3.4.2 Resultados de simulación en células HIT con implantación de titanio (R=1,7Ω·cm)

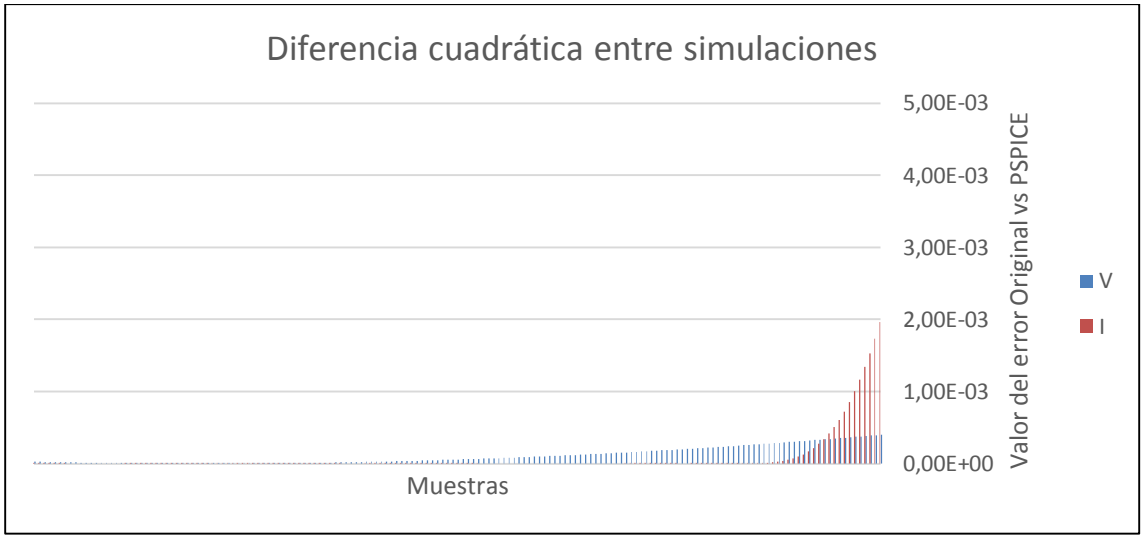
HIT_pSi_02FZTi_5nm_aSi_dch_LUZ - Real	
A (cm^2)	0,25
Isc (A)	0,00013142
Voc (V)	0,28140703518
Rsh (Ω)	775,193798449612
Rs (Ω)	5,93507033058342



HIT_pSi_02FZTi_5nm_aSi_dch_LUZ - PSPICE	
A (cm^2)	0,25
Isc (A)	0,00009948
Voc (V)	0,230337
Rsh (Ω)	9000
Rs (Ω)	47



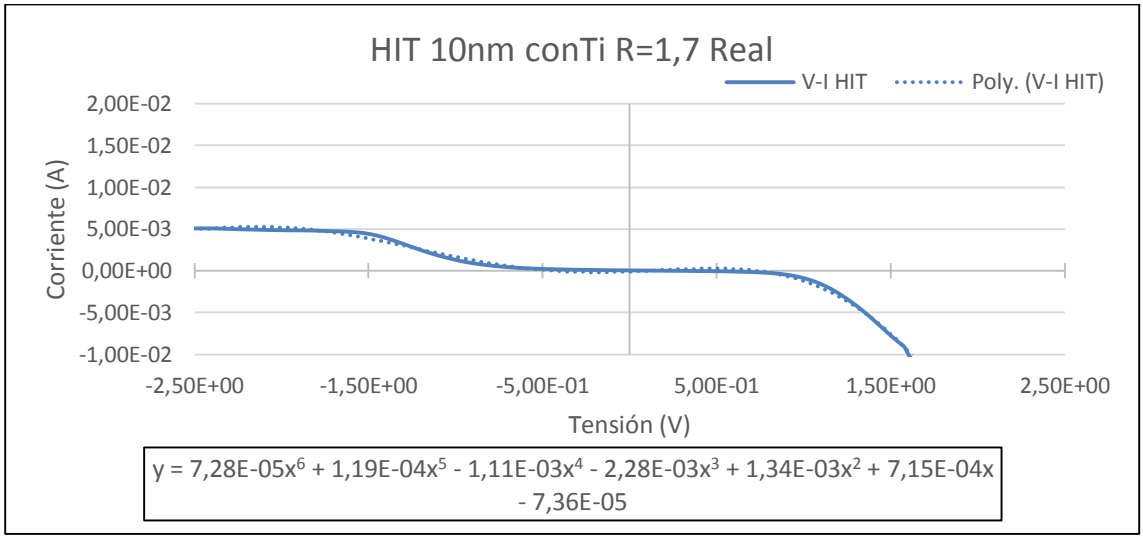




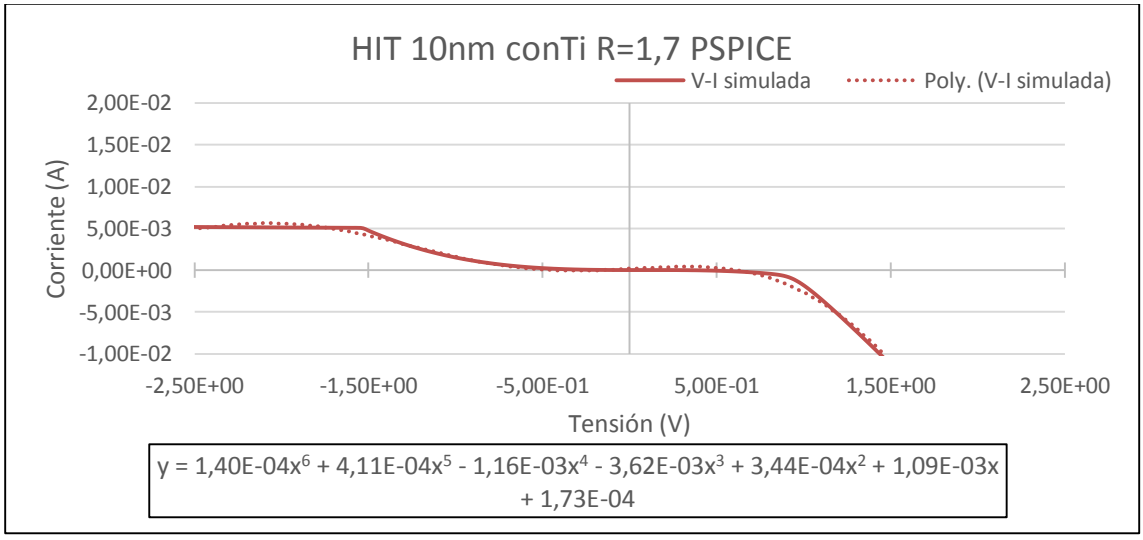
RMS (V)	1,04%	RMS (I)	0,89%

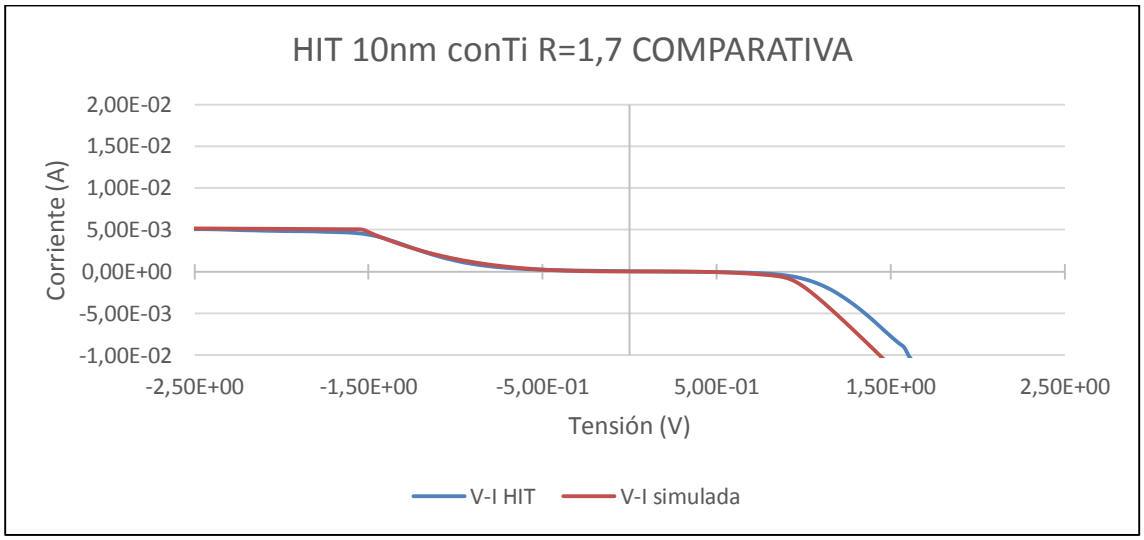
Como en el caso de las células de 0,4Ωcm con implantación de titanio, el efecto *S-Shape* empieza a producirse en la característica V-I con una tensión negativa superior, de aproximadamente -1,2V. Adicionalmente, la corriente decae una cantidad menor por disminución de tensión, lo que supone una disminución del efecto *S-Shape*.

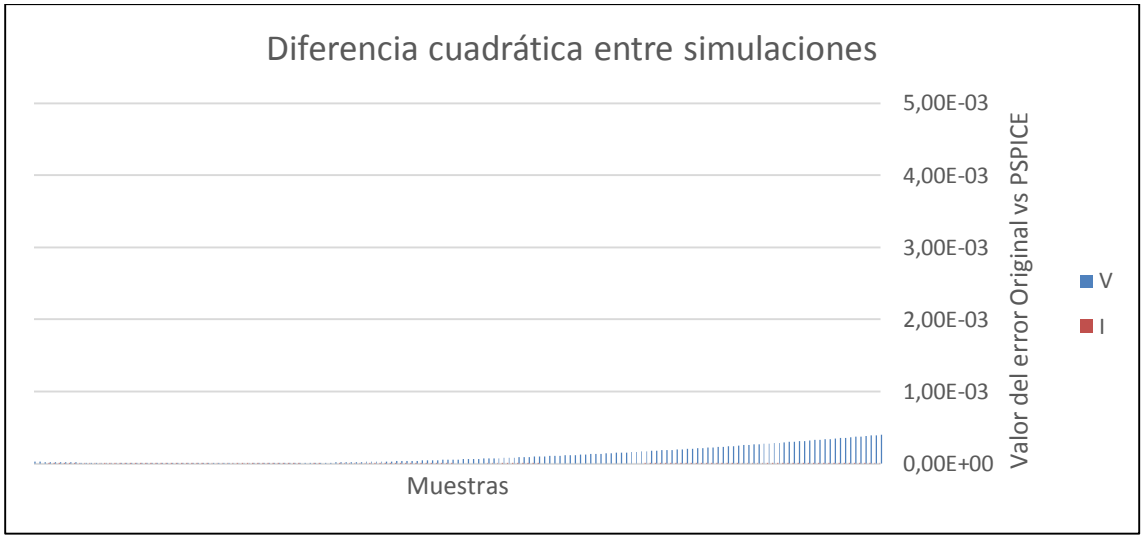
HIT_pSi_02FZTi_10nm_aSi_dch_LUZ - Real	
A (cm^2)	0,25
Isc (A)	0,000052966
Voc (V)	0,31155778894
Rsh (Ω)	1265,82278481013
Rs (Ω)	5,88824118235883



HIT_pSi_02FZTi_10nm_aSi_dch_LUZ - PSPICE	
A (cm^2)	0,25
Isc (A)	0,0000199
Voc (V)	0,35625
Rsh (Ω)	9000
Rs (Ω)	47



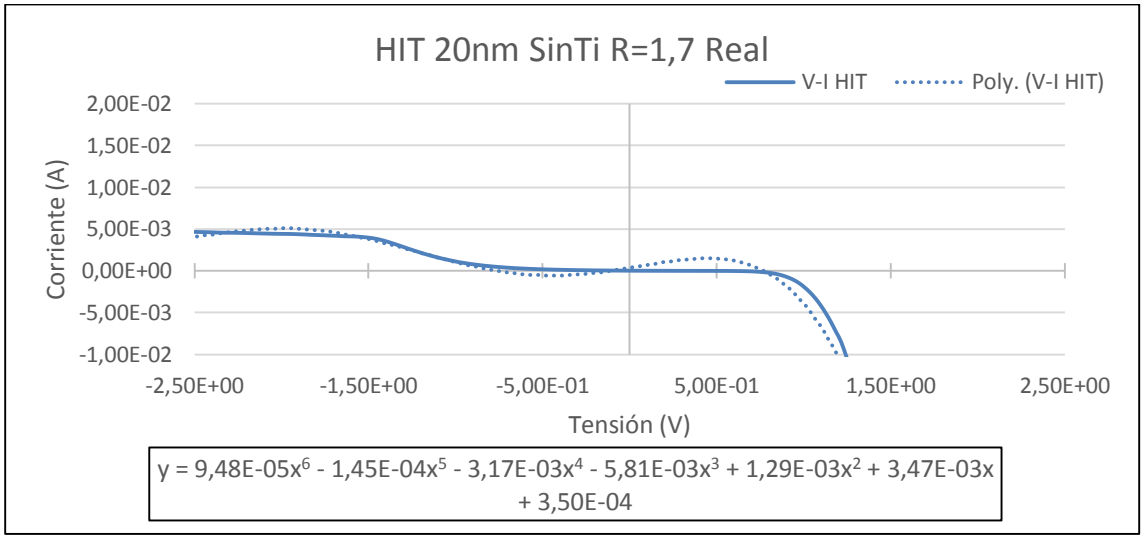




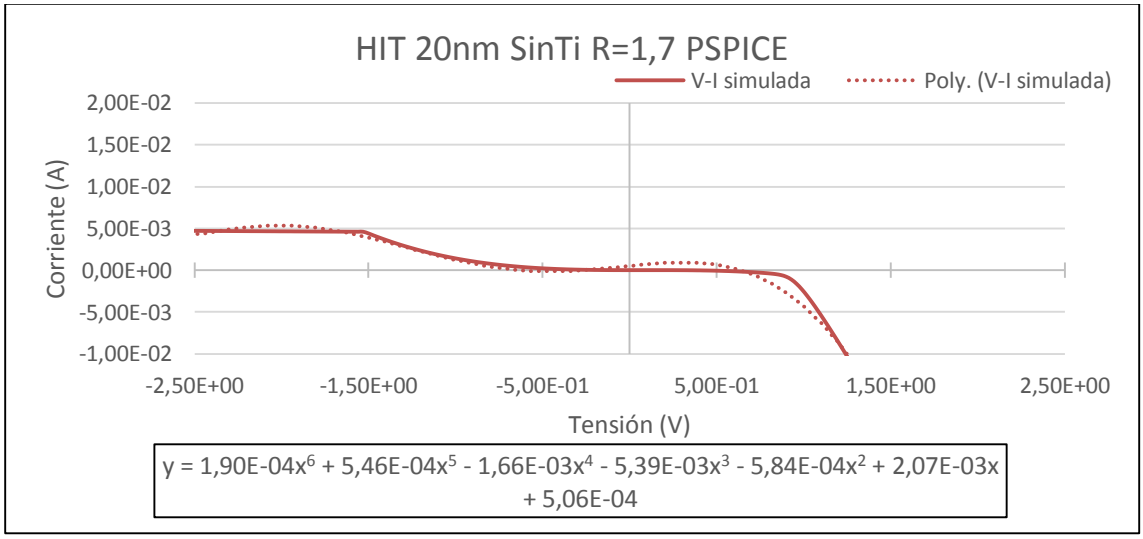
RMS (V)	1,04%	RMS (I)	0,11%

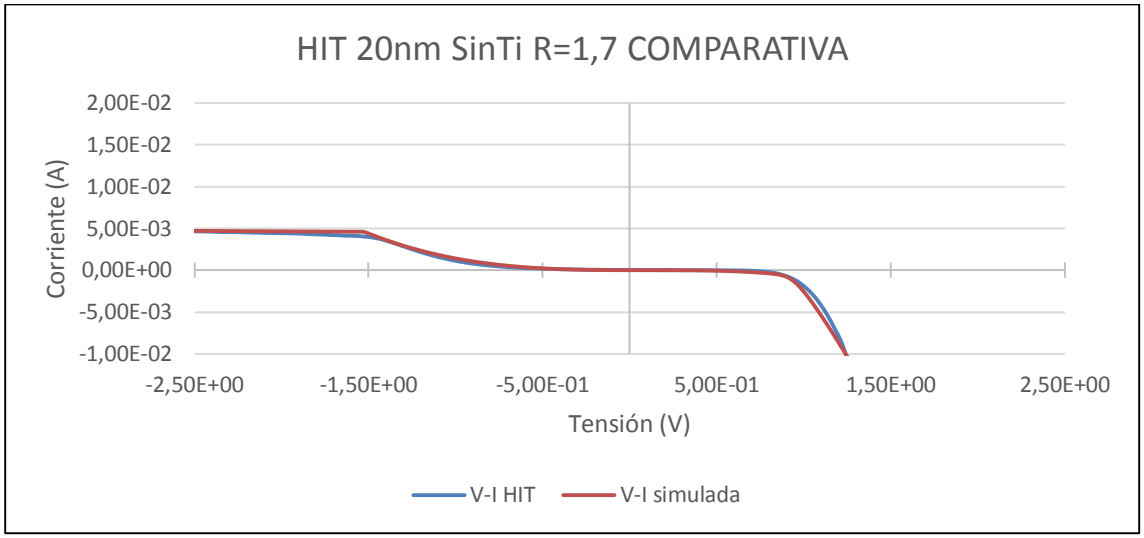
Similar al caso anterior, el efecto *S-Shape* empieza a producirse con tensión -1,5V y decae con la tensión a un ritmo menor. En esta simulación con PSPICE se ha obtenido un resultado muy bueno de error RMS con la corriente.

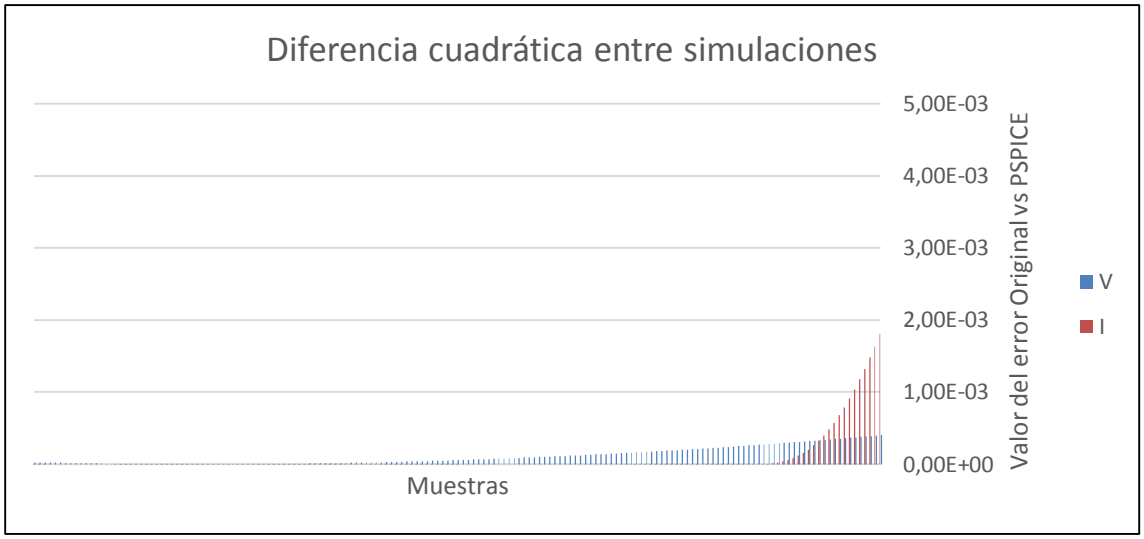
HIT_pSi_02FZTi_20nm_aSi_dch_LUZ - Real	
A (cm^2)	0,25
Isc (A)	0,000022672
Voc (V)	0,43216080402
Rsh (Ω)	462,962962962963
Rs (Ω)	9,3711929528629



HIT_pSi_02FZTi_20nm_aSi_dch_LUZ - PSPICE	
A (cm^2)	0,25
Isc (A)	0,00000997
Voc (V)	0,324675
Rsh (Ω)	9000
Rs (Ω)	47





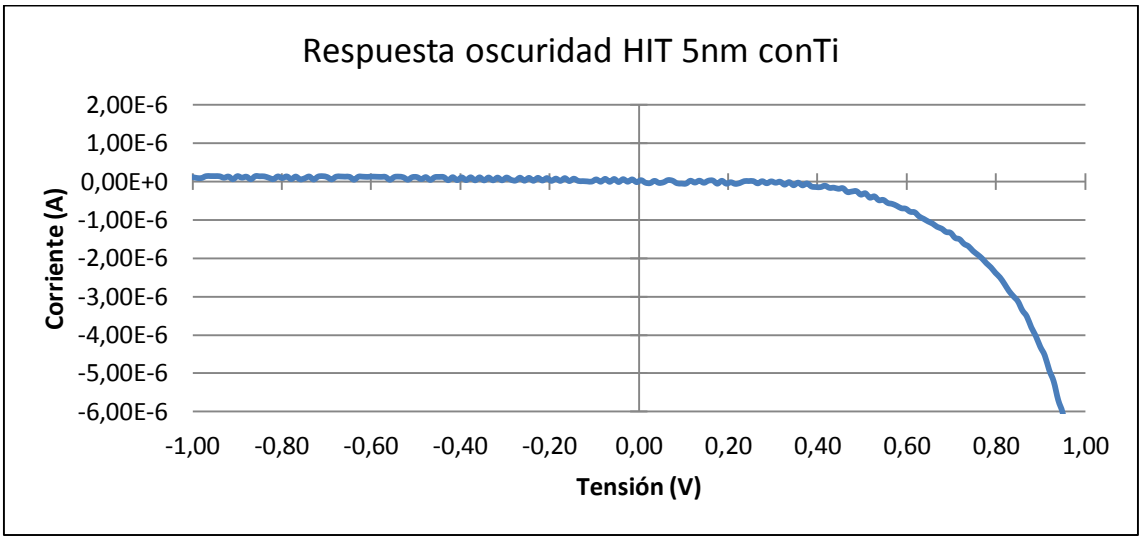


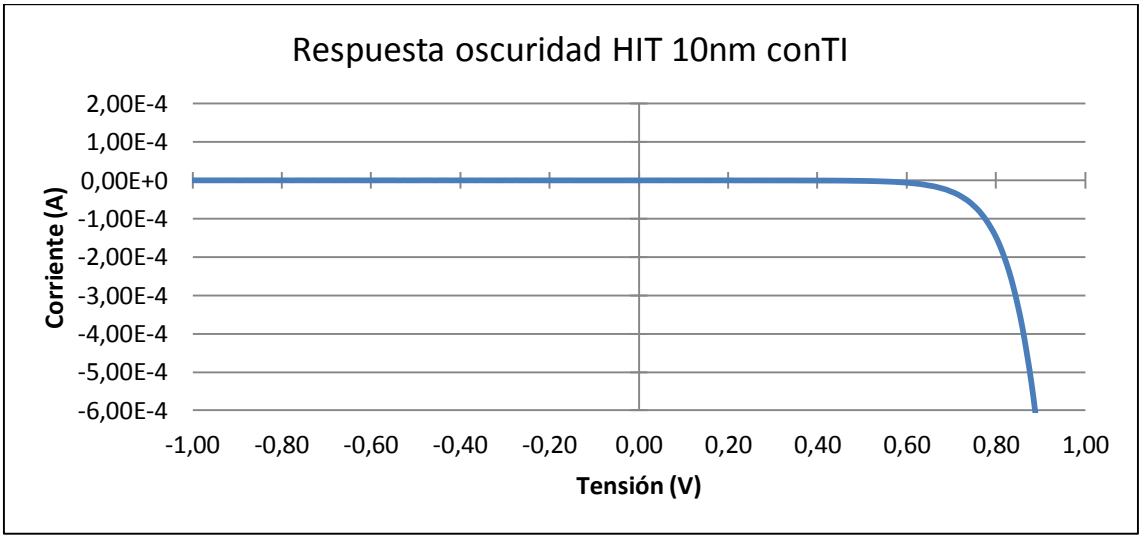
RMS (V)	1,04%	RMS (I)	0,90%

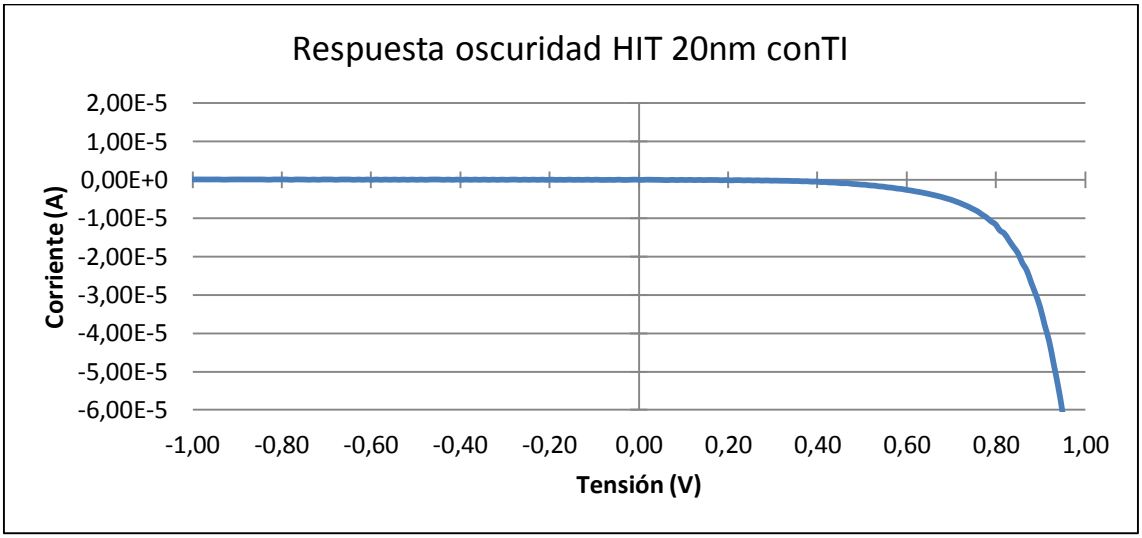
En este caso no se aprecian diferencias significativas con los anteriores.

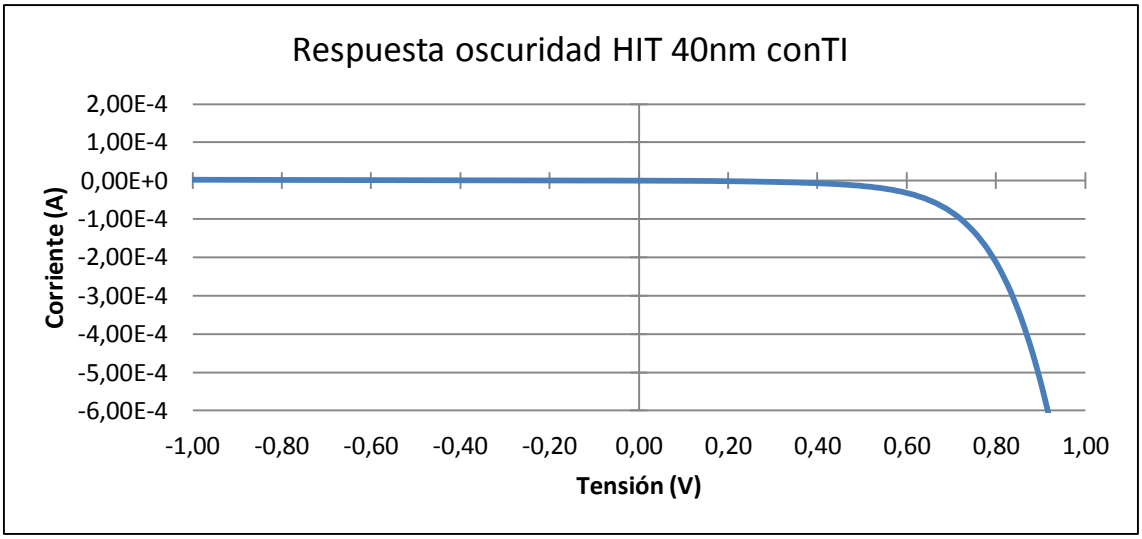
3.5 Respuestas en oscuridad de las muestras con implantación de Titanio

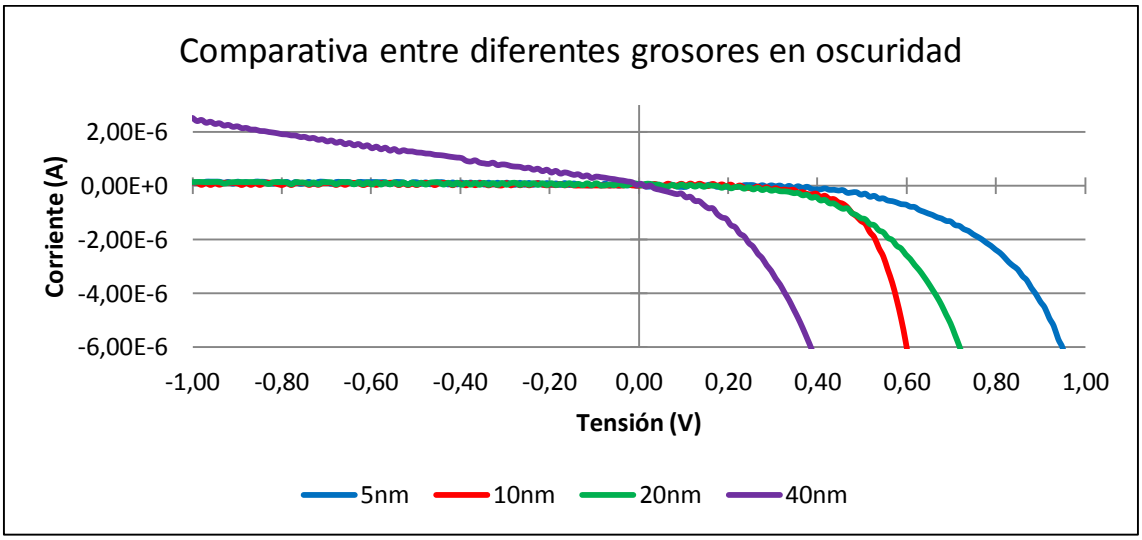
A continuación, a modo de ejemplo, se muestran las respuestas de la característica V-I de las células HIT con implantación de Titanio por diferente grosor.











Como puede apreciarse en la última gráfica, el grosor de la célula HIT también afecta a la respuesta en oscuridad.

4. Conclusiones

En este trabajo se ha intentado crear una simulación del efecto *S-Shape* producido en las células HIT a partir de unas muestras con implantación de titanio, y acercarse asimismo a un modelo circuital equivalente.

Para ello, primeramente se ha hecho un estudio de las células HIT, de sus principales características y del efecto que se produce en algunos casos con forma de "S". Seguidamente, se han analizado las muestras de algunas células HIT elaboradas previamente en la Tesis de Alfredo Boronat donde se producían los efectos citados, y a partir de éstas se ha trabajado en un circuito equivalente que permitiera la representación de la característica V-I de la célula en el programa de simulación PSpice. Finalmente se han comparado los resultados simulados con los reales para comprobar el grado de aproximación.

Con el estudio realizado, se ha observado que muchos autores defienden diferentes teorías sobre la aparición de este efecto distorsionador del factor de forma (FF) de la célula solar. A pesar de ello, la teoría que cobra más fuerzas es por la acumulación de cargas debido a una alta barrera energética en células solares formadas por multicapa.

Respecto al modelo equivalente, el mejor modelo obtenido ha sido el modelo de aproximación por tramos mediante fuentes controladas por tensión. En el tramo central, donde se genera la *S-Shape*, se ha optado por un modelo polinómico que se ajustaba de forma más precisa a la característica V-I real, sin dejar de ser una fuente controlada por tensión.

La fuente de corriente controlada del modelo circuital depende en realidad de la recombinación de la interfaz c-Si/a-Si de la célula HIT.

El primer modelo que pensamos a la hora de simular una célula solar es el modelo equivalente estándar formado por una fuente, un diodo y dos resistencias:

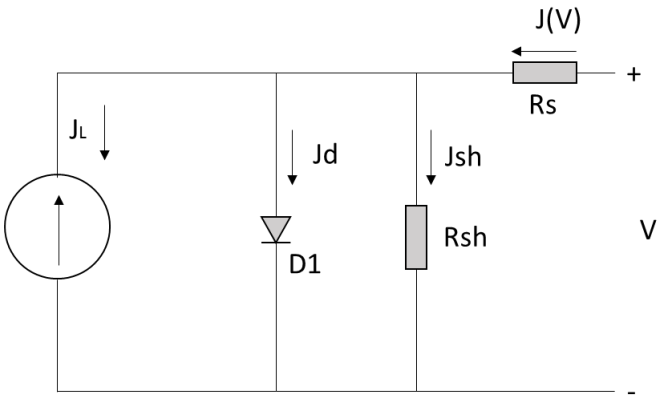


Figura 4.1: Circuito equivalente estándar de una célula fotovoltaica.

Este circuito tiene un comportamiento que se describe mediante la ecuación estándar de la célula solar, que es la siguiente:

$$J = J_d + J_{sh} - J_L = J_s \cdot \left(e^{\frac{V - A \cdot JR_s}{nV_T}} - 1 \right) + \frac{V - A \cdot JR_s}{R_{sh}} - J_L$$

Sin embargo, una célula con heterounión, como es el caso de las células HIT, se aleja de esta realidad debido a los efectos de la unión y el comportamiento de las zonas de carga espacial, diferente al de las células de una sola unión. Según algunos estudios [19], cuando la unión c-Si / a-Si padece defectos o centros de recombinación, la característica V-I bajo iluminación muestra, para tensiones por debajo del punto máximo de potencia, una dependencia cuasi-lineal de la densidad de corriente con la tensión. Volviendo al modelo circuital estándar anterior, se podría representar añadiendo una cuarta corriente de recombinación que estaría controlada por la tensión. Esta teoría reforzaría el modelo circuital equivalente planteado en el trabajo mediante fuentes controladas por tensión.

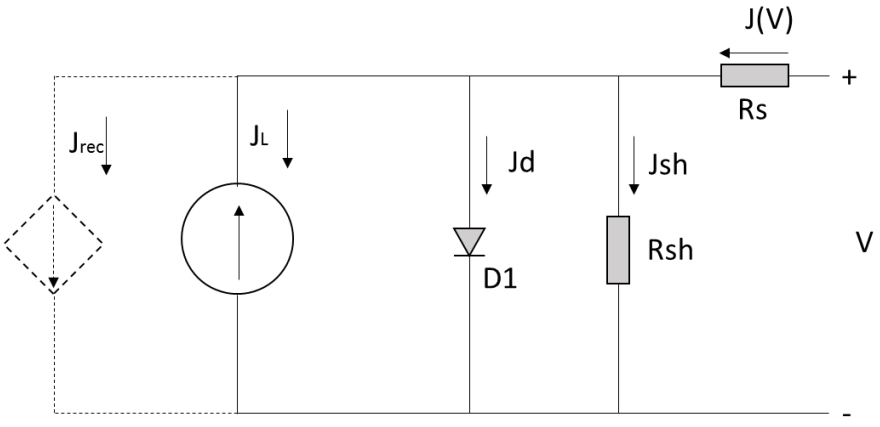


Figura 4.2: Modelo circuital equivalente teniendo en cuenta las pérdidas por recombinación producidas en las células con heterounión c-Si / a-Si como el caso de las células HIT [19]

La ecuación equivalente a este circuito, entonces, quedaría de la siguiente manera:

$$J = J_d + J_{sh} - J_L \cdot \int_0^{\infty} h(\lambda, V) d\lambda$$

En esta ecuación, se mantiene la superposición de la corriente en iluminación y en oscuridad, pero como se añade un factor que puede ser dependiente del bias y la longitud de onda (λ) o del bias y la profundidad (x) [19]. Así pues, la función h(λ,V) se puede expresar como producto de dos factores: uno dependiente de la longitud de onda y la tensión, representando los procesos de recombinación en el bulk del material, y otro dependiente solo de la tensión, referente a la interfaz de recombinación. No obstante, en el caso de las heterouniones c-Si / a-Si, la recombinación en el bulk pueden ser despreciadas, por lo que la función dependerá solo de la tensión referente a la interfaz de recombinación.

$$J = J_d + J_{sh} - J_L \cdot \int_0^{\infty} h(\lambda, V) d\lambda$$

$$J = J_d + J_{sh} - J_L \cdot \left(\int_0^{\infty} h_1(\lambda, V) d\lambda \right) \cdot H_2(V)$$

$$\left(\int_0^{\infty} h_1(\lambda, V) d\lambda \right) = 1 \ (recombinación\ en\ bulk\ despreciable)$$

$J = J_d + J_{sh} - J_L \cdot H_2(V)$ Donde H2(V) depende de la recombinación en la interfaz.

Por otro lado, mediante las simulaciones, han podido obsevarse las siguientes características de las células que presentan *S-Shape:*

- El grosor de la capa intrínseca afecta al *S-Shape*. En las simulaciones realizadas, cuanto mayor era el grosor, mayor era el efecto.
- La implantación de titanio también aumenta el efecto de la *S-Shape*. Ha podido verse que el efecto distorsiona la curva V-I durante un rango mayor de valores de tensión.
- En las células con mayor resistividad, el efecto *S-Shape* era menor.

Por último, en cuanto a las ecuaciones polinómicas obtenidas, algunas de ellas presentaban factores similares, pero otras no. No ha podido obtenerse, por lo tanto, un modelo matemático aproximado. Queda en manos de estudios posteriores el poder obtener una ecuación matemática que permita simular el efecto *S-Shape* desde cero.

5. Referencias

- [1] EPIA, *Global Market Outlook for Photovoltaics 2014-2018*, 2014.
- [2] NREL, *http://www.nrel.gov/ncpv/images/efficiency_chart.jpg,* consultado el 25/08/2015.
- [3] Mishima, T.; Taguchi, M.; Sakata, H.; Maruyama, E.. *Development status of high-efficiency HIT solar cells*. Solar Energy Materials & Solar cells 95, 2011.
- [4] Guettler, G.; Queisser, H.J. *Impurity photovoltaic effect in silicon*. 1970.
- [5] Luque, A.; Martí, A. *Increasing the Efficiency of ideal Solar Cells bu Photon Induced Transitions at Intermediate Levels.* Physical Review Letters, 1997.
- [6] Boronat, A.; *Tecnología de fabricación de células solares con materiales candidatos a presentar banda intermedia.* UPC, 2013.
- [7] J. Olea et al, *Titanium doped silicon layers with very high concentration.* Journal of applied Physics 104, 2008.
- [8] Ho Huh, Y.; Park, B.; Hwang, I.. *Investigating the origin of S-Shaped photocurrent-voltage characteristics of polymer: fullerene bulk-heterojunction organic solar cells*. AIP Journal of Applied Physics 115, 2014.
- [9] van Cleef, M.W.M.; Rubinelli, F.A.; et al. *Photocarrier collection in a-SiC:H / c-Si heterojunction solar cells*. Journal of Non-Crystalline Solids 227-230, 1998.
- [10] Fantoni, A.; Vigranenko, Y.; Fernandes, M.; Schwarz, R.; Vieira, M. *Influence of the band offset on the performance of photodevices based on the c-Si / a-Si:h heterostructure*. Thin Solid Films 383, 2001.
- [11] Jian, L.; Shihua, H.; Lü, H. *Simulation og a high-efficiency silicon-based heterojunction solar cell*. Jounal of Semiconductors Vol.36, No. 4, 2015.
- [12] Kumar, A.; Sista, S.; Yang, Y. *Dipole induced anomalous S-shape I-V curves in polymer solar cells.* Journal of applied physics 105, 2009.
- [13] Panasonic, *blog.panasonic.es*. Consultado el 25/08/2015.
- [14] Dwivedi, N.; Kumar, S.; Bisht, S.; Patel, K.; Sudhakar, S. *Simulation approach for optimization of device structure and thickness of HIT Solar Cells to achieve ~27% efficiency*, 2012.
- [15] Moustafa, M.; Boumediene, B. *Simulation and Optimization of the Performance in Hit Solar Cells*. International Journal of Computer Applications, Vol. 80 – No 13, 2013.

- [16] Iftiquar, S.M.; Lee, Y.; Ai Dao, V.; Kim, S.; Yi, J. *High efficiency heterojunction with intrinsic thin layer solar cell: A short review*. Materials and processes for energy: communicating current research and technological developments, 2013.
- [17] Singh, N.; Jain, A.; Kapoor, A. *Exact analytical solution for organic solar cells showing S-shaped J-V characteristics using Special Trans Function Theroy (STFT).* International Journal of Renewable Energy Research, Vol.3 – No.2, 2013.
- [18] Wang, T.H.; Iwaniczko, E.; Page, M.R.; et al. *High-Efficiency Silicon Heterojunction Solar Cells bu HWCVD*. NREL, sin fecha.
- [19] Gandía, JJ.; Cárabe, J. *Modelling of J-V Characteristics of c-Si/a-Si Heterojunction Solar Cells*, 2004.