

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

TESIS DOCTORAL

---

**Simulació 2D/3D de cèl.lules solars de  
silici de contactes posteriors**

---

*Autor:*

David CARRIÓ

*Directors:*

Dr. Pablo ORTEGA

*Doctor d'Enginyeria Electrònica*

*a*

Grup de Micro i Nano-Tecnologies (MNT)

Departament d'Enginyeria Electrònica

27 de maig de 2022

---

## *Resum*

Amb la finalitat d'optimitzar l'eficiència de conversió fotovoltaica, diverses arquitectures de cèl·lules solars basades en silici monocristal·lí (c-Si) han sorgit al llarg del temps. Les cèl·lules solars de contactes posteriors interdigitats IBC (Interdigitated Back-Contacted cell), en disposar els contactes a la part posterior, permeten una major absorció de llum, i milloren la integració de les cèl·lules al mòdul. Al llarg de la tesi s'estudiaran, mitjançant l'eina de simulació comercial de dispositius semiconductors 2D/3D Sentaurus Synopsis TCAD, diversos dissenys i tipologies de cèl·lules IBC de c-Si, alguna d'elles, fabricades finalment al laboratori del grup de Micro i Nanotecnologies MNT de la UPC. Després d'estudiar l'estat de l'art en aquest tipus d'estructures al capítol 1 de la tesi, es farà una introducció als models físics utilitzats a la simulació al capítol 2. A més, s'introduirà el concepte de cèl·lula unitària i cèl·lula mínima de simulació amb la finalitat de reduir el temps i els recursos de memòria de les simulacions. La repetició periòdica de la cèl·lula unitària als eixos X i Y reproduïx la cèl·lula solar total mitjançant escalat de corrent. Al capítol 3, s'estudien estructures IBC amb contactes puntuals posteriors amb cel·la unitària constant. Aquest tipus d'estructura de contactes s'adequa a la tecnologia làser de què disposa el grup MNT per a la fabricació de cèl·lules solars. En aquest cas, lasejant capes dielèctriques amb contingut d'alumini i de fòsfor s'aconsegueixen els contactes  $p^+$  i  $n^+$  respectivament. Les simulacions permetran determinar la distància òptima o pitch entre contactes, així com el potencial d'eficiència que es pot aconseguir mitjançant aquest concepte atenent a la velocitat de recombinació del contacte de base. Al capítol 4, s'analitzen alternatives de més complexitat per mitigar l'efecte d'una mala passivació dels contactes de base, ja sigui utilitzant contactes puntuals o bé estructures basades en tècniques més convencionals fent servir regions dopades en tires, per exemple. En aquest capítol es defineix un paràmetre geomètric important i nou com és el factor de cobertura d'emissor ( $F_E$ ). Aquest paràmetre sospena el pes dels contactes/regions d'emissor a les prestacions del dispositiu, interessant que sigui elevat, per a mitigar l'efecte pernicios de tenir un contacte de base amb mala passivació. A més, es discutiran diverses estratègies, ja sigui o bé mantenint la cel·la unitària constant o bé augmentant-la tant a contactes puntuals com utilitzant regions dopades extenses (large emitter coverage strategy). Gràcies als conceptes utilitzats en aquest capítol, el grup MNT ha pogut desenvolupar cèl·lules solars amb contactes puntuals làser en col·laboració amb el centre làser de la Universitat Politècnica de Madrid (UPM) amb rendiments superiors al 20 %. Al capítol 5, s'analitza l'efecte de la resistència sèrie del grid de metal·lització i dels contactes, i com incloure'l a les simulacions. Al capítol 6, les simulacions permetran dimensionar i estudiar la millor geometria per aplicar-la a cèl·lules solars IBC amb nanotexturització black silicon (b-Si) a la superfície frontal. Gràcies a les simulacions, s'han dissenyat les màscares de fotolitografia per a la fabricació de cèl·lules solars IBC b-Si fruit d'una

col·laboració amb la Universitat finlandesa d'Aalto, aconseguint-se rendiments per sobre del 22 %, que són els més grans aconseguits fins la data combinant una estructura IBC amb b-Si frontal. També, fruit de les simulacions, s'han dissenyat les màscares de fotolitografia per fabricar un mínimòdul black en col·laboració amb l'empresa finlandesa Valoe. Finalment, al capítol 7, s'explora el potencial que ofereixen les cèl·lules solars IBC per a aplicacions de baixa i mitjana concentració.

## *Resumen*

Con la finalidad de optimizar la eficiencia de conversión fotovoltaica diversas arquitecturas de células solares basadas en silicio monocristalino (c-Si) han surgido a lo largo del tiempo. Las células solares de contactos traseros interdigitados IBC (Interdigitated Back-Contacted cell), al disponer los contactos en la parte trasera, permiten una mayor absorción de luz, y mejoran la integración de las células en el módulo. A lo largo de la tesis se estudiarán, mediante la herramienta de simulación comercial de dispositivos semiconductores 2D/3D Sentaurus Synopsis TCAD, diversos diseños y tipologías de células IBC de c-Si, alguna de ellas, fabricadas finalmente en el laboratorio del grupo de Micro y Nanotecnologías MNT de la UPC. Después de estudiar el estado del arte en este tipo de estructuras en el capítulo 1 de la tesis, se hará una introducción a los modelos físicos utilizados en la simulación en el capítulo 2. Además, se introducirá el concepto de célula unitaria y célula mínima de simulación con la finalidad de reducir el tiempo y los recursos de memoria de las simulaciones. La repetición periódica de la célula unitaria en los ejes X y Y reproduce la célula solar total mediante escalado de corriente. En el capítulo 3, se estudian estructuras IBC con contactos puntuales traseros con celda unitaria constante. Este tipo de estructura de contactos se adecua a la tecnología láser que dispone el grupo MNT para la fabricación de células solares. En este caso, laseando capas dieléctricas con contenido de aluminio y de fósforo se consiguen los contactos  $p^+$  y  $n^+$  respectivamente. Las simulaciones permitirán determinar la distancia óptima o pitch entre contactos, así como el potencial de eficiencia que se puede conseguir mediante este concepto atendiendo a la velocidad de recombinación del contacto de base. En el capítulo 4, se analizan alternativas de mayor complejidad para mitigar el efecto de una mala pasivación de los contactos de base, ya sea utilizando contactos puntuales o bien estructuras basadas en técnicas más convencionales usando regiones dopadas en tiras, por ejemplo. En este capítulo se define un parámetro geométrico importante y novedoso como es el factor de cobertura de emisor ( $F_E$ ). Este parámetro sopesa el peso de los contactos/regiones de emisor en las prestaciones del dispositivo interesado que sea elevado para mitigar el efecto pernicioso de tener un contacto de base con

---

mala pasivación. Además, se discutirán varias estrategias, ya sea o bien manteniendo la celda unitaria constante o bien aumentando la misma tanto en contactos puntuales como utilizando regiones dopadas extensas (*large emitter coverage strategy*). Gracias a los conceptos utilizados en este capítulo el grupo MNT ha podido desarrollar células solares con contactos puntuales láser en colaboración con el centro lóser de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM) con rendimientos superiores al 20 %. En el capítulo 5, se analiza el efecto de la resistencia serie del grid de metalización y de los contactos, y como incluirlo en las simulaciones. En el capítulo 6, las simulaciones permitirán dimensionar y estudiar la mejor geometría para aplicarla a células solares IBC con nanotexturización black silicon (b-Si) en la superficie frontal. Gracias a las simulaciones, se han diseñado las máscaras de fotolitografía para la fabricación de células solares IBC b-Si fruto de una colaboración con la Universidad finlandesa de Aalto, consiguiéndose rendimientos por encima del 22 %, que son los mayores conseguidos hasta la fecha combinando una estructura IBC con b-Si frontal. También, fruto de las simulaciones, se han diseñado las máscaras de fotolitografía para la fabricación de un minimódulo black en colaboración con la empresa finlandesa Valoe. Finalmente, en el capítulo 7, se explora el potencial que ofrecen las células solares IBC para aplicaciones de baja y media concentración.

## ***Abstract***

In order to optimize photovoltaic conversion efficiency, various solar cell architectures based on monocrystalline silicon (c-Si) have emerged in the past. Solar cells with interdigitated back contacts IBC (Interdigitated Back-Contacted cell), by placing the contacts on the back, allow greater absorption of light, and improve the integration of the cells in the module. Throughout the thesis, various designs and types of c-Si IBC cells will be studied, some of them finally manufactured in the laboratory of the Micro and MNT Nanotechnologies of the UPC. After studying the state of the art in this type of structures in chapter 1 of the thesis, an introduction will be made to the physical models used in the simulation in chapter 2. In addition, the concept of unitary cell and minimum cell will be introduced in order to reduce time and memory resources during simulations. Periodic repetition of the unit cell in the X and Y axes reproduces the total solar cell electrical behavior by current scaling. In chapter 3, IBC structures with back point contacts with constant unit cell are studied. This type of contact structure is suitable for the laser technology available to the MNT group for the manufacture of solar cells. In this case, by laser dielectric layers containing aluminum and phosphorus,  $p^+$  and  $n^+$  contacts are achieved, respectively. The simulations will allow determining the optimal distance or pitch between contacts, as well as the efficiency potential that can be achieved through



this concept, considering the recombination speed of the base contact. In chapter 4, alternatives of greater complexity are analyzed to mitigate the effect of poor passivation of the base contacts, either using point contacts or structures based on more conventional techniques based on doped regions in strips, for example. In this chapter, an important and novel geometric parameter is defined, such as the emitter coverage factor ( $F_E$ ). This parameter takes into account the weight of the emitter contacts/regions in the performance of the device, and it should be the higher as possible to mitigate the pernicious effect of having a base contact with poor passivation. In addition, various strategies will be discussed, either keeping the unit cell constant or increasing using either point contacts or using large doped regions (*large emitter coverage strategy*). Thanks to the concepts used in this chapter, the MNT group has been able to develop solar cells with laser point contacts in collaboration with the Laser Center of the Polytechnic University of Madrid (UPM) with efficiencies over 20 %. In chapter 5, the effect of the series resistance of the metallization grid and contacts is analyzed, as well as how to include it in the simulations. In chapter 6, simulations will allow dimensioning and studying the best geometry to apply to IBC solar cells with black silicon (b-Si) nanostructures on the front surface. Thanks to the simulations, photolithography masks have been designed for manufacturing of IBC b-Si solar cells, in collaboration with the Finnish University of Aalto, achieving efficiencies beyond 22 %, which are the highest achieved to date. by combining an IBC structure with front b-Si. Also, as a result of the simulations, photolithography masks have been designed for the manufacture of a black minimodule in collaboration with the Finnish company Valoe. Finally, in chapter 7, the potential offered by IBC solar cells for low and medium concentration applications is explored.

## *Reconeixements*

La tendència natural de les coses és assolir un estat d'equilibri, i en certa manera, emprendre una tesis doctoral implica l'inici d'un viatge en el que el desig és arribar a assolir el destí final i en conseqüència assolir un nou equilibri vital. En aquest viatge és necessari l'acompanyament, la tutoria, la conducció en aquest procés, i per això el meu agraïment al Dr. Plablo Rafael Ortega Villasclaras, realment sense ell no hagués estat possible. Agrair també al coordinador del Grup de Micro i Nano-Tecnologies (MNT) Dr. Ramón Alcubilla per permetre l'inici d'aquest viatge i pel suport donat.

A nivel personal agrair a la meva família per estar al costat i compartir el viatge són i seran sempre el centre i la raó de tot. ...

# Contingut

<b>Reconeixements</b>	<b>v</b>
<b>Contingut</b>	<b>vi</b>
<b>Llista de Figures</b>	<b>x</b>
<b>Llista de Taules</b>	<b>xiv</b>
<b>Abreviatures</b>	<b>xv</b>
<b>1 Fonaments i estat de l'art de la tesis</b>	<b>1</b>
1.1 Introducció	1
1.1.1 Conceptes sobre la conversió fotovoltaica	1
1.1.1.1 L'espectre de radiació solar	1
1.1.1.2 Generalitats sobre les cèl·lules solars	2
1.1.1.3 Consideracions sobre el disseny de les cèl·lules solars	4
1.2 Evolució en el disseny de les cèl·lules solars de contactes posteriors de silici	6
1.2.1 Fonaments sobre les cèl·lules solars Emitter Wrap-Through EWT	7
1.2.2 Introducció a les cèl·lules solars Metallization Wrap-Through MWT	8
1.2.3 Les cèl·lules solars Interdigitated Back Contact IBC	9
1.2.4 Tendències en el disseny de les cèl·lules solars Interdigitated Back Contact IBC	10
1.3 La necessitat de les eïnes de simulació	13
1.4 Els capítols de la tesis	14
1.4.1 Consideracions teòriques i pràctiques sobre l'entorn de simulació	14
1.4.2 L'estructura IBC ideal de contactes puntuals	14
1.4.3 L'estructura IBC ideal de contactes puntuals i geometries complexes	15
1.4.4 Estudi de l'estructura IBC real	15
1.4.5 Estudi de les cèl·lules IBC Black Silicon	15
1.4.6 Estudi de les cèl·lules de concentració	15
1.4.7 Conclusions	16
<b>2 Consideracions teòriques i pràctiques sobre l'entorn de simulació</b>	<b>17</b>
2.1 Introducció	17
2.2 L'Entorn de Simulació	17
2.3 Conceptes Generals sobre el Sentaurus Device	19

2.4	Models físics aplicats a la tesis	20
2.4.1	Concentració de portadors i nivells de Fermi	20
2.4.2	Model de transport de portadors	21
2.4.3	Bandes d'Energia	23
2.4.3.1	Model d'estretament de la banda d'energia prohibida de del Alamo	24
2.4.4	Mobilitat	24
2.4.5	Generació i Recombinació	25
2.4.5.1	Recombinació Shockley–Read–Hall en volum	25
2.4.5.2	Recombinació intrínseca. Recombinació d'Auger i banda a banda	27
2.4.5.3	Recombinació Shockley–Read–Hall de superfície	30
2.4.6	Condicions de contorn als contactes	31
2.4.7	Model Òptic	32
2.4.7.1	Model de rendiment quàntic	32
2.4.7.2	Model de resolució òptic	32
2.4.7.3	Absorció	33
2.4.7.4	Càlcul de la reflectància a la regió posterior	33
2.4.7.5	L'espectre ponderat	34
2.5	Generació de les estructures de simulació	36
2.5.1	L'estructura unitària i la unitat mínima de simulació	36
2.5.2	Un cas exemplificatiu	37
<b>3</b>	<b>L'estructura IBC de contactes puntuals</b>	<b>40</b>
3.1	Introducció	40
3.2	Definició de les condicions de simulació	40
3.3	Efecte del radi i el pitch dels contactes puntuals	46
3.4	Conclusions	55
<b>4</b>	<b>L'estructura IBC ideal de geometries complexes</b>	<b>56</b>
4.1	Introducció	56
4.2	L'Àrea de Influència Geomètrica i Elèctrica de l'Emissor AIE - $AIE_{elect}$ i el Factor de Cobertura Geomètric i Elèctric de l'Emissor $F_E(\%)$ - $F_{E,elect}(\%)$	57
4.3	Estructures de cèl·lula unitària constant	59
4.3.1	Introducció	59
4.3.2	Les estructures de geometries <i>line-like</i>	60
4.3.2.1	Càlcul de la reflectància a la regió posterior	61
4.3.2.2	Resultats	63
4.3.3	Les estructures de geometries <i>ring-like</i>	65
4.3.3.1	Introducció	65
4.3.3.2	Càlcul de la reflectància a la regió posterior	66
4.3.3.3	Resultats	68
4.3.4	Estructura IBC Difused Large-emitter Coverage	70
4.3.4.1	Introducció	70
4.3.4.2	Càlcul de la reflectància a la regió posterior	70
4.3.4.3	Resultats	71

4.4 Estructures de cèl·lula unitària no constant	73
4.4.1 Introducció	73
4.4.2 Estructures amb cèl·lula unitària no constant amb pitch constant	73
4.4.2.1 Definició de les estructures de geometries IBC de contactes puntuals	73
4.4.2.2 Càlcul de la reflectància a la regió posterior	74
4.4.2.3 Definició de les estructures de simulació	76
4.4.2.4 Resultats	77
4.4.3 Estructures amb cèl·lula unitària no constant amb pitch no constant	78
4.4.3.1 Introducció	78
4.4.3.2 Definició de les estructures de cèl·lula unitària no constant amb pitch no constant	79
4.4.3.3 Càlcul de la reflectància a la regió posterior	80
4.4.3.4 Resultats	81
4.4.4 Exemple de cèl·lula unitària no constant i pitch constant; DopLa-IBC solar cell	82
4.4.5 Estructures IBC de contactes en tires	83
4.4.5.1 Introducció	83
4.4.5.2 Càlcul de la reflectància a la regió posterior	85
4.4.5.3 Resultats	85
4.5 Estudi comparatiu	86
4.6 Conclusions	88
<b>5 Estudi de l'estructura IBC real, efecte resistiu</b>	<b>89</b>
5.1 Introducció	89
5.2 L'efecte de la resistència sèrie	90
5.2.1 L'efecte resistiu dels fingers	91
5.2.2 L'efecte resistiu del busbar	94
5.2.3 El doble nivell de metal·lització i la resistència sèrie	96
5.3 Estudi de la resistència sèrie $R_s$ a les estructures amb cèl·lula unitària no constant amb pitch constant	97
5.3.1 Introducció	97
5.3.2 Definició de les estructures de geometries IBC de contactes puntuals	98
5.3.2.1 Càlcul de la resistència sèrie	99
5.3.3 Resultats	100
5.4 Estudi de la resistència sèrie $R_s$ a estructures IBC de contactes en tires	102
5.4.1 Introducció	102
5.4.1.1 Càlcul de la resistència sèrie	102
5.4.2 Resultats	104
5.5 Conclusions	105
<b>6 Estudi de les cèl·lules IBC Black Silicon</b>	<b>106</b>
6.1 Introducció	106
6.1.0.1 L'espectre ponderat AM1.5G	108
6.2 Definició de les cèl·lules IBC black-silicon	109
6.2.1 Càlcul de la reflectància a la regió posterior	112
6.2.1.1 Càlcul de la resistència sèrie	114

---

6.2.2 Resultats cèl·lules IBC Black Silicon	115
6.3 Estructures IBC per la fabricació de mòduls Black Silicon	118
6.3.1 Resultats	121
6.4 Conclusions	123
<b>7 Estudi de les cèl·lules de concentració</b>	<b>124</b>
7.1 Introducció	124
7.2 L'estructura 2D de cèl·lula industrial de concentració	125
7.2.0.1 Resultats	129
7.3 Conclusions	132
<b>8 Valoracions i conclusions</b>	<b>134</b>
8.1 Valoracions i conclusions	134
<b>Bibliografia</b>	<b>140</b>

# Llista de Figures

1.1	Espectre AM1.5G ( $1 \text{ kW/m}^2$ ) . . . . .	2
1.2	Circuit elèctric equivalent . . . . .	4
1.3	Característica I-V sota condicions de foscor i il·luminació. L'àrea de color vermell representa la potència entregada sobre la resistència $R_L$ . . . . .	5
1.4	Figura reimpressa de [6] ©1995 Centre for Photovoltaic Devices and Systems, University of New South Wales. . . . .	6
1.5	Estructura bàsica de la cèl·lula solar Emitter Wrap-Through (EWT) . . . . .	7
1.6	Estructura bàsica de la cèl·lula solar Metallization Wrap-Through (MWT) . . . . .	8
1.7	Vista frontal d'una cèl·lula industrial MWT fabricada per ECN. Figura publicada per [11] ©2008 IEEE. . . . .	9
1.8	Estructura d'una cèl·lula solar Interdigitated Back Contacted (IBC). Figura publicada per [12] ©2013 Hindawi Publishing Corporation. . . . .	9
1.9	Variant de disseny de la cèl·lula solar Interdigitated Back Contact (IBC) . . . . .	11
2.1	Recombinació intrínseca amb el model de Ritcher [30] i del temps de vida efectiu intrínsec per a tipus $n$ (b,d) i $p$ (a,c) amb resistivitat $2.2 (\Omega \cdot \text{cm})$ . . . . .	29
2.2	Espectres ponderats AM1.5G ( $\text{W/cm}^2 \cdot \mu\text{m}$ ) (línia discontinua) i reflectància (símbols) respecte a $[0.3 - 1.2 \mu\text{m}]$ sobre una capa de texturació i passivació frontal conformada per superfícies amb texturitzat amb piràmides aleatòries i passivades amb $\text{Al}_2\text{O}_3$ ( $15 \text{ nm}$ ) \ $\text{SiC}_x$ ( $60 \text{ nm}$ ), <b>b-Si</b> passivat amb $\text{Al}_2\text{O}_3$ ( <i>aprox</i> $20 \text{ nm}$ ) i el cas de texturitzat amb piràmides aleatòries i passivació amb $90 \text{ nm}$ d'alumina. . . . .	35
2.3	L'estructura de la cèl·lula unitària i la unitat mínima de simulació. . . . .	36
2.4	Diagrama de generació de l'estructura d'una cèl·lula IBC amb un contacte base rodejat per un emissor, estructura tipus ring-like. . . . .	39
3.1	Definició de la unitat mínima de simulació. . . . .	41
3.2	Unitat mínima de simulació vista planta. . . . .	41
3.3	Possible esquema d'una cèl·lula IBC amb doble nivell de metal·lització. . . . .	43
3.4	Unitat mínima de simulació amb <b>pitch</b> de $250 \mu\text{m}$ . . . . .	46
3.5	Evolució de l' <b>Eficiència</b> $\eta(\%)$ a l'IBC ideal de contactes puntuals tipus $p$ amb gap metàl·lic $80 \mu\text{m}$ respecte a la resistivitat $2.2 (\Omega \cdot \text{cm})$ i les diferents $S_{c,base}$ . . . . .	48
3.6	Evolució del $J_o$ ( $fA \text{ cm}^{-2}$ ) a l'IBC ideal de contactes puntuals tipus $p$ amb Gap metàl·lic $80 \mu\text{m}$ respecte a la resistivitat $2.2 (\Omega \cdot \text{cm})$ i les diferents $S_{c,base}$ . . . . .	48
3.7	Evolució de l' <b>Eficiència</b> $\eta(\%)$ a l'IBC ideal de contactes puntuals tipus $n$ amb gap metàl·lic $80 \mu\text{m}$ respecte a la resistivitat $2.2 (\Omega \cdot \text{cm})$ i les diferents $S_{c,base}$ . . . . .	49

3.8	Evolució del $J_o$ ( $fA/cm^2$ ) a l'IBC ideal de contactes puntuals tipus $n$ amb gap metàl·lic $80 \mu m$ respecte a la resistivitat $2.2 (\Omega \cdot cm)$ i les diferents $S_{c,base}$ .	49
3.9	Evolució de l' <b>Eficiència</b> $\eta(\%)$ a l'IBC ideal de contactes puntuals tipus $p$ amb gap metàl·lic $80 \mu m$ , considerant la resistivitat de l'oblea (tipus $p$ ) i el pitch de la cèl·lula unitària. Les diferents figures es corresponen a diferents valors de $S_{c,base}$ ( <b>a</b> ) 100, <b>b</b> ) $2 \cdot 10^3$ , <b>c</b> ) $10^4$ , <b>d</b> ) $5 \cdot 10^6$ ( $cm/s$ )	50
3.10	Evolució de l' <b>Eficiència</b> $\eta(\%)$ a l'IBC ideal de contactes puntuals tipus $n$ amb gap metàl·lic $80 \mu m$ , considerant la resistivitat de l'oblea (tipus $p$ ) i el pitch de la cèl·lula unitària. Les diferents figures es corresponen a diferents valors de $S_{c,base}$ ( <b>a</b> ) 100, <b>b</b> ) $2 \cdot 10^3$ , <b>c</b> ) $10^4$ , <b>d</b> ) $5 \cdot 10^6$ ( $cm/s$ ).	51
3.11	Mapa d'evolució de l' <b>Eficiència</b> $\eta(\%)$ respecte a les velocitats de recombinació a la superfície frontal $S_F$ i a la superfície posterior $S_R$ .	52
3.12	Evolució de la $V_{oc}(V)$ <b>a</b> ), $J_{sc}$ ( $mA/cm^2$ ) <b>b</b> ), <b>FF</b> (%) <b>c</b> ) i <b>Eficiència</b> $\eta(\%)$ <b>d</b> ) respecte al radi dels contactes i el <i>pitch</i> amb radis (2.5, 5, 10, 15, 20, 30) $\mu m$ per a les tipologies $p$ (cercles) i $n$ (quadrats), doble nivell metal·lització.	53
3.13	Evolució de la $V_{oc}(V)$ <b>a</b> ), $J_{sc}$ ( $mA/cm^2$ ) <b>b</b> ), <b>FF</b> (%) <b>c</b> ) i <b>Eficiència</b> $\eta(\%)$ <b>d</b> ) amb el <i>pitch</i> .	54
4.1	Unitat mínima de simulació amb la AIE.	57
4.2	Cèl·lula unitària (dreta) i unitat mínima de simulació (esquerra) de l'estructura de geometria de contactes puntuals <i>line-like</i> .	60
4.3	Unitats mínimes de simulació de les tipologies geomètriques <i>line-like</i> .	61
4.4	Estructura de la unitat mínima de simulació de la tipologia geomètrica <i>line-like</i> $d_x = 100 \mu m$ .	62
4.5	Mapa d'evolució <b>Eficiència</b> $\eta(\%)$ respecte $F_E$ en funció de $S_{c,base}$ .	63
4.6	Mapa d'evolució del <b>Factor de Cobertura Elèctric de l'Emissor</b> $F_{E,elect}(\%)$ respecte a $F_E$ i velocitat de recombinació efectiva a la base $S_{c,base}$ .	64
4.7	Geomètriques <i>ring-like</i> .	65
4.8	Unitats mínimes de simulació de les tipologies geomètriques <i>ring-like</i> .	66
4.9	Estructura de la unitat mínima de simulació de la tipologia geomètrica <i>ring-like</i> $d_r = 90 \mu m$ .	67
4.10	Mapa d'evolució <b>Eficiència</b> $\eta(\%)$ en funció de $F_E$ i $S_{c,base}$ .	69
4.11	Mapa d'evolució del <b>Factor de Cobertura Elèctric de l'Emissor</b> $F_{E,elect}(\%)$ respecte a $F_E$ i $S_{c,base}$ a l'estructura ring-like.	69
4.12	Unitat mínima de simulació de l'estructura large-emitter coverage.	70
4.13	Evolució de la <b>a</b> ) $V_{oc}(V)$ , <b>b</b> ) $J_{sc}$ ( $mA/cm^2$ ), <b>c</b> ) <b>FF</b> (%), <b>d</b> ) <b>Eficiència</b> $\eta(\%)$ , <b>e</b> ) $J_o$ ( $fA/cm^2$ ) amb la $S_{c,base}$ .	72
4.14	Cèl·lules unitàries i unitats mínimes de simulació per a les geometries de l'estructura IBC de contactes puntuals amb cèl·lula unitària no constant. En vermell contacte base i en verd contactes d'emissor.	74
4.15	Unitat mínima de simulació per a la geometria $N3$ .	76
4.16	Unitat mínima de simulació per a la geometria $N4$ .	77
4.17	Evolució de l' <b>Eficiència</b> respecte $F_E$ (%) i $S_{c,base}$ considerant una resistivitat de $2.2 (\Omega \cdot cm)$ .	78
4.18	Geometries híbrides de l'estructura IBC de contactes puntuals, en vermell contacte base i en verd contactes emissor.	79



4.19	Unitat mínima de simulació per a la geometria $N3h$ . . . . .	80
4.20	Evolució de l' <b>Eficiència</b> respecte $F_E$ (%) i $S_{c,base}$ considerant una resistivitat de $2.2 (\Omega \cdot cm)$ . . . . .	81
4.21	DopLa-IBC cell structure. Figura publicada a [37] ©2015 Elsevier. . . . .	82
4.22	Part posterior d'una oblea processada de 4" amb les quatre topologies de cèl·lula utilitzades a l'estudi. Figura publicada a [37] ©2015 Elsevier. . . . .	83
4.23	Estructura amb contactes amb tires. (esquerra) secció vertical i vista de planta (dereta) de la unitat mínima de simulació. La regió BSF es simplifica amb una velocitat de recombinació efectiva a la base $S_{c,base}$ . . . . .	84
4.24	Mapa d'evolució de l' <b>Eficiència</b> respecte a $F_E$ (%) i $S_{c,base}$ ( $cm/s$ ). . . . .	86
4.25	comparativa estructures de cèl·lula unitària constant a) $S_{c,base} = 5 \cdot 10^6$ ( $cm/s$ ) i b) $S_{c,base} = 100$ ( $cm/s$ ). . . . .	87
4.26	comparativa estructures de cèl·lula unitària no constant a) $S_{c,base} = 5 \cdot 10^6$ ( $cm/s$ ) i b) $S_{c,base} = 100$ ( $cm/s$ ). . . . .	87
5.1	Circuit elèctric equivalent . . . . .	90
5.2	Diferents termes resistius que influeixen en la resistència sèrie del dispositiu. $R_b$ i $R_e$ ja es tenen en compte inherentment a les simulacions. . . . .	91
5.3	Cèl·lula IBC amb la línia d'interconnexió i els fingers. . . . .	91
5.4	Cèl·lula IBC amb les línies d'interconnexió accedint al busbar pel punt mig. . . . .	94
5.5	Doble nivell de metal·lització a una cèl·lula IBC. . . . .	96
5.6	a) Imatge mostrant el primer nivell de metal·lització a 4 cèl·lules IBC fabricades a una oblea de silici. b) Imatge mostrant el segon nivell de metal·lització a aquestes 4 cèl·lules. c) Esquema mostrant les mesures dels busbars (pads) del segon nivell de metal·lització. . . . .	97
5.7	Reducció de la longitud efectiva dels fingers quan es fa servir un doble nivell de metal·lització. . . . .	98
5.8	Cèl·lules unitàries i unitats mínimes de simulació per a les geometries de l'estructura IBC de contactes puntuals amb cèl·lula unitària no constant. En vermell contacte base i en verd contactes d'emissor. . . . .	98
5.9	Evolució de l' <b>Eficiència</b> (%), $\eta$ (%), vs. $F_E$ per a diferents $S_{c,base}$ ( $10^2, 2 \cdot 10^3, 10^4, 5 \cdot 10^6$ ) ( $cm/s$ ), amb $r_{cont,b} = 10^{-5}$ ( $\Omega \cdot cm^2$ ) i $r_{cont,e}$ ( $10^{-4}, 5 \cdot 10^{-4}, 10^{-3}, 5 \cdot 10^{-3}, 10^{-2}$ ) ( $\Omega \cdot cm^2$ ) i el cas de $r_{cont,b} = 0$ ( $\Omega \cdot cm^2$ ) i $r_{cont,e} = 0$ ( $\Omega \cdot cm^2$ ). . . . .	101
5.10	Evolució de l' <b>Eficiència</b> (%), $\eta$ (%), vs. $F_E$ per a diferents $S_{c,base}$ ( $10^2, 2 \cdot 10^3, 10^4, 5 \cdot 10^6$ ) ( $cm/s$ ), amb $r_{cont,b} = 10^{-5}$ ( $\Omega \cdot cm^2$ ) i $r_{cont,e}$ ( $10^{-4}, 5 \cdot 10^{-4}, 10^{-3}, 5 \cdot 10^{-3}, 10^{-2}$ ) ( $\Omega \cdot cm^2$ ) i el cas de $r_{cont,b} = 0$ ( $\Omega \cdot cm^2$ ) i $r_{cont,e} = 0$ ( $\Omega \cdot cm^2$ ). . . . .	104
6.1	a) Imatge SEM (Scanning Electron Microscope) d'una superfície nano-texturitzada amb black silicon (b-Si). b) Ampliació mostrant les mides típiques de les nanoestructures. Figura adaptada de [27] ©2015 John Wiley & Sons Ltd. . . . .	107
6.2	Estructura 3D simulada a substrats de silici tipus $p$ o $n$ . Tall transversal (esquerra) i vista inferior (dreta). . . . .	109

6.3	Imatges d'una oblea procesada de 4 polzades per darrere (mostrant els electrodes interdigitats) i pel davant (superfície amb b-Si). Cada oblea fabricada conté quatre cèl·lules solars de $9\text{ cm}^2$ amb diferent $F_E$ , 67 %, 75 %, 80 % i 86 %. Figura adaptada de [27] ©2015 John Wiley & Sons Ltd . . . . .	110
6.4	$EQE(\lambda)$ simulada i real, amb la reflectància $R(\lambda)$ . S'ha inclòs també al gràfic la reflectància $R(\lambda)$ mesurada a la cèl·lula b-Si. . . . .	113
6.5	Evolució de la $V_{oc}$ (V), $J_{sc}$ ( $\text{mA}/\text{cm}^2$ ), $FF$ (%), <b>Eficiència</b> $\eta$ (%). . . . .	116
6.6	Current de saturació en inversa $J_{oe}$ d'emissors dopats amb bor en funció de la resistència de quadre amb diferents passivacions, mitjançant $\text{Al}_2\text{O}_3$ de ALD (gruix $30\text{ nm}$ ) o alternativament òxid tèrmic sec. Els símbols són resultats experimentals en mostres de test i les línees són dades simulades amb PC-1D per diferents velocitats de recombinació fonamental del portador minoritari $S_{no}$ (paràmetre que es correspon a $S_{pas,p+1}$ o $S_{pas,p+2}$ a les simulacions). Gràfica extreta d'un informe tècnic intern del <b>grup MNT</b> [46]. . . . .	119
6.7	(Esquerra) Secció recta de la cèl·lula mínima de simulació utilitzant substrats de silici tipus n. (Dreta) Vista inferior de l'estructura 3D (dalt) i 2D (baix). Per claretat del dibuix, s'ha obviat la metal·lització posterior al ser una estructura amb doble nivell de metal·lització. . . . .	120
6.8	(esquerra) 4 cèl·lules IBC fabricades a una oblea de 4 polzades mostrant els dos pads del segon nivell de metal·lització. Aquests dispositius es van utilitzar per a fabricar un mínimòdul black amb 9 cèl·lules solars en sèrie (dreta). . . . .	120
6.9	Comparativa de la $V_{oc}$ (V), $J_{sc}$ ( $\text{mA}/\text{cm}^2$ ), $FF$ (%), <b>Eficiència</b> $\eta$ (%) entre de l'estructura 3D i 2D (contactes de tires) (símbols) i 2D (línees). . . . .	122
7.1	a) Esquema de metal·lització interdigitat posterior d'una cèl·lula IBC amb un únic nivell de metal·lització. b) Estructura amb doble nivell de metal·lització i dos busbars de mateixes dimensions ( $N_{Busbar} = 2$ ) c) Concepte d'estructura multibusbar amb 4 busbars ( $N_{Busbar} = 4$ ) d'identiques dimensions utilitzant un doble nivell de metal·lització. . . . .	126
7.2	Espectre ponderat $AM1.5G(W/\text{cm}^2 \cdot \mu\text{m})$ i reflectància respecte al rang de longituds d'ona $[0.3 - 1.2]\ \mu\text{m}$ sobre una capa de texturació i passivació frontal formada per $\text{Al}_2\text{O}_3$ ( $90\text{ nm}$ ) aplicada a l'estudi de la cèl·lula IBC de concentració. . . . .	127
7.3	Tall transversal (esquerra) i planta inferior (dreta) de l'esquema de la cèl·lula IBC de concentració a substrats tipus n (estructura 2D). Per claretat del dibuix, s'ha obviat la metal·lització posterior amb un doble nivell de metal·lització. . . . .	127
7.4	Evolució de l' <b>Eficiència</b> $\eta(\%)$ respecte la concentració solar 0.1 <b>suns</b> fins a 40 <b>suns</b> considerant $L_{ef} = 1.5\text{ cm}$ . . . . .	130
7.5	Evolució de l' <b>Eficiència</b> $\eta(\%)$ respecte la concentració solar 0.1 <b>suns</b> fins a 40 <b>suns</b> considerant $L_{ef} = 1\text{ cm}$ . . . . .	131
7.6	Evolució de l' <b>Eficiència</b> $\eta(\%)$ respecte la concentració solar 0.1 <b>suns</b> , 40 <b>suns</b> , $r_{cont,e} = r_{cont,b} = 0$ ( $\Omega \cdot \text{cm}^2$ ). . . . .	131
7.7	Evolució de l' <b>Eficiència</b> $\eta(\%)$ respecte una concentració <b>C</b> d'un sol ( $C = 1\text{ Suns}$ ) amb la variació del gap, considerant valors desde $5\ \mu\text{m}$ fins a $80\ \mu\text{m}$ i $r_{cont,e} = r_{cont,b} = 0$ ( $\Omega \cdot \text{cm}^2$ ). . . . .	132

# Llista de Taules

1.I	Estat de l'art de les cèl·lules IBC. . . . .	12
2.I	Paràmetres per a la definició de la mobilitat en relació a la dependència del dopat. . . . .	25
2.II	Paràmetres per a la definició de la dispersió relacionada amb el fonó. . . . .	25
3.I	Reflectància segons el pitch i gap metàl·lic de $80 \mu m$ i radi $r = 30 \mu m$ . . . . .	45
3.II	Reflectància segons el pitch i gap metàl·lic de $0 \mu m$ i radi $r = 30 \mu m$ . . . . .	45
4.I	Reflectància del <i>Large-Emitter-Coverage</i> . . . . .	71
4.II	Condicions de simulació, IBC de contactes en tires. . . . .	84
6.I	Condicions de simulació a les estructures tipus <i>p</i> . . . . .	110
6.II	Condicions de simulació a les estructures tipus <i>n</i> . . . . .	111
6.III	Condicions de simulació a l'estructura Large Emitter Coverage IBC black-silicon. . . . .	121
7.I	Condicions de simulació, Large Emitter Coverage IBC $b - Si(n)$ . . . . .	128
7.II	Paràmetres relacionats amb el càlcul de la resistència sèrie. . . . .	128

# Abreviatures

## Llista Abreviatures

$I_D$	Corrent en fosc (A)
$I_o$	Corrent de saturació (A)
$I_L$	Corrent fotogenerat (A)
$I_{SRH}$	Corrent de saturació degut a la recombinació a la regió de càrrega d'espai (A)
$I$	Corrent total (A)
$R_s$	Resistència sèrie ( $\Omega$ )
$R_{sh}$	Resistència en paral·lel ( $\Omega$ )
$FF$	Fill Factor (Factor de forma) (%)
$V_{oc}$	Tensió en circuit obert (V)
$I_{sc}$	Corrent de curtcircuit (A)
$P_{max}$	Potència màxima entregada (W)
$E_g$	Energia de la banda prohibida (eV)
$h\nu$	Energia (eV)
$N_{st}$	Densitat d'estats a la superfície ( $1/cm^3$ )
$n_0$	Concentració d'electrons en equilibri tèrmic ( $1/cm^3$ )
$p_0$	Concentració de forats en equilibri tèrmic ( $1/cm^3$ )
$n_i$	Concentració intrínseca ( $1/cm^3$ )
$E_{Fi}$	Nivell de Fermi intrínsec (eV)
$E_F$	Nivell de Fermi (eV)
$E_{Fn}$	Nivells d'energia de quasi-Fermi per a electrons (eV)
$E_{Fp}$	Nivells d'energia de quasi-Fermi per a forats (eV)
$\Delta_n$	Excesos de concentració d'electrons ( $1/cm^3$ )
$\Delta_p$	Excesos de concentració de forats ( $1/cm^3$ )
$N_C$	Densitat efectiva d'estats a la Banda de Conducó ( $1/cm^3$ )

$N_V$	Densitat efectiva d'estats a la Banda de València ( $1/cm^3$ )
$E_{F,n}$	Energia de Fermi per a electrons ( $eV$ )
$E_{F,p}$	Energia de Fermi per a forats ( $eV$ )
$\Phi_n$	Pseudo-potencial de Fermi per a electrons ( $eV$ )
$\Phi_p$	Pseudo-potencial de Fermi per a forats ( $eV$ )
$\mu_n$	Coeficient de mobilitat d'electrons ( $cm^2/V \cdot s$ )
$\mu_p$	Coeficient de mobilitat de forats ( $cm^2/V \cdot s$ )
$E$	Camp elèctric ( $V/cm$ )
$J_{drift}$	Densitat de corrent d'arrossegament total ( $A/cm^2$ )
$J_{diffusion}$	Densitat de corrent de difusió ( $A/cm^2$ )
$D_n$	Coeficient de difusió d'electrons ( $cm^2/s$ )
$D_p$	Coeficient de difusió de forats ( $cm^2/s$ )
$J_{Total}$	Densitat de corrent total ( $A/cm^2$ )
$E_g$	Banda d'energia prohibida ( $eV$ )
$n_i(T)$	Concentració intrínseca en funció de la temperatura ( $cm^{-3}$ )
$E_{bgn}$	Energia d'estretament de la banda prohibida a regions d'alt dopat ( $eV$ )
$\Delta E_g^0$	Estretament de la banda d'energia prohibida a regions fortament dopades aplicant estadística de Boltzman ( $eV$ )
$R_{SHR}$	Rrecombinació de Shockley–Read–Hall ( $1/cm^3 \cdot s$ )
$\tau_n$	Temps de vida fonamental d'electrons ( $s$ )
$\tau_p$	Temps de vida fonamental de forats ( $s$ )
$E_t$	Nivell Energètic de l'estat permés o trampa en la banda prohibida ( $eV$ )
$E_{trap}$	Diferència entre el nivell d'energia dels estats permesos $E_t$ i el nivell d'energia intrínsec ( $eV$ )
$m_n^*$	Masses efectives d'electrons ( $Kgr$ )
$m_p^*$	Masses efectives de forats ( $Kgr$ )
$R_{in}$	Recombinació intrínseca ( $1/cm^3 \cdot s$ )
$R_{b,b}$	Recombinació banda a banda ( $1/cm^3 \cdot s$ )
$g_{eeh}$	Factors que interaccionen les forces d'atracció de Coulumb amb la recombinació d'Auger electró-electró-forat ( )
$g_{ehh}$	Factors que interaccionen les forces d'atracció de Coulumb amb la recombinació d'Auger electró-forat-forat ( )
$B_{rel}$	Coeficient de recombinació radiativa relativa ( )

$R_{SHR}^{surf}$	Recombinació Shockley–Read–Hall de superfície ( $1/cm^2 \cdot s$ )
$S_p$	Velocitat de recombinació superficial fonamental de forats ( $cm/s$ )
$S_p$	Velocitats de recombinació superficial fonamental d'electrons ( $cm/s$ )
$S_{c,base}$	Velocitat de recombinació superficial efectiva al contacte base ( $cm/s$ )
$S_{c,emitter}$	Velocitat de recombinació superficial de l'emissor ( $cm/s$ )
$\tilde{n}$	Índex de refracció complex ( $\phantom{()}$ )
$n$	Part real de l'índex de refracció complex ( $\phantom{()}$ )
$n_0$	Índex de refracció base, part real de l'índex de refracció ( $\phantom{()}$ )
$\Delta n_\lambda$	Factor de correcció, part real de l'índex de refracció ( $\phantom{()}$ )
$k$	Part imaginària de l'índex de refracció complex ( $\phantom{()}$ )
$k_0$	Índex d'extinció base, part imaginària de l'índex de refracció ( $\phantom{()}$ )
$\Delta k_\lambda$	Factor de correcció, part imaginària de l'índex de refracció ( $\phantom{()}$ )
$\alpha$	Coefficient d'absorció ( $1/cm$ )
$EQE$	Eficiència Quàntica Externa (%)
$IQE$	Eficiència Quàntica Interna (%)
$EQE_{real}$	Eficiència Quàntica Externa real (%)
<i>pitch</i>	Distància entre els contactes ( $\mu m$ )
<i>BSF</i>	Back Surface Field
$T$	Transmissió òptica (%)
$I(\lambda)$	Espectre d'irradància estàndar ( $W/cm^2 \cdot \mu m$ )
$I_{AM1.5G}$	Espectre de referència Air-Mass 1.5 global ( $W/cm^2 \cdot \mu m$ )
$R(\lambda)$	Reflectància mesurada (%)
$S_F$	Velocitat de recombinació superficial a la regió frontal del dispositiu ( $cm/s$ )
$S_R$	Velocitat de recombinació superficial efectiva a la regió posterior del dispositiu ( $cm/s$ )
$J_o$	Densitat de corrent de foscor ( $A/cm^2$ )
$F_E$	Factor de Cobertura Geomètric de l'Emissor (%)
$F_{E,elect}$	Factor de Cobertura Elèctric de l'Emissor (%)
$AIE$	Àrea de Influència Geomètrica de l'Emissor ( $cm^2$ )
$AIE_{elect}$	Àrea de Influència Elèctrica de l'Emissor ( $cm^2$ )
$\rho_m$	Resistivitat del metall ( $\Omega \cdot cm$ )
$h_m$	Gruix del finger ( $\mu m$ )

$R_{sh}$	Resistència de quadre del finger metàl·lic ( $\Omega/sq$ )
$f_m$	Factor de metal·lització del finger ()
$I_s$	Distribució de la corrent als fingers ( $A$ )
$N_A^+$	Dopat acceptor per centímetre cúbic a regions $p^+$ ( $1/cm^3$ )
$N_D^+$	Dopat donador per centímetre cúbic a regions $n^+$ ( $1/cm^3$ )
$N_D^{++}$	Dopat donador per centímetre cúbic a regions $n^{++}$ ( $1/cm^3$ )
$R_{sh,p^+}$	Resistència de quadre a la regió $p^+$ ( $\Omega/sq$ )
$R_{sh,n^+}$	Resistència de quadre a la regió $n^+$ ( $\Omega/sq$ )
$R_{sh,n^{++}}$	Resistència de quadre a la regió $n^{++}$ ( $\Omega/sq$ )
$S_{pas,p^+}$	Velocitat de recombinació superficial a la regió no contactada $p^+$ ( $cm/s$ )
$S_{pas,n^+}$	Velocitat de recombinació superficial a la regió no contactada $n^+$ ( $cm/s$ )
$S_{pas,n^{++}}$	Velocitat de recombinació superficial a la regió no contactada $n^{++}$ ( $cm/s$ )
$S_{c,p^+}$	Velocitat de recombinació superficial efectiva al contacte de la regió $p^+$ ( $cm/s$ )
$S_{c,n^{++}}$	Velocitat de recombinació superficial de la regió $n^{++}$ ( $cm/s$ )
$I_s$	Distribució de la corrent als fingers ( $A$ )
$I_s(x)$	Distribució triangular de corrent ( $A$ )
$P_f(x)$	Potència dissipada al finger ( $W$ )
$r_f$	La resistència per àrea deguda a l'efecte dels fingers ( $\Omega \cdot cm^2$ )
$I_S$	Corrent derivat per a secció de $n$ dits, considerant el nombre de dits de la secció $n$ ( $A$ )
$P_{Bus}$	Potència dissipada als busbars ( $W$ )
$R_{Bus}$	Resistència deguda a l'efecte del busbar ( $\Omega$ )
$r_{Bus}$	Resistència per àrea deguda a l'efecte del busbar ( $\Omega \cdot cm^2$ )
$f_{m,b}$	Factor de metal·lització dels fingers de base ()
$f_{m,e}$	Factor de metal·lització dels fingers d'emissor ()
$r_{fb}$	Resistència deguda a l'efecte resistiu dels fingers respecte a la base ( $\Omega \cdot cm^2$ )
$r_{fe}$	Resistència deguda a l'efecte resistiu dels fingers respecte a l'emissor ( $\Omega \cdot cm^2$ )
$r_f$	Resistència deguda a l'efecte resistiu dels fingers ( $\Omega \cdot cm^2$ )
$R_{met}$	Resistència considerant la contribució dels efectes fingers i busbars normalitzada a l'àrea de la unitat mínima de simulació ( $\Omega$ )
$r_{cont,b}$	Resistència de contacte base ( $\Omega \cdot cm^2$ )
$r_{cont,e}$	Resistència de contacte emissor ( $\Omega \cdot cm^2$ )
$R_{bc}$	Resistència al contacte base ( $\Omega$ )

$R_{ec}$	Resistència al contacte emissor ( $\Omega$ )
$R_S$	Resistència sèrie total posterior del dispositiu ( $\Omega$ )



*Dedicat a la meva família, tots hi són als meus pensaments...*

# Capítol 1

## Fonaments i estat de l'art de la tesis

### 1.1 Introducció

#### 1.1.1 Conceptes sobre la conversió fotovoltaica

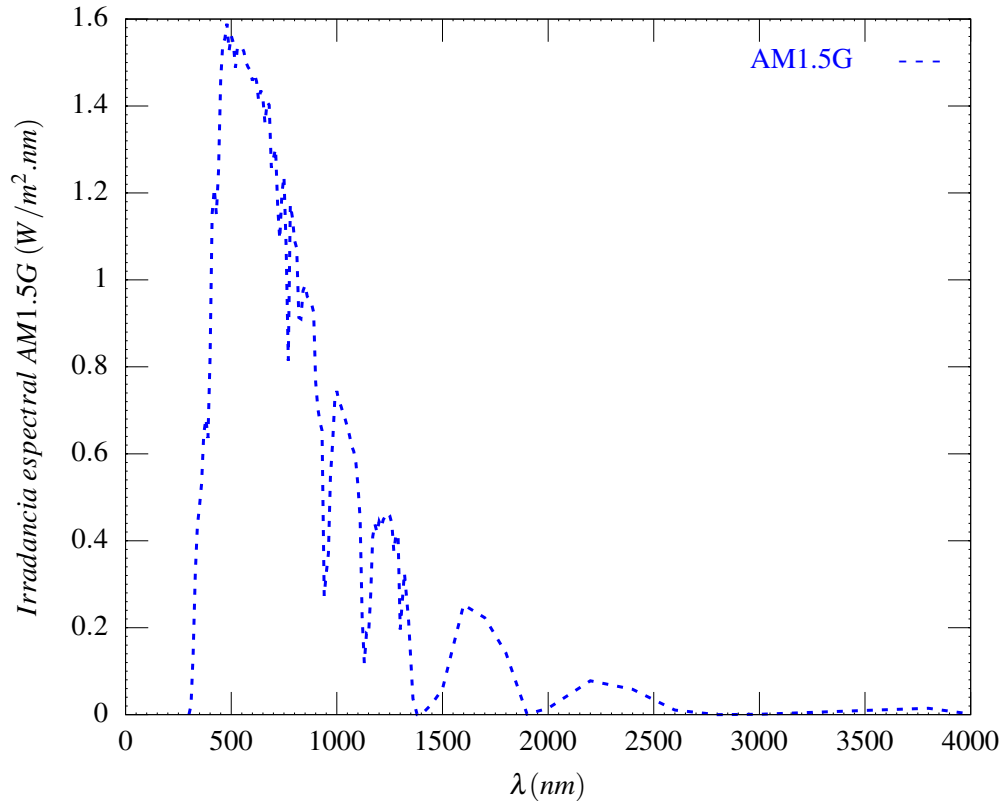
##### 1.1.1.1 L'espectre de radiació solar

Les cèl·lules solars són dispositius semiconductors que transformen la radiació solar en energia elèctrica.

La radiació solar fora de l'atmosfera terrestre pot ser aproximada per la radiació d'un cos negre a la temperatura de la superfície solar,  $6000K$  [1]. Com a conseqüència de l'absorció parcial de la radiació solar a l'atmosfera, l'espectre de la radiació sobre la superfície de la Terra es veu ostensiblement modificat.

Aquest fet, comporta la necessitat de fixar un espectre de referència de radiació solar, sota unes condicions específiques de radiació solar, amb l'objectiu d'evaluar de manera efectiva les prestacions d'una cèl·lula solar.

Així, s'estableix l'espectre de referència Air-Mass 1.5 global  $1 kW/m^2$ , (veure figura 1.1), què representa l'espectre de radiació solar sobre la superfície terrestre i un conjunt de condicions atmosfèriques específiques. Aquestes distribucions de potència (Watts per metre quadrat i nanometre) són en funció de la longitud d'ona.

FIGURA 1.1: Espectre AM1.5G ( $1 kW/m^2$ )

### 1.1.1.2 Generalitats sobre les cèl·lules solars

Una cèl·lula solar convencional de silici és essencialment un diode d'unió  $pn$ , format per un substrat de silici, base, i una capa difosa a la part frontal amb un dopatge oposat al del substrat anomenat emissor. Generalment la base sol ser de tipus  $p$  i l'emissor tipus  $n$ .

La generació de portadors per mitjà d'una font d'energia externa, radiació solar, és utilitzada per a generar energia elèctrica. L'objectiu en el disseny del dispositiu es aconseguir la màxima eficiència.

El principi d'operació d'una cèl·lula solar es basa en la generació de parells d'electróforats i la separació d'ambdós tipus de portadors. Així, un corrent d'il·luminació  $I_L$  és generat, en el cas d'una cèl·lula solar amb la base de tipus  $p$  i l'emissor tipus  $n$ , per la recol·lecció d'electrons al contacte emissor i la recol·lecció de forats al contacte base.

Quan es connecta una càrrega externa als terminals de sortida de la cèl·lula solar, el dispositiu opera a un cert punt de la característica tensió-corrent, que depèn de la resistència de càrrega, amb una tensió directa aplicada  $V$  a la unió  $pn$ .

La unió *pn* amb una tensió aplicada té una relació tensió corrent que segueix el model Schokley. Amb una tensió aplicada directa a la unió flueix un corrent de foscor en sentit invers al corrent generat per la il·luminació.

Per a una cèl·lula solar ideal amb una tensió aplicada  $V$ , el corrent en foscor  $I_D$  (1.1) serà:

$$I_D = I_o \cdot (e^{\frac{q \cdot V}{K \cdot T}} - 1) \quad (1.1)$$

$I_o$  defineix el corrent de saturació, es caracteritza pels paràmetres tecnològics de la cèl·lula solar. Aleshores, el corrent total (1.2) per a una cèl·lula solar ideal il·luminada és:

$$I = I_o \cdot (e^{\frac{q \cdot V}{K \cdot T}} - 1) - I_L \quad (1.2)$$

On  $I_L$  és el corrent fotogenerat.

Si es pren en consideració la recombinació a la regió de càrrega d'espai, aleshores apareix un nou terme exponencial on  $I_{SRH}$  és el corrent de saturació degut a la recombinació a l'esmentada regió, el corrent total:

$$I = I_o \cdot (e^{\frac{q \cdot V}{K \cdot T}} - 1) + I_{SRH} \cdot (e^{\frac{q \cdot V}{2 \cdot K \cdot T}} - 1) - I_L \quad (1.3)$$

Cal també considerar la influència en la característica tensió - corrent (I-V) de la resistència sèrie  $R_s$  i de la resistència en paral·lel  $R_{sh}$  de la cèl·lula solar.

D'una banda la resistència sèrie  $R_s$  ve donada per la pròpia resistivitat del semiconductor més la resistivitat de les interconnexions i contactes. Per una altra banda, la resistència en paral·lel  $R_{sh}$  ve donada per defectes a la regió de buidament i pel corrent de pèrdues al voltant dels marges físics del dispositiu [2].

Del circuit elèctric equivalent de la figura 1.2 es pot deduir l'equació de funcionament de la cèl·lula:

$$I = I_o \cdot (e^{\frac{q \cdot V - I \cdot R_s}{K \cdot T}} - 1) + I_{SRH} \cdot (e^{\frac{q \cdot V - I \cdot R_s}{2 \cdot K \cdot T}} - 1) + \frac{V - I \cdot R_s}{R_{sh}} - I_L \quad (1.4)$$

El corrent en curcircuit  $I_{sc}$  i la tensió en circuit obert  $V_{oc}$ , quan el corrent d'il·luminació és anul·lat pel corrent de foscor, són en règim d'il·luminació, dos dels principals paràmetres de la cèl·lula solar.

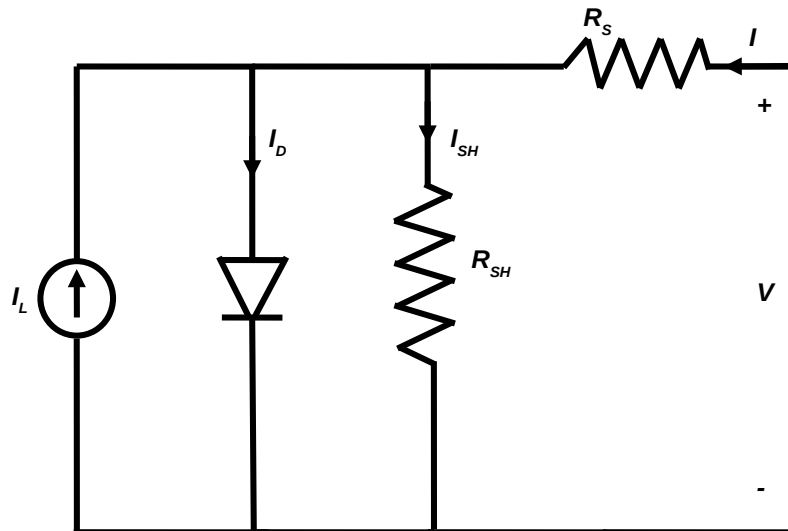


FIGURA 1.2: Circuit elèctric equivalent

Un altre dels paràmetres principalment és la potència màxima de sortida. Per a assolir-la cal polaritzar la cèl·lula solar en el punt de la seva característica on el producte de la tensió  $V(V)$  corrent  $I(A)$  sigui màxim en valor absolut, veure figura 1.3.

Aquests paràmetres ens porten a parlar del factor de forma, **Fill Factor** ( $FF$ ), veure figura 1.3, amb  $P_{max}$  representant la potència màxima entregada,  $V_{oc}$  la tensió en circuit obert i  $I_{sc}$  el corrent de curtcircuit de la cèl·lula solar.

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{oc} \cdot I_{sc}} \quad (1.5)$$

L'eficiència de conversió d'energia solar a elèctrica d'una cèl·lula solar, paràmetre del qual depèn la potència màxima assolida, ve limitada per les característiques pròpies del material semiconductor, principalment en la seva banda prohibida. Un fotó amb energia  $h\nu$  menor que l'energia de la banda prohibida  $E_g$  no es veurà absorbit pel material semiconductor, i un fotó amb energia  $h\nu$  més gran que la de la banda prohibida  $E_g$  generarà un parell d'electrò-forats i l'energia sobrant, la diferència entre l'energia del fotó i la de la banda prohibida  $h\nu - E_g$ , en forma de calor.

### 1.1.1.3 Consideracions sobre el disseny de les cèl·lules solars

El principal objectiu en el disseny de les cèl·lules solars, és aconseguir valors d'eficiència els més alts possibles. És condició necessària una alta fotogeneració i un valor baix de corrent de saturació  $I_o$ . Això s'aconsegueix disminuint les pèrdues per recombinació en volum i recombinació en superfície de la cèl·lula solar.

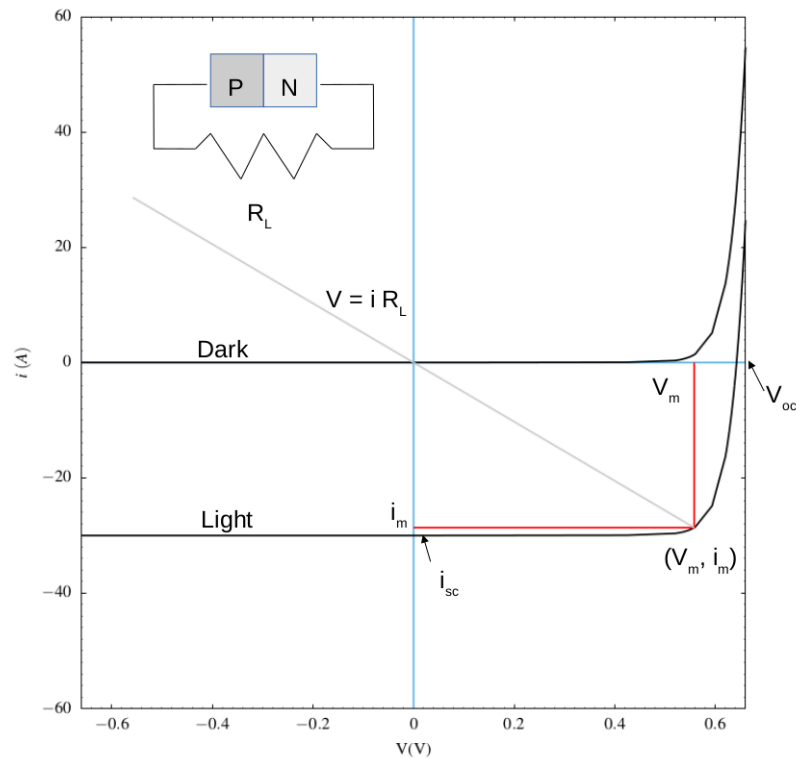


FIGURA 1.3: Característica I-V sota condicions de foscor i il·luminació. L'àrea de color vermell representa la potència entregada sobre la resistència  $R_L$

Amb el disseny de les cèl·lules solars [3] i l'evolució tecnològica en els processos de fabricació, l'efecte de la recombinació de volum és menyspreable en relació a l'efecte de la recombinació a la superfície. La incidència de la recombinació a la superfície sobre les prestacions del dispositiu és la de limitar l'eficiència de la cèl·lula solar.

Per tal de reduir la velocitat de recombinació a la superfície, existeixen dos tipus d'estratègies de passivació.

La primera d'elles, és la passivació per reducció de la densitat d'estats a la superfície,  $N_{st}$ , per mitjà de fer créixer capes fines d'òxid a la superfície.

El segon mètode, és la passivació per efecte de camp, s'aconsegueix amb la reducció de la concentració d'un dels dos tipus de portadors a la superfície, mitjançant la creació d'un camp elèctric, reduint la probabilitat de recombinació entre electrons i forats.

Existeixen diverses tècniques per a aconseguir la passivació per efecte de camp, com ara introduir una capa dielèctrica carregada, o bé, introduir un gradient al perfil del dopatge a prop de la superfície.

Una de les tipologies de cèl·lules solars, que ha donat un valor d'eficiència destacable, és l'anomenada PERL- Passivated Emitter Rear Locally Diffused [4] i [5], tal com es mostra a la figura 1.4, la qual es caracteritza per disposar de perfils selectius de dopatge

tipus  $n^+$  sota els contactes metàl·lics de la part frontal dins la regió emissor de tipus  $n$ , cercant de baixar la incidència de la recombinació al contacte, a més de disposar de recobriments antireflectants a la superfície frontal, millorant l'eficiència òptica amb l'ús combinat de texturitzat amb piràmides invertides i capes antireflectants. També, es disposen illes de perfil de dopatge selectiu tipus  $p^+$  a la part posterior dins la regió de la base de la cèl·lula solar buscant bloquejar els portadors minoritaris als contactes, anomenades Back Surface Field (BSF). Les zones no contactades a la part posterior es passiven amb una capa dielèctrica, usualment d'òxid tèrmic. Finalment, es recobreix tota la part posterior (contactes i superfícies passivades) amb metall per a millorar la reflexió posterior (*Back Reflector*).

Hi han diverses morfologies semblants a la de la cèl·lula solar PERL, com ara Passivated Emitter and Rear Cell (PERC), on la part frontal és similar a la de la cèl·lula PERL, amb la diferència a la part posterior, on no es disposen les illes de perfil de dopatge tipus  $p^+$  a la base, i d'altres tipologies amb combinacions similars, PESC, PERT, PERF, totes elles desenvolupades inicialment a la Universitat de New South Wales (Australia) UNSW [5].

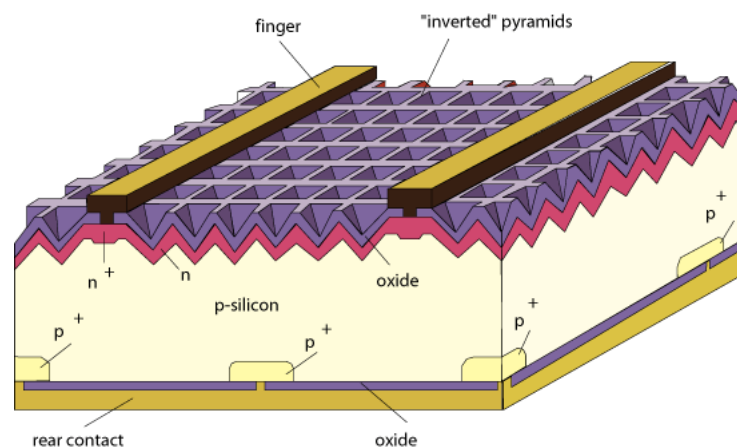


FIGURA 1.4: Figura reimpressa de [6] © 1995 Centre for Photovoltaic Devices and Systems, University of New South Wales.

## 1.2 Evolució en el disseny de les cèl·lules solars de contactes posteriors de silici

En la recerca de mitigar les pèrdues de reflectància a la metal·lització frontal (fingers i busbars), han sorgit estructures que disposen total o parcialment els contactes metàl·lics a la part posterior como ara les cèl·lules solars Emitter Wrap-Through EWT, cèl·lules solars Metallization Wrap-Through MWT i les cèl·lules solars de contactes posteriors

interdigitats IBC (Interdigitated Back contacted solar cells), estructures on es focalitza la tesis.

### 1.2.1 Fonaments sobre les cèl·lules solars Emitter Wrap-Through EWT

Les cèl·lules solars Emitter Wrap-Through (EWT) [7] i [8] (veure figura 1.5), generalment es presenten en una estructura del tipus  $n^+pn^+$ , caracteritzant-se pel fet de que els contactes metàl·lics es troben a la superfície posterior i per disposar de dues regions d'emissor, una aprop de la superfície frontal i l'altra aprop de la superfície posterior, connectades mitjançant interconnexions del mateix tipus de dopant que els dos emissors, tipus  $n^+$ , que travessen el gruix del dispositiu connectant ambdues regions d'emissor.

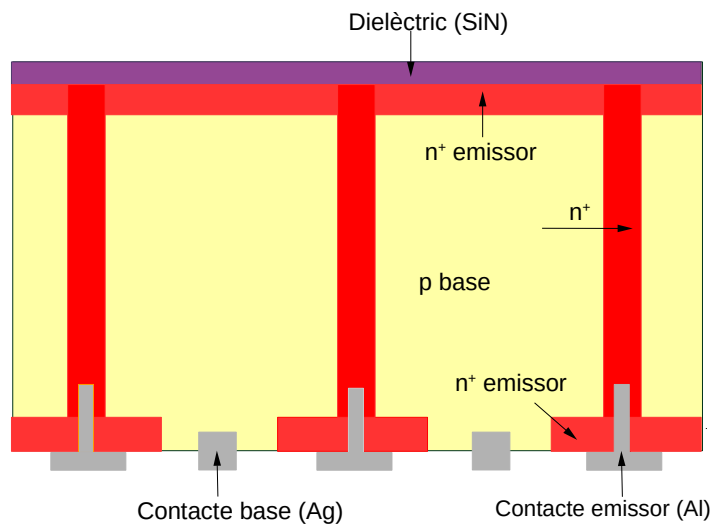


FIGURA 1.5: Estructura bàsica de la cèl·lula solar Emitter Wrap-Through (EWT)

A la part frontal es troba una capa de passivació de la superfície, com per exemple, una capa de nitrur de silici, localitzada just per sobre d'una regió fortament dopada  $n^+$ , que es defineix com a la regió emissor frontal de la cèl·lula solar.

La regió de la base de tipus  $p$  és atravesada per unes vies generades usualment amb làser i dopades de la mateixa manera que els dos emissors,  $n^+$ , encarregats de transportar electrons cap a l'emissor de la part posterior, regió dopada també  $n^+$ , que es troba per sota de la base de tipus  $p$ , i que es connecta amb els dits dels contactes metàl·lics.

El contacte de l'emissor es localitza a la regió posterior, a l'igual que el contacte de la base. L'eficiència de recol·lecció interna és alta, degut a la contribució a la recol·lecció d'ambdues regions emissor, emissor frontal i posterior. La longitud de difusió ha de prendre valors que es troben a la meitat dels valors típics de longitud de difusió de les cèl·lules solars convencionals, degut a l'estructura simètrica amb una unió a la regió frontal i una altra a la regió posterior.



Les estratègies per a una millora de l'eficiència d'aquestes cèl·lules solars són comparables al de les cèl·lules solars convencionals. Així, l'optimització de la tensió en circuit obert  $V_{oc}$  i la densitat de corrent en curtcircuit  $J_{sc}$ , tècniques de passivació a la superfície, millores de les propietats òptiques, absorció i reflexió, temps de vida dels portadors minoritaris a la base, són alguns dels factors de millora de l'eficiència.

### 1.2.2 Introducció a les cèl·lules solars Metallization Wrap-Through MWT

Les cèl·lules solars Metallization Wrap Through (MWT) tal com es mostra a les figures 1.6 i 1.7, presenten generalment una estructura molt similar al de les cèl·lules convencionals [9] i [10].

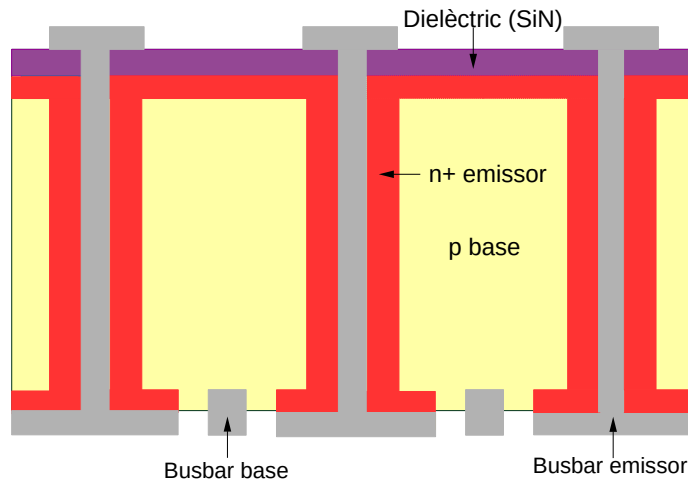


FIGURA 1.6: Estructura bàsica de la cèl·lula solar Metallization Wrap-Through (MWT)

D'una banda, l'emissor i els dits metal·litzats es troben localitzats a la part frontal com a una cèl·lula convencional, i per una altra banda, els busbars es troben disposats a la part posterior, gràcies als forats generats per mitjà del làser i omplerts amb metall. La principal diferència entre les cèl·lules solars MWT i EWT es troba en les interconnexions entre l'emissor de la regió frontal i posterior, en el cas de les cèl·lules solars MWT són de tipus metàl·lic i en cas de les cèl·lules solars EWT es tracta d'interconnexions del mateix tipus de material que els dos emissors.

El disseny estructural i funcional de les cèl·lules solars MWT ofereix avantatges envers les cèl·lules convencionals, com ara la localització dels busbars a la part posterior, amb el què es redueix l'ombrejat, més o menys a la meitat d'una cèl·lula convencional, en conseqüència, s'incrementa l'eficiència òptica de la cèl·lula solar.

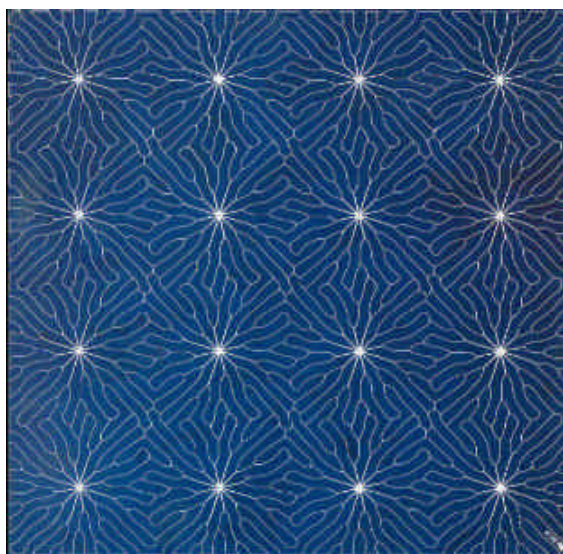


FIGURA 1.7: Vista frontal d'una cèl·lula industrial MWT fabricada per ECN. Figura publicada per [11] © 2008 IEEE.

La interconnexió coplanar és possible, donat que ambdues polaritats es troben localitzades a la part posterior, fet que fa que aquest tipus de cèl·lules presentin una bona modularitat i facilitat d'ensamblatge.

### 1.2.3 Les cèl·lules solars Interdigitated Back Contact IBC

És una de les tipologies de disseny més existoses en relació a la recerca d'una millora d'eficiència [9] en diverses variants i morfologies, i on es focalitzarà la tesis. Aquesta tipologia de cèl·lules solars presenta les dues polaritats dels contactes metàl·lics (emissor i base) a la regió posterior de la cèl·lula solar tal com es pot observar a la figura 1.8.

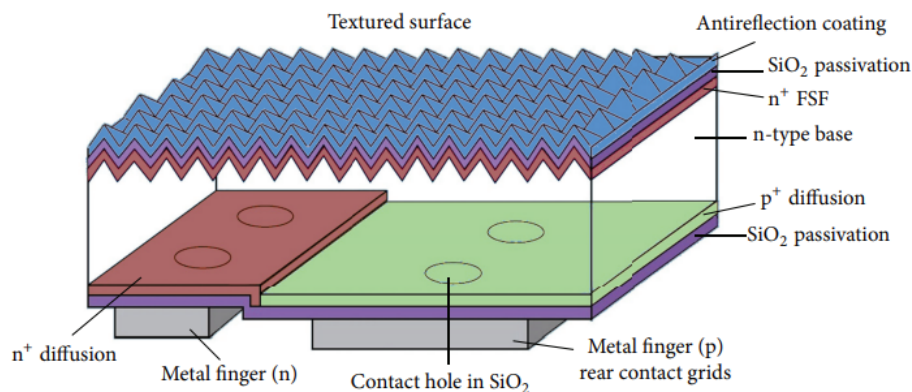


FIGURA 1.8: Estructura d'una cèl·lula solar Interdigitated Back Contacted (IBC). Figura publicada per [12] © 2013 Hindawi Publishing Corporation.

La presència dels contactes metàl·lics a la zona posterior de la cèl·lula solar dóna lloc a una sèrie d'avantatges:

- El·liminació de l'ombrejat en absència del mallat metàl·lic a la regió frontal, per tant es produeix un increment del corrent fotogenerat ( $I_L$ ).
- Reducció de les resistències serie del mallat metàl·lic, donat que els contactes es troben a la regió posterior i els dits metàl·lics poden tenir una amplada no limitada degut a que no hi han efectes d'ombrejat.
- La integració entre els mòduls de les cèl·lules solars IBC resulta més fàcil (connexió coplanar).

Gràcies a aquests avantatges, i altres, l'eficiència de conversió d'aquest tipus de cèl·lules solars és millor que a les cèl·lules solars convencionals. Malgrat tot, hi ha un conjunt de punts que cal tenir en compte:

- El procés de fabricació és més sofisticat i més complicat.
- Donat que a la regió posterior de la cèl·lula solar té lloc la recol·lecció de portadors es requereix uns temps de vida de portadors minoritaris alts a la base i una baixa recombinació superficial a la part frontal i la posterior. Es desenvolupen tècniques amb l'objectiu de millorar tant la recol·lecció de portadors com la reducció de la velocitat de recombinació superficial i de volum del dispositiu [9].

Els portadors minoritaris que són generats principalment a la part frontal han de ser difosos cap a l'unió de la part posterior. Aleshores, cal una relació òptima entre la longitud de difusió i el gruix de la cèl·lula solar.

Una de les característiques habituals a les diverses variants d'aquesta tipologia de cèl·lules solars, és que les àrees dopades i els contactes es troben disposats de manera alternativa, amb tires o regions interdigitades.

#### **1.2.4 Tendències en el disseny de les cèl·lules solars Interdigitated Back Contact IBC**

Una característica significativa de disseny de les cèl·lules solars IBC [13], (veure figura 1.9), és el fet de disposar els contactes i unions a la part posterior del dispositiu, que comporta un increment de l'absorció òptica, i per tant, un increment en la densitat de corrent generada, al voltant d'entre un 5 % i 8 % [9].

Degut a la disposició dels contactes i unions a la part posterior és possible incidir en una bona passivació superficial i paral·lelament dissenyar les difusions i geometries a la part posterior per tal de minimitzar l'efecte de la recombinació, pèrdues laterals de conductivitat, la resistència als contactes, a més de minimitzar la contribució resistiva del metall·lic.

Gràcies a aquestes característiques ventajoses, les cèl·lules solars Interdigitated Back Contact IBC han aconseguit altes eficiències, assolint eficiències de 26.6 % [14].

Un disseny típic és el de [13] la figura 1.9, en el què es troben disposats alternativament la regió  $p^+$  emissor, amb els seus contactes emissor corresponents, i la regions  $n^+$  (BSF) amb els seus contactes base.

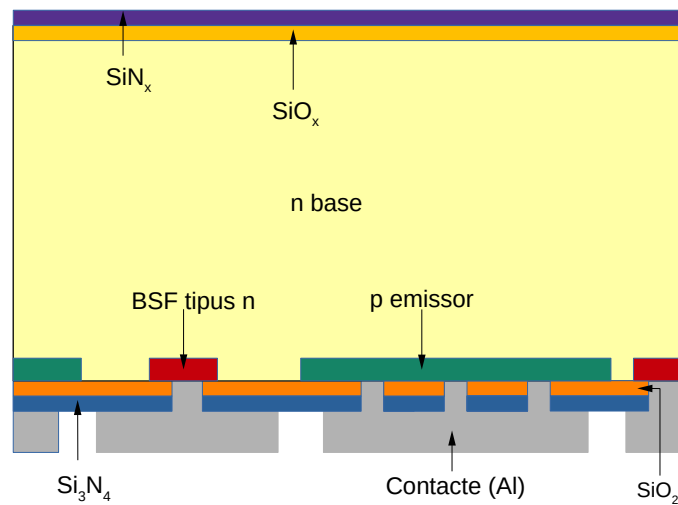


FIGURA 1.9: Variant de disseny de la cèl·lula solar Interdigitated Back Contact (IBC)

A la regió frontal es troben dues capes dielèctriques, la capa més externa és destinada a la captació òptica, capa antireflectant, mentre que la capa més interna d'elles, a banda de també d'estar destinada a la captació òptica, la seva funció principal és la de reduir els efectes de la recombinació superficial frontal per mitjà de la passivació.

Finalment, a la regió posterior es troben també disposades dues capes dielèctriques amb la doble missió de passivar la superfície posterior i augmentar la reflexió interna (**Back Reflector**).

Es poden presentar diverses variants d'aquesta estructura, modificacions focalitzades en la manera de disposar geomètricament les regions emissor, les regions Back Surface Field (BSF), i els contactes emissor i base associats. La disposició geomètrica, però, té implicacions en el comportament del dispositiu i en les seves prestacions.

Existeixen estructures geomètriques amb regions i contactes puntuals en el què es requereix una modelització 3D per tal de caracteritzar el comportament elèctric i òptic

del dispositiu. Al grup de Micro i Nanotecnologies de la UPC **MNT-UPC** s'estudien aquests tipus de dispositius, gràcies a la tecnologia del làser. Amb aquesta tecnologia els contactes puntuals es realitzen mitjançant el dopat de làser utilitzant dielèctrics que actuen com a passivants i fonts dopants. En concret, s'utilitza la alúmina,  $Al_2O_3$ , com a font de dopat tipus  $p$  ( $Al$ ) i capes de carbur de silici dopades amb fòsfor per a dopar el tipus  $n$  ( $SiC_x$ ). Aquest tipus d'estructures seran àmpliament estudiades a la tesis (capítols 3, 4 i 5).

Altres estructures, presenten les regions emissor, BSF i contactes de manera que geomètricament són tires disposades a la part posterior del dispositiu, en les que la caracterització del seu comportament elèctric i òptic es possible modelar-lo en 2D. Les cèl·lules IBC amb ***b-Si*** i de concentració estudiades al final de la tesis (capítols 6 i 7) són un exemple d'estructures amb modelització 2D.

A la taula [1.1] es presenta una mostra representativa de l'estat de l'art en el disseny i fabricació de les cèl·lules IBC. Cercant a la llista el valor màxim en relació a l'eficiència assolida, és la cèl·lula IBC desenvolupada per **Kaneka** la que presenta el valor més alt 26.6 (%). Es tracta d'una cèl·lula IBC amb heterunions de silici amorf, d'igual manera que la cèl·lula de PANASONIC. Rellevants també, són els dos dissenys de Sunpower, especialment el de tecnologia IBC/Cu amb una eficiència assolida de 25.0 (%), es tracta d'una cèl·lula IBC tipus  $n$  amb contactes metàl·lics de coure ( $Cu$ ).

TAULA 1.1: Estat de l'art de les cèl·lules IBC.

Institució	Tecnologia	$\eta$ (%)	Àrea( $cm^2$ )
Kaneka [14]	IBC/HET	26.6	180
Panasonic [15]	IBC/HET	25.6	143.7
Sunpower [16]	IBC/Cu	25	121
Sunpower [16]	IBC point contact	24.2	155
ANU [16]	IBC point contact	24.6	4
IME [16]	IBC/Cu point contact	23.3	4
ISE [16]	Back-contacted Back-junction point contact	23	4
UPC [17]	IBC point contact	22.2	9
ISFH [16]	IBC	22.3	239
ISC [16]	IBC ZEBRA	21.5	243
Panasonic-Sanyo [15]	IBC/HET	24.7	100.8
SHARP [16]	IBC/HET	25.1	1
LG [16]	IBC/HET	23.4	4
LG [16]	IBC/HET	20.7	239
EPFL-CSEM [16]	IBC/HET	22	9
HZB-ISFH [16]	IBC/HET	20.2	1
CEA-INES [16]	IBC/HET	20	25

### 1.3 La necessitat de les eines de simulació

Sorgeix la necessitat de fixar una metodologia aplicada a les simulacions dels paràmetres característics de les cèl·lules solars de silici de contacte posterior.

Una eina de simulació 1D àmpliament utilitzada per a la simulació de les cèl·lules solars convecionals és PC1D [18] [19] [20] [21], que resol les equacions no lineals per al transport dels portadors a dispositius semiconductors a 1D. PC1D resulta insuficient per a una simulació acurada de les estructures IBC degut al seu caràcter multidimensional, per tant cal ampliar el tractament i modelització a més d'una dimensió.

Des de ja fa uns anys existeixen eines de simulació de caràcter multidimensional aplicables a la simulació de dispositius semiconductors, Sentaurus TCAD [22] [23] [24], SILVACO [25] i COMSOL [26] són exemples d'eines de simulació de caràcter multidimensional, 2D/3D.

Degut a les particularitats estructurals i funcionals d'aquests tipus de cèl·lules solars cal una definició particular i ajustaments específics de les eines de simulació genèriques de caràcter multidimensional.

Algunes de les particularitats que condicionen les simulacions són:

- Les característiques de generació de l'espectre solar.
- Les característiques òptiques del dispositiu, coeficient de absorció, paràmetre important de caracterització del material, capes antireflectants a la superfície, i capes de reflexió interna a la regió posterior.
- Les dimensions de les cèl·lules solars, regions de dimensions relativament grans envers les dimensions típiques dels dispositius semiconductors, en combinació amb regions de dimensions més petites. L'assimetria dimensional comporta un tractament específic per a les cèl·lules solars, conseqüentment, la consideració i determinació de l'eina de simulació i la metodologia d'aplicació no és una tasca simple.

La modelització numèrica 2D i 3D resulta una important eina per a la caracterització i optimització d'aquest tipus de cèl·lules solars de silici d'alta eficiència.

Un paràmetre important a considerar en el disseny de cèl·lules solars de silici, és la distància entre els dits metàl·lics que contacten amb la regió de l'emissor.

La modelització i caracterització multidimensional permet realitzar estudis destinats a millorar les tècniques de disseny de les cèl·lules solars IBC mitjançant les simulacions 2D/3D.

Alguns dels paràmetres a estudiar per tal de millorar les prestacions del seu disseny són l'espaiat entre contactes (pitch), amplada dels contactes, la relació entre l'amplada de l'emissor i l'espaiat entre els contactes. A una optimització del disseny intervenen les pèrdues com ara les relacionades amb la passivació superficial i el temps de vida de volum.

Un dels efectes més importants que afecta significativament les prestacions de la cèl·lula solar és la recombinació superficial posterior, entre la regió *BSF* i l'emissor, la qual degrada la prestacions de la cèl·lula quan l'espaiat entre contactes, pitch, es fa més petit.

És necessari un model més precís per tal d'optimitzar i caracteritzar de manera més ajustada al comportament real d'aquestes estructures de cèl·lules solars, i això s'aconsegueix utilitzant modelitzacions en més d'una dimensió, aconseguint clarificar efectes importants que es produeixen a l'emissor i a la base, que no són quantificables a una anàlisi 1D.

## **1.4 Els capítols de la tesis**

A aquesta secció es presenten la resta de capítols que conformen la tesis. La divisió de capítols conjuga d'una banda la coincidència temàtica i la cronologia dels diferents estudis.

Una gran part de la tesis és destinada a l'estudi de cèl·lules IBC de contactes puntuals dopats amb làser. Aquesta estructura es molt novedosa i la seva optimització requereix necessàriament eines de simulació 3D.

### **1.4.1 Consideracions teòriques i pràctiques sobre l'entorn de simulació**

És el capítol on es presenten els conceptes teòrics i pràctics aplicats específicament a la simulació de les estructures IBC en l'ús de l'eina de simulació.

### **1.4.2 L'estructura IBC ideal de contactes puntuals**

El primer punt d'aquest capítol es centra en la presentació de les estructures de cèl·lula IBC ideals, amb estructures de contactes puntuals dopats amb làser, per després presentar els diversos estudis.

### 1.4.3 L'estructura IBC ideal de contactes puntuals i geometries complexes

Es presenten estudis en relació a diverses estructures IBC de geometries complexes, amb l'objectiu de mitigar una deficient passivació als contactes de base.

### 1.4.4 Estudi de l'estructura IBC real

Considerant els efectes resistius,  $R_s$ , es presenten diversos estudis, establint comparatives amb resultats experimentals, que permet una retroalimentació de les condicions de simulació i una millora en l'ajustament de l'entorn de simulació i dels resultats obtinguts a les simulacions. L'efecte de la resistència sèrie degut als electrodes i els contactes serà aplicat a les estructures de contactes puntuals analitzades als dos capítols precedents. La influència de  $R_s$  s'estudiarà en detall a capítols posteriors on s'abordarà l'estudi de cèl·lules IBC amb ***b-Si*** frontal (Capítol 6) i per al disseny de cèl·lules IBC a sistemes de concentració (Capítol 7).

### 1.4.5 Estudi de les cèl·lules IBC Black Silicon

En la recerca d'incrementar l'eficiència de les cèl·lules IBC d'altres prestacions, incrementant la transmissió òptica de la superfície frontal a la regió semiconductor es presenten les cèl·lules IBC amb ***black-silicon (b-Si)***, [27] [28] i passivació per mitjà del recobriment del ***black-silicon (b-Si)*** amb *ALD*  $Al_2O_3$ . En aquest capítol s'estudiaran estructures amb emissor i BSF difosos seguint un procés de fabricació base desenvolupat pel grup de Micro i Nanotecnologies de la UPC ***MNT-UPC*** per a la fabricació de cèl·lules IBC convencionals.

### 1.4.6 Estudi de les cèl·lules de concentració

Una variant de disseny aplicat a les cèl·lules solars és el de les cèl·lules solars de concentració, en les que s'aconsegueixen eficiències remarcables partint de la concentració de l'espectre solar. A aquest capítol, es presenten diversos estudis basats en les cèl·lules de concentració fabricades de forma similar a les cèl·lules amb Black Silicon ***b-si*** per la seva aplicació en un futur a sistemes de baixa concentració (típicament per sota de 10 *suns*)



### **1.4.7 Conclusions**

Finalment, a aquest capítol es remarquen les conclusions més importants de la tesis, recollint els diferents estudis i prenent en consideració l'estat de l'art en el disseny de cèl·lules IBC, es plantejen futurs estudis.

## Capítol 2

# Consideracions teòriques i pràctiques sobre l'entorn de simulació

### 2.1 Introducció

L'entorn de simulació és un element central en aquest estudi, per aquest motiu a la següent secció i subseccions es presenten les seves característiques i particularitats.

### 2.2 L'Entorn de Simulació

Existeixen diverses eines de simulació TCAD que són susceptibles de ser seleccionades a fi de caracteritzar, simular, generar i extreure resultats per a estructures en què el seu comportament és multidimensional.

Fent una recerca bibliogràfica d'articles, es van seleccionar dos entorns de simulació amb enfocaments divergents. El primer d'ells, és el de Sentaurus Device [22], què es caracteritza per ser una eina TCAD de propòsit general, amb un conjunt de mòduls, entre els quals es troba un mòdul de resolució òptica multidimensional. El segon, presenta una eina de simulació i modelització no específica TCAD, es tracta d'una plataforma de simulació multifísica, COMSOL Multiphysics [26]. D'aquesta manera, cadascun dels entorns de simulació formen part de dues categories diferents.

L'entorn de simulació COMSOL Multiphysics té la capacitat de resoldre les equacions de transport del semiconductor, mitjançant mètodes numèrics d'elements finits (FEM),

característica comuna a aquests tipus de plataformes de simulació. Un desavantatge, és el referent al tractament òptic, on nativament no es tracten l'absorció de l'espectre solar, la reflectivitat i la transmissió o la generació de portadors associada a l'absorció del fluxe de fotons. En cas de necessitar contemplar-los, cal definir i afegir les equacions i models que els representen. Malgrat tot, a COMSOL Multiphysics existeixen models desenvolupats per a la simulació de dispositius semiconductors com el cas del diode, basat en l'unió  $pn$ , a partir del qual és possible el plantejament d'una modelització adaptada a les particularitats de les cèl·lules solars IBC.

El gran avantatge del Sentaurus Device [22] és la inclusió de manera realística d'efectes òptics, tals com l'absorció, l'espectre solar AM1.5G per a la generació òptica en contraposició a COMSOL Multiphysics.

Sentaurus Device, es caracteritza per incloure els principals i actuals models numèrics de resolució per al transport de portadors, efectes de la temperatura, efectes quàntics i heteroestructures. Especialment conté dos mòduls destinats a la simulació de dispositius optoelectronics, Opto Option i EMW Option.

L'optimització de l'eficiència de la cèl·lula solar és l'objectiu en el disseny del dispositiu. La simulació del comportament del dispositiu resulta una eina important per tal de quantificar la minimització dels efectes negatius sobre l'eficiència. Sentaurus Device, fent ús dels seus models elèctrics i òptics resulta una eina òptima. Les característiques principals que es poden destacar, aplicant aquest software sobre la simulació de les cèl·lules solars, són les següents.

Mètodes de resolució òptics:

- Mètode de la matriu de transferència 1D, mètode utilitzat a òptica per a analitzar la propagació electromagnètica a mitjans acotats. En aquest cas, per exemple s'aplica al disseny de capes d'antireflexió i miralls dielèctrics.
- Model 2D i 3D de representació multicapa de l'antireflexió òptica.
- Mètode de propagació 2D i 3D.
- FDTD parellitzada a 2D i 3D. FDTD, mètode de les Diferències Finites al Domini del Temps (Finite Difference Time Domain FDTD) s'utilitza per a resoldre problemes electromagnètics transitoris utilitzant diferències finites.
- Diferents acoblaments per a les representacions òptiques i transport elèctric.

Especificacions físiques:

- Combinació de simulació del dispositiu amb un procés de modelització que considera els efectes de difusió i els processos de fabricació.
- Dependència de les propietats òptiques amb la longitud d'ona.
- Generació de l'espectre òptic.
- Suport per fer ús de materials compostos i heteroestructures.

Resultats:

- Consideració de les característiques d'il·luminació i foscor  $I - V$ .
- Extracció de les eficiències quàntiques internes i externes.
- Optimització de l'espectre de reflexió.
- Investigació de les pèrdues perimetrals.
- Maximització de la interceptació de la llum.
- Inspecció d'estructures 3D.

Amb aquestes característiques, aquesta eina és adequada per a desenvolupar simulacions 2D/3D d'estructures com les presentades, fent especial incidència sobre dependència de les propietats òptiques en relació a la longitud d'ona i generació de l'espectre òptic. Partint d'aquestes consideracions, és possible establir una metodologia de modelització i simulació 2D/3D de les cèl·lules solars IBC de contactes posteriors.

Considerant els avantatges i inconvenients de COMSOL i Sentaurus, s'escolleix Sentaurus per a dur a terme les simulacions de les cèl·lules IBC de contactes posteriors.

### 2.3 Conceptes Generals sobre el Sentaurus Device

Sentaurus Device simula numèricament el comportament elèctric, i òptic en el cas de dispositius optoelectrònics. Es genera al simulador un dispositiu semiconductor, que representa l'aproximació a un dispositiu semiconductor real, amb les diverses característiques i propietats físiques discretitzades a un mallat, "mesh", d'estructura de nodes disposats de manera no regular. Aquesta discretització estructural node a node del semiconductor generat al simulador, comporta que les propietats físiques, variables... han de ser interpolades entre node i node per tal de complir les condicions de continuïtat de les equacions. L'estructura generada d'aquesta partint del mallat conté la descripció geomètrica del dispositiu, la subdivisió per regions, materials i la localització dels nodes.

Una característica rellevant és la possibilitat de generar estructures 2D i 3D. En el cas d'estructures 2D per defecte el simulador computa la tercera dimensió amb  $1 \mu m$  de profunditat.

A les següents subseccions s'aprofundeix amb els fonaments de la modelització física i es presenten les variables i paràmetres dels models que es fan servir a l'estudi de les cèl·lules IBC.

## 2.4 Models físics aplicats a la tesis

### 2.4.1 Concentració de portadors i nivells de Fermi

En condicions d'equilibri tèrmic, la concentració dels electrons (2.1) i forats (2.2) s'expressen en funció del nivell d'energia de Fermi; amb  $E_{Fi}$  nivell de Fermi intrínsec,  $E_F$  nivell de Fermi i  $n_i$  concentració intrínseca:

$$n_0 = n_i \cdot e^{\left(\frac{E_F - E_{Fi}}{K \cdot T}\right)} \quad (2.1)$$

$$p_0 = n_i \cdot e^{\left(\frac{E_{Fi} - E_F}{K \cdot T}\right)} \quad (2.2)$$

Fora de l'equilibri tèrmic, es defineixen els nivells d'energia de quasi-Fermi  $E_{Fn}$  per a electrons i  $E_{Fp}$  per a forats, amb  $\Delta_n$  i  $\Delta_p$  excessos de concentració d'electrons (2.3) i forats (2.4) respectivament:

$$n = n_0 + \Delta_n = n_i \cdot e^{\left(\frac{E_{Fn} - E_{Fi}}{K \cdot T}\right)} \quad (2.3)$$

$$p = p_0 + \Delta_p = n_i \cdot e^{\left(\frac{E_{Fi} - E_{Fp}}{K \cdot T}\right)} \quad (2.4)$$

A Setaurus Device, es presenta una variant de les expressions anteriors (2.5) i (2.6). Per defecte assumeix l'aproximació estadística de Boltzman, definida de la següent manera:

$$n = N_c \cdot e^{\left(\frac{E_{F,n} - E_c}{K \cdot T}\right)} \quad (2.5)$$

$$p = N_v \cdot e^{\left(\frac{E_v - E_{F,p}}{K \cdot T}\right)} \quad (2.6)$$

Amb:

- $N_C$  (2.7) i  $N_V$  (2.8) representen respectivament la densitat efectiva d'estats a la Banda de Conducció i la densitat efectiva d'estats a la Banda de València.
- $E_{F,n} = -q\Phi_n$  i  $E_{F,p} = -q\Phi_p$  les energies de Fermi per a electrons i forats,  $\Phi_n$  (2.9) i  $\Phi_p$  (2.10) els pseudo-potencials de Fermi per a electrons i forats.

$$N_c = 2 \cdot \left( \frac{2 \cdot \pi \cdot m_e^*}{h^2} \cdot K \cdot T \right)^{\frac{3}{2}} \quad (2.7)$$

$$N_v = 2 \cdot \left( \frac{2 \cdot \pi \cdot m_h^*}{h^2} \cdot K \cdot T \right)^{\frac{3}{2}} \quad (2.8)$$

$$\Phi_n = \frac{K \cdot T}{q} \cdot \ln\left(\frac{n}{n_i}\right) \quad (2.9)$$

$$\Phi_p = -\frac{K \cdot T}{q} \cdot \ln\left(\frac{p}{n_i}\right) \quad (2.10)$$

D'aquesta expressió, assumint l'aproximació estadística de Boltzman, s'extreu la posició dels nivells d'energia de quasi-Fermi d'electrons (2.11) i forats (2.12) respecte la banda de conducció i valència:

$$E_{F,n} = E_c + K \cdot T \cdot \ln\left(\frac{n}{N_c}\right) \quad (2.11)$$

$$E_{F,p} = E_v + K \cdot T \cdot \ln\left(\frac{N_v}{p}\right) \quad (2.12)$$

### 2.4.2 Model de transport de portadors

El moviment d'electrons i forats al semiconductors genera corrents. Aquest moviment de portadors és el que es defineix com a transport. Bàsicament, hi han dos mecanismes de transport. El primer dels mecanismes, arrossegament, és basa en el moviment de la càrrega degut a camps elèctrics. El segón dels mecanismes, difusió, relacionat amb el moviment dels portadors degut al gradient de densitat.

Un camp elèctric en un semiconductor genera una força sobre els electrons i forats produint un moviment als portadors. El moviment net dels portadors és expressat pel

corrent d'arrossegament. El corrent d'arrossegament degut als electrons és en la mateixa direcció al del camp elèctric aplicat i oposada al del moviment dels electrons.

La densitat de corrent d'arrossegament total (2.13) és el resultat de la suma de les densitats de corrent d'arrossegament d'electrons i forats i s'expressa com:

$$J_{drift} = q \cdot (\mu_n \cdot n + \mu_p \cdot p) \cdot E \quad (2.13)$$

La difusió d'electrons d'una regió d'alta concentració a una regió on la concentració és més baixa produeix un fluxe d'electrons cap a la regió amb la concentració més baixa, amb la direcció de la corrent de difusió deguda al fluxe d'electrons en sentit positiu. En el cas dels forats, la difusió d'una regió d'alta concentració de forats a una regió on la concentració és més baixa es produeix un fluxe de forats cap a la regió amb la concentració més baixa, amb la direcció de la corrent de difusió deguda al fluxe de forats en sentit positiu. La suma de les densitats de corrent de difusió d'electrons i forats (2.14) es presenta de la forma, amb  $D_n$  i  $D_p$ , amb unitats de  $cm^2/s$ , definits com a coeficients de difusió d'electrons i forats:

$$J_{diffusion} = q \cdot (D_n \cdot \nabla_n - D_p \cdot \nabla_p) \quad (2.14)$$

L'equació de densitat de corrent total (2.15) es defineix com:

$$J_{Total} = J_{drift} + J_{diffusion} = q \cdot [(\mu_n \cdot n + \mu_p \cdot p) \cdot E + (D_n \cdot \nabla_n - D_p \cdot \nabla_p)] \quad (2.15)$$

Una altra equació, que forma part de les equacions que serveixen per a definir el comportament del semiconductor, és l'equació de Poisson (2.16), expressada com:

$$\nabla^2 \Phi(x, y, z) = \frac{\delta^2 \Phi}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 \Phi}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 \Phi}{\delta z^2} = \frac{-q}{\epsilon_s} \cdot [(p(x, y, z) - n(x, y, z) + N_d(x, y, z) - N_a(x, y, z))] \quad (2.16)$$

Finalment, les equacions de continuïtat (2.17) (2.18), que conjuntament amb les equacions de corrents d'arrossegament, difusió i Poisson conformen les equacions que governen el comportament del semiconductor, es presenten com:

$$\frac{\partial n(x, y, z)}{\partial t} = \frac{1}{q} \cdot \text{div} J_n(x, y, z) + (G_n - R_n) \quad (2.17)$$

$$\frac{\partial p(x, y, z)}{\partial t} = \frac{-1}{q} \cdot \text{div} J_p(x, y, z) + (G_p - U_p) \quad (2.18)$$

El model de transport de portadors definit per defecte a Sentaurus Device és el de Drift-Difussion, Sentaurus Device presenta altres models de transport de portadors com el model de transport de portadors Isotèrmic, Termodinàmic, Hidrodinàmic i Monte-Carlo. Tots els models de transport de Sentaurus Device s'expressen per mitjà de les equacions de continuïtat (2.17) i (2.18), que serveixen per descriure la conservació de la càrrega.

Per a l'estudi de les estructures IBC és aquest model de transport de portadors Drift-Difussion el que s'aplica en la parametrització i definició de les condicions de simulació.

Sentaurus Device defineix les densitats de corrent (2.19) d'electrons i forats al model de transport Drift-Difussion, considerant l'acompliment de la relació d'Einstein ( $D_n = k \cdot T \cdot \mu_n$ ,  $D_p = k \cdot T \cdot \mu_p$ ), aplicant estadística de Boltzmann, i  $\Phi_n$   $\Phi_p$  com els potencials de quasi-Fermi per a electrons i forats, com:

$$\vec{J}_n = -n \cdot q \cdot \mu_n \cdot \nabla \Phi_n, \quad \vec{J}_p = -p \cdot q \cdot \mu_p \cdot \nabla \Phi_p \quad (2.19)$$

### 2.4.3 Bandes d'Energia

Un dels punts més importants en la definició d'una metodologia aplicada a la simulació, és la de models de bandes d'energia, cal presentar els elements que intervenen en la seva definició i la seva modelització a Sentaurus Device, que en les seccions successives s'aniran presentant, on la banda d'energia prohibida ( $E_g$ ) es defineix com a la diferència entre el nivell més alt de banda de valència i el nivell més baix de la banda de conducció. La concentració intrínseca (2.20) i la concentració efectiva intrínseca (2.21), amb el factor  $E_{bgn}$  definit com a l'energia d'estretament de la banda d'energia prohibida a regions d'alt dopat, es defineixen com, ambdues en funció de la temperatura:

$$n_i(T) = \sqrt{N_c(T) \cdot N_v(T)} \cdot e^{\left(\frac{-E_g(T)}{2 \cdot K \cdot T}\right)} \quad (2.20)$$

$$n_{i,eff} = n_i \cdot e^{\left(\frac{E_{bgn}}{2 \cdot K \cdot T}\right)} \quad (2.21)$$

Sentaurus Device presenta diversos models de bandes d'energia, Bennett-Wilson, del Alamo, OldSlotboom, Slotboom, Jain-Roulston i TableBGN. El model seleccionat és el



del Alamo, ja que per mitjà de l'ajust d'alguns dels seus paràmetres s'aconsegueix una relació equivalent amb el model de bandes d'energia aplicat a PC1D.

La relació de dependència de la banda d'energia prohibida envers la temperatura (2.22), amb  $E_g(0) = 1.16964$  (eV),  $\alpha$  i  $\beta$  paràmetres específics per a cada material, per defecte  $\alpha = 4.73 \cdot 10^{-4}$  i  $\beta = 636$ , es presenta com:

$$E_g(T) = E_g(0) - \left( \frac{\alpha \cdot T^2}{T + \beta} \right) \quad (2.22)$$

### 2.4.3.1 Model d'estretament de la banda d'energia prohibida de del Alamo

La banda d'energia prohibida efectiva afectada per l'estretament de la banda d'energia (2.23)  $E_{bgn}$  s'expressa a:

$$E_{g,eff} = E_g(T) - \Delta E_g^0 \quad (2.23)$$

La variable  $\Delta E_g^0$  (2.24) quantifica l'estretament de la banda d'energia prohibida a regions fortament dopades aplicant estadística de Boltzman, amb el model d'estretament de la banda d'energia prohibida de del Alamo, amb  $E_{ref} = 18.7 \cdot 10^{-3}$  (eV) i  $N_{ref} = 7 \cdot 10^{17}$  ( $cm^{-3}$ ) paràmetres ajustables i específics per a cada material:

$$\Delta E_g^0 = \begin{cases} E_{ref} \cdot \ln\left(\frac{N_{tot}}{N_{ref}}\right) & \text{si } N_{tot} \geq N_{ref} \\ 0 & \text{si } N_{tot} < N_{ref} \end{cases} \quad (2.24)$$

### 2.4.4 Mobilitat

Sentaurus Device presenta diverses opcions de modelització de la mobilitat. En el cas particular aplicat als diversos estudis de la tesis, s'activa l'opció de degradació de la mobilitat en relació al dopat (DopingDependence), degradació deguda als ions carregats elèctricament a les impureses del dopat. En el cas del silici el model per defecte és el proposat per Masetti [29], que coincideix amb el model de mobilitat de PC1D (2.25):

$$\mu_{p,n} = \mu m_{in1} \cdot e^{\left(\frac{P_c}{N_A + N_D}\right)} + \left( \frac{\mu_{const} - \mu m_{in2}}{1 + \left(\frac{N_A + N_D}{C_r}\right)^\alpha} \right) + \left( \frac{\mu_1}{1 + \left(\frac{C_s}{N_A + N_D}\right)^\beta} \right) \quad (2.25)$$

Amb les mobilitats de referència  $\mu m_{in1}$ ,  $\mu m_{in2}$  i  $\mu_1$ , les concentracions de dopatge  $P_c$ ,  $C_r$  i  $C_s$  i exponents  $\alpha$  i  $\beta$  definits per defecte a:

TAULA 2.I: Paràmetres per a la definició de la mobilitat en relació a la dependència del dopat.

Paràmetre	Electrons	Forats
$\mu_{in1} (cm^2/V \cdot s)$	52.2	42.9
$\mu_{in2} (cm^2/V \cdot s)$	52.2	0
$\mu_1 (cm^2/V \cdot s)$	43.4	29.0
$P_c (cm^{-3})$	0	$9.23 \cdot 10^{16}$
$C_r (cm^{-3})$	$9.68 \cdot 10^{16}$	$2.23 \cdot 10^{17}$
$C_s (cm^{-3})$	$3.43 \cdot 10^{20}$	$6.10 \cdot 10^{20}$
$\alpha$ (1)	0.680	0.719
$\beta$ (1)	2.0	2.0

El paràmetre  $\mu_{const}$  (2.26) representa l'expressió de la dispersió de fonons en funció de la temperatura, normalitzada a 300 (K). Les simulacions a la tesis es fixen a la temperatura de 300 (K) pel que  $\mu_{const}$  equival al valor de  $\mu_L$ , (2.II):

$$\mu_{const} = \mu_L \cdot \left(\frac{T}{300(K)}\right)^{-\eta} \quad (2.26)$$

TAULA 2.II: Paràmetres per a la definició de la dispersió relacionada amb el fonó.

Paràmetre	Electrons	Forats
$\mu_L (cm^2/V \cdot s)$	1417	470.5
$\eta$ (1)	2.5	2.2

## 2.4.5 Generació i Recombinació

Els processos de generació i recombinació comporten intercanvis de portadors entre la banda de conducció i la banda de valència. Aplicat a les cèl·lules solars IBC, fent ús de la modelització presentada a Sentaurus Device, es detallen els principals processos de generació i recombinació.

### 2.4.5.1 Recombinació Shockley–Read–Hall en volum

A semiconductors reals hi han defectes a la xarxa cristal·lina que produeixen una distorsió a la funció periòdica de potencial. Si la densitat d'aquests defectes és suficientment gran, es creen estats discrets d'energia a la banda d'energia prohibida. Aquests estats permesos d'energia situats dins de la banda d'energia prohibida esdevenen el factor determinant al temps de vida dels portadors.

El temps de vida dels excessos de portadors minoritaris és inversament proporcional a la densitat d'estats d'energia permesos a la banda d'energia prohibida. Bàsicament, hi han quatre possibles processos, aparellats de manera complementaria.

- Captura d'un electró de la banda de conducció.
- Procés invers a l'anterior, emissió d'un electró des del centre de recombinació a la banda de conducció.
- Captura d'un forat de la banda de valència.
- Procés invers a l'anterior, emissió d'un forat del centre de recombinació cap a la banda de valència.

Al primer dels processos esdevé la captura d'un electró de la banda de conducció a un dels centres de recombinació, on la probabilitat de que es produeixi aquest procés depèn de la densitat d'electrons a la banda de conducció i de la densitat d'estats buits als centres de recombinació. La probabilitat de que es produeixi el procés complementari d'emissió d'electrons des d'un dels centres de recombinació a la banda de conducció depèn de la densitat d'estats omplerts d'electrons als centres de recombinació i dels estats buits a la banda de conducció. Als processos tres i quatre s'expressa de manera anàloga la probabilitat de que es produeixin aquests processos aplicat a la banda de valència i als forats.

Per a Sentaurus Device la recombinació de Shockley–Read–Hall (2.27) es defineix com:

$$R_{SHR} = \frac{n \cdot p - n_{i,eff}^2}{\tau_p \cdot (n + n_1) + \tau_n \cdot (p + p_1)} \quad (2.27)$$

Amb els valors  $n_1$  (2.28) i  $p_1$  (2.29):

$$n_1 = n_{i,eff} \cdot e^{\left(\frac{E_{trap}}{K \cdot T}\right)} \quad (2.28)$$

$$p_1 = n_{i,eff} \cdot e^{\left(\frac{-E_{trap}}{K \cdot T}\right)} \quad (2.29)$$

On  $\tau_n$  i  $\tau_p$  són el temps de vida fonamentals d'electrons i forats, i  $E_{trap}$  es defineix com a la diferència entre el nivell d'energia dels estats permesos  $E_t$  i el nivell d'energia intrínsec.

A les simulacions de la tesis per a les cèl·lules IBC es considera l'efecte Recombinació Shockley–Read–Hall com a menyspreable ( $\tau_{n,p} \rightarrow \infty$ ), donada l'alta qualitat del material semiconductor, i per tant, a les simulacions es parametritzarà amb valors de ( $\tau_{n,p} = 1$  s) per tal de minimitzar l'efecte de la Recombinació Shockley–Read–Hall. La recombinació en volum vindrà condicionada per la recombinació intrínseca (Banda a Banda i Auger) com es veurà més endavant.

#### 2.4.5.2 Recombinació intrínseca. Recombinació d'Auger i banda a banda

El procés dominant a semiconductors de silici de molt bona qualitat (per exemple a substrats zona flotant) ve determinat bàsicament per la recombinació intrínseca.

A la definició de la Recombinació intrínseca, deguda als mecanismes inherents d'Auger i Banda a Banda, es fa ús d'unes de les eines de Sentaurus Device, PMI (Physical Model Interface), que proporciona la possibilitat de modificar els seus paràmetres i variables, a més de definir una nova modelització.

La contribució a la recombinació intrínseca de la recombinació d'Auger es relaciona amb l'excés d'energia producte de la recombinació entre un parell electró-forat es transmés a un altre electró, generant-se una transició de l'electró a la banda de conducció. Aquest procés és la resultant de la interacció entre diversos electrons i un forat a la banda de conducció o forats i un electró a la banda de valència. Es basa en l'intercanvi d'energia entre portadors, on s'incrementa la probabilitat de recombinació amb l'increment de la concentració de portadors, donat que s'incrementa la probabilitat d'interacció i transmissió de l'excés d'energia a un altre electró. És un tipus de recombinació característica a entorns alta injecció amb altes densitats de portadors o en regions fortament dopades.

La recombinació banda a banda s'associa a la recombinació d'un electró de la banda de conducció amb un forat de la banda de valència.

Sentaurus Device dóna la possibilitat d'accedir a un conjunt de models que formen part de les equacions de transport del semiconductor. La llista de models, on és possible accedir per mitjà de PMI (Physical Model Interface):

- Recombinació.
- Mobilitats d'electrons i forats  $\mu_n$  i  $\mu_p$ .
- Banda d'energia prohibida.
- Estretament de la banda d'energia prohibida  $E_{bg}$ .

- Índex de refracció.
- Afinitat electrònica.
- Masses efectives  $m_n^*$  i  $m_p^*$ .
- Temps de vida de portadors.
- Rendiment quàntic.

Fent ús d'aquesta eina, s'introdueix la modificació del model de recombinació intrínseca, implementant una millora a la parametrització de la recombinació d'Auger i Banda a Banda considerant el model de Ritcher (2.30) *et Al* [30].

$$R_{in} = (p \cdot n - n_i^2) \cdot (2.5 \cdot 10^{-31} \cdot g_{eeh} \cdot N_D + 8.5 \cdot 10^{-32} \cdot g_{ehh} \cdot N_A + 3.0 \cdot 10^{-29} \cdot \Delta_n^{0.92} + 4.73 \cdot 10^{-15} \cdot B_{rel}) \quad (2.30)$$

Amb el factor associat a la recombinació banda a banda (2.31):

$$R_{b,b} = 4.73 \cdot 10^{-15} \cdot B_{rel} \quad (2.31)$$

$$g_{eeh} = 1 + 13 \cdot [1 - \tanh[(\frac{N_D}{3.3 \cdot 10^{17}})^{0.66}]] \quad (2.32)$$

$$g_{ehh} = 1 + 7.5 \cdot [1 - \tanh[(\frac{N_A}{7 \cdot 10^{17}})^{0.63}]] \quad (2.33)$$

$$B_{rel} = b_{min} + \frac{1 - b_{min}}{1 + (\frac{n+p}{b_1})^{0.54} + (\frac{n+p}{b_3})^{1.25}} \quad (2.34)$$

$$b_{min} = 0.2 - \frac{0.2}{1 + (\frac{T}{320})^{2.5}} \quad (2.35)$$

$$b_1 \cong 1.5 \cdot 10^{18} - \frac{1.5 \cdot 10^{18}}{1 + (\frac{T}{550})^3} \quad (2.36)$$

$$b_3 \cong 4 \cdot 10^{18} - \frac{4 \cdot 10^{18}}{1 + (\frac{T}{365})^{3.54}} \quad (2.37)$$

Les variables  $g_{eeh}$  (2.32) i  $g_{ehh}$  (2.33) representen els factors que interaccionen les forces d'atracció de Coulumb amb la recombinació d'Auger. El paràmetre  $B_{rel}$  (2.34) representa el coeficient de recombinació radiativa relativa.

A la figura 2.1 es presenta l'evolució de la recombinació amb el model de [30] en el cas d'un semiconductor tipus  $n$  i un semiconductor tipus  $p$  amb una resistivitat de  $2.2 \Omega \cdot cm$ , que es correspon a les concentracions dopant  $N_D = 2.14 \cdot 10^{15} cm^{-3}$  en el cas del semiconductor c-Si(n) i  $N_A = 6.48 \cdot 10^{15} cm^{-3}$  en el cas del semiconductor c-Si(p), i el temps de vida efectiu. A les figures, que representen la recombinació d'Auger i temps de vida efectiu d'Auger s'observa un punt d'inflexió al voltant dels valors de concentracions dopants. Establint una comparativa entre els temps de vides efectius en el cas del semiconductor c-Si(n) i semiconductor c-Si(p) amb resistivitat  $2.2 \Omega \cdot cm$ , és sensiblement millor per al cas tipus  $n$ .

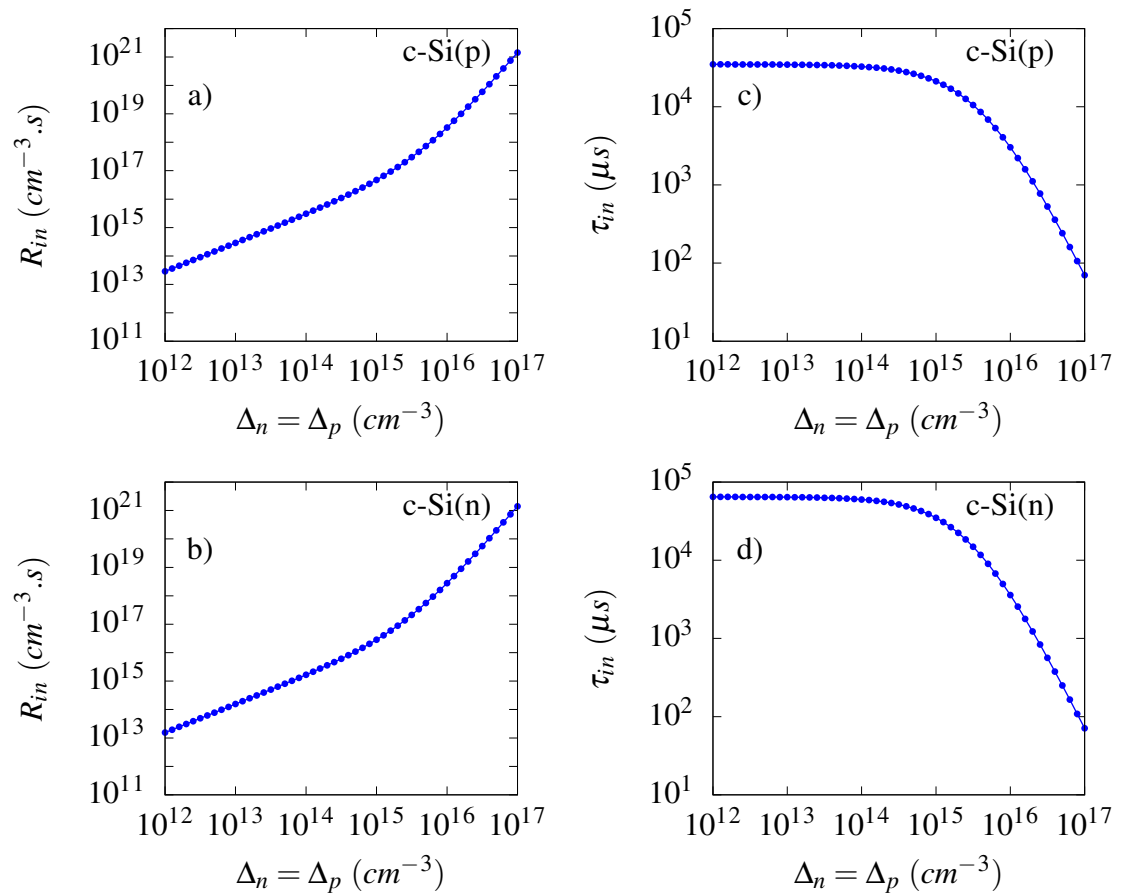


FIGURA 2.1: Recombinació intrínseca amb el model de Ritcher [30] i del temps de vida efectiu intrínsec per a tipus  $n$  (b,d) i  $p$  (a,c) amb resistivitat  $2.2 (\Omega \cdot cm)$ .

### 2.4.5.3 Recombinació Shockley–Read–Hall de superfície

La recombinació Shockley–Read–Hall de superfície s'expressa d'igual manera que la recombinació Shockley–Read–Hall de volum, amb la diferència que en aquest cas s'aplica a la recombinació Shockley–Read–Hall a les interfícies semiconductor-semiconductor, semiconductor-dielèctric, la xarxa cristal·lina del semiconductor és abruptament delimitada, interfície semiconductor-semiconductor, semiconductor-dielèctric.

També es produeix una distorsió a la funció de potencial periòdica, generant-se estats d'energia dins de la banda d'energia prohibida. Tal com succeix a la recombinació Shockley–Read–Hall de volum, el temps de vida dels excessos de portadors minoritaris és inversament proporcional a la densitat d'estats d'energia permesos a la banda d'energia prohibida.

Donat que la densitat d'estats permesos a la banda d'energia prohibida és substancialment més gran a la superfície que al volum, la finalització abrupta a la superfície del semiconductor genera una densitat d'estats permesos o centres de recombinació molt més gran que al volum, i per tant el temps de vida dels minoritaris és més petit a la superfície.

A Setaurus Device la recombinació Shockley–Read–Hall de superfície (2.38) s'expressa com a, considerant  $S_p$  i  $S_n$  com a velocitats de recombinació superficial fonamentals de forats i electrons respectivament:

$$R_{SHR}^{surf} = \frac{n \cdot p - n_{i,eff}^2}{\frac{(n+n_1)}{S_p} + \frac{(p+p_1)}{S_n}} \quad (2.38)$$

Amb:

$$n_1 = n_{i,eff} \cdot e^{\left(\frac{E_{trap}}{K \cdot T}\right)} \quad (2.39)$$

$$p_1 = n_{i,eff} \cdot e^{\left(\frac{-E_{trap}}{K \cdot T}\right)} \quad (2.40)$$

Aquesta expressió de recombinació superficial suposa que totes les trampes es troben a un únic nivell energètic ( $E_{trap}$ ).

### 2.4.6 Condicions de contorn als contactes

L'establiment de les condicions de contorn als contactes esdevé un dels elements més importants a la definició de les estructures de simulació. Aquestes són:

- Les condicions de contorn de corrents als contactes amb les concentracions en equilibri de portadors definides per defecte,  $n = n_0$  i  $p = p_0$ , es veuen alterades tal com es pot comprovar a les equacions (2.41) (2.42), amb  $s_n$  i  $s_p$  velocitats de recombinació.

$$\vec{J}_n \hat{n} = q \cdot s_n \cdot (n - n_0) \quad (2.41)$$

$$\vec{J}_p \hat{n} = -q \cdot s_p \cdot (p - p_0) \quad (2.42)$$

- L'àrea de l'emissor contactada té associada una velocitat de recombinació superficial de l'emissor amb un valor de  $S_{c,emitter} = 5 \cdot 10^6 \text{ cm/s}$ , valor representatiu d'una recombinació infinita de minoritaris.
- La velocitat de recombinació de majoritaris s'ajusta al valor  $5 \cdot 10^6 \text{ cm/s}$ , que permet expressar una recombinació infinita de majoritaris als contactes.
- Es defineix la regió fortament dopada localitzada al contacte base, denominada Back Surface Field (BSF), on es presenta una interfície entre la base, feblement dopada, i una regió fortament dopada BSF, del mateix tipus de dopat que la base, és a dir, si la base és de tipus  $p$  la regió BSF és del tipus  $p^+$  i per al cas complementari si la base és del tipus  $n$  la regió BSF és del tipus  $n^+$ , establint-se una unió  $p p^+$  per al cas de base tipus  $p$  o una unió  $n n^+$  per al cas de base tipus  $n$ , i on sorgeix un camp elèctric que crea una barrera per als portadors minoritaris, cercant la passivació al contacte base per tal de reduir la velocitat de recombinació, com a condició de simulació, la velocitat de recombinació de minoritaris al contacte base s'ajusta a  $S_{c,base}$ , prenent valors considerant condicions ideals en relació a la  $S_{c,base}$  tal com  $S_{c,base} = [0, 100] \text{ cm/s}$  i valors de  $S_{c,base} = [10^4, 5 \cdot 10^6] \text{ cm/s}$  representatius de valors reals i casos en què no hi ha passivació. Sentaurus Device permet definir la velocitat de recombinació superficial efectiva al contacte base  $S_{c,base}$ , diferenciant per als portadors majoritaris i minoritaris.



### 2.4.7 Model Òptic

De les diferents opcions de generació òptica s'escolleix la font d'il·luminació espectral, en el què es llegeix d'un fitxer l'espectre de generació òptica.

#### 2.4.7.1 Model de rendiment quàntic

El model de rendiment quàntic representa la relació d'eficiència a la generació de parells d'electrons-forats respecte al número de fotons incidents.

El model per defecte assumeix que tots els fotons absorbits generen portadors independentment de les característiques del material. Aquesta asseveració es correspon a un factor amb valor la unitat per al model de rendiment òptic aplicat a les regions de semiconductor, on s'absorbeixen els fotons, i un factor zero a les regions on no hi ha semiconductor.

#### 2.4.7.2 Model de resolució òptic

Dels models de resolució òptic s'usa el Raytracing. L'eina relacionada amb el Raytracing que s'anomena Raytracer basat en una interpolació lineal. La seva execució va acompanyada amb el model de l'índex de refracció complex.

L'índex de refracció complex (2.43) es descriu amb la part real de  $n$  composta per un índex de refracció base  $n_0$  i uns factors de correcció dependents de la longitud d'ona, temperatura, densitat de portadors i guany del material. La part imaginària  $k$  és composta de un índex d'extinció base  $k_0$  i factors de correcció dependents de la longitud d'ona i de la densitat de portadors:

$$\tilde{n} = n + i \cdot k \quad (2.43)$$

Amb:

$$n = n_0 + \Delta n_\lambda \quad (2.44)$$

$$k = k_0 + \Delta k_\lambda \quad (2.45)$$

El coeficient d'absorció  $\alpha$  (2.46) es defineix partint de l'índex d'extinció i de la longitud d'ona:

$$\alpha = \frac{4 \cdot \pi}{\lambda} \cdot k \quad (2.46)$$

L'índex de refracció i els coeficients d'absorció es basen en una taula específica per a cada material, que en el cas del silici és equivalent a l'utilitzat pel simulador PC1D.

### 2.4.7.3 Absorció

És necessària una component imaginària, coeficient d'extinció  $k$ , a l'índex de refracció, a fi de que es produeixi l'absorció de fotons (2.47):

$$\alpha(\lambda)[cm^{-1}] = \frac{4 \cdot \pi \cdot k}{\lambda} \quad (2.47)$$

La generació frontal  $G(x, y, z = 0, t)$  del raig de llum incident (2.48) es veu reduïda per un factor exponencial  $e^{-\alpha l}$ , amb  $l$  definida com la longitud del raig dins del dispositiu. L'absorció es defineix com:

$$G^{opt}(x, y, z = 0, t) = G(x, y, z = 0, t) \cdot [1 - e^{-\alpha \cdot l}] \quad (2.48)$$

### 2.4.7.4 Càlcul de la reflectància a la regió posterior

La reflectància de la regió posterior ve determinada per les propietats de reflectivitat dels materials que conformen les regions localitzades a la superfície posterior del dispositiu. La fixació del Gap metàl·lic, les dimensions dels contactes metàl·lics, la dimensió de regions no metal·litzades, són elements determinants en el càlcul de la reflectància.

Considerant els contactes de base i emissor, la reflectivitat de les zones metal·litzades de  $R_{Met}$ , 94 %, amb àrea  $A_{Met}$ , la reflectivitat de les zones no metal·litzades  $R_{noMet}$ , considerant un valor de 15 % (com es veurà més endavant al capítol de l'Estudi de les *Cèl·lules IBC Black Silicon (b-Si)*, aquest valor s'ajustarà prenent com a referència dades reals i passarà a prendre un valor de 86 %), amb àrea  $A_{noMet}$  i la reflectivitat als contactes de  $R_{cont}$ , 86 %, amb àrea  $A_{cont}$ , la reflectància a la regió posterior es calcula depenent del gap metàl·lic, és a dir, les zones no metal·litzades localitzades a sobre del material dielèctric, es pot calcular una reflectància mitja a la regió posterior (2.49) com:

$$\begin{aligned} \langle R(\%) \rangle = & R(\%)_{Met} \cdot \left(\frac{A(\%)_{Met}}{100}\right) + R(\%)_{noMet} \cdot \left(\frac{A(\%)_{noMet}}{100}\right) \\ & + R(\%)_{cont} \cdot \left(\frac{A(\%)_{cont}}{100}\right) \end{aligned} \quad (2.49)$$

#### 2.4.7.5 L'espectre ponderat

L'opció de Sentaurus Device utilitzada a la generació òptica és l'anomenada ComputeFromSpectrum, que es caracteritza per representar la definició d'una font d'il·luminació espectral, on la generació òptica és resultat de la integració de cadascun dels valors de la intensitat,  $W/cm^2$ , respecte a cada longitud d'ona, expressada en  $\mu m$ , de la qual es llegeix d'un fitxer de text.

Per a simplificar el model òptic es suposa que per a l'estructura es transmet la totalitat amb una irradiància espectral ponderada  $I_\lambda$  considerant l'espectre incident estàndard  $AM1.5G$   $I_{\lambda,AM1.5G}$  i la reflectància mesurada  $R(\lambda)$  amb esfera integradora de dispositius reals de referència.

$$I_{mod}(\lambda) = I_{\lambda,AM1.5G} \cdot (1 - R(\lambda)) \quad (2.50)$$

Aquesta aproximació suposa que no hi ha absorció a la capa antireflex i porta a definir la regió o interfície superficial frontal del dispositiu amb coeficient de transmissió extern de 1 i complementàriament el coeficient de reflexió intern de 1.

Fent ús de l'espectre ponderat i considerant la reflectància mitja a la superfície posterior s'aplica el model de resolució òptic, Raytracing, en conjunció amb el coeficient d'absorció es generen els càlculs d'absorció òptica dins l'estructura.

Als diferents estudis de la tesis s'han utilitzat tres espectres ponderats. L'espectre ponderat d'il·luminació incident sobre el semiconductor estalvia els càlculs a la transmissió òptica de la capa de texturació i passivació frontal, així com la complexitat de l'estructura a simular, especialment a superfícies texturitzades amb piràmides aleatòries o nanotexturitzades (black silicon). Tanmateix, als càlculs òptics s'ha d'utilitzar un model de resolució òptic, en aquest estudi *Raytracing*, amb el model de l'índex de refracció complex i la reflectància a la regió posterior.

El primer dels espectres ponderats, línia vermella, és utilitzat als capítols 3 i 4 *L'estructura IBC ideal de contactes puntuals* i al capítol 5 *L'estructura IBC ideal de geometries complexes*, prové dels resultats experimentals de laboratori de l'espectre d'il·luminació incident sobre una capa de texturació i passivació frontal conformada per  $Al_2O_3$  (15 nm)/ $SiC_x$

(60 nm), el segon dels espectres ponderats, línia blau mar i, s'utilitza a l'estudi de les cèl·lules IBC Black Silicon (b-Si), prové dels resultats experimentals de laboratori de l'espectre d'il·luminació incident sobre una capa de texturació i passivació frontal conformada per  $Al_2O_3$  (20 nm). A la figura 2.2 s'observa també la gràfica de la reflectància (simbols),  $R(\%)$ . Al cas del black silicon, la reflectància al rang de longituds d'ona 300 – 1000 nm, és quasi-nul·la i es transmet pràcticament el 100 % de llum. L'últim dels espectres ponderats, línia verda, s'aplica a l'estudi de les cèl·lules IBC de concentració, prové dels resultats experimentals de laboratori de l'espectre d'il·luminació incident sobre una capa de texturació amb piràmides aleatòries i passivació frontal conformada per  $Al_2O_3$  (90nm).

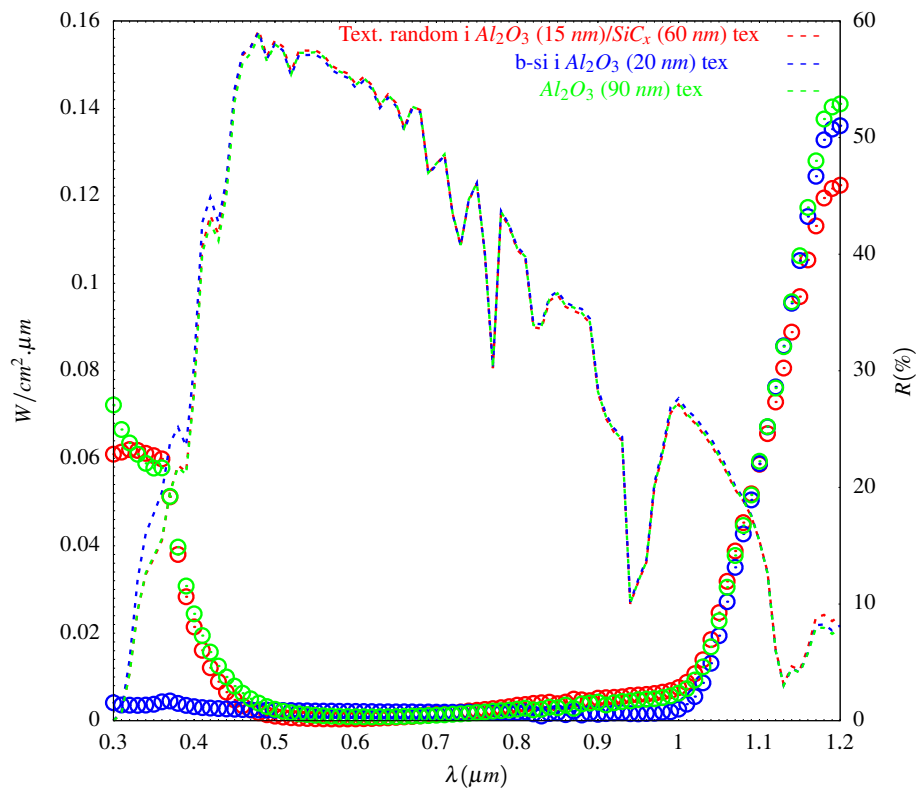


FIGURA 2.2: Espectres ponderats AM1.5G ( $W/cm^2 \cdot \mu m$ ) (línia discontinua) i reflectància (simbols) respecte a  $[0.3 - 1.2 \mu m]$  sobre una capa de texturació i passivació frontal conformada per superfícies amb texturitzat amb piràmides aleatòries i passivades amb  $Al_2O_3$  (15 nm)\  $SiC_x$  (60 nm), **b-Si** passivat amb  $Al_2O_3$  (aprox 20 nm) i el cas de texturitzat amb piràmides aleatòries i passivació amb 90 nm d'alumina.

Als càlculs de l'Eficiència Quàntica Externa (EQE) (2.51) cal tenir en compte que amb l'espectre ponderat el que es calcula realment amb el simulador es l'Eficiència Quàntica Interna (IQE), no es consideren les pèrdues per reflectància, on l'Eficiència Quàntica Externa (EQE) real es defineix com a:

$$EQE_{real} = IQE \cdot (1 - R(\lambda)) \quad (2.51)$$

## 2.5 Generació de les estructures de simulació

L'eina específica de Sentaurus Device per a la generació de les estructures de simulació és Sentaurus Structure Editor [23], [24], en el què es defineixen les diferents regions del dispositiu amb els perfils de dopatge associats, propietats elèctriques i òptiques, especificant també les característiques de generació de l'estructura, on s'estableixen les diferents estratègies de refinament per tal d'optimitzar la simulació.

Són necessàries una correcta i precisa descripció de la geometria del dispositiu, de la unitat mínima del dispositiu de simulació, que pot o no coincidir amb l'expressió unitària del dispositiu, una definició acurada de les diverses regions amb el seu perfil de dopatge en el cas de les regions de tipus semiconductor, les regions dielèctriques i les regions metal·litzades, les estratègies de refinament de la malla estructural del dispositiu, que presenta dues vessants, la primera d'elles referida a la finura suficient de l'estructura per tal de que existeixi una consistència en els resultats assolits i la segona es referiex més a la infraestructura computacional de la simulació.

### 2.5.1 L'estructura unitària i la unitat mínima de simulació

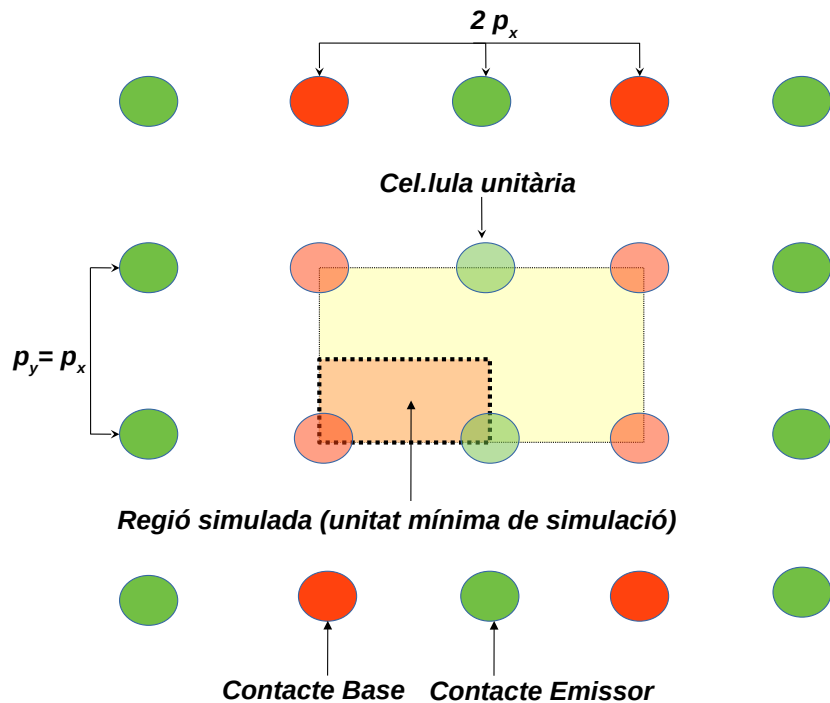


FIGURA 2.3: L'estructura de la cèl·lula unitària i la unitat mínima de simulació.

Un concepte rellevant a nivell geomètric, amb implicacions elèctriques i òptiques, és el de l'estructura unitària de cèl·lula solar (veure la figura 2.3), que en el cas d'una estructura IBC amb contactes puntuals, es defineix com l'entitat geomètrica mínima que conté un contacte base i com a mínim un contacte emissor, amb la seva regió semiconductor emissor associada. La consideració de com a mínim un contacte i regió d'emissor és una de les consideracions centrals en el disseny d'estructures de geometria complexa, on és possible, repetint de manera periòdica la cèl·lula unitària, caracteritzar l'estructura dels dispositius reals. Aquesta cèl·lula unitària permetrà realitzar simulacions amb dimensions més reduïdes, i per tant, es reduirà el temps de simulació i es guanyarà en la possibilitat de tenir una major precisió i finura de càlcul a les regions crítiques del dispositiu.

Encara es pot reduir més la complexitat de les simulacions definint la unitat mínima de simulació, veure la figura 2.3, com aquella part reduïda de l'estructura unitària de cèl·lula solar que a la seva vegada és una part reduïda del dispositiu real, que permet extrapolar dimensionalment els resultats de la simulació al dispositiu real.

És especialment aplicable a les cèl·lules solars, com es comprovarà més endavant, per les seves característiques geomètriques, que permeten simular expressions reduïdes del dispositiu real.

### 2.5.2 Un cas exemplificatiu

Una manera de presentar l'eina de Sentaurus Device, Sentaurus Structure Editor [23], [24], per a la generació de les estructures de simulació és mitjançant la descripció pràctica del procés de generació de l'estructura de simulació d'un cas d'estructura puntual.

Un exemple representatiu per la seva complexitat és la definició de la cèl·lula de simulació d'una estructura amb contacte puntual de base i un emissor rodejant el contacte de base (estructura tipus ring-like).

Una particularitat de Sentaurus Structure Editor és la diferenciació que estableix entre la definició geomètrica, l'etiquetat de l'entitat definida, la finestra de dopat i la finestra de refinament del dopat, permetent una assignació entre els diferents elements al mateix nivell i de manera unívoca.

L'estructura de la unitat mínima de simulació per a aquesta cèl·lula IBC és la presentada a la figura 2.4.

En la definició de l'estructura de la unitat mínima de simulació de la cèl·lula IBC hi ha una metodologia aplicable:

- Cal definir la regió de l'emissor associada a un material.
- Es defineix la finestra per a definir el perfil de dopat de l'emissor.
- Execució de la definició del perfil de dopat, el pic màxim, factor de forma, la posició del pic màxim.
- Definició de la regió de la base associada a un material, perfil i tipus de dopat constant.
- Definició estructural dels contactes metàl·lics amb l'elecció del tipus de material.
- Es defineix una capa dielèctrica a la regió frontal. La funció d'aquesta capa és virtual, en el sentit de que serveix com a suport a la simulació a fi de poder usar l'espectre ponderat, ja que s'injecta a la interfície entre aquesta regió i la regió de la base, definint un factor de reflectància nul, de tal manera que es transmet l'espectre íntegrament al semiconductor. Un segon aspecte, no menys rellevant, és el relacionat amb la definició de la velocitat de recombinació superficial a la regió frontal. L'etiqueta de capa dielèctrica virtual ve determinada pel fet de que representa, a nivell de paràmetres òptics i de recombinació superficial de la regió frontal, l'efecte de la capa de texturació i de passivació de la regió frontal.
- Es defineix la capa dielèctrica a la regió posterior amb un factor de reflectància a la superfície posterior i una velocitat de recombinació superficial a la regió posterior.
- Definides ja les entitats que formen part de l'estructura de la unitat mínima de simulació es defineix el mallat associat a cada regió, material o finestra de refinament del mallat. S'han de considerar sempre les dimensions de cada entitat per tal d'ajustar el mallat a unes proporcions raonables per tal d'optimitzar els càlculs òptics. Tanmateix, cal un ajustament fi a les zones properes a la regió de l'emissor, i en general, a la regió posterior. En relació a la regió de la base, donat que les seves dimensions són comparativament considerables, la discretització del mallat s'ha de dissenyar cercant l'equilibri entre l'optimització dels recursos de càlcul i la finura del mallat. També, s'afegeix una finestra de refinament del mallat a la regió de la base propera a la regió de l'emissor i, en general, a la regió posterior, i una altra finestra de refinament a la regió frontal.

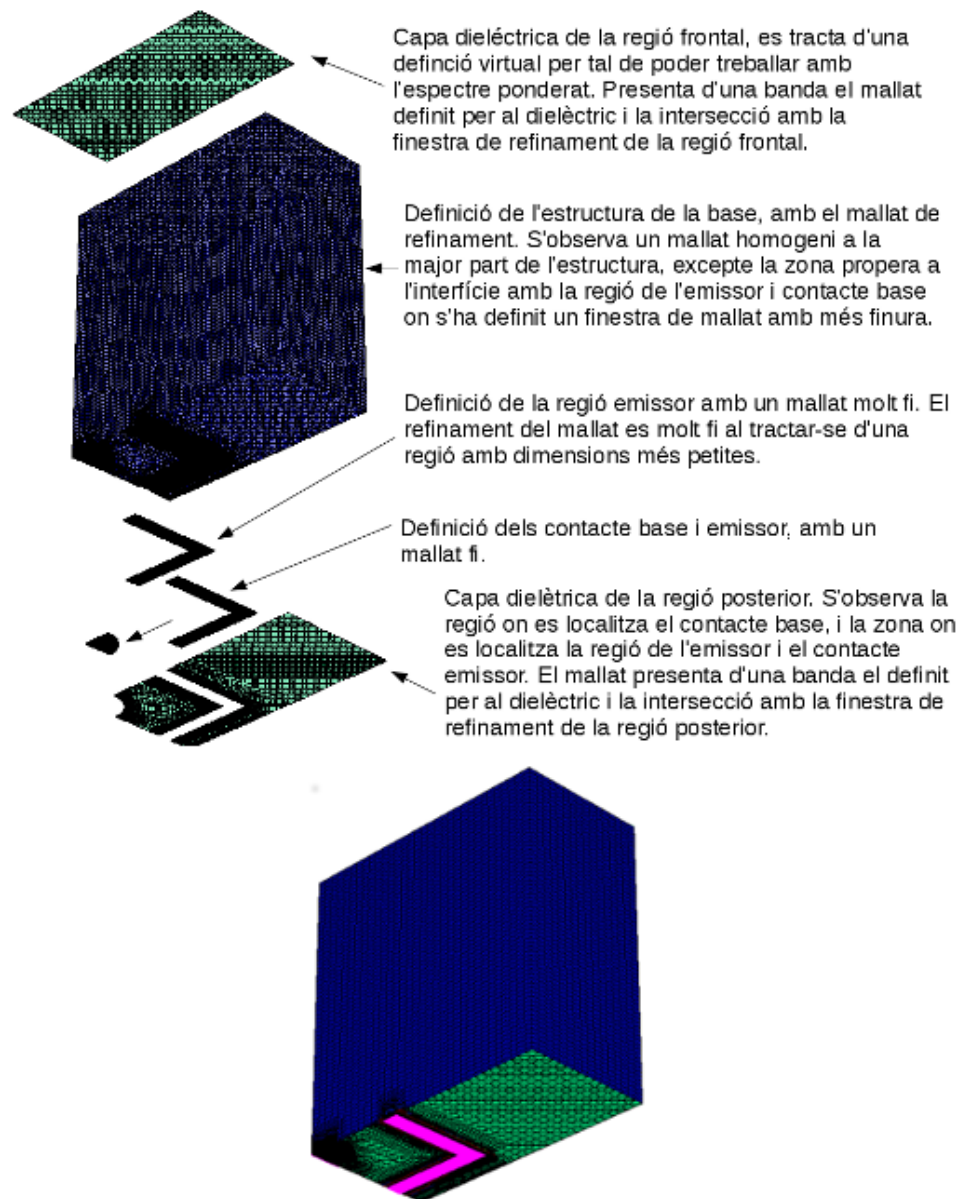


FIGURA 2.4: Diagrama de generació de l'estructura d'una cèl·lula IBC amb un contacte base rodejat per un emissor, estructura tipus ring-like.



## Capítol 3

# L'estructura IBC de contactes puntuals

### 3.1 Introducció

A aquest capítol es presenten simulacions basades en estructures IBC amb contactes puntuals a base i emissor. Tecnològicament, es pot fer mitjançant el làser dopant localment el silici. S'utilitzen materials dielèctrics que passen i actuen com a font dopant al procés làser, com ara  $Al_2O_3$  per a dopar amb alumini (regions  $p^+$ ) i  $SiC_x$  ( $n$ ) per a dopar amb fòsfor (regions  $n^+$ ) [31] [32].

Al capítol 2 s'ha presentat la generació de les estructures de simulació, les cèl·lules solars Interdigitated Back Contact (IBC), on es poden caracteritzar mitjançant modelitzacions basades en el concepte de l'estructura unitària, que es defineix com a l'entitat geomètrica mínima que conté un contacte base i com a mínim un contacte emissor. Del concepte de l'estructura unitària sorgeix la definició del dispositiu a simular, unitat mínima de simulació que s'associa a aquella part reduïda de l'estructura unitària de cèl·lula solar IBC aprofitant les simetries.

Prenent en consideració el concepte de la unitat mínima de simulació, en les properes seccions es presenten diversos estudis relacionats amb la introducció de l'estructura de cèl·lula solar IBC ideal de contactes puntuals i les seves variants bàsiques.

### 3.2 Definició de les condicions de simulació

A aquest estudi, s'entén la cèl·lula IBC ideal com aquella estructura en la que no es pren en consideració la resistència sèrie associada als contactes i metal·lització dels electrodes,

fers i busbars. Aquests efectes resistius seran analitzats al capítol 5.

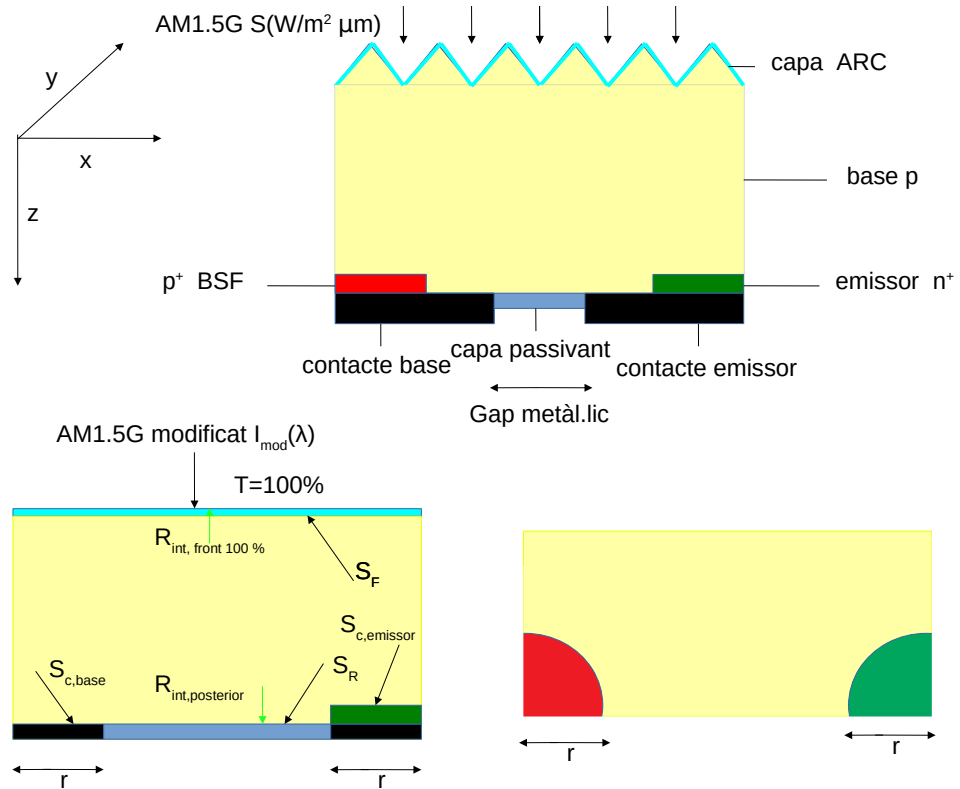


FIGURA 3.1: Definició de la unitat mínima de simulació.

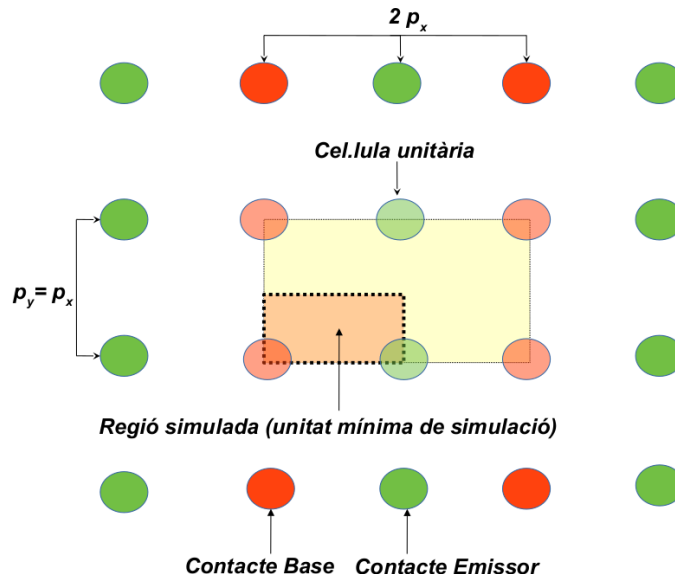


FIGURA 3.2: Unitat mínima de simulació vista planta.

La definició de la unitat mínima de simulació de l'estructura IBC de contactes puntuals de radi  $r$  bàsica pren com a referència la distància entre els contactes o pitch, veure figures 3.1 i 3.2, on  $p_x$  i  $p_y$  són el pitch horitzontal i vertical i respectivament.

Fent ús de simetries especulars es genera primerament l'estructura unitària de la cèl·lula solar, per després generar l'estructura de la cèl·lula solar.

La repetició periòdica de la cèl·lula unitària a les direccions  $x$  ( $p_x$ ) i  $y$  ( $p_y$ ) donen lloc a la cèl·lula solar. La definició de la unitat de simulació a l'estructura de contactes puntuals es caracteritza per:

- Es consideren les condicions de contorn als contactes definides al capítol anterior, amb la regió fortament dopada localitzada al contacte base, Back Surface Field (BSF) definint una velocitat de recombinació al contacte de base per als portadors minoritaris,  $S_{c,base}$ . Als contactes d'emissor es fixa una velocitat de recombinació de  $S_{c,emitter} = 5 \cdot 10^6 \text{ cm/s}$  tant per els majoritaris com els minoritaris.
- Un element important és el gap entre les tires de metall, amb incidència en la definició de la reflectància interna de la superfície posterior, es tracta d'una variable de parametrització a Sentaurus Device.
- La capa texturitzada a la superfície frontal es simplificada per una regió plana a la superfície frontal amb una característica de transmissió òptica de  $T = 100 \%$  amb un espectre d'irradància ponderat de tal manera que, considerant  $I_{\lambda,AM1.5G}$  com l'espectre d'irradància estàndar  $AM1.5G$  i  $R(\lambda)$  com a la reflectància mesurada, es defineix com  $I_{mod}(\lambda) = I_{\lambda,AM1.5G} (1 - R(\lambda))$ . Conseqüentment la reflectància interna de la superfície frontal serà  $R_{int}(\lambda) = 100 \%$ .
- La caracterització del comportament elèctric de la cèl·lula solar IBC pot ser obtinguda mitjançant la consideració de cadascuna de les estructures unitàries, en la qual es pot dividir la cèl·lula solar, connectades elèctricament en paral·lel.
- $S_F$  representa la velocitat de recombinació superficial efectiva a la regió frontal del dispositiu, corresponent a la capa texturitzada de la regió frontal passivada. Per altra banda,  $S_R$  representa la velocitat de recombinació superficial efectiva a la regió posterior passivada al voltant dels contactes.
- La recombinació en volum del dispositiu ve fixada per mecanismes de recombinació intrínsecs, recombinació d'Auger i recombinació banda a banda, fent ús del model desenvolupat [30], on la recombinació de Shockley Read Hall (SRH) és menyspreable, els temps de vida de portadors és fixa a  $1 \text{ s}$ .
- Els contacte base i emissor es consideraran que tenen les mateixes dimensions, considerant una geometria circular amb  $radi = 30 \mu\text{m}$ , valor per defecte a les simulacions que s'adequa a la mida del contacte làser amb el sistema làser utilitzat pel grup **MNT**. La distància entre contactes (pitch) serà la mateixa als eixos

geomètriques de coordenades  $x$  i  $y$ ,  $p_x = p_y = p$ . A la unitat mínima de simulació es defineix una estructura a simular amb dimensions de  $p$  a l'eix  $x$  i  $\frac{p}{2}$  a l'eix  $y$ . El gruix del dispositiu es considerarà genèricament amb una dimensió de  $w = 260 \mu m$ .

- La resistivitat de referència del dispositiu es fixa al valor de  $2.2 (\Omega \cdot cm)$ . En alguns dels estudis és aquest paràmetre el que serà fixat a diferents valors, rang de resistivitats entre  $[0.5 - 5] \Omega \cdot cm$  que es corresponen al dopat de bulk a l'oblea tipus  $p$  al rang  $[3.3 \cdot 10^{16} - 2.8 \cdot 10^{15}] cm^{-3}$  i a l'oblea tipus  $n$  al rang  $[1.1 \cdot 10^{16} - 9.2 \cdot 10^{14}] cm^{-3}$ , a fi d'observar la dependència envers la resistivitat.
- Es defineix un perfil de dopat gaussià a la regió de l'emissor, a l'oblea tipus  $p$  amb una profunditat a la unió de  $1.5 \mu m$  per a cada resistivitat  $[0.5, 1, 2.2, 5] \Omega \cdot cm$  i un valor de dopat de pic de  $10^{20} cm^{-3}$  amb un dopat de bulk representatiu de  $[3.3 \cdot 10^{16}, 1.5 \cdot 10^{16}, 6.5 \cdot 10^{15}, 2.8 \cdot 10^{15}] cm^{-3}$  i l'oblea tipus  $n$  amb una profunditat a la unió de  $1.5 \mu m$  i un valor de dopat de pic de  $10^{20} cm^{-3}$  per a cada resistivitat  $[0.5, 1, 2.2, 5] \Omega \cdot cm$  amb un dopat de bulk  $[1.1 \cdot 10^{16}, 5 \cdot 10^{15}, 2.2 \cdot 10^{15}, 9.2 \cdot 10^{14}] cm^{-3}$ .

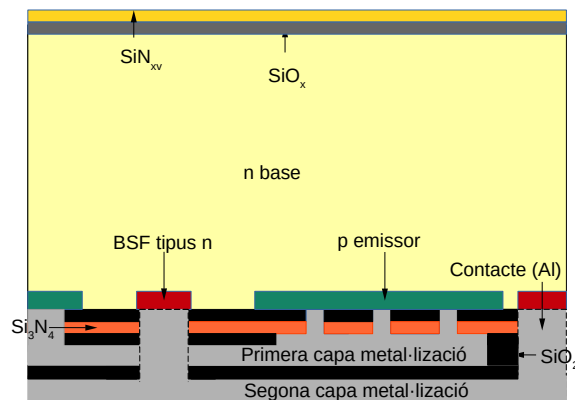


FIGURA 3.3: Possible esquema d'una cèl·lula IBC amb doble nivell de metal·lització.

L'estructura IBC de contactes puntuals amb gap metàl·lic nul (paràmetre  $Gap_{met} = 0 \mu m$ ), veure figura 3.3, es caracteritza per tenir un doble nivell de metal·lització de manera que la superfície posterior es troba totalment metal·litzada a efectes pràctics, de tal manera que la reflectància de la part posterior es veu modificada de manera destacable.

El doble nivell de metal·lització cerca una reducció de les pèrdues òhmiques als dits metàl·lics i a les línies d'interconnexió modulars, permet el disseny de grans seccions transversals de metall per a totes dues polaritats, cobrint completament la regió posterior, a banda de la interconnexió modular. La reducció de la resistència sèrie implica directament una millora en el  $FF$  i l'**Eficiència**.

En el cas del doble nivell de metal·lització, exceptuant les regions dels contactes puntuals, la resta de les regions s'utilitzen per a la conducció del corrent extret d'una polaritat a la primera capa de metall. El corrent extret a la segona polaritat es porta a través del segon nivell d'alumini, que ocupa també l'amplada lateral posterior de la cèl·lula solar.

Considerant que el radi dels contactes base i emissor són de  $30 \mu m$ , la reflectivitat de les zones metal·litzades de 94 %, la reflectivitat de les zones no metal·litzades de 15 % i la reflectivitat als contactes de 86 %, la reflectància a la regió posterior es calcula depenent del gap metàl·lic.

Per a l'estructura unitària de cèl·lula solar bàsica d'acord a la distància entre contactes puntuals, s'expressa la reflectància, considerant  $A_{pitchN}$  (3.1) com l'àrea de la  $N = (1 \Rightarrow pitch = 150 \mu m, \dots, N \Rightarrow pitch = pitch_N)$  estructura unitària, amb els següents termes com:

$$A(\%)_{pitchN, noMet} = \left( \frac{Gap_{Met} \cdot p_y}{A_{pitchN}} \right) \cdot 100 \quad (3.1)$$

El percentatge de l'àrea contactada (3.2) de les fraccions dels contactes inclosos a l'estructura unitària de cèl·lula solar equival a l'àrea d'un contacte:

$$A(\%)_{pitchN, cont} = \left( \frac{A_{pitchN, contacte}}{A_{pitchN}} \right) 100 = \left( \frac{\pi \cdot r^2}{A_{pitchN}} \right) \cdot 100 = \left( \frac{\pi \cdot 30^2}{A_{pitchN}} \right) \cdot 100 \quad (3.2)$$

Finalment, el percentatge d'àrea metal·litzada (3.3) es calcula de la resta del percentatge d'àrea:

$$A(\%)_{pitchN, Met} = 100 - (A(\%)_{pitchN, noMet} + A(\%)_{pitchN, cont}) \quad (3.3)$$

La reflectància (3.4) de l'estructura  $pitch_N$  es calcula com:

$$R(\%)_{pitchN} = R(\%)_{met} \cdot \left( \frac{A(\%)_{pitchN, Met}}{100} \right) + R(\%)_{noMet} \cdot \left( \frac{A(\%)_{pitchN, noMet}}{100} \right) + R(\%)_{cont} \cdot \left( \frac{A(\%)_{pitchN, cont}}{100} \right) \quad (3.4)$$

A les cèl·lules IBC amb gap metàl·lic  $0 \mu m$  (cèl·lules amb doble nivell de metal·lització), el càlcul de la reflectància (3.1) (3.2) (3.3) depèn de l'àrea metal·litzada i de l'àrea

TAULA 3.I: Reflectància segons el pitch i gap metàl·lic de  $80 \mu m$  i radi  $r = 30 \mu m$ .

Pitch ( $\mu m$ )	Àrea	A. no met. (%)	A. cont. (%)	A met. (%)	R(%)
150	22500	53.33	12.56	34.1	50.86
200	40000	40	7.07	52.93	61,83
250	62500	32	4.52	63.47	68.36
300	90000	26.66	3.14	70.19	72.68
400	160000	20	1.76	78.23	78.06

TAULA 3.II: Reflectància segons el pitch i gap metàl·lic de  $0 \mu m$  i radi  $r = 30 \mu m$ .

Pitch ( $\mu m$ )	Àrea	A. no met. (%)	A. cont. (%)	A. met. (%)	R(%)
100	10000	0	28.27	71.72	91.74
150	22500	0	12.56	87.43	92.99
200	40000	0	7.07	92.93	93.43
250	62500	0	4.52	95.47	93.64
300	90000	0	3.14	96.86	93.75
400	160000	0	1.77	98.23	93.86

contactada. Els valors obtinguts seran de valors de reflectància superiors al 90 % i aproximant-se assíptòticament al valor de la reflectivitat de les regions metàl·liques 94 % quan la distància entre els contactes, *pitch*, es fa més gran.

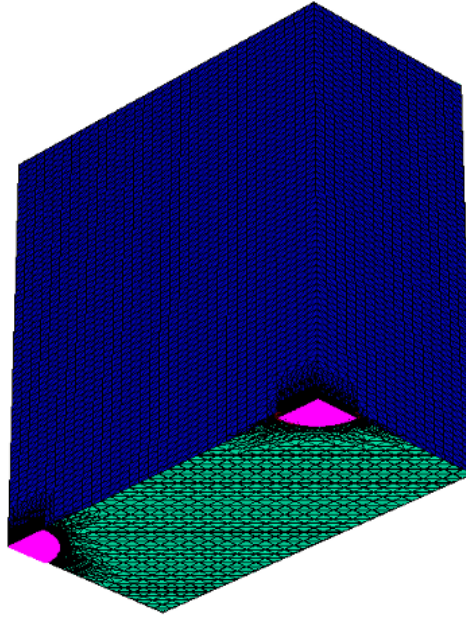
Mitjançant l'eina Sentaurus Structure Editor [23], [24], es generen les unitats mínimes de simulació corresponent a cadascuna de les distàncies entre els contactes *pitch* = (150, 200, 250, 300, 400)  $\mu m$  i resistivitats (0.5, 1, 2.2, 5)  $\Omega \cdot cm$ .

La generació de la unitat mínima de simulació, tal com es mostre a la figura 3.4, de les diverses estructures es basa en la variació de les dimensions de l'estructura i la distància entre contactes.

Conjuntament amb la definició de les unitats mínimes de simulació, amb la parametrització específica, incloent el model de recombinació d'Auger, l'ús de l'espectre ponderat, el càlcul de la reflectància, el següent pas és la definició de les condicions de la simulació a Sentaurus Device [22].

Un aspecte important, per tal d'optimitzar el temps de càlcul, a més de l'ús del número de processadors, intrínsec a la llicència i a les condicions de la màquina on s'executa la simulació, és la definició dels passos de simulació, en aquest cas apostant per un escombrat de tensió assimètric, centrant-ho al càlcul de  $V_{oc}$ ,  $J_{sc}$  i  $P_m$  (potència màxima).

El bloc de simulació òptic és possible reutilitzar-ho a les successives simulacions de  $S_{c,base}$ , una vegada generat per a una  $S_{c,base}$  determinada, estalviant recursos i temps de càlcul.

FIGURA 3.4: Unitat mínima de simulació amb *pitch* de 250  $\mu m$ .

### 3.3 Efecte del radi i el *pitch* dels contactes puntuals

El primer estudi es basa en l'efecte de la variació del *pitch* sobre les prestacions de la cèl·lula solar, com és la tensió en circuit obert  $V_{oc}$  (V), la densitat de corrent en curtcircuit  $J_{sc}$  ( $mA/cm^2$ ), la densitat de corrent de recombinació  $J_o$  ( $fA/cm^2$ ),  $FF$  (%) i Eficiència  $\eta$ (%). La estructura simulada té un únic nivell de metal·lització amb un gap metàl·lic de 80  $\mu m$ , amb una velocitat de recombinació superficial a la regió frontal i posterior de  $S_F = 10 cm/s$  i  $S_R = 10 cm/s$  respectivament. Adicionalment, es considera una velocitat de recombinació de la regió BSF del contacte base  $S_{c,base}$ , amb possibles valors que van des de  $10^2 cm/s$  a  $5 \cdot 10^6 cm/s$ , que es corresponen amb un BSF ideal creat per difusió i un contacte làser i un contacte mal passivat sense efecte BSF respectivament [31] [32].

La relació entre els paràmetres  $J_o$  i  $V_{oc}$  es mostra a les equacions (3.5) i (3.6), definint  $V_t$  com la tensió tèrmica,  $K$  la constant de Boltzmann,  $T$  la temperatura en graus  $K$  i  $q$  la càrrega elemental.

$$V_{oc} = V_t \ln\left(\frac{J_{sc}}{J_o} + 1\right), \text{ amb } V_t = \frac{K T}{q} \quad (3.5)$$

$$J_o = \frac{J_{sc}}{e^{\frac{V_{oc}}{V_t}} - 1} \quad (3.6)$$

Les figures 3.5 i 3.6 mostren respectivament els mapes d'evolució de l'**Eficiència** i la  $J_o$  a l'estructura tipus  $p$  respecte a una resistivitat  $2.2 (\Omega \cdot cm)$  en funció de la  $S_{c,base}$  i el pitch.

Observant les figures 3.5 i 3.6 es poden estreure algunes tendències generals en el comportament de l'**Eficiència** amb el pitch: si la distància entre els contactes de base i emissor és petita (pitch petits), les pèrdues d'eficiència són degudes a l'increment de les pèrdues per recombinació (major àrea contactada), el que implica una major  $J_o$ . Aquesta disminució és rellevant si  $S_{c,base}$  és gran, essent poc important per a  $S_{c,base}$  petites (contactes de base bé passivats). Contraposadament, si la distància entre els contactes augmenta, l'efecte dominant sobre la pèrdua d'eficiència és degut a l'increment de la resistència sèrie, provocant una disminució del  $FF$ . Amb valors ideals de  $S_{c,base} = 10^2 cm/s$  la  $J_o$  presenta els valors més baixos. També mostra una tendència decreixent amb l'increment del pitch, on  $J_{oe}$  és el terme dominant en aquest cas, al tenir passivats els contactes de base, la qual també decreix en incrementar el pitch. Conseqüentment, existeix una situació de compromís entre un alt valor de  $FF$  (baixa resistència sèrie), un pitch curt, i un valor baix de recombinació als contactes que implica un pitch llarg, resultant un pitch òptim al voltant de  $250 \mu m$  amb eficiències per sobre del 22 %, per a contactes de base ben passivats. Contràriament, per a  $S_{c,base}$  elevades interessa augmentar el pitch per a minvar la recombinació als contactes de base, en aquest cas amb l'eficiència amb valors del 14 %. Amb valors ideals de  $S_{c,base} = 10^2 cm/s$  la  $J_o$  presenta els valors més baixos. També mostra una tendència decreixent amb l'increment del *pitch*, on  $J_{oe}$  és el terme dominant, la qual també decreix en incrementar el pitch.

Similarment, tal com es mostre a les figures 3.7 i 3.8, les estructures bàsiques IBC tipus  $n$  tenen un comportament molt similar als dispositius tipus  $p$ , però en aquest cas el pitch òptim sembla ser una mica menor, situant-se al voltant de  $200 \mu m$  amb eficiències màximes per sobre del 21 % per a contactes de base ben passivats.

A continuació s'estudia l'impacte de la velocitat de recombinació als contactes de base respecte al valor de  $S_{c,base}$  per a diferents valors representatius de la resistivitat de substrat, tant a oblees  $p$  com a  $n$ . Per a aquest estudi es fixa  $S_F = S_R = 10 cm/s$ . Aquests valors són valors representatius de l'últim estat de la passivació superficial a superfícies texturitzades. Aquestes superfícies texturitzades s'han generat o bé per mitjà de la deposició d'una capa *ALD*  $Al_2O_3$   $90 nm$ , o de la deposició de vapor químic millorat amb plasma PECVD  $SiC_x$ ,  $SiO_x$  o  $SiN_x$ , o pel·lícules tèrmiques de  $SiO_2$  [33] [34]. També, es fixen els valors representatius de  $S_{c,base}$  ( $100, 2 \cdot 10^3, 10^4, 5 \cdot 10^6$ )( $cm/s$ ) des d'un **BSF ideal**  $100 cm/s$  a un contacte no passivat  $5 \cdot 10^6 cm/s$ . Els valors intermitjos de  $S_{c,base}$  ( $10^4, 2 \cdot 10^3$ ) ( $cm/s$ ) es podrien correspondre a contactes làser amb molt bona o bona passivació respectivament [31] [32].



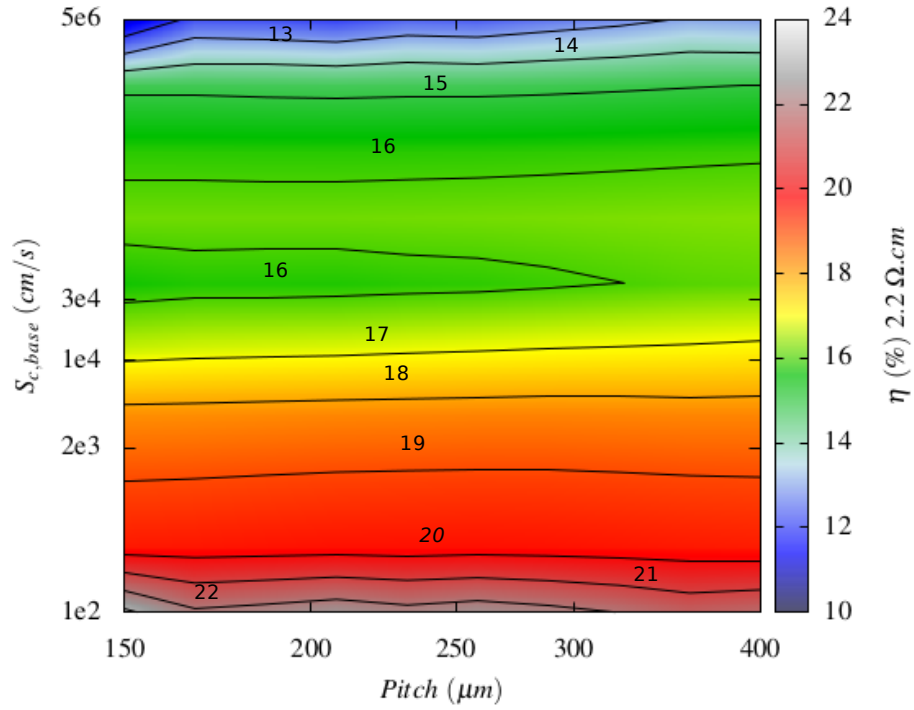


FIGURA 3.5: Evolució de l'**Eficiència**  $\eta(\%)$  a l'IBC ideal de contactes puntuals tipus  $p$  amb gap metàl·lic  $80 \mu m$  respecte a la resistivitat  $2.2 (\Omega \cdot cm)$  i les diferents  $S_{c,base}$ .

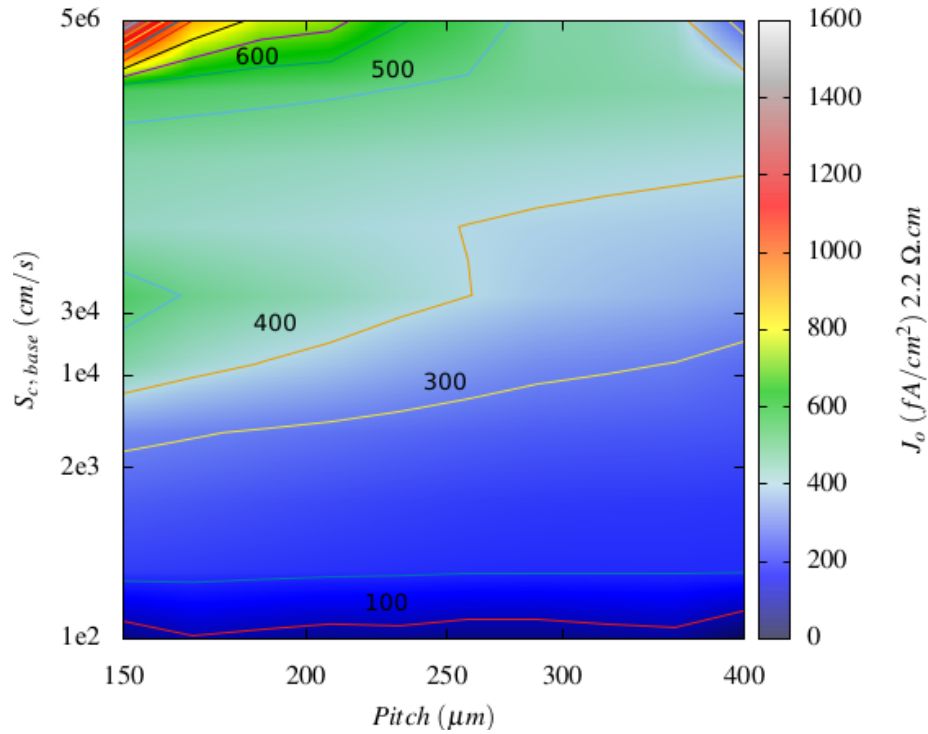


FIGURA 3.6: Evolució del  $J_o (fA \text{ cm}^{-2})$  a l'IBC ideal de contactes puntuals tipus  $p$  amb Gap metàl·lic  $80 \mu m$  respecte a la resistivitat  $2.2 (\Omega \cdot cm)$  i les diferents  $S_{c,base}$ .

A les figures 3.9 i 3.10 s'observa la forta dependència de l'**Eficiència** respecte la velocitat superficial al contacte de base  $S_{c,base}$  a substrats  $p$  i  $n$  respectivament..

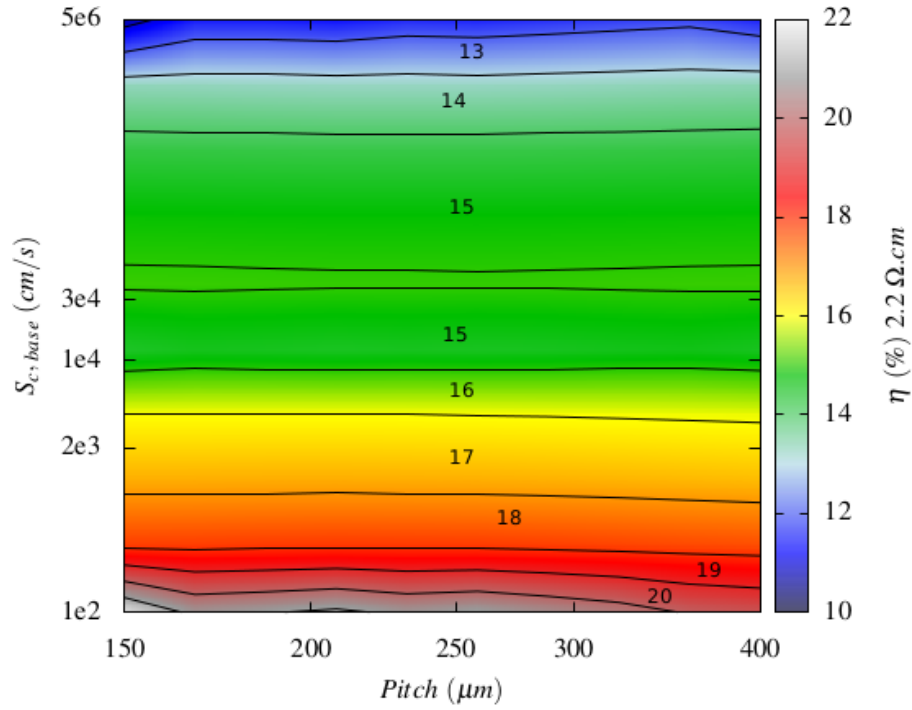


FIGURA 3.7: Evolució de l'**Eficiència**  $\eta(\%)$  a l'IBC ideal de contactes puntuals tipus  $n$  amb gap metàl·lic  $80 \mu\text{m}$  respecte a la resistivitat  $2.2 (\Omega \cdot \text{cm})$  i les diferents  $S_{c,base}$ .

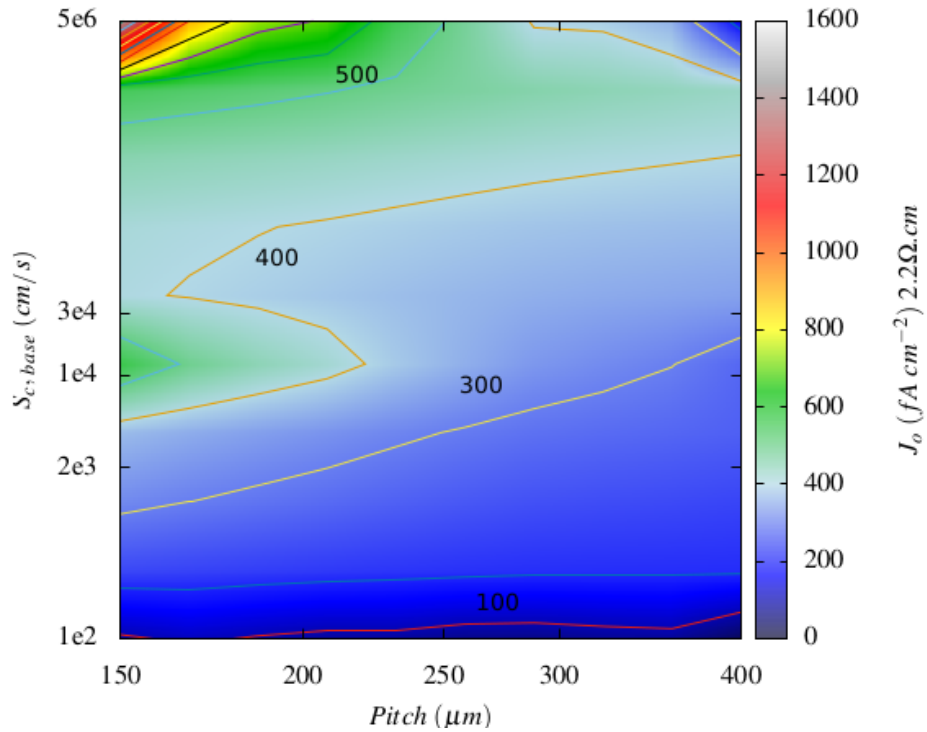


FIGURA 3.8: Evolució del  $J_o$  ( $\text{fA}/\text{cm}^2$ ) a l'IBC ideal de contactes puntuals tipus  $n$  amb gap metàl·lic  $80 \mu\text{m}$  respecte a la resistivitat  $2.2 (\Omega \cdot \text{cm})$  i les diferents  $S_{c,base}$ .

Generalitzant a ambdues estructures ideals IBC de contactes puntuals, base tipus  $p$  i tipus  $n$ , per a les tipologies amb velocitats de recombinació a la regió BSF del contacte base altes, incrementar el *pitch* permet millorar l'eficiència sempre i quan el  $FF$  no es

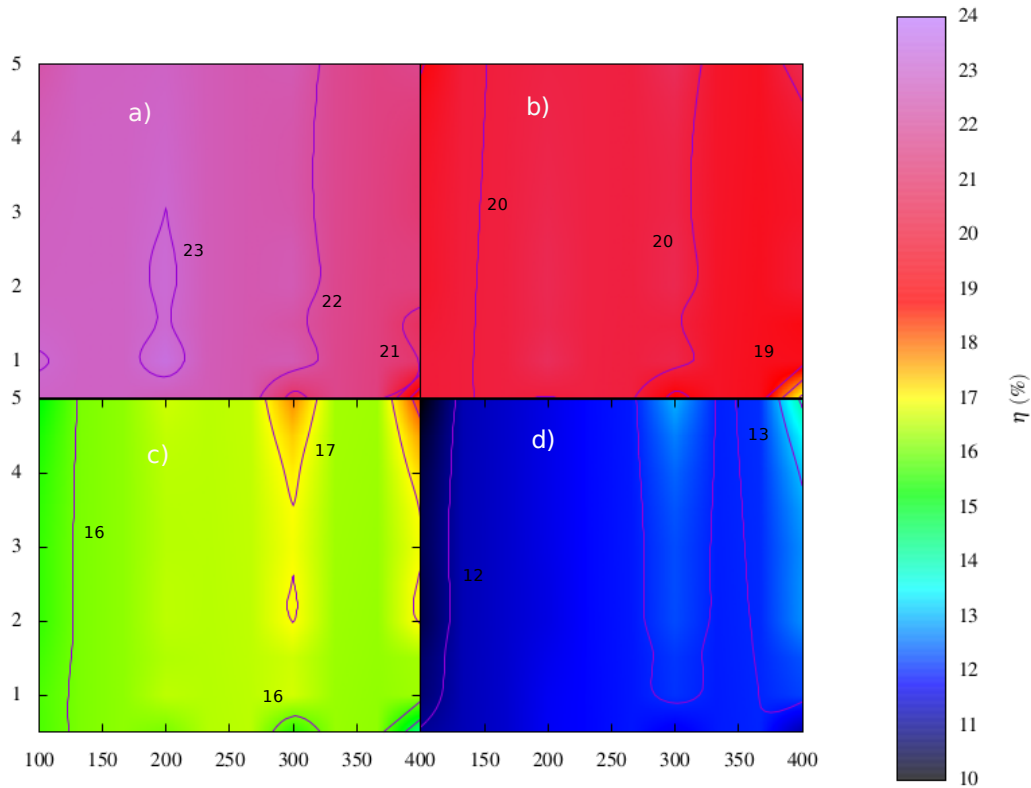


FIGURA 3.9: Evolució de l'**Eficiència**  $\eta(\%)$  a l'IBC ideal de contactes puntuals tipus  $p$  amb gap metàl·lic  $80 \mu m$ , considerant la resistivitat de l'oblea (tipus  $p$ ) i el pitch de la cèl·lula unitària. Les diferents figures es corresponen a diferents valors de  $S_{c,base}$  ( **a**)  $100$ , **b**)  $2 \cdot 10^3$ , **c**)  $10^4$ , **d**)  $5 \cdot 10^6$ )( $cm/s$ )

vegi degradat per un augment de la resistència sèrie al distanciar els contactes. Es tracta de mitigar l'efecte negatiu de les velocitats de recombinació a la regió BSF del contacte base altes, conjugant la variable geomètrica distància entre els contactes, **pitch**. En aquesta situació, la distància òptima entre els contactes s'assoleix amb una situació de compromís mitigant l'efecte negatiu de la recombinació de la regió BSF sense introduir l'efecte advers sobre el  $FF$  (%) associat a l'increment de la distància entre els contactes.

A més de la recombinació de la superfície frontal i posterior, la velocitat de recombinació de la superfície de contacte de base, té un fort impacte sobre l'ombrejat elèctric, **Electrical Shadowing** [27] [35] [36], especialment en els substrats de tipus  $n$ , es pot comprovar a les figures 3.9 i 3.10. Per a contactes base molt ben passivats ( $< 2 \cdot 10^3 cm/s$ ), el disseny amb pitch de  $200 \pm 50 \mu m$  i una resistivitat de  $2 \pm 1 (\Omega \cdot cm)$  és la millor elecció, obtenint eficiències al voltant de 23 % i 22 % a substrats tipus  $p$ . D'altra banda, els valors de  $S_{c,base}$  alts penalitzen greument  $J_{sc}$  i  $V_{oc}$ , que requereixen una gran resistivitat i pitch més llargs per a mitigar la forta caiguda de l'eficiència.

Les estructures tipus  $n$ , com es veu a la figura 3.10, presenten eficiències més baixes que les estructures equivalents tipus  $p$  independentment del **pitch**. En aquests tipus

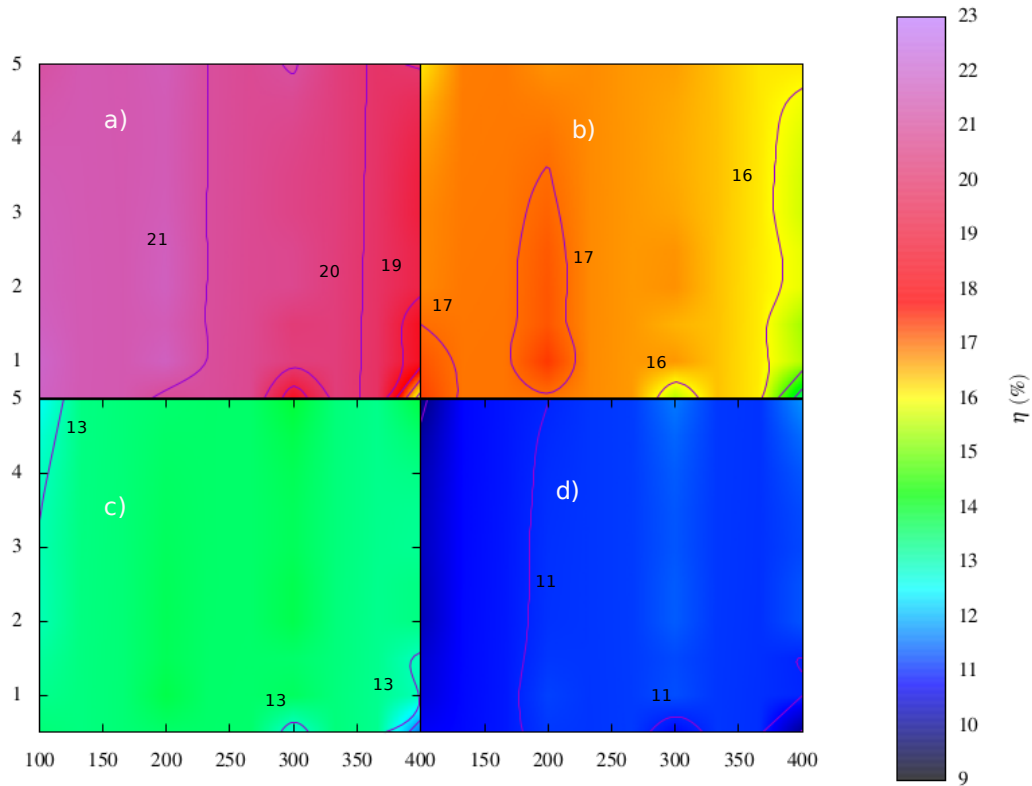


FIGURA 3.10: Evolució de l'**Eficiència**  $\eta(\%)$  a l'IBC ideal de contactes puntuals tipus  $n$  amb gap metàl·lic  $80 \mu m$ , considerant la resistivitat de l'oblea (tipus  $p$ ) i el pitch de la cèl·lula unitària. Les diferents figures es corresponen a diferents valors de  $S_{c,base}$  ( **a**) 100, **b**)  $2 \cdot 10^3$ , **c**)  $10^4$ , **d**)  $5 \cdot 10^6$ )( $cm/s$ ).

de cèl·lules solars, el transport de portadors minoritaris a les unions  $p - n$  es basa principalment en el mecanisme de transport per difusió. Malgrat que a les estructures tipus  $n$  els temps de vida presenten valors més alts, la longitud de difusió de minoritaris és més baixa que a les estructures equivalents tipus  $p$ , degut a la més baixa difusivitat dels forats envers els electrons. Aquesta es la raó de la caiguda abrupta de la  $J_{sc}$  ( $mA/cm^2$ ) quan s'incrementa el valor del **pitch** a ambdues estructures, però més altament visible a les estructures tipus  $n$ . Per tant, existeix una relació de compromís òptima entre la resistència a la base i les pèrdues per recol·lecció de portadors, on el  $FF$  (%) i la  $J_{sc}$  ( $mA/cm^2$ ) minvem quan més valors alts de **pitch**, i la recombinació a les regions emissor on la  $V_{oc}$  (V),  $FF$  (%) i Eficiència  $\eta(\%)$  minven quan més valors petits de **pitch**.

La passivació de la superfície frontal i posterior pren un paper principal sobre les prestacions del dispositiu. A la figura 3.11 s'observa l'efecte de  $S_F$  i  $S_R$  sobre l'eficiència amb  $S_{c,base} = 100 cm/s$  amb substrats de resistivitat  $2.2 (\Omega \cdot cm)$  de c-Si (p) ( $p = 250 \mu m$ ,  $r = 30 \mu m$  i gap metàl·lic de  $80 \mu m$ ). Per a obtenir eficiències superiors al 24 (%), calen valors dels paràmetres  $S_F$  i  $S_R$  inferiors a  $10 cm/s$ , en cas contrari, les eficiències baixen de forma molt considerable en aquest tipus de cèl·lules solars.

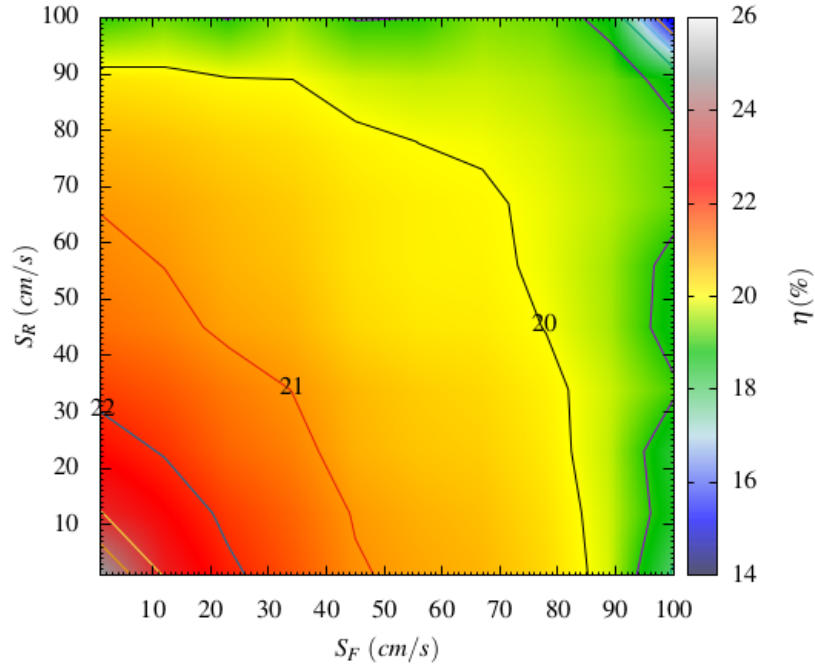


FIGURA 3.11: Mapa d'evolució de l'**Eficiència**  $\eta(\%)$  respecte a les velocitats de recombinació a la superfície frontal  $S_F$  i a la superfície posterior  $S_R$ .

Dels resultats obtinguts, s'observa un petit desequilibri en quant a limitació dels marges de funcionament, a favor de la recombinació a la superfície frontal respecte a la recombinació superfície posterior. Fixant la comparativa en els valors obtinguts a l'eficiència i escollint per exemple els valors  $S_F = 5 \text{ cm/s}$  i  $S_R = 50 \text{ cm/s}$  el valor assolit és 21 %. Anàlogament, els valors obtinguts per a la velocitat de recombinació a la superfície frontal  $S_F = 50 \text{ cm/s}$  i per a la velocitat de recombinació a la superfície posterior  $S_R = 5 \text{ cm/s}$  és de 20.4 %. Aquesta assimetria envers el pes de  $S_F$  i  $S_R$  a les prestacions finals del dispositiu es deguda a que els portadors es fotogeneren en gran part a les primeres micres del dispositiu per on entra el llum.

A continuació, s'estudia el potencial d'una estructura ideal basada en contactes puntuals sense recombinació, és a dir  $S_{c,base} = 0 \text{ cm/s}$ ,  $S_R = S_F = 0 \text{ cm/s}$ . En aquesta situació, el principal mecanisme de recombinació es dóna als contactes d'emissor. A aquest estudi també s'analitza l'efecte de la mida dels contactes a les prestacions del dispositiu. Amb aquest objectiu es modifica el radi del contacte des de 2.5 a 30  $\mu\text{m}$ . S'exploren els límits d'eficiència per mitjà de la simulació d'una estructura amb doble nivell de metal·lització (gap metàl·lic de 0  $\mu\text{m}$ ) de manera que es maximitza la reflexió posterior.

Respecte l'evolució de la  $V_{oc}$  d'acord les dimensions dels contactes i el *pitch*, com s'observa a la 3.12.a, destaca la prevalència dels contactes amb radis més petits assolint una  $V_{oc}$  amb valors més alts. Reduint les dimensions dels contactes, idealment, s'aconsegueix incrementar la recollida de portadors minoritaris, a més de reduir la influència de la

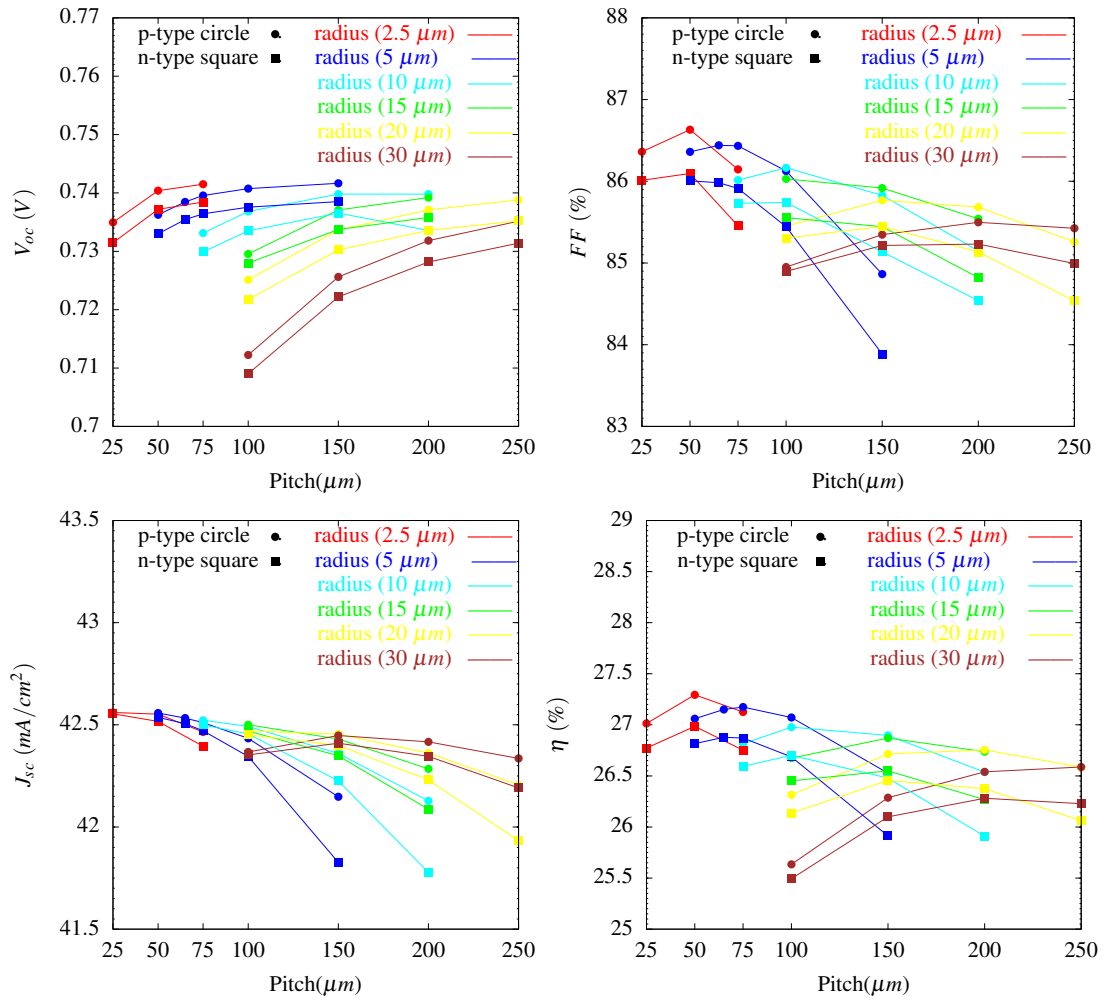


FIGURA 3.12: Evolució de la  $V_{oc}$  (V) **a**),  $J_{sc}$  ( $\text{mA}/\text{cm}^2$ ) **b**),  $FF$  (%) **c**) i **Eficiència**  $\eta$  (%) **d**) respecte al radi dels contactes i el *pitch* amb radis (2.5, 5, 10, 15, 20, 30)  $\mu\text{m}$  per a les tipologies *p* (cercles) i *n* (quadrats), doble nivell metal·lització.

recombinació als contactes d'emissor. Paral·lelament, fixant la dimensió dels contactes i incrementant el *pitch* s'aconsegueix una millora de la  $V_{oc}$ .

El concepte de relació òptima entre el radi dels contactes puntuals, dimensions dels contactes, i la distància entre els contactes a les estructures IBC ideal de contactes puntuals esdevé un paràmetre rellevant de disseny òptim.

Genèricament, a aquesta figura 3.12, es reafirmen consideracions ja esmentades a paràgrafs anteriors. Així, incrementant el *pitch* s'aconsegueix una millora de la  $V_{oc}$  (figura 3.12.a) i en contraposició el  $FF$  (%), figura 3.12.c i la  $J_{sc}$  ( $\text{mA}/\text{cm}^2$ ), veure figura 3.12.b, minvem quan més valors alts de *pitch*, degut a que part dels portadors fotogenerats recombinen al volum de la cèl·lula solar, el qual augmenta quan el *pitch* augmenta, així com augmenta també en augmentar la resistència sèrie atribuïda a la base en incrementar la distància entre contactes de base. Finalment, l'Eficiència  $\eta$  (%), veure la figura 3.12.d, es fruit dels dos comportaments contraposats, i és en un valor de *pitch*

òptim on s'assoleix en aquest cas un màxim,  $pitch = 250 \mu m$  per a un radi de  $30 \mu m$  amb eficiències potencials per sobre del 26 % independentement de la polaritat del substrat. En el cas de radis petits eficiències del 27 % són possibles a una estructura ideal de contactes puntuals perfectament passivada. Aquesta eficiència elevada es pot aconseguir gràcies a la millora del  $FF$  en minvar les distàncies entre contactes sense penalitzar la recombinació als contactes d'emissor (en ser més petits).

Si ens centrem al cas de radi  $30 \mu m$  i oblea **tipus p** es pot estudiar l'efecte de millora en fotocorrent i eficiència degut al ús o no d'un doble nivell de metal·lització, tal com s'observa a les figures 3.13.b i 3.13.d, on suposar un gap metal·làic de  $80 \mu m$  es tradueix a unes pèrdues de fotocorrent i en eficiència d'uns  $1.5 - 2 (mA/cm^2)$  i 1 % respectivament. L'efecte de tenir o no un doble nivell de metal·lització és poc rellevant als paràmetres  $V_{oc}$  i  $FF$ .

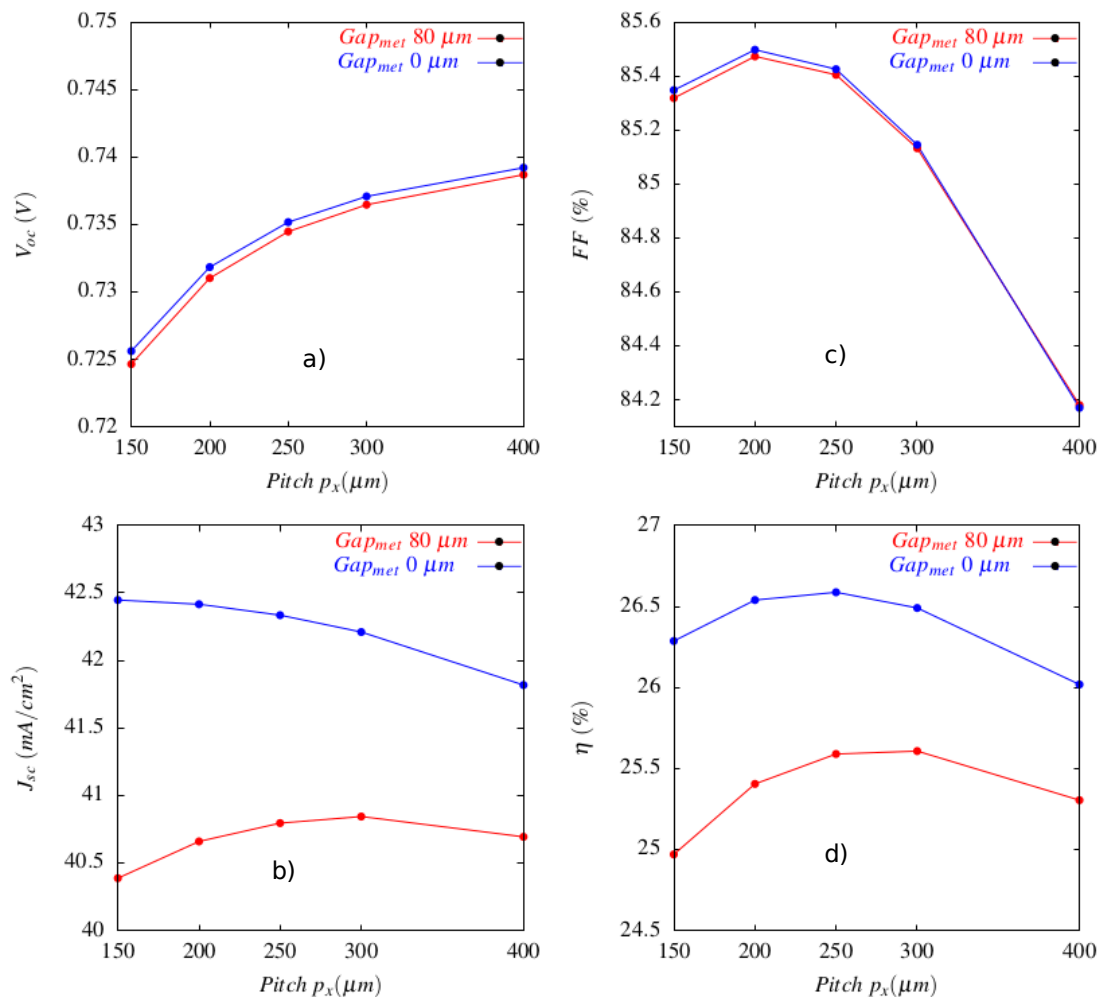


FIGURA 3.13: Evolució de la  $V_{oc}$ (V) **a)**,  $J_{sc}$  ( $mA/cm^2$ ) **b)**,  $FF$  (%) **c)** i **Eficiència**  $\eta$ (%) **d)** amb el pitch.

### 3.4 Conclusions

A les estructures IBC ideal de contactes puntuals, la característica dominant, incident sobre l'efecte de les pèrdues, ve determinada pel valor de la distància entre els contactes o *pitch*. Així, quan més propers es troben la regió BSF de la base amb el seu contacte base i la regió de l'emissor amb el seu contacte emissor, la tendència dominant és la de l'efecte de les pèrdues recombinatives mentre que contràriament quan més llunyans es troben la regió BSF de la base amb el seu contacte base i la regió de l'emissor amb el seu contacte emissor les pèrdues dominants són les resistives de la base, així com les pèrdues de col·lecció de portadors per recombinació a la base, malgrat tenir longituds de difusió elevades.

A les estructures IBC tipus *n* s'assoleixen **Eficiències** més baixes que a les estructures equivalents tipus *p* independentment del *pitch*. A aquests tipus de cèl·lules solars, el transport de portadors minoritaris a les unions *p - n* es basa principalment en el mecanisme de transport per difusió, on la longitud de difusió de minoritaris és més baixa que a les estructures equivalents tipus *p*, degut a la més baixa difusivitat dels forats envers els electrons. Aquesta es la raó de la caiguda abrupta de la  $J_{sc}$  ( $mA/cm^2$ ) més altament visible a les estructures tipus *n* quan s'incrementa el valor del *pitch*.

Caracteritzant l'efecte del radi dels contactes puntuals a les estructures IBC ideal, hi ha una relació de dependència directa entre les dimensions dels contactes puntuals i la  $V_{oc}$ . Reduint el radi dels contactes s'aconsegueix un increment de la  $V_{oc}$  amb la resta de paràmetres prefixats. Per a la  $J_{sc}$ , donat un radi fixat, en incrementar el *pitch* la tendència és decreixent. A mesura que el radi dels contactes és més gran, la  $J_{sc}$  creix per als *pitch* més petits fins a assolir un màxim. Existeix una relació òptima entre el radi dels contactes puntuals i la distància entre ells. A l'estudi el cas òptim seria  $pitch = 25 \mu m$  i  $radi_{cont} = 2.5 \mu m$  en contraposició al cas menys òptim de  $pitch = 100 \mu m$  i  $radi_{cont} = 30 \mu m$ , on hi ha al voltant del 2 % de pèrdua d'eficiència entre aquests casos extrems. Al cas de  $radi_{cont} = 30 \mu m$  el valor òptim es troba amb  $pitch = 250 \mu m$ , amb el valors assolits per al cas de  $pitch = 200 \mu m$  propers a aquests.

Disposar d'un doble nivell de metal·lització permet incrementar els valors de  $J_{sc}$  ( $mA/cm^2$ ), donat que s'incrementa la reflectivitat interna i s'incrementa el corrent fotogenerat. Es podrien obtenir eficiències de fins el 27 % a estructures IBC ben passivades amb contactes puntuals.

Un paràmetre que penalitza fortament el rendiment de l'estructura de contactes puntuals és  $S_{c,base}$ . Al capítol següent es presenten tècniques enfocades a mitigar l'efecte de la recombinació al contacte base i la seva regió BSF sobre les prestacions del dispositiu.



## Capítol 4

# L'estructura IBC ideal de geometries complexes

### 4.1 Introducció

Al capítol anterior s'han presentat diversos estudis de l'estructura IBC ideal de contactes puntuals. Com s'ha vist, un concepte important és la influència del contacte base i la seva recombinació sobre les prestacions del dispositiu. En el disseny de la cèl·lula solar IBC un dels objectius és cercar una millora de la passivació del contacte base, a més de la superfície frontal i posterior del dispositiu.

Existeixen limitacions tecnològiques que no permeten reduir els mecanismes de recombinació a la base, fins al punt que no és possible assolir valors de velocitats de recombinació efectives petites, tal com s'ha definit al capítol anterior on és simplifica la presència de la regió BSF i el contacte base en forma d'una velocitat de recombinació superficial efectiva al contacte base  $S_{c,base}$  (condició de contorn a la simulació).

Existeixen dues visions complementàries que convergeixen en la recerca de la reducció de l'efecte dels mecanismes de recombinació a la base. La primera es basa en la recerca d'una reducció de la influència del contacte base, per exemple, com s'ha vist en el capítol anterior, incrementant la distància entre els contactes (*pitch*) cercant la relació òptima entre el *pitch* i les dimensions dels contactes, allunyant d'aquesta manera la influència de la base sobre l'emissor. S'ha suposat que les dimensions dels contactes base i emissor són les mateixes, malgrat que el ventall de combinacions és més ampli, fent l'ús asimètric de les dimensions dels contactes en combinació amb el (*pitch*).

La segona alternativa es basa en la recerca d'un increment de la influència del contacte d'emissor en el comportament del dispositiu per tal de minimitzar els efectes dels

mecanismes de recombinació a la base i, per tant, augmentar el corrent fotogenerat a l'estructura.

A les successives seccions i subseccions d'aquest capítol es presentaran diverses tipologies que cerquen reduir la influència dels mecanismes de recombinació a la base per mitjà de la segona alternativa afavorint la influència de l'emissor amb la finalitat d'augmentar el corrent fotogenerat malgrat tenir una recombinació als contactes de base gran ( $S_{c,base}$  grans).

## 4.2 L'Àrea de Influència Geomètrica i Elèctrica de l'Emissor AIE - $AIE_{elect}$ i el Factor de Cobertura Geomètric i Elèctric de l'Emissor $F_E(\%)$ - $F_{E,elect}(\%)$

Es defineix l'Àrea d'Influència Geomètrica de l'Emissor normalitzada al plà  $XY$ , tal com es mostra a la figura 4.1, que conforma la regió posterior amb els contactes base i emissor, com aquella subàrea conformada pels punts  $(x_n, y_n)$  en què donat un punt  $(x_e, y_e)$  del plà  $XY$  la distància al contacte de l'emissor  $d_e$  és menor que la distància al contacte de la base  $d_b$ .

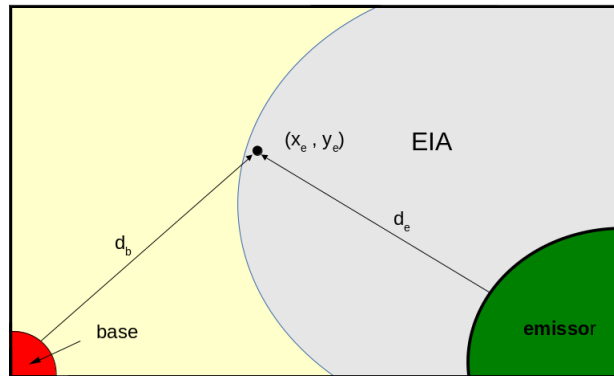


FIGURA 4.1: Unitat mínima de simulació amb la AIE.

De la definició de l'Àrea d'Influència Geomètrica de l'Emissor sorgeix el concepte Factor de Cobertura Geomètric de l'Emissor  $F_E(\%)$  que es defineix com la relació percentual normalitzada d'Àrea d'Influència Geomètrica de l'Emissor envers l'àrea total del plà  $XY$  de la regió posterior de la unitat mínima de simulació.

Per tal de calcular l'Àrea de Influència Geomètrica de l'Emissor AIE i el Factor de Cobertura Geomètric de l'Emissor  $F_E(\%)$  (4.1), veure figura 4.1, cal dividir l'àrea total per tal de generar un conjunt de nodes o punts i conformar així un mallat de l'àrea, de la què la precissió dependrà de la dimensió dels nodes del mallat. L'estratègia és la mateixa

a l'utilitzada a la definició del refinament del mallat de la unitat mínima de simulació a la generació de l'estructura amb Setaurus Structure Editor, discretitzar l'àrea en un conjunt de nodes conformant un mallat de discretització. Cada node tindrà associat el concepte de distància al contacte emissor  $d_e$  i al contacte base  $d_b$  i segons quina de les distàncies és mínima permetrà categoritzar de la porció d'àrea corresponent al node la seva pertanyença a l'Àrea de Influència Geomètrica de l'Emissor AIE.

$$F_E(\%)_{d_e < d_b} = \left( \frac{AIE}{A_T} \right) \cdot 100 \quad (4.1)$$

Malgrat que la AIE es pot calcular de forma teòrica utilitzant l'esquema indicat a la figura 4.1, un algorisme de càlcul de la AIE utilitzant N nodes quadrats, podria ser tal com:

- Divisió de l'àrea total de la unitat mínima de simulació en N nodes quadrats amb dimensió  $N \times N$ , àrea  $A_N$  i centre del node  $C_N = (x_N, y_N)$ . La complexitat dels càlculs és proporcional al número de nodes, malgrat que quant  $N \rightarrow \infty$  millor precisió, cal doncs un mallat amb un refinament el més dens possible.
- Per a cada node  $n_N$  fora dels contactes base i emissor es cerca la distància mínima entre el seu centre  $C_N$  i el centre del node pertanyent als contactes base  $d_{b,N}$  i emissor  $d_{e,N}$  més proper. El nucli principal del procés es basa en la recerca dels centres dels nodes del contacte base i contacte emissor que compleixen la condició de distància mínima  $d_{b,N}$  i  $d_{e,N}$ .
- Per a cada node recursivament  $n_N d_{e,N} < d_{b,N} \rightarrow AIE = AIE + A_N$ .
- En el cas d'una unitat mínima de simulació amb més d'un emissor la distància mínima del node  $n_N$  a l'emissor equivalent que conté els  $n$  emissors serà  $d_{e,minN} = (d_{e1,N}, d_{e2,N}, \dots, d_{en,N})$ .

Les tipologies de cèl·lules solars IBC de contactes puntuals presentades al capítol anterior es caracteritzen per un  $F_E(\%) = 50 \%$ , en les que els contactes base i emissor són de les mateixes dimensions, es troben separats per una distància determinada i localitzats als extrems de la unitat mínima de simulació.

Existeixen dues filosofies per tal de millorar la FE, la primera es basa en l'estructura unitària de cèl·lula solar constant (line-like, ring-like i estructures Large Emitter Coverage) i les altres en estructures unitàries de cèl·lula solar no constant.

Una idea bàsica per tal d'assolir una  $F_E(\%) > 50 \%$  és la de l'ús asimètric de les dimensions entre contactes base i emissor, de manera que l'emissor i el seu contacte és més gran que la regió BSF de la base i el seu contacte base tal com es mostra a la figura 4.1. D'aquesta manera, s'incrementa la  $F_E(\%)$ . Un requeriment important, és tenir en compte que incrementar les dimensions dels contactes incideix sobre un decreixement de la  $V_{oc}$  pel que l'assimetria és realitza reduint el contacte base, o de manera compensada reduint el contacte base i incrementant l'emissor de manera que és manté la relació òptima.

A les seccions d'aquest capítol es presenten diferents tipologies on s'aplica el concepte de reducció de la influència de la base.

Es defineix el Factor de Cobertura Elèctric de l'Emissor  $F_{E,elect}(\%)$  segons l'equació (4.2), què depèn de la passivació del contacte base, com la relació percentual entre de la densitat de corrent fotogenerada amb la velocitat de recombinació efectiva de la base i la densitat de corrent fotogenerada ideal amb la velocitat de recombinació efectiva de la base nul·la, considerant les velocitats de recombinació de les superfícies frontals  $S_F$  i posteriors  $S_R$  nul·les amb un temps de vida infinit i l'Àrea de Influència Elèctrica de l'Emissor  $AIE_{elect}$  (4.3) com el Factor de Cobertura Elèctric de l'Emissor extés a l'àrea de la unitat mínima de simulació, de manera que:

$$F_{E,elect} = \left( \frac{J_{ph}(S_{c,base})}{J_{ph}(S_{c,base} = 0)} \right) \cdot 100 \text{ (amb } S_F, S_R = 0 \text{ i } \tau \rightarrow \infty) \cong \left( \frac{J_{ph}(S_{c,base})}{J_{ph}(S_{c,base} = 0)} \right) \cdot 100 \text{ (amb } S_F, S_R = 0 \text{ i } \tau \cong \tau_n) \quad (4.2)$$

$$AIE_{elect} = F_{E,elect} \cdot A \quad (4.3)$$

Quan la velocitat de recombinació efectiva de la base és significativament gran,  $S_{c,base} \rightarrow \infty$  es compleix la condició  $AIE_{elect} \rightarrow AIE$ . Contraposadament, quan el contacte de base és ben passivat,  $S_{c,base} = 100 \text{ (cm/s)}$ , el valor de  $F_{E,elect} \rightarrow 100\%$  de l'àrea.

## 4.3 Estructures de cèl·lula unitària constant

### 4.3.1 Introducció

Cercant un increment del Factor de Cobertura Geomètric de l'Emissor  $F_E(\%)$ , es planteja una estratègia de disseny a l'estructura IBC tipus  $p$  de contactes puntuals  $pitch =$

250  $\mu\text{m}$  amb doble nivell de metal·lització, és a dir gap metàl·lic 0  $\mu\text{m}$ , contactes circulars amb un radi per defecte de 30  $\mu\text{m}$ . La resistivitat de referència per a aquestes estructures tipus  $p$  és 2.2 ( $\Omega \cdot \text{cm}$ ), equivalent a una concentració de bor de  $6.510^{15} \text{cm}^{-3}$  amb un factor de profunditat del perfil gaussià a l'emissor de fòsfor de 0.48  $\mu\text{m}$  i amb un dopat de superfície de  $10^{20} \text{cm}^{-3}$ .

### 4.3.2 Les estructures de geometries *line-like*

Les estructures de geometries *line-like* (veure la figura 4.2) presenten una disposició geomètrica de dos contactes emissor a la unitat mínima de simulació. Es tracta d'una discretització d'un contacte emissor en forma de tira per mitjà de contactes puntuals.

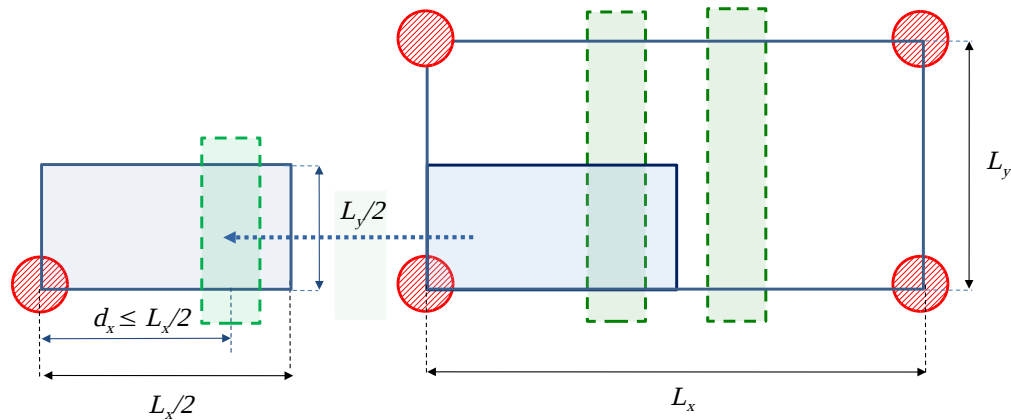
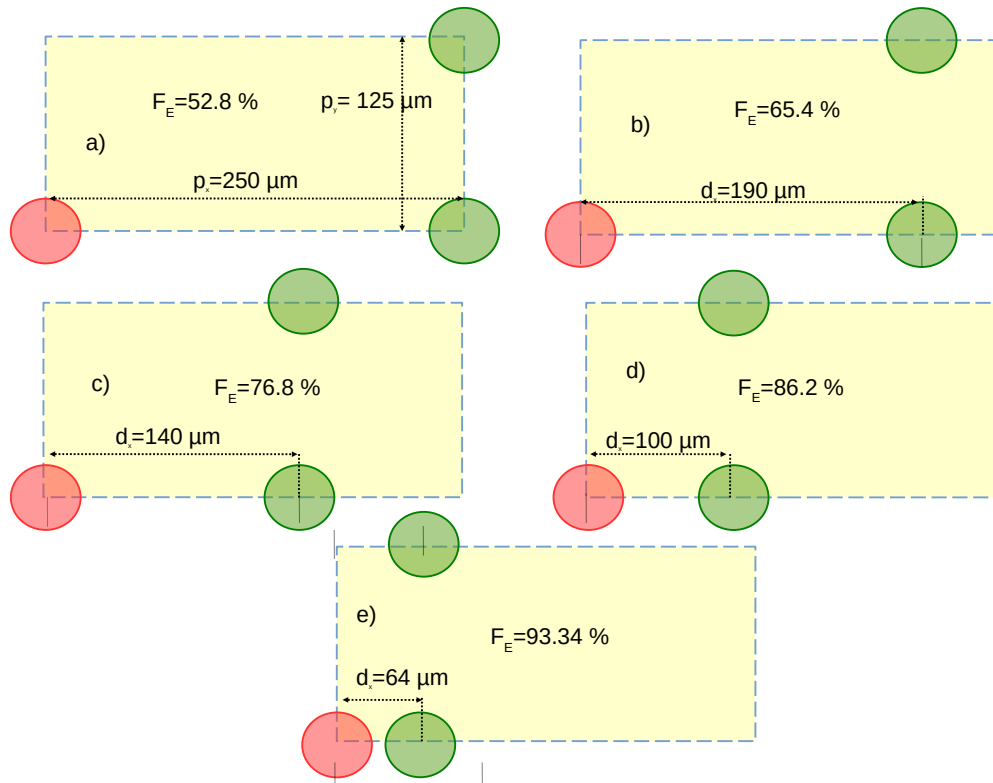


FIGURA 4.2: Cèl·lula unitària (dreta) i unitat mínima de simulació (esquerra) de l'estructura de geometria de contactes puntuals *line-like*.

Partint de la primera de les estructures amb la disposició dels contactes base i els dos emissors a una distància  $d_x = 250 \mu\text{m}$  es plantejen quatre estructures en el que la disposició dels dos contactes emissor es va apropant al contacte base a la dimensió  $X$  de la unitat mínima de simulació de manera que s'incrementa el  $F_E(\%)$ .

La figura 4.3 mostra les unitats mínimes de simulació de cinc tipologies geomètriques *line-like* amb dos emissors confrontats i desplaçats sobre l'eix d'abscisses a la recerca d'una estratègia d'increment de la influència de l'emissor sobre la base. A la figura 4.4 es mostre el mallat 3D de unitat mínima de simulació para el cas de  $F_E = 86.2 \%$  ( $d_x = 100 \mu\text{m}$ ).

La presència dels dos emissors confrontats, malgrat que afegir un contacte emissor a la unitat mínima de simulació comporta una petit decreixement de la  $V_{oc}$ , incideix sobre l'increment de la  $F_E(\%)$ , s'incrementa la influència de l'emissor en detriment de la base, reduint l'efecte de la velocitat de recombinació efectiva del contacte base al corrent


 FIGURA 4.3: Unitats mínimes de simulació de les tipologies geomètriques *line-like*.

fotogenerat. Apropant els dos emissors al contacte base s'aconsegueix un increment afegit de la influència de l'emissor.

La figura 4.4 presenta la unitat mínima de simulació de la tipologia geomètrica *line-like* per al cas de  $d_x = 100 \mu m$ , relacionada amb la figura 4.3.d, generada, amb el seu mallat de nodes i les seves propietats elèctriques associades, per l'eina de simulació Sentaurus TCAD [23] [24].

#### 4.3.2.1 Càlcul de la reflectància a la regió posterior

A aquesta apartat s'analitza el càlcul de la reflectància posterior de la cèl·lula unitària *line-like* considerant la reflectivitat dels materials de les regions localitzades a la superfície posterior del dispositiu i les dimensions dels contactes metàl·lics determinen el càlcul de la reflectància.

Les cèl·lules unitàries sempre contenen un contacte de base (per definició), però poden contenir més d'un contacte d'emissor. En concret, la primera cèl·lula unitària conté dos contactes sencers d'emissor (un cercle i dos mitjos cercles) més un contacte de base. La cèl·lula mínima de simulació equivalent conté  $\frac{1}{4}$  de base més  $\frac{1}{4} + \frac{1}{4}$  contactes d'emissor ubicats als vertexs, en total  $\frac{3}{4}$  de contacte.

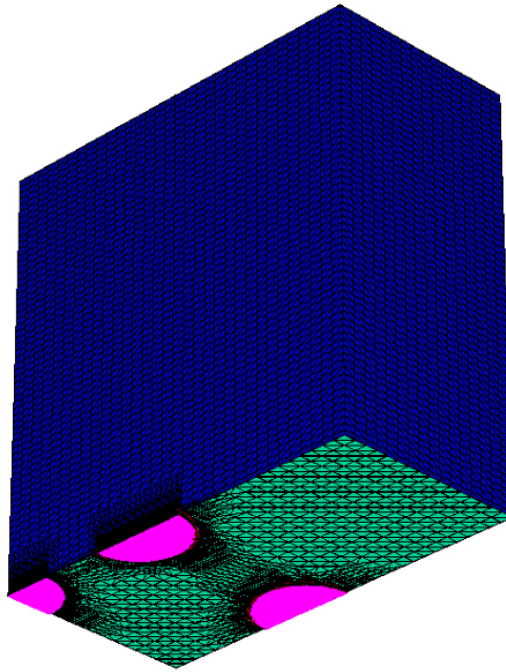


FIGURA 4.4: Estructura de la unitat mínima de simulació de la tipologia geomètrica *line-like*  $d_x = 100 \mu m$ .

La resta de cèl·lules unitàries contenen un contacte sencer de base més quatre contactes sencers d'emissor (dos cercles i quatre mig cercles). Les unitats mínimes de simulació contenen un contacte sencer d'emissor (dos mig cercles) més  $\frac{1}{4}$  de contacte de base, equivalent a un contacte i un  $\frac{1}{4}$ .

Fixant el radi dels contactes base i emissor de  $30 \mu m$ , la reflectivitat de les zones metal·litzades de 94 % i la reflectivitat als contactes de 86 %, doble nivell de metal·lització, la reflectància es presenta a les següents expressions.

L'àrea de la superfície contactada de la primera tipologia es calcula com:

$$A(\%)_{line1,cont} = \left( \frac{A_{line,contacte}}{A_{line}} \right) \cdot 100 = 1.5 \cdot \left( \frac{\pi \cdot r^2}{A_{line}} \right) \cdot 100 = 1.5 \cdot \left( \frac{\pi \cdot 30^2}{A_{line}} \right) \cdot 100 \quad (4.4)$$

L'àrea de la superfície contactada de la resta de tipologies és tal com:

$$A(\%)_{line2,cont} = \left( \frac{A_{line,contacte}}{A_{line}} \right) \cdot 100 = 2.5 \cdot \left( \frac{\pi \cdot r^2}{A_{line}} \right) \cdot 100 = 2.5 \cdot \left( \frac{\pi \cdot 30^2}{A_{line}} \right) \cdot 100 \quad (4.5)$$

Les àrees no contactades:

$$A(\%)_{line,nocont} = 100 - (A(\%)_{line,cont}) \quad (4.6)$$

La reflectància es calcula com:

$$R(\%)_{line} = R(\%)_{cont} \cdot \left(\frac{A(\%)_{line,cont}}{100}\right) + R(\%)_{nocont} \cdot \left(\frac{A(\%)_{line,nocont}}{100}\right) \quad (4.7)$$

#### 4.3.2.2 Resultats

Amb una passivació a la superfície de la regió frontal  $S_F = 10$  (cm/s) i posterior  $S_R = 10$  (cm/s), i  $S_{c,emitter} = 5 \cdot 10^6$  cm/s, es presenta a la figura 4.5 l'evolució de l'Eficiència  $\eta(\%)$  en funció de  $F_E$  per a diferents valors de  $S_{c,base}$ . Si  $S_{c,base}$  és gran, la forma d'augmentar l'eficiència és treballar amb  $F_E$  grans,  $d_x$  petites, per disminuir les pèrdues per recombinació al contacte de base que decrementen el corrent fotogenerat. A aquest cas, es poden assolir eficiències per sobre del 19% per a  $F_E > 65\%$  ( $d_x < 190\mu m$ ). Al cas d'una bona passivació del contacte de base  $S_{c,base} < 10^2$  (cm/s), el contacte de base penalitza poc a les pèrdues per recombinació al contacte de base, l'eficiència es manté estable respecte a  $F_E$ .

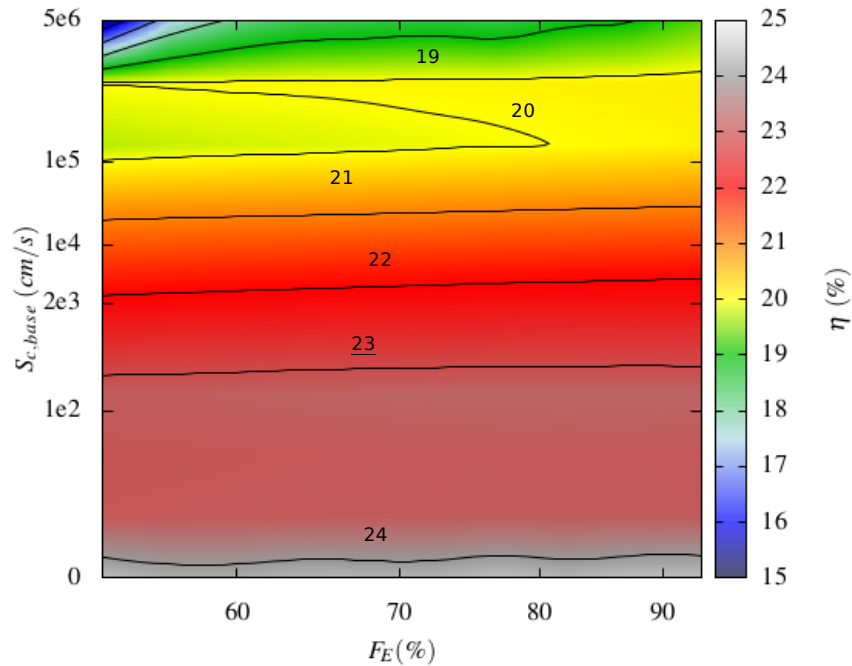


FIGURA 4.5: Mapa d'evolució **Eficiència**  $\eta(\%)$  respecte  $F_E$  en funció de  $S_{c,base}$ .

La  $V_{oc}$  experimenta un creixement a mesura que s'incrementa la distància entre el contacte base i els dos contactes emissor. La tipologia  $d_x = 250 \mu m$  ( $F_E = 50\%$ ), és un



exemple d'aquest efecte combinat sobre la  $V_{oc}$  de la distància entre els contactes i la menor àrea total d'emissors a la unitat mínima de simulació. Així, al cas de  $d_x = 250 \mu m$  ( $F_E = 50 \%$ ) el valor absolut de  $V_{oc}$  amb  $S_{c,base} = 10^2 (cm/s)$  és de  $0.71 V$  i per a  $d_x = 64 \mu m$  ( $F_E = 93.34 \%$ ) és  $0.70 V$ .

És important comentar que a estructures de cèl·lula unitària constant, el  $FF$  és pràcticament constant. Un cas que ho exemplifica és per a una  $S_{c,base} = 10^2 (cm/s)$  la  $FF$  amb  $d_x = 250 \mu m$  assoleix el valor de  $82.6 \%$  i per a  $d_x = 64 \mu m$  el valor de  $82.8 \%$ .

També els resultats obtinguts per a la  $J_{sc}$  justifiquen el concepte de  $F_E(\%)$  on els valors més alts s'assoleixen a la distància més petita entre els contacte base i els dos emissors.

Amb els resultats obtinguts, s'observa que el disseny òptim és el de la tipologia  $d_x = 64 \mu m$  ( $F_E = 50 \%$ ) dependent de la  $S_{c,base}$ . D'aquesta manera, treballant amb  $F_E$  alts es poden mitigar les pèrdues de fotocorrent per recombinació al contacte de base. Conceptualment, lligat a la definició de la  $F_{E,elect}(\%)$  si el contacte base és ben passivat,  $S_{c,base} = 10^2 (cm/s)$ , aquest paràmetre tendeix cap al  $100 \%$  de l'àrea, veure la figura 4.6.

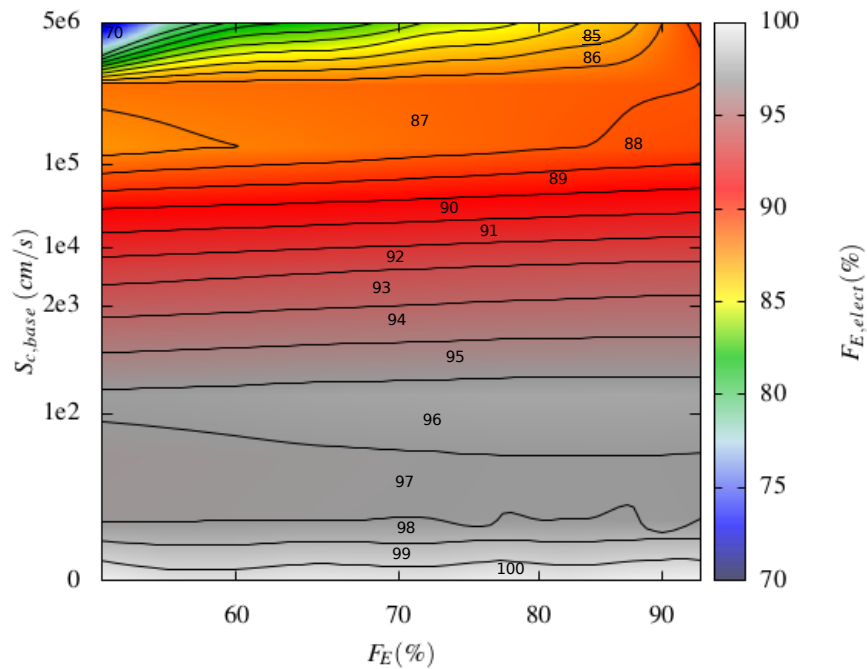


FIGURA 4.6: Mapa d'evolució del **Factor de Cobertura Elèctric de l'Emissor**  $F_{E,elect}(\%)$  respecte a  $F_E$  i velocitat de recombinació efectiva a la base  $S_{c,base}$ .

### 4.3.3 Les estructures de geometries *ring-like*

#### 4.3.3.1 Introducció

Cercant un increment del Factor de Cobertura Geomètric de l'Emissor  $F_E(\%)$ , es presenta una estratègia de disseny a l'estructura IBC de contactes puntuals  $pitch = 250 \mu m$ , veure la figura 4.7, amb doble nivell de metal·lització amb una disposició geomètrica de dos contactes emissor amb els centres localitzats als punts d'intersecció d'una circumferència amb la unitat mínima de simulació, un conjunt de radi  $d_r$  determinats, simulant una geometria amb disposició dels emissors amb contactes puntuals en forma d'anell. La resistivitat per a aquestes estructures tipus  $p$  és la de referència,  $2.2 (\Omega \cdot cm)$ . Els contactes d'emissor tenen el mateix perfil de dopat i geometria esmentada a l'estructura line-like.

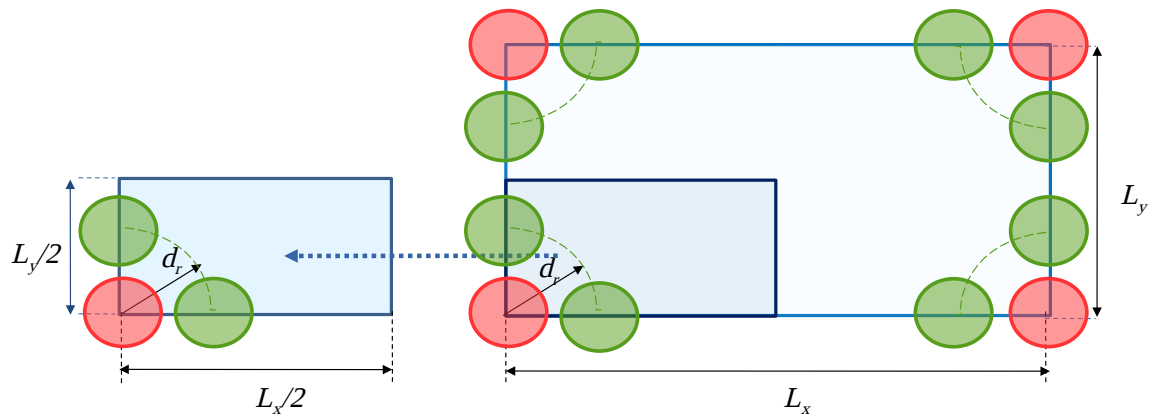
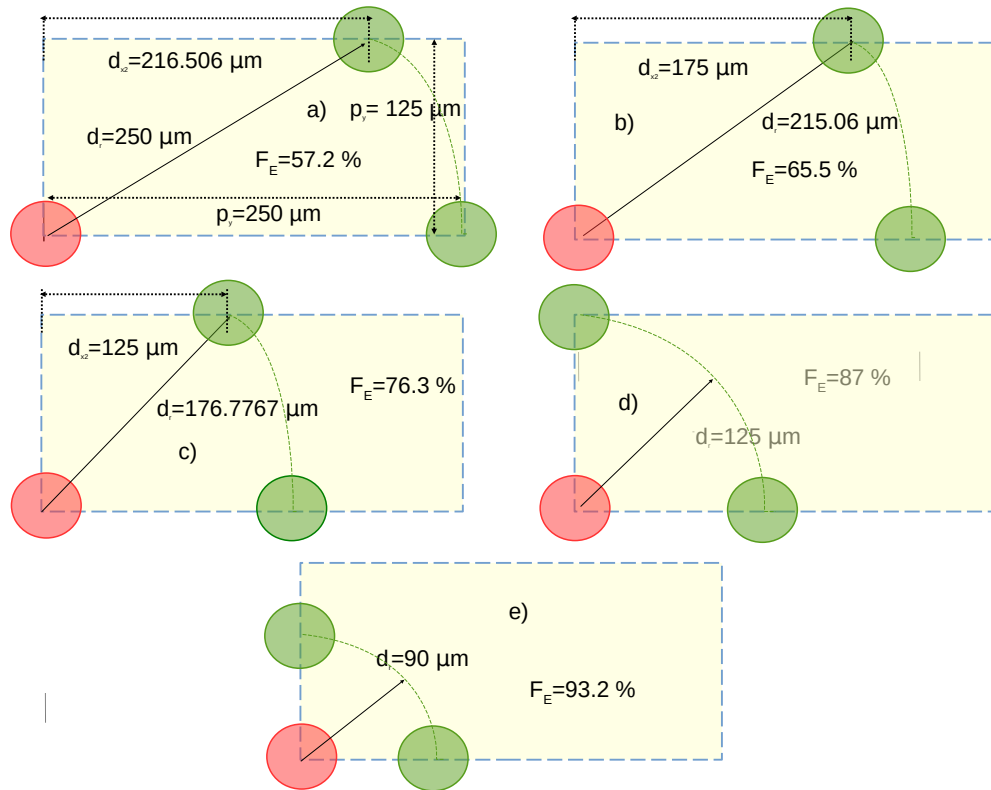


FIGURA 4.7: Geomètriques *ring-like*.

Partint de la primera de les estructures amb la disposició dels contactes emissor a una geometria en anell amb radi  $d_r = 250 \mu m$ , es presenten quatre estructures en el que la disposició dels dos contactes emissor es van apropant al contacte base reduint el radi de l'anell a la unitat mínima de simulació de manera que s'incrementa el  $F_E(\%)$ .

La figura 4.8 mostra les unitats mínimes de simulació de cinc tipologies geomètriques *ring-like* amb dos emissors localitzats sobre el perímetre d'una circumferència centrada sobre el contacte base a la recerca d'una estratègia d'increment de la influència de l'emissor sobre la base. Comparant aquesta estructura amb la line-like s'aconsegueix una major  $F_E$  per a una igual o menor àrea contactada d'emissor.

Els dos emissors deixen d'estar confrontats perpendicularment, per estar sempre a la mateixa distància radial entre el centre del contacte base i els seus centres. Com a les tipologies *line-like*, afegir un contacte emissor a la unitat mínima de simulació implica un petit decreixement de la  $V_{oc}$  i un increment de la  $F_E(\%)$ , afavorint la influència de


 FIGURA 4.8: Unitats mínimes de simulació de les tipologies geomètriques *ring-like*.

l'emissor sobre la base, amb la intenció de reduir l'efecte de la velocitat de recombinació efectiva del contacte base. A mesura que s'apropen els dos contactes emissors al contacte base s'aconsegueix un increment de la influència de l'emissor. Les tipologies *ring-like* a diferència de les *line-like* es caracteritzen per tenir els dos emissors a la mateixa distància al contacte base. L'estratègia de disseny és encerclar el contacte base amb emissors i els seus contactes puntuals de manera que es produeixi un efecte d'apantallament i d'aquesta manera reduir els efectes no desitjats dels mecanismes de recombinació a la base. D'aquesta manera s'aconsegueix un increment de la  $J_{sc}$  sense penalitzar gaire la  $V_{oc}$ .

De manera equivalent a les tipologies *line-like*, la figura 4.9 presenta la unitat mínima de simulació de la tipologia geomètrica *ring-like*  $d_r = 90 \mu m$ , relacionada amb la figura 4.8.e.

#### 4.3.3.2 Càlcul de la reflectància a la regió posterior

De la mateixa manera que les tipologies *line-like*, el càlcul de la reflectància de la regió posterior ve determinat per la suma de les subàrees dels contactes de les estructures unitàries de cadascuna de les tipologies *ring-like*.

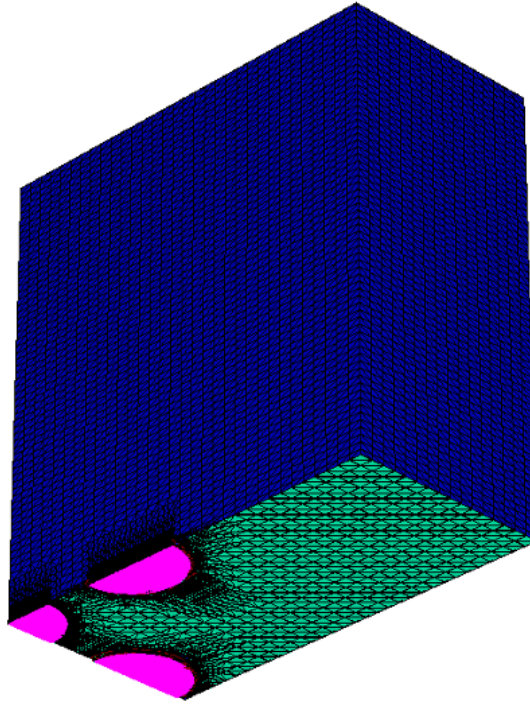


FIGURA 4.9: Estructura de la unitat mínima de simulació de la tipologia geomètrica *ring-like*  $d_r = 90 \mu m$ .

La primera ( $d_r = 250 \mu m$ ) i quarta tipologia ( $d_r = 125 \mu m$ ) (veure la figura 4.8) de les estructures unitàries de cèl·lula solar presenten l'equivalent a dos contactes (contant contactes d'emissor i base), un contacte per a la unitat mínima de simulació, mentre que la resta de tipologies presenten l'equivalent a dos contactes i mig, un contacte i un quart per a la unitat mínima de simulació. L'àrea de l'estructura unitària de cèl·lula solar és de  $pitch_{250} = p_x \cdot p_y = 250 \mu m \cdot 125 \mu m = 62500 \mu m^2$ .

La primera cèl·lula unitària conté tres contactes sencers d'emissor (dos cercle i dos mitjos cercles) més un contacte de base. La cèl·lula mínima de simulació equivalent conté  $\frac{1}{4}$  de base més  $\frac{1}{4}$  i  $2\frac{1}{2}$  contactes d'emissor, en total un contacte.

Fixat el radi dels contactes base i emissor de  $30 \mu m$ , la reflectivitat de les zones metal·litzades de 94 % i la reflectivitat als contactes de 86 % i doble nivell de metal·lització la reflectància es calcula a les expressions següents.

L'àrea de la superfície contactada de la primera i quarta tipologies (4.8) es calcula com:

$$A(\%)_{ring1,cont} = \left( \frac{A_{ring,contacte}}{A_{ring}} \right) \cdot 100 = 2 \cdot \left( \frac{\pi \cdot r^2}{A_{ring}} \right) \cdot 100 = 2 \cdot \left( \frac{\pi \cdot 30^2}{A_{ring}} \right) \cdot 100 \quad (4.8)$$

L'àrea de la superfície contactada de la resta de tipologies (4.9) és calcula com:

$$A(\%)_{ring2,cont} = \left( \frac{A_{ring,contacte}}{A_{ring}} \right) \cdot 100 = 2.5 \cdot \left( \frac{\pi \cdot r^2}{A_{ring}} \right) \cdot 100 = 2.5 \cdot \left( \frac{\pi \cdot 30^2}{A_{ring}} \right) \cdot 100 \quad (4.9)$$

Les àrees no contactades (4.10):

$$A(\%)_{ring,nocont} = 100 - A(\%)_{ring,cont} \quad (4.10)$$

La reflectància (4.11) es calcula com:

$$R(\%)_{ring} = R(\%)_{cont} \cdot \left( \frac{A(\%)_{ring,cont}}{100} \right) + R(\%)_{nocont} \cdot \left( \frac{A(\%)_{ring,nocont}}{100} \right) \quad (4.11)$$

### 4.3.3.3 Resultats

Els centres geomètrics dels emissors a les tipologies *ring-like* es defineixen partint dels punts geomètrics de localització dels centres dels contactes d'emissor 1 ( $d_{x1}, d_{y1}$ ) i d'emissor 2 ( $d_{x2}, d_{y2}$ ), amb  $d_{y1} = 125 \mu m$ .

Fixant la passivació a la superfície de la regió frontal a  $S_F = 10 (cm/s)$  i posterior  $S_R = 10 (cm/s)$ , la figura 4.10 mostra el mapa d'evolució **Eficiència**  $\eta(\%)$  respecte a la distància entre els contactes base i emissor en disposició en forma d'anell amb el  $F_E(\%)$  associat.

Amb valors de la  $F_E(\%)$  més alts, s'aconsegueix millorar sensiblement el comportament de l'Eficiència  $\eta(\%)$  amb condicions reals de recombinació efectiva al contacte base i a la regió BSF. Analògament a l'estructura anterior, si el contacte de base és ben passivat,  $S_{c,base} = 10^2 (cm/s)$ , el  $F_{E,elect}$  tendeix cap al 100 %, veure la figura 4.11.

Establint una comparativa respecte a les tipologies line-like i ring-like, els valors màxims d'eficiència s'assoleixen a la tipologia ring-like, obtenint un valor lleugerament millor de 24.46% en front 24.41% respectivament per contactes de base molt bé passivats ( $S_{c,base}$  petites). El valor d'eficiència que es pot aconseguir per  $S_{c,base}$  molt grans amb una  $F_E$  màxima de 82.94 % es de 18.5 %. Curiosament, per a  $S_{c,base}$  grans i  $F_E$  semblants s'obté un lleuger millor rendiment per l'estructura line-like, ja que a l'estructura ring-like es

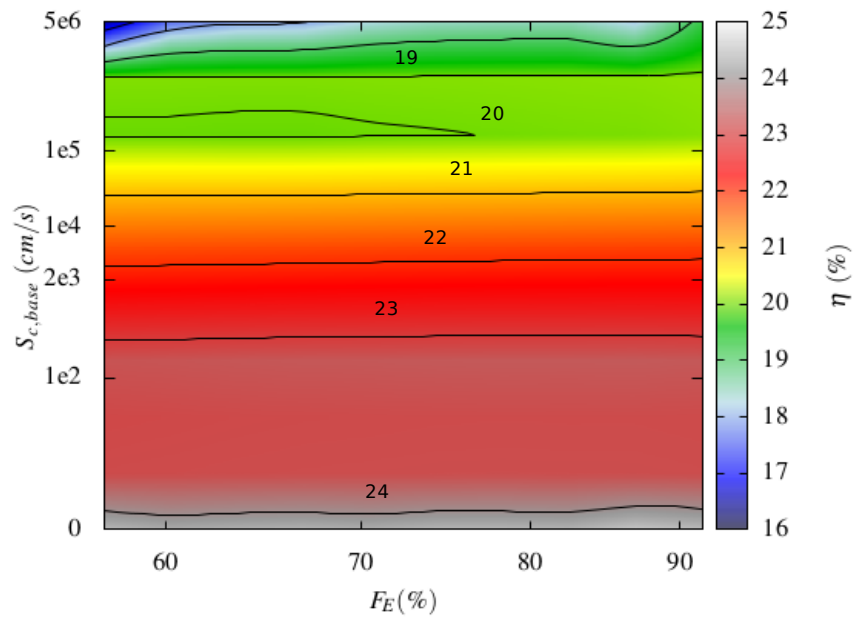


FIGURA 4.10: Mapa d'evolució **Eficiència**  $\eta$ (%) en funció de  $F_E$  i  $S_{c,base}$ .

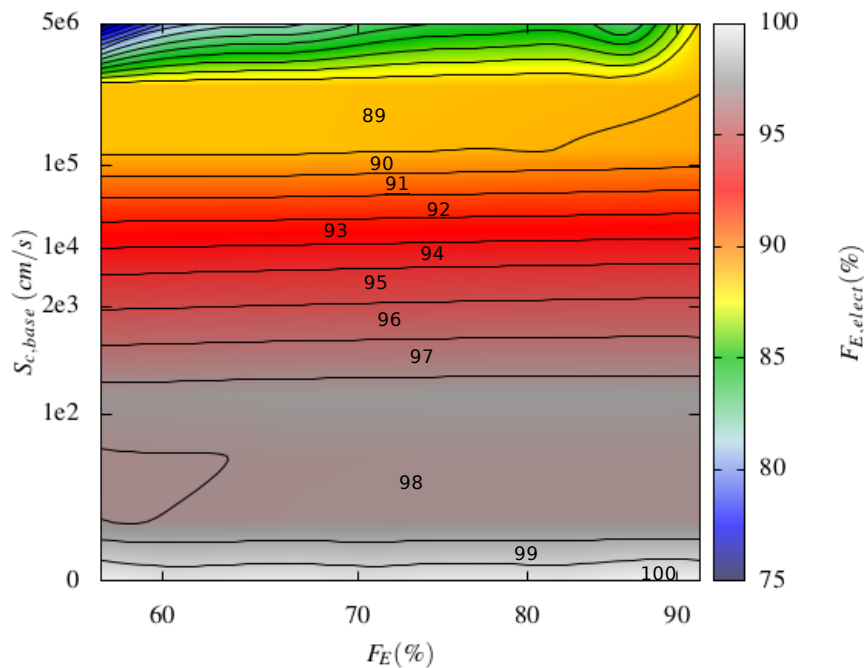


FIGURA 4.11: Mapa d'evolució del **Factor de Cobertura Elèctric de l'Emissor**  $F_{E,elect}$ (%) respecte a  $F_E$  i  $S_{c,base}$  a l'estructura ring-like.

penalitzava la  $V_{oc}$  en apropar els punts d'emissor a la base, incrementant conseqüentment la  $J_o$  del dispositiu.

### 4.3.4 Estructura IBC Difussed Large-emitter Coverage

#### 4.3.4.1 Introducció

Un disseny que cerca un Factor de Cobertura Emissor  $F_E(\%)$  per sobre del 90 % per tal d'optimitzar la màxima influència de l'emissor sobre la base, és com la unitat mínima de simulació presentada a la figura 4.12. L'objectiu del disseny, és encerclar el contacte base per tal d'apantallar els mecanismes de recombinació al contacte base i a la regió BSF. La motivació tecnològica es fixa en afavorir la prevalència de l'emissor i modular els efectes negatius de la velocitat de recombinació efectiva de la base.

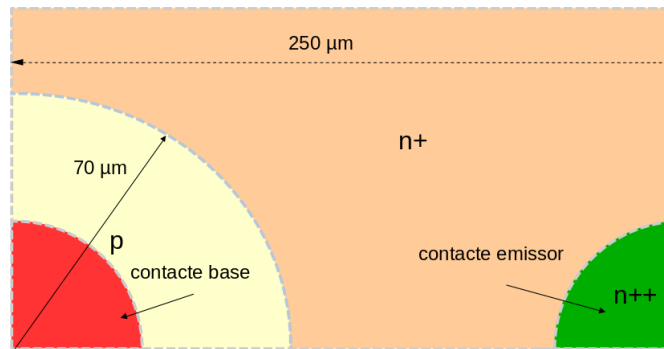


FIGURA 4.12: Unitat mínima de simulació de l'estructura large-emitter coverage.

#### 4.3.4.2 Càlcul de la reflectància a la regió posterior

Fixada l'àrea de l'estructura unitària de cèl·lula solar (veure figura 4.12) de  $pitch_{250} = p_x \cdot p_y = 250 \mu m \cdot 125 \mu m = 62500 \mu m^2$ , amb el radi dels contactes base i emissor de  $30 \mu m$ , la reflectivitat de les zones metal·litzades de 94 % i la reflectivitat als contactes de 86 % i doble nivell de metal·lització, la reflectància es presenta a les següents expressions. El percentatge d'àrea contactada:

$$A(\%)_{large,cont} = \left( \frac{A_{large,contacte}}{A_{large}} \right) \cdot 100 = 1 \cdot \left( \frac{\pi \cdot r^2}{A_{large}} \right) \cdot 100 = \left( \frac{\pi \cdot 30^2}{A_{large}} \right) \cdot 100 \quad (4.12)$$

Les àrees no contactades (4.13):

$$A(\%)_{large,nocont} = 100 - (A(\%)_{large,cont}) \quad (4.13)$$

La reflectància (4.14) es calcula com, :

$$R(\%)_{large} = R(\%)_{cont} \cdot \left( \frac{A(\%)_{large,cont}}{100} \right) + R(\%)_{nocont} \cdot \left( \frac{A(\%)_{large,nocont}}{100} \right) \quad (4.14)$$

TAULA 4.I: Reflectància del *Large-Emitter-Coverage*.

Pitch	Àrea	Àrea cont. (%)	Àrea no cont. (%)	R(%)	$F_E(\%)$
250 $\mu m$	62500	4.52	95.48	93.64	93.71

#### 4.3.4.3 Resultats

Fixant la resistivitat en referència a les estructures tipus *p*, 2.2 ( $\Omega \cdot cm$ ), a la regió  $n^+$  de fòsfor un pic màxim del perfil de dopat gaussià de  $9 \cdot 10^{18} cm^{-3}$ , profunditat de 2.3  $\mu m$  i un factor de profunditat del perfil gaussià de 0.85 i a la regió emissor de  $n^{++}$  de fòsfor un pic màxim del perfil de dopat gaussià de  $6 \cdot 10^{19} cm^{-3}$ , profunditat de 1.1  $\mu m$  i un factor de profunditat del perfil gaussià de 0.36, a més la velocitat de recombinació superficial a la regió  $n^+$  es  $S_{pas,n^+} = 10^3 cm/s$ , s'obtenen els resultats del paràmetres fotovoltaics mostrats a la figura 4.13. Aquest perfils de dopat són típics en procés de fabricació de cèl·lules IBC amb processos litogràfics i de forn per a fer les difusions [17].

Dels resultats obtinguts destaquen els valors absoluts per a  $J_{sc} mA/cm^2$ , veure a la figura 4.13.c, i **Eficiència**  $\eta(\%)$ , veure la figura 4.13.d, en la comparativa de la velocitat de recombinació efectiva de la base, amb velocitats de recombinació a la superfície frontal i posterior fixades a  $S_R = S_F = 10 (cm/s)$ , i on s'observa nítidament l'assoliment conceptual de tenir un valor molt alt de  $FE(\%)$ . És a dir, valors molt alts de la  $J_{sc}$  en condicions de velocitats de recombinació efectiva de la base altes, molt propers als valors de les velocitats de recombinació efectiva a la base ideals. Els valors de  $J_{sc}$  condicionen els valors de l'**Eficiència**  $\eta(\%)$ , obtenint resultats destacables, per sobre del 21 % per a velocitats de recombinació efectiva a la base no ideals. És a dir, aquest disseny permet mitigar l'efecte negatiu de la recombinació al contacte de base, i  $J_{sc}$  s'apropa al comportament absolut amb valors ideals de la  $S_{c,base}$ .

Respecte a la  $V_{oc}(V)$ , com es mostra a la figura 4.13.a, els resultats obtinguts són similars, del mateix ordre, que els obtinguts a una estructura IBC ideal de contactes puntuals amb  $pitch = 250 \mu m$ . En aquest cas,  $V_{oc}(V)$  ve condicionada majoritàriament per la  $J_o (fA/cm^2)$ , ja que la variació de la  $J_{sc} (mA/cm^2)$  (veure figura 4.13.c, no és molt significativa, tal com s'ha esmentat.

L'evolució de la  $J_o (fA/cm^2)$ , mostra a la figura 4.13.e la tendència de millora quan la  $S_{c,base}$  es fa més petita i tendeix a la idealitat, presentant d'aquesta manera una



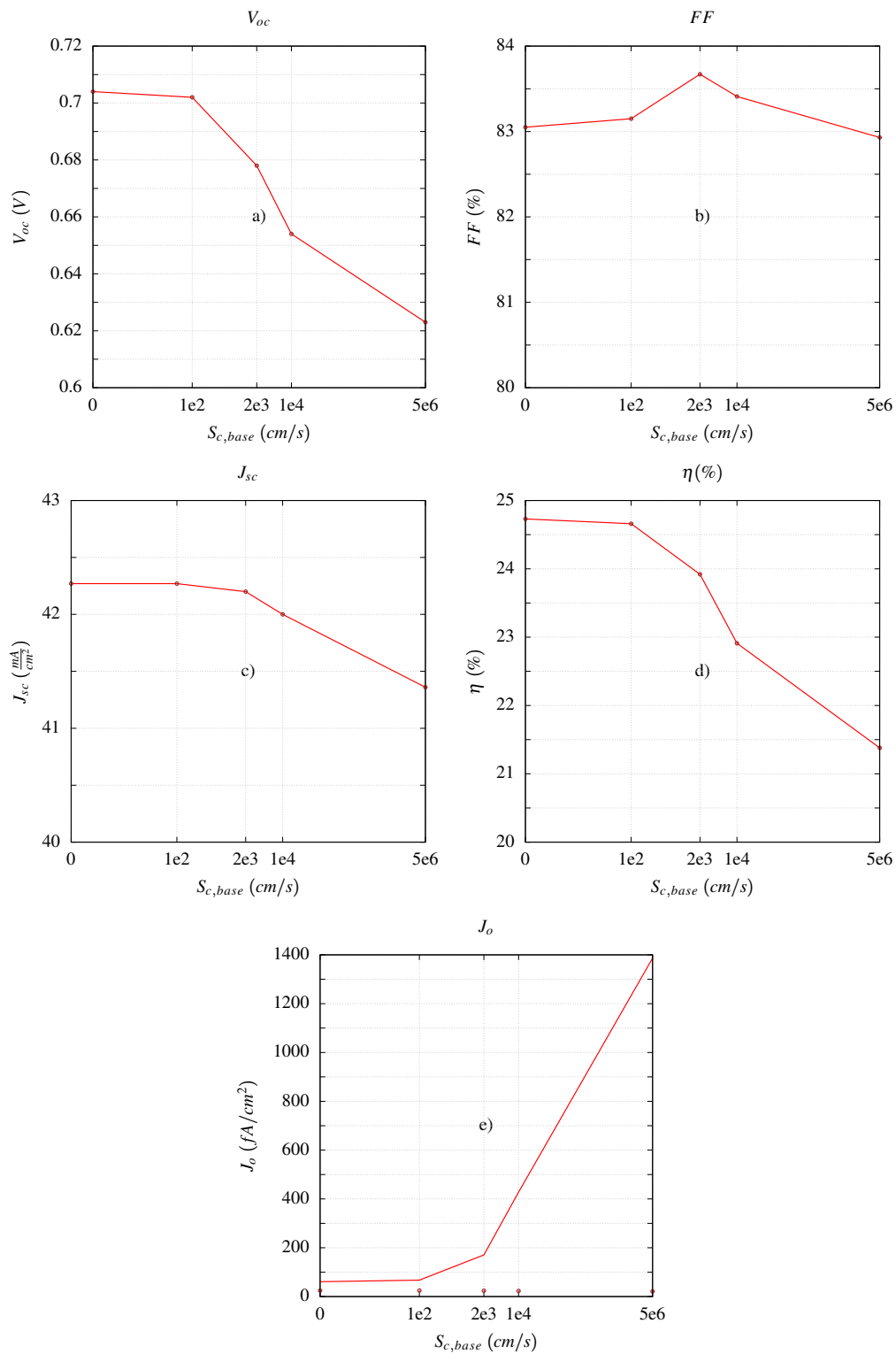


FIGURA 4.13: Evolució de la **a)**  $V_{oc}$  (V), **b)**  $J_{sc}$  ( $\frac{mA}{cm^2}$ ), **c)**  $FF$  (%), **d)** **Eficiència**  $\eta$  (%), **e)**  $J_o$  ( $fA/cm^2$ ) amb la  $S_{c,base}$ .

dependència directa de la  $J_o$  ( $fA/cm^2$ ) 4.13.c envers la  $J_{oe}$  ( $fA/cm^2$ ), ja que la contribució de la base passa a ser menyspreable. A aquesta situació, la recombinació al contacte d'emissor condiciona practicamente el valor de  $J_o$ . El límit  $J_o$  és correspon a la

$J_{oe}$  (terme de recombinació exclusivament degut a la totalitat de l'emissor, regions  $n^+$  i  $n^{++}$ ).

## 4.4 Estructures de cèl·lula unitària no constant

### 4.4.1 Introducció

Partint del concepte  $F_E(\%)$ , es planteja l'ús de més d'un emissor a l'estructura de cèl·lula unitària de contactes puntuals, però en aquest cas, a diferència dels apartats anteriors, modificant la mida física de la cèl·lula unitària. La idea principal, al igual que l'estudi precedent, és incrementar  $F_E$  per augmentar  $J_{sc}$  amb l'objectiu de mitigar l'efecte negatiu d'una alta recombinació als contactes de base ( $S_{c,base}$  grans). El disseny de les estructures de cèl·lula unitària no constant és el que s'adapta millor a un procés de fabricació a la sala blanca del **Grup MNT**, ja que permet utilitzar tires de dielèctrics, on aplicant la tecnologia làser puntualment es crea l'estructura IBC de contactes puntuals, així com el contactat per mitjà de tires metàl·liques grabades mitjançant fotolitografia. Tanmateix, les estructures line-like i ring-like estudiades anteriorment (estructures amb cèl·lula unitària constant), malgrat ser molt interessants, són de difícil implementació amb la tecnologia làser del grup que en disposa actualment.

Els electrodes metàl·lics es realitzen mitjançant tires (strip) amb un Gap  $80 \mu m$  per tal d'ajustar-se als requeriments de litografia del **Grup MNT**, es fixa la distància mínima de seguretat a fi de limitar les possibles generacions de curtcircuits accidentals entre pistes durant el procés fotolitogràfic/gravat.

Cal considerar que aquest estudi es desenvolupa amb substrats tipus  $p$ , però tant els resultats com les conclusions d'aquests, són extrapolables a estructures amb substrats tipus  $n$ .

### 4.4.2 Estructures amb cèl·lula unitària no constant amb pitch constant

#### 4.4.2.1 Definició de les estructures de geometries IBC de contactes puntuals

Les estructures de geometries mostrades a la figura 4.14 es caracteritzen per divergir en el número d'emissors i contactes associats en contraposició al contacte base, amb un increment de les dimensions de la unitat mínima de simulació respecte a la dimensió  $x$ . Cal afegir que tots els contactes làser són puntuals de  $radi = 30 \mu m$  amb pitch horitzontal i vertical de contactes puntuals  $p_x = p_y = 250 \mu m$ .

La terminologia que identifica la relació geomètrica entre les diferents unitats mínimes de simulació es defineix de tal manera que  $N_1$  indica un emissor a la cèl·lula unitària,  $N_2$  dos emissors a la cèl·lula unitària i així successivament per al cas  $N_n$  amb  $n$  emissors a la cèl·lula unitària.

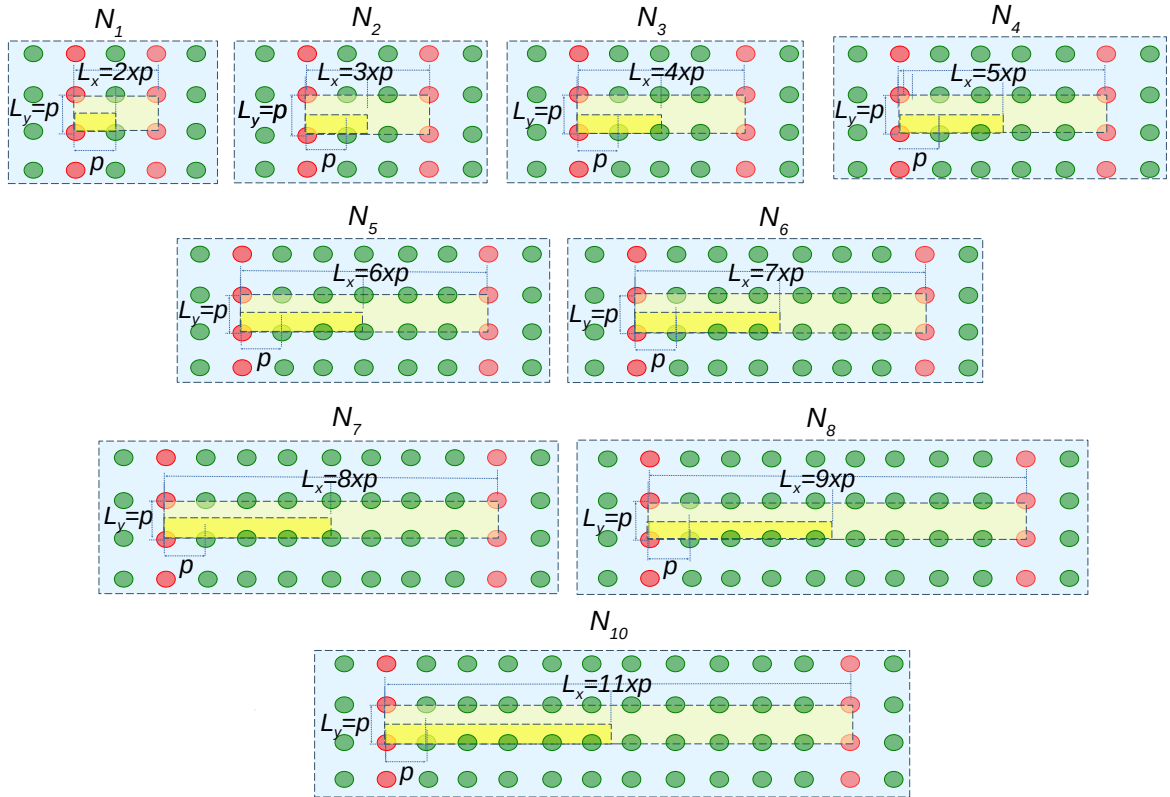


FIGURA 4.14: Cèl·lules unitàries i unitats mínimes de simulació per a les geometries de l'estructura IBC de contactes puntuals amb cèl·lula unitària no constant. En vermell contacte base i en verd contactes d'emissor.

#### 4.4.2.2 Càlcul de la reflectància a la regió posterior

Anteriorment s'ha expressat que la reflectància de la regió posterior ve determinada per les propietats de reflectivitat dels materials que conformen les regions localitzades a la superfície posterior del dispositiu.

A l'estudi de les geometries de l'estructura IBC de contactes puntuals la reflectància depèn proporcionalment de les dimensions de les estructures associades a cadascuna de les tipologies geomètriques  $N_1$ - $N_{10}$ .

A aquest estudi es considera el radi dels contactes base i emissor a  $30 \mu m$ , el Gap metàl·lic de  $80 \mu m$ , la reflectivitat de les zones metal·litzades fixada a 94 %, la reflectivitat de les zones no metal·litzades amb un valor de 15 % i la reflectivitat als contactes de 86 %.

El percentatge de l'àrea no metal·litzada, veure la figura (4.15), per a l'estructura unitària de cèl·lula solar de la geometria  $Nn$  s'expressa com:

$$A(\%)_{Nn,noMet} = \left( \frac{Gap_{Met} \cdot p_y}{A_{Nn}} \right) \cdot 100 = \left( \frac{80\mu m \cdot 250\mu m}{A_{Nn}} \right) \cdot 100 \quad (4.15)$$

El percentatge de l'àrea contactada (4.16), on l'àrea total de les fraccions dels contactes inclosos a l'estructura unitària de cèl·lula solar equival a  $\frac{n+1}{2}$  contactes:

$$\begin{aligned} A(\%)_{Nn,cont} &= \left( \frac{n+1}{2} \right) \cdot \left( \frac{A_{Nn,contactes}}{A_{Nn}} \right) \cdot 100 = \left( \frac{n+1}{2} \right) \cdot \left( \frac{\pi \cdot r^2}{A_{Nn}} \right) \cdot 100 \\ &= \left( \frac{n+1}{2} \right) \cdot \left( \frac{\pi \cdot 30^2}{A_{Nn}} \right) \cdot 100 \end{aligned} \quad (4.16)$$

El percentatge de l'àrea metal·litzada (4.17) per a l'estructura unitària de cèl·lula solar de la geometria  $Nn$  s'expressa com:

$$A(\%)_{Nn,Met} = 100 - (A(\%)_{Nn,noMet} + A(\%)_{Nn,cont}) \quad (4.17)$$

Per a l'estructura unitària de cèl·lula solar de la geometria  $Nn$  s'expressa la reflectància (4.18) amb els següents termes com:

$$\begin{aligned} R(\%)_{Nn} &= R(\%)_{met} \cdot \left( \frac{A(\%)_{Nn,Met}}{100} \right) + R(\%)_{noMet} \cdot \left( \frac{A(\%)_{Nn,noMet}}{100} \right) \\ &\quad + R(\%)_{cont} \cdot \left( \frac{A(\%)_{Nn,cont}}{100} \right) \end{aligned} \quad (4.18)$$

Els valors de reflectància obtinguts per a cadascuna de les geometries, mostren una tendència assíptica cap el 100 % en l'ordre creixent de  $N$  expressat per mitjà d'un decreixement del pes percentual de l'àrea no metal·litzada de l'estructura unitària de cèl·lula solar i un creixement del pes percentual de l'àrea metal·litzada, contribuint d'aquesta manera en una millora de la  $J_{sc}$ . Comentar que, la reflectància de la regió posterior comença a prendre importància al voltant de longituds d'ona de 950 nm on els fotons ja no són absorbits en la seva totalitat i es produeixen reflexions internes a la superfície posterior.

#### 4.4.2.3 Definició de les estructures de simulació

La definició de les estructures IBC de contactes puntuals, el dopat de l'emissor i la base d'acord a la resistivitat de volum, permet definir, mitjançant l'eina Sentaurus Structure Editor [23], [24], les unitats mínimes de simulació corresponent a cadascuna de les geometries ( $N1$ ,  $N2$ ,  $N3$ ,  $N4$ ,  $N5$ ,  $N6$ ,  $N7$ ,  $N8$ ,  $N10$ ). Aquest estudi es farà fixant una resistivitat tipus  $p$  de  $2.2 (\Omega \cdot cm)$  al igual que els estudis precedents.

Les pròpies característiques de les diferents geometries de les unitats mínimes de simulació de les estructures IBC de contactes puntuals, permeten categoritzar-les d'acord a la paritat dels números d'emissors, número parell i senars d'emissors.

La generació de la geometria  $N1$  de la unitat mínima de simulació mitjançant la codificació de l'eina Sentaurus Structure Editor coincideix amb la definició de la unitat mínima de simulació de l'estructura IBC bàsica tipus  $p$  de contactes puntuals amb un *pitch* de  $250 \mu m$ :

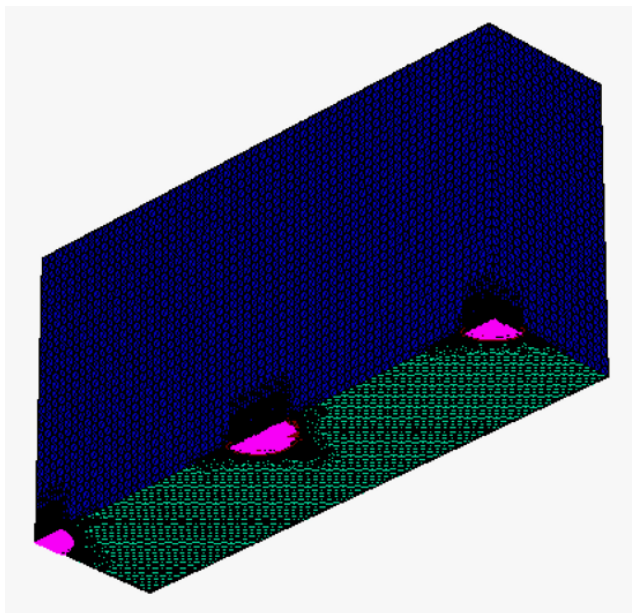


FIGURA 4.15: Unitat mínima de simulació per a la geometria  $N3$ .

La geometria  $N3$  mostrada a la figura 4.15 serveix per a exemplificar les tipologies d'estructures IBC de contactes puntuals que pertanyen a la categoria de números d'emissors senars a les seves unitats mínimes de simulació associades. En el cas de geometria  $N3$  la unitat mínima de simulació conté un contacte base i dos emissors amb els seus contactes associats.

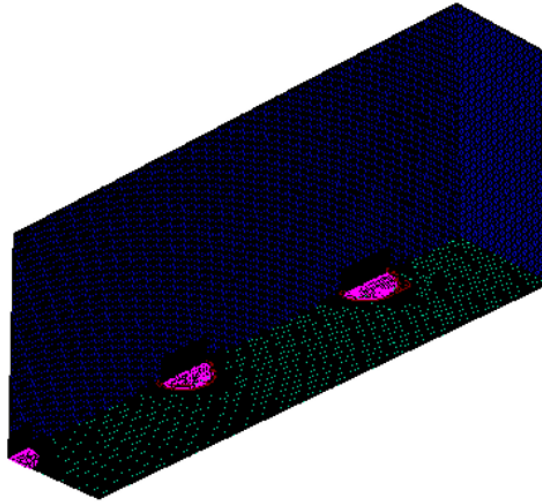


FIGURA 4.16: Unitat mínima de simulació per a la geometria  $N4$ .

La geometria  $N4$  mostrada a la figura 4.16 serveix per a exemplificar les tipologies d'estructures IBC de contactes puntuals que pertanyen a la categoria de números d'emissors parells a les seves unitats mínimes de simulació associades.

En el cas de geometria  $N4$ , la unitat mínima de simulació conté un contacte base i dos emissors amb els seus contactes associats, amb la diferència envers la geometria  $N3$  centrada en la dimensió de la unitat mínima de simulació i en el fet de que els dos emissors es presenten en dos semicercles al cas de  $N4$ , i al cas  $N3$ , en forma d'un semicercle i un quart de cercle.

La definició de les geometries  $N3$  i  $N4$  permeten ser extrapolades a les unitats mínimes de simulació categoritzades per mitjà del número d'emissors senars i parells respectivament, afegint dimensions, cada  $250 \mu m$  la família geomètrica caracteritzada pel número senar d'emissors ( $N1, N3, N5, N7, N9\dots$ ) i cada  $250 \mu m$  la família geomètrica caracteritzada pel número parell d'emissors ( $N2, N4, N6, N8, N10\dots$ ).

El càlcul de la  $F_E$  en funció del número  $n$ , on si  $n$  creix  $F_E$  creix:

$$F_E(\%)_{Nn} = \left(\frac{n}{n+1}\right) \cdot 100 \quad (4.19)$$

#### 4.4.2.4 Resultats

Els efectes resistius de la base i l'increment del número d'emissors amb els seus contactes associats resten l'efecte positiu en l'increment de  $F_E$ , i la millora de la  $J_{sc}$  amb un decrement de la  $V_{oc}$  i el  $FF$ .

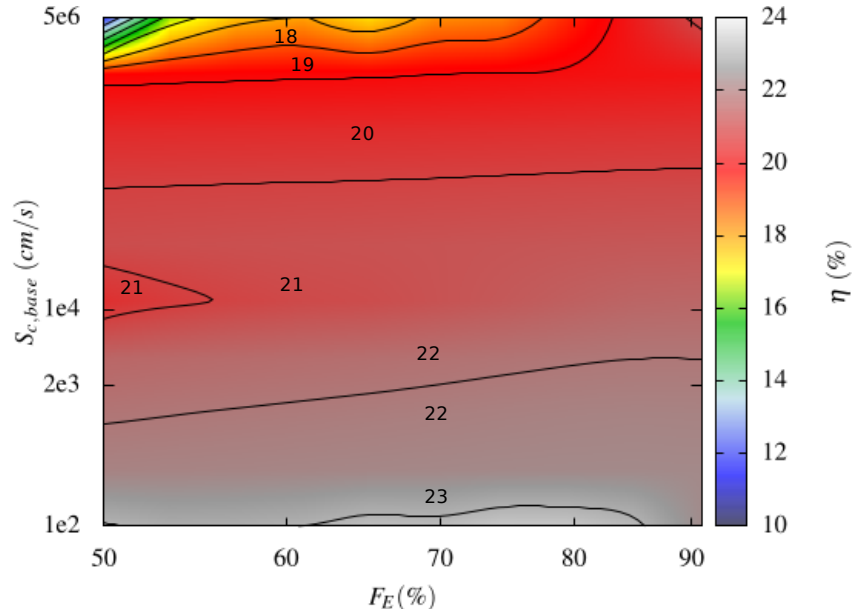


FIGURA 4.17: Evolució de l'**Eficiència** respecte  $F_E$  (%) i  $S_{c,base}$  considerant una resistivitat de  $2.2 (\Omega \cdot cm)$ .

Respecte a la  $J_{sc}$ , existeix una correlació entre la variació geomètrica i l'increment de la reflectivitat interna de la superfície posterior que contribueix al creixement adicional de la  $J_{sc}$ .

La figura 4.17 mostra l'**Eficiència**  $\eta(\%)$  en funció de  $F_E$  (%) i  $S_{c,base}$ . Destaca especialment una millora de l'**Eficiència** a les velocitats de recombinació efectives a la base altes, amb què per mitjà de les estructures geomètriques s'aconsegueix millorar les prestacions de les cèl·lules solars IBC de contactes puntuals amb passivacions de la base no òptimes i més realistes, en funció d'un increment del  $F_E$  (%), increment que s'aconsegueix incrementant el número d'emissors a la unitat mínima de simulació. Per exemple, en el cas d'un contacte de base mal passivat es poden assolir eficiències al voltant del 20-21 % per  $F_E > 80$  % considerant una resistivitat de base  $2.2 (\Omega \cdot cm)$ .

### 4.4.3 Estructures amb cèl·lula unitària no constant amb pitch no constant

#### 4.4.3.1 Introducció

Considerant les estructures de geometries IBC presentades anteriorment i del concepte de Factor de Cobertura de l'Emissor  $F_E(\%)$  són diverses els dissenys possibles que permeten assolir altes prestacions. Una de les tipologies de disseny es presenta en aquesta secció és una estructura híbrida entre una geometria line-like i una cèl·lula unitària no constant amb pitch constant, on la primera tira d'emissors, més propers al contacte de base, conté

un emissor adicional a un pitch meitat a l'eix vertical ( $\frac{p_y}{2} = 125 \mu\text{m}$ , amb  $p_y = 250 \mu\text{m}$ ), tal com es mostra a la figura 4.18.

Tal com es mostra a la figura 4.18, la presència dels dos primers emissors confrontats a prop del contacte de base incrementa d'entrada la  $F_E(\%)$  i apantalla en certa mesura els efectes dels mecanismes de recombinació a la base. Malgrat tot, afegir un emissor confrontat incideix en una feble disminució de la  $V_{oc}(V)$  en relació als resultats obtinguts a les estructures geomètriques IBC de contactes puntuals amb cèl·lula unitària no constant del apartat [Estructures amb cèl·lula unitària no constant amb pitch constant](#) vist a l'apartat anterior (4.4.2).

#### 4.4.3.2 Definició de les estructures de cèl·lula unitària no constant amb pitch no constant

La terminologia que identifica la relació geomètrica entre les diferents unitats mínimes de simulació es defineix de manera similar a la presentada a la subsecció anterior, on el subíndex  $h$  indica estructura híbrida.

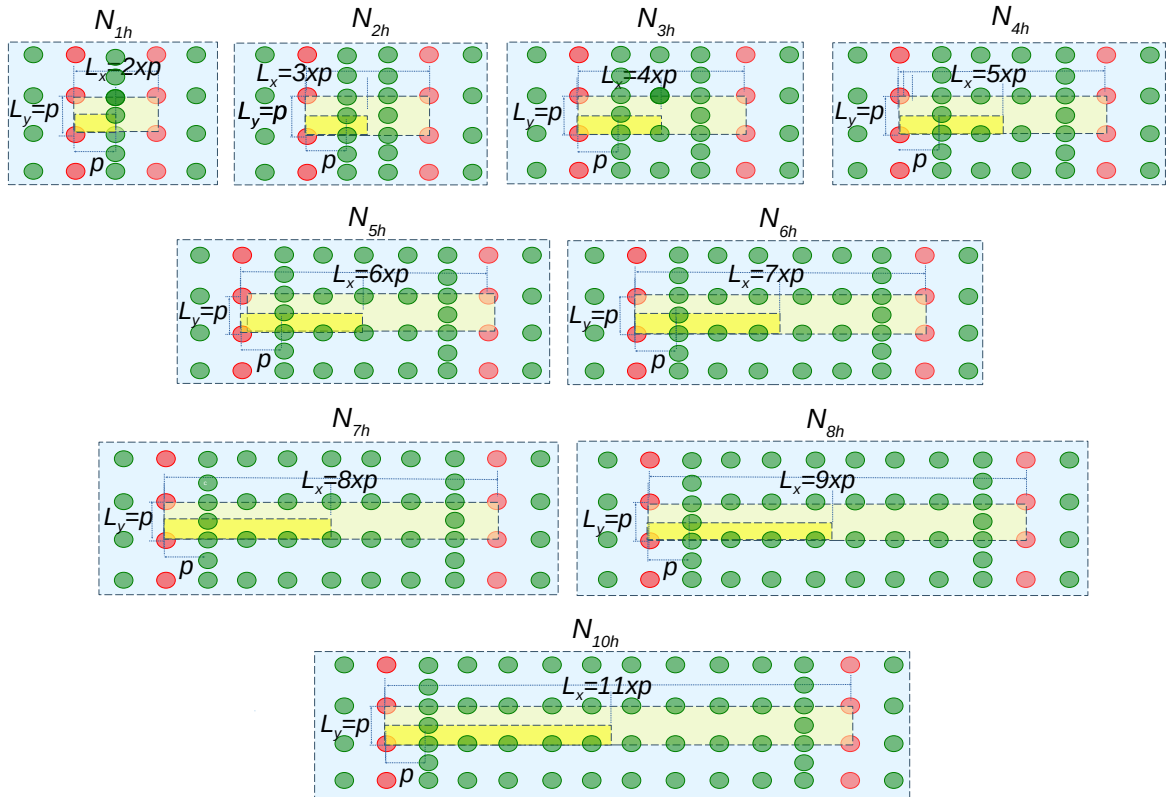


FIGURA 4.18: Geometries híbrides de l'estructura IBC de contactes puntuals, en vermell contacte base i en verd contactes emissor.

Fent ús de simetries, antisimetries, simetries especulars i rotacions sobre eixos, partint de la geometria de les estructures unitàries de simulació, es genera primerament l'estructura



unitària de la cèl·lula solar 4.18, per després generar l'estructura de la cèl·lula solar. La resistivitat utilitzada a aquest estudi és de  $2.2 (\Omega \cdot cm)$ .

#### 4.4.3.3 Càlcul de la reflectància a la regió posterior

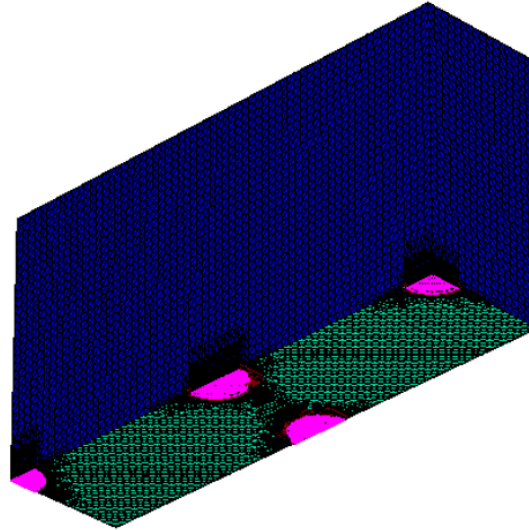


FIGURA 4.19: Unitat mínima de simulació per a la geometria  $N3_n$ .

Similarment a l'estudi de les geometries de l'estructura IBC de contactes puntuals la reflectància posterior depèn de les estructures de contactes associades a cadascuna de les tipologies geomètriques  $N1-N10$  (veure la figura 4.19).

Considerant el radi dels contactes base i emissor a  $30 \mu m$ , el Gap metàl·lic de  $80 \mu m$ , la reflectivitat de les zones metal·litzades fixada a  $94 \%$ , la reflectivitat de les zones no metal·litzades amb un valor de  $15 \%$  i la reflectivitat als contactes de  $86 \%$ , la reflectància a la regió posterior per a l'estructura unitària de cèl·lula solar de la geometria  $Nn$  es presenta per mitjà de les expressions següents.

De manera equivalent a l'estructura anterior, el percentatge de l'àrea no metal·litzada (4.20) per a l'estructura unitària de cèl·lula solar de la geometria  $Nn$  s'expressa com:

$$A(\%)_{Nhn,noMet} = \left( \frac{Gap_{Met} \cdot p_y}{A_{Nhn}} \right) \cdot 100 = \left( \frac{80\mu m \cdot 250\mu m}{A_{Nhn}} \right) \cdot 100 \quad (4.20)$$

El percentatge de l'àrea contactada (4.21), on l'àrea total de les fraccions dels contactes inclosos a l'estructura unitària de cèl·lula solar equival a  $\frac{n+2}{2}$  contactes:

$$\begin{aligned}
 A(\%)_{Nhn,cont} &= \left(\frac{n+2}{2}\right) \cdot \left(\frac{A_{Nhn,contactes}}{A_{Nhn}}\right) \cdot 100 = \left(\frac{n+2}{2}\right) \cdot \left(\frac{\pi \cdot r^2}{A_{Nhn}}\right) \cdot 100 \\
 &= \left(\frac{n+2}{2}\right) \cdot \left(\frac{\pi \cdot 30^2}{A_{Nhn}}\right) \cdot 100 \quad (4.21)
 \end{aligned}$$

El percentatge de l'àrea metal·litzada (4.22) per a l'estructura unitària de cèl·lula solar de la geometria  $Nn$  s'expressa com:

$$A(\%)_{Nhn,Met} = 100 - (A(\%)_{Nhn,noMet} + A(\%)_{Nhn,cont}) \quad (4.22)$$

La reflectància de la geometria  $Nn$  es calcula com:

$$\begin{aligned}
 R(\%)_{Nhn} &= R(\%)_{met} \cdot \left(\frac{A(\%)_{Nhn,Met}}{100}\right) + R(\%)_{noMet} \cdot \left(\frac{A(\%)_{Nhn,noMet}}{100}\right) \\
 &\quad + R(\%)_{cont} \cdot \left(\frac{A(\%)_{Nhn,cont}}{100}\right) \quad (4.23)
 \end{aligned}$$

#### 4.4.3.4 Resultats

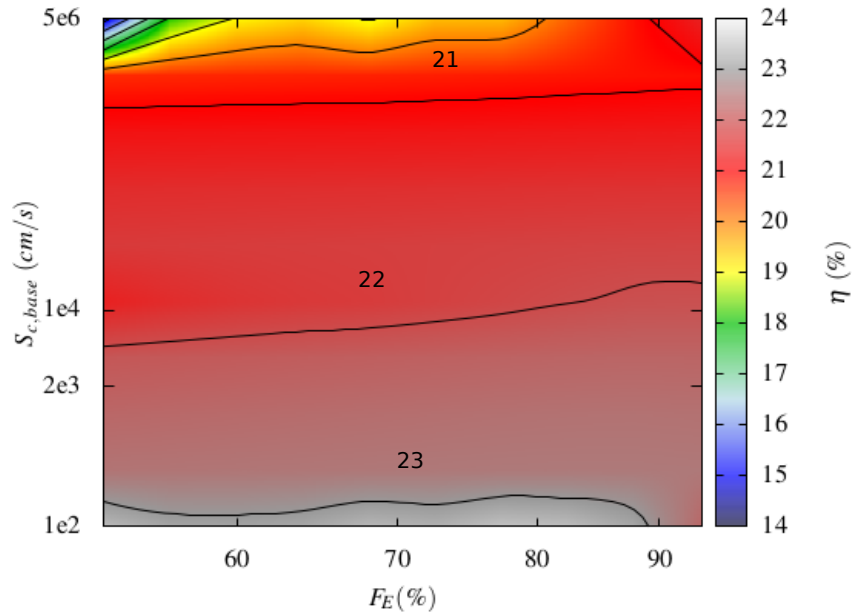


FIGURA 4.20: Evolució de l'**Eficiència** respecte  $F_E$  (%) i  $S_{c,base}$  considerant una resistivitat de  $2.2 (\Omega \cdot cm)$ .

La generació de la unitat mínima de simulació de la geometria  $N1_h$  és la mateixa que la ja presentada a la tipologia *line-like*  $d_x = 250 \mu m$ . Similarment a les estructures

geomètriques, les unitats mínimes de simulació de les geometries  $N3_h$  i  $N4_h$  tipifiquen la resta de generacions d'unitats mínimes de simulació.

En general, aquestes estructures permeten una millora i optimització de l'Eficiència, amb l'objectiu de millorar els valors assolits per a les  $S_{c,base}$  reals, figura 4.20.

La presència de l'emissor confrontat permet una millora de les prestacions, malgrat la petita afectació sobre la  $V_{oc}$  envers a les estructures de les geometries més convencionals, estudiades a l'apartat 4.4.2. Amb tot, quan s'incrementa el número d'emissors, la divergència entre aquestes estructures híbrides i les geometries convencionals es fa menyspreable, donat que l'efecte puntual d'un emissor confrontat es dilueix davant el número total d'emissors a la unitat mínima de simulació.

#### 4.4.4 Exemple de cèl·lula unitària no constant i pitch constant; DopLa-IBC solar cell

Aquesta tipologia es presenta a l'estud [37], on es recull la idea de cèl·lula unitària no constant i pitch constant desenvolupada pel *grup MNT*, i es descriu el procés de fabricació de cèl·lules solars IBC c-Si (n) basades en contactes puntuals làser *DopLa-IBC solar cell structures*.

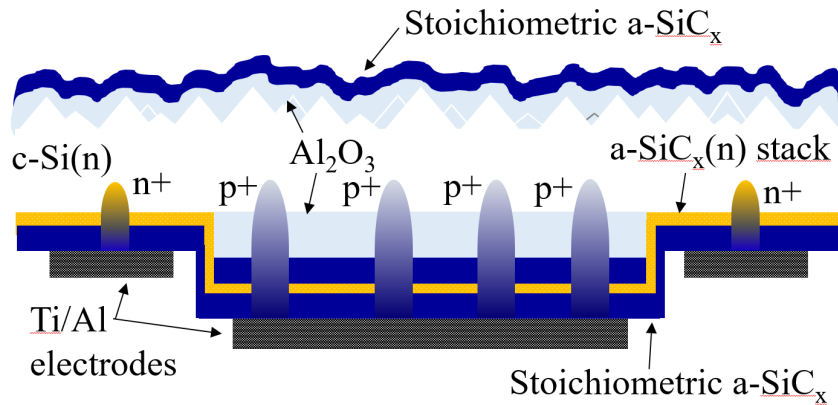


FIGURA 4.21: DopLa-IBC cell structure. Figura publicada a [37] © 2015 Elsevier.

A aquest tipus d'estructura, totes les regions altament dopades s'han fabricat per mitjà d'un làser d'ultraviolenta UV (*Centro Láser de Madrid*) amb pitch de  $125 \mu m$ , donat que el spot del làser és d'uns  $15 \mu m$  de radi. Els contactes  $p^+$  es generen per mitjà del làser amb un stack d'alumina i carbur de silici ( $Al_2O_3/SiC_x$ ) i els contactes  $n^+$  per mitjà del làser amb un stack de silici amorf i carbur de silici dopats amb fòsfor, veure figura 4.21.

Aquestes cèl·lules solars ( $3 \times 3 cm^2$ ), veure figura 4.22, s'han fabricat amb eficiències superiors al 20 % amb  $J_{sc}$  de  $40.7 mA cm^{-2}$  i  $V_{oc}$  de  $654 mV$ .

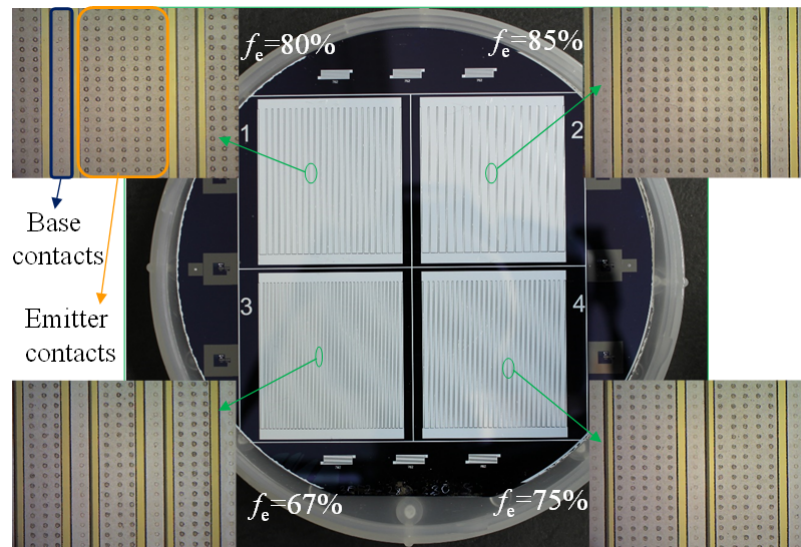


FIGURA 4.22: Part posterior d'una oblea processada de 4" amb les quatre topologies de cèl·lula utilitzades a l'estudi. Figura publicada a [37] © 2015 Elsevier.

Malgrat que les dimensions no coincideixen amb les utilitzades a les simulacions, pitch  $250 \mu m$ , les cèl·lules DopLa IBC mostren el concepte de disseny d'un tipus de cèl·lula unitària no constant i pitch constant.

La idea principal és incrementar  $F_E$  per augmentar  $J_{sc}$  per a mitigar l'efecte negatiu d'una alta recombinació als contactes de base ( $S_{c,base}$  grans).

#### 4.4.5 Estructures IBC de contactes en tires

##### 4.4.5.1 Introducció

Una alternativa a les tipologies de contactes puntuals, és la disposició dels contactes en forma de tires, amb una regió emissor fortament dopada  $n^{++}$  sobre una regió  $n^+$ . A aquest estudi es considerarà una regió BSF de la base simplificada en combinació amb el contacte base associats a una velocitat de recombinació efectiva de la base  $S_{c,base}$ . Aquesta disposició en forma de tires permet una generació de la unitat mínima de simulació en 2D, optimitzant d'aquesta manera els recursos de simulació. És important comentar que aquesta estructura en tires es pot fabricar fàcilment de forma convencional fent servir processos de difusió i fotolitografia de sala blanca desenvolupats per el **grup MNT** [17].

Partint de la unitat mínima de simulació de la figura 4.23 es desenvolupa l'estudi d'un conjunt de tipologies d'acord a la sèrie geomètrica depenent de la dimensió de la regió de l'emissor  $n^+$ ,  $L_{n^+}$  (0, 125, 250, 375, 625, 875, 1125, 1500)  $\mu m$ , que es corresponen a

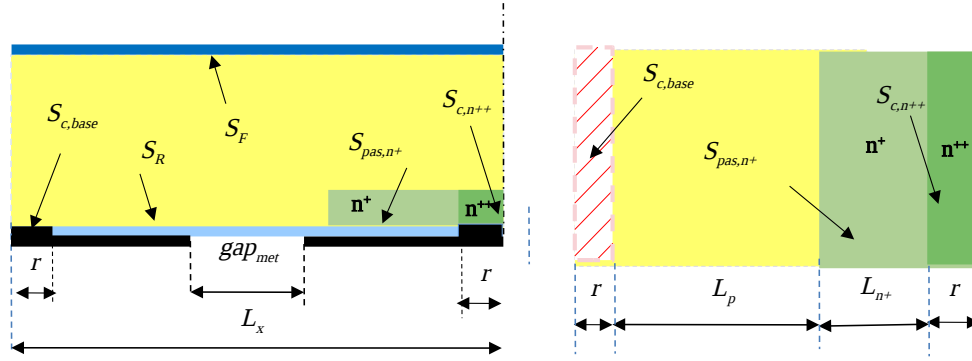


FIGURA 4.23: Estructura amb contactes amb tires. (esquerra) secció vertical i vista de planta (dreta) de la unitat mínima de simulació. La regió BSF es simplifica amb una velocitat de recombinació efectiva a la base  $S_{c,base}$ .

$N_{2D} = 1, 2, 3, 4, 6, 8, 10, 11, 13$ , seguint la nomenclatura de les estructures geomètriques dels apartats precedents. Es cerca incrementar la influència de l'emissor ampliant les dimensions de la regió de l'emissor  $n^+$ .

A la taula 4.II es resumeixen el valors dels paràmetres utilitzats a les simulacions.

TAULA 4.II: Condicions de simulació, IBC de contactes en tires.

<b>Resistivity (<math>\Omega \cdot \text{cm}</math>)</b>	2.2
<b>Base p</b>	$6.5 \cdot 10^{15} \text{ (cm}^{-3}\text{)}$
<b>W(width)</b>	$250 \mu\text{m}$
<b><math>n^+</math></b>	$L_{n^+} = (0, 125, 250, 375, 625, 875, 1125, 1500) \mu\text{m}$ Peak Doping $N_D^+ \Rightarrow 9 \cdot 10^{18}$ Depth = $1.1 \mu\text{m}$ $R_{sh,n^+} \cong 120 \text{ (}\Omega/\text{square)}$
<b><math>n^{++}</math></b>	$r = 30 \mu\text{m}$ Peak Doping $N_D^{++} \Rightarrow 6 \cdot 10^{19}$ Depth = $2.3 \mu\text{m}$ $R_{sh,n^{++}} \cong 17 \text{ (}\Omega/\text{square)}$
<b><math>p^+</math></b>	$L_p^+ = 190 \mu\text{m}$ Peak Doping $N_A^+ \Rightarrow 10^{19} \text{ (cm}^{-3}\text{)}$ Depth = $5 \mu\text{m}$ $R_{sh,p^+} \cong 40 \text{ (}\Omega/\text{square)}$
<b>Contactes en tires</b>	$r = 30 \mu\text{m}$
<b>gap<sub>met</sub></b>	$80 \mu\text{m}$
<b><math>S_F</math></b>	$10 \text{ (cm/s)}$
<b><math>S_R</math></b>	$10 \text{ (cm/s)}$
<b><math>S_{c,n^{++}}</math></b>	$5 \cdot 10^6 \text{ (cm/s)}$
<b><math>S_{c,p^+}</math></b>	$5 \cdot 10^6 \text{ (cm/s)}$
<b><math>S_{pas,n^+}</math></b>	$10^3 \text{ (cm/s)}$

#### 4.4.5.2 Càlcul de la reflectància a la regió posterior

Per a les estructures IBC tipus  $p$  de contactes en tires amb Gap  $80 \mu m$  metàl·lic la reflectància depèn proporcionalment a les dimensions de les estructures associades a cadascuna de les tipologies geomètriques  $N1_{2D}$ - $N13_{2D}$ .

Donada l'amplada dels contactes  $30 \mu m$  per a la unitat mínima de simulació, el gap metàl·lic de  $gap_{met} = 80 \mu m$ ,  $L_p = 190 \mu m$ , la reflectivitat de les zones metal·litzades fixada a 94 %, la reflectivitat de les zones no metal·litzades amb un valor de 15 % i la reflectivitat als contactes de 86 %. El percentatge d'àrea no metal·litzada (4.24) es defineix com:

$$A(\%)_{Nn2D,noMet} = \left( \frac{Gap_{Met}}{Width_{Nn2D}} \right) \cdot 100 = \left( \frac{80\mu m}{Width_{Nn2D}} \right) \cdot 100 \quad (4.24)$$

En el cas del percentatge d'àrea contactada (4.25):

$$A(\%)_{Nn2D,cont} = \left( \frac{\frac{Width_{cont}}{2} + \frac{Width_{cont}}{2}}{Width_{Nn2D}} \right) \cdot 100 = \left( \frac{60\mu m}{Width_{Nn2D}} \right) \cdot 100 \quad (4.25)$$

L'àrea metal·litzada (4.26) és el resultat de la resta entre el percentatge d'àrea total (100 %) i la suma del percentatge de les àrees no metal·litzades i contactades:

$$A(\%)_{Nn2D,Met} = 100 - (A(\%)_{Nn2D,noMet} + A(\%)_{Nn2D,cont}) \quad (4.26)$$

La reflectància (4.27) de la geometria  $Nn_{2D}$  es calcula com:

$$R(\%)_{Nn2D} = R(\%)_{met} \cdot \left( \frac{A(\%)_{Nn2D,Met}}{100} \right) + R(\%)_{noMet} \cdot \left( \frac{A(\%)_{Nn2D,noMet}}{100} \right) + R(\%)_{cont} \cdot \left( \frac{A(\%)_{Nn2D,cont}}{100} \right) \quad (4.27)$$

#### 4.4.5.3 Resultats

La generació de les unitats mínimes de simulació per a les estructures IBC tipus  $p$  de contactes en tires es caracteritza per la simplificació dimensional a 2D, entenent la tercera dimensió com una repetició del plà 2D. Amb aquesta simplificació s'aconsegueix

una optimització de recursos a les simulacions permetent una reducció dels temps de càlcul i d'assoliment de resultats.

La figura 4.24 mostra altes prestacions d'**Eficiència** a la majoria de valors de  $S_{c,base}$  i ja des de geometries petites, comportament similar al presentat a les estructures de geometries híbrides. El que realment interessa en el disseny d'aquest tipus d'estructures és el factor de compensació sobre l'efecte negatiu de la recombinació a la regió BSF de la base i el contacte base. Incrementant les dimensions, estructura geomètrica més alta, afavoreix la prevalència de l'efecte emissor sobre la base,  $F_E(\%)$ , permetent assolir valors d'**Eficiència** més alts. A la figura es visualitza perfectament aquest efecte per a  $S_{c,base}$  al voltant de valors  $5 \cdot 10^6$  (cm/s), a partir de la geometria  $N3_{2D}$  l'efecte de la recombinació a la base es veu compensat quasi en la seva totalitat per l'increment de la  $F_E(\%)$ .

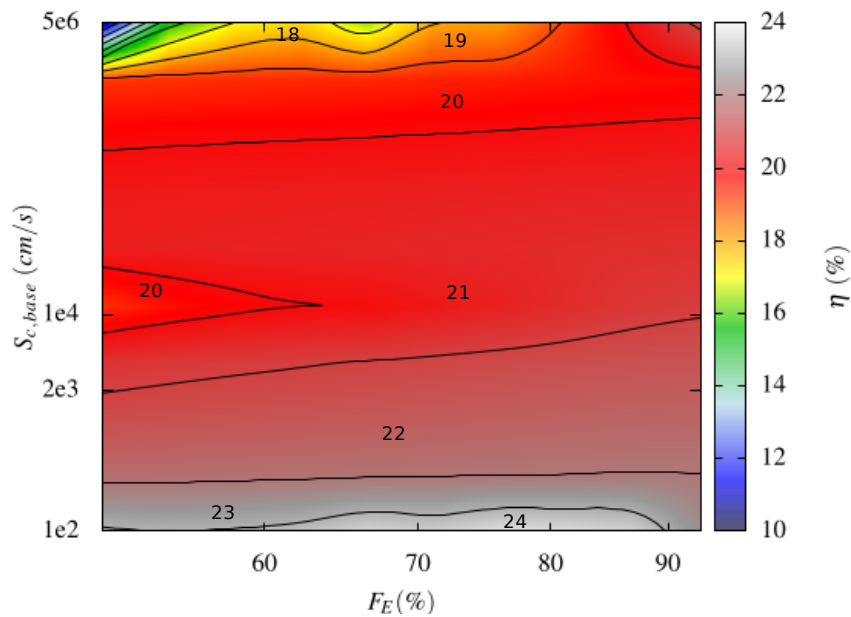


FIGURA 4.24: Mapa d'evolució de l'**Eficiència** respecte a  $F_E$  (%) i  $S_{c,base}$  (cm/s).

## 4.5 Estudi comparatiu

La figura 4.25 presenta una comparativa de les diferents estructures de geometries complexes de cèl·lula unitària constant en relació al valor de  $S_{c,base} = 5 \cdot 10^6$  (cm/s) i el valor ideal representat numèricament per  $S_{c,base} = 100$  (cm/s). Els resultats obtinguts mostren que l'estructura IBC de cèl·lula unitària constant Large Emitter Coverage és la que assoleix valors d'**Eficiència** més òptims.

De manera equivalent, la figura 4.26 presenta una comparativa de les diferents estructures de geometries complexes de cèl·lula unitària no constant, **Pitch constant**, **Pitch**



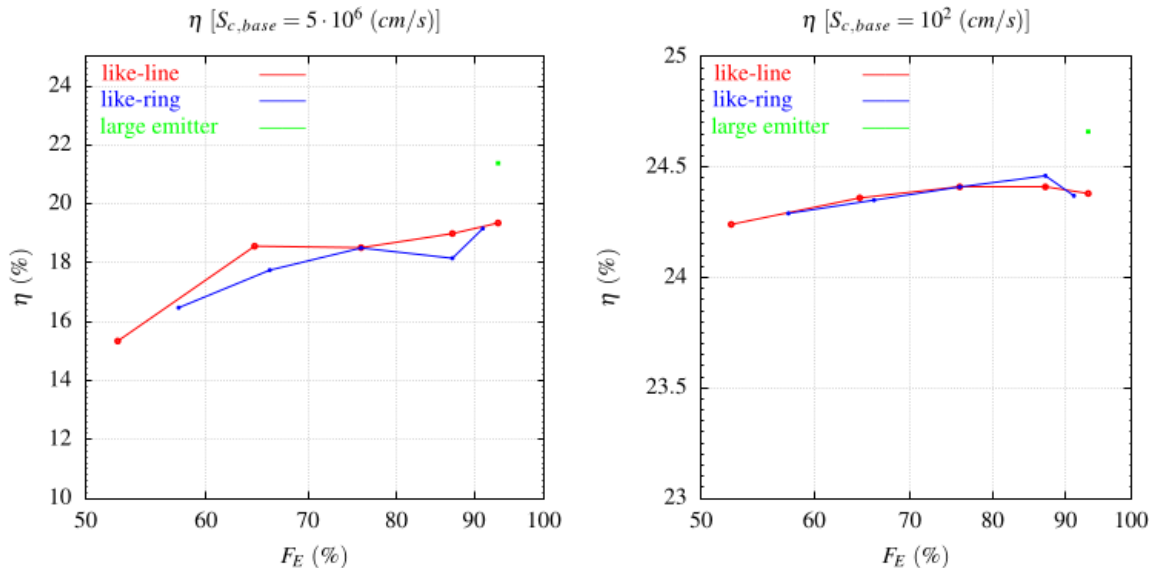


FIGURA 4.25: comparativa estructures de cèl·lula unitària constant a)  $S_{c,base} = 5 \cdot 10^6$  (cm/s) i b)  $S_{c,base} = 100$  (cm/s).

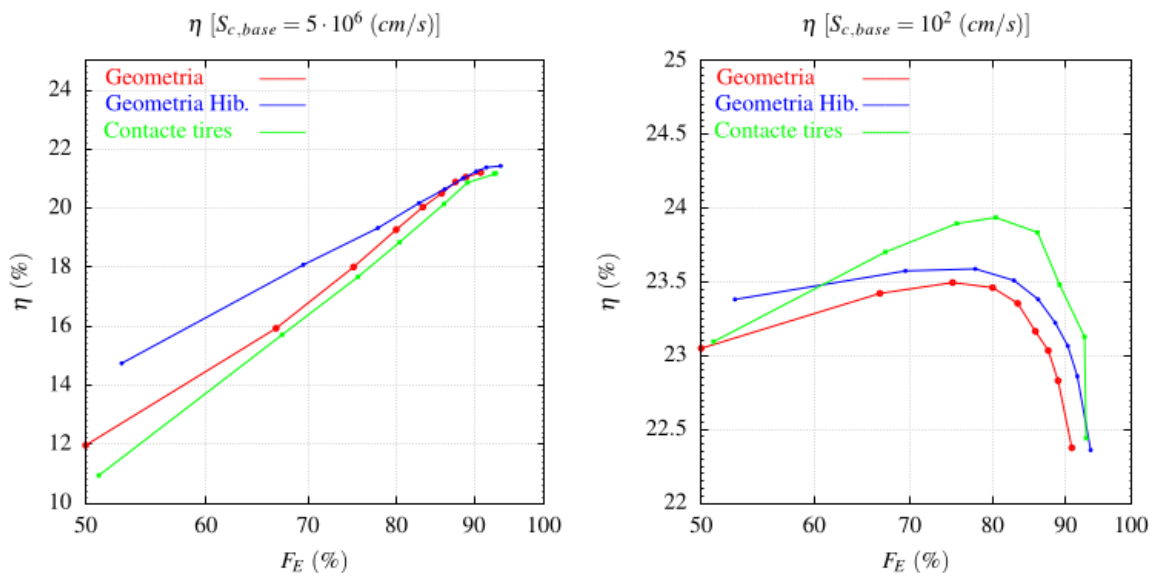


FIGURA 4.26: comparativa estructures de cèl·lula unitària no constant a)  $S_{c,base} = 5 \cdot 10^6$  (cm/s) i b)  $S_{c,base} = 100$  (cm/s).

**no constant (estructura híbrida) i contactes en forma de tires**, en relació al valor de  $S_{c,base} = 5 \cdot 10^6$  (cm/s) i el valor ideal representat numèricament en aquest cas per  $S_{c,base} = 10^2$  (cm/s). Dels resultats obtinguts a estructures amb cel·la unitària no constant, s'extrau que els valors d'eficiència més alts s'aconsegueixen amb l'estructura amb contactes de tires, per al cas d'una bona passivació del contacte de base, amb una  $F_E$  d'aproximadament el 80 % i eficiències properes al 24 %. En cas de tenir una  $S_{c,base}$  alta, l'estructura híbrida i convencional (pitch constant i cel·la unitària no constant) són la millor opció amb prestacions similars, obtenint-se eficiències per sobre del 21 % per a una  $F_E$  aproximadament del 90 %.



## 4.6 Conclusions

De la definició de l'Àrea d'Influència Geomètrica de l'Emissor sorgeix el concepte Factor de Cobertura Geomètric de l'Emissor  $F_E(\%)$  que es defineix com la relació percentual normalitzada d'Àrea d'Influència Geomètrica de l'Emissor envers l'àrea total del plà  $XY$  de la regió posterior de la unitat mínima de simulació. L'objectiu principal, és millorar la  $F_E(\%)$  per tal d'incrementar **Eficiència**, amb valors de  $S_{c,base}$  alts, que s'ajusten al comportament real.

Existeixen dues filosofies per tal de millorar la  $F_E(\%)$ , la primera es basa en l'estructura unitària de cèl·lula solar constant (line-like, ring-like i estructures Large Emitter Coverage) i les altres en estructures unitàries de cèl·lula solar no constant.

Una idea bàsica per tal d'assolir una  $F_E(\%) > 50 \%$  és la de l'ús asimètric de les dimensions entre contactes base i emissor, de manera que l'emissor i el seu contacte és més gran que la regió BSF de la base i el seu contacte base. D'aquesta manera, s'incrementa la  $F_E(\%)$ . Un requeriment important, és tenir en compte que incrementar les dimensions dels contactes incideix sobre un decreixement de la  $V_{oc}$  pel que l'assimetria és realitza reduint el contacte base o de manera compensada reduint el contacte base i incrementant l'emissor de manera que és manté la relació òptima.

Dels diferents estudis presentats, pertanyents a ambdues filosofies, s'extreu associat al propi concepte de definició d'aquestes, la metodologia en la recerca d'assolir una  $F_E(\%) > 50 \%$ , per tal d'aconseguir una Eficiència  $\eta(\%)$  òptima.

Per a les estructures unitàries de cèl·lula solar constant, es cerca mitjaçant tècniques de disposició d'emissors confrontats a localitzacions específiques dins l'estructura geomètrica aconseguir una  $F_E(\%) > 50 \%$ , i per tant, incrementar el pes de l'emissor sobre la base, aconseguint eficiències de fins 21 % amb  $F_E$  de 90 % tant a estructures line-like com ring-like malgrat tenir valors de recombinació als contactes de base de  $S_{c,base} = 5 \cdot 10^6$  (cm/s)

Per contra, al cas de les estructures unitàries de cèl·lula solar no constant, en combinació amb l'increment del pitch entre contactes i en correlació amb l'increment del número d'emissors en relació a l'estructura unitària, ja sigui en el cas regular o híbrid o en forma de tires, s'aconsegueix apantallar la influència de la base i preponderar la contribució de l'emissor, expressat en un increment de l'**Eficiència**, especialment per a valors de  $S_{c,base}$  reals, aconseguint també eficiències de fins 21 % amb  $F_E$  de 90 % malgrat tenir valors de recombinació als contactes de base de  $S_{c,base} = 5 \cdot 10^6$  (cm/s).

## Capítol 5

# Estudi de l'estructura IBC real, efecte resistiu

### 5.1 Introducció

Als capítols anteriors s'han presentat diversos estudis de la cèl·lula IBC ideal de contactes puntuals i de l'estructura IBC ideal de geometries complexes. Un element comú és el concepte d'idealitat, des del punt de vista de la no presència dels efectes de la resistència sèrie, on la seva influència es centra principalment en una ostensible disminució del **Fill Factor**, i per tant, l'afectació sobre l'**Eficiència**. Els resultats obtinguts a les cèl·lules IBC ideals s'han de prendre com les fites ideals no assolibles a les cèl·lules IBC reals.

Al capítol 1 s'ha presentat la influència en la característica tensió - corrent (I-V) de la resistència sèrie  $R_s$  i de la resistència en paral·lel  $R_{sh}$  de la cèl·lula solar.

La resistència sèrie  $R_s$  ve donada per la pròpia resistivitat del semiconductor, per la resistivitat de les interconnexions i contactes, i per la resistència en paral·lel  $R_{sh}$ , que ve donada per defectes a la regió de buidament i pel corrent de pèrdues al voltant dels marges físics del dispositiu [2].

El circuit elèctric equivalent és com el de la figura 5.1, presentada al capítol 1, representat a l'equació (5.1):

$$I = I_o \cdot (e^{\frac{q \cdot V - I \cdot R_s}{K \cdot T}} - 1) + I_{SRH} \cdot (e^{\frac{q \cdot V - I \cdot R_s}{2 \cdot K \cdot T}} - 1) + \frac{V - I \cdot R_s}{R_{sh}} - I_L \quad (5.1)$$

Considerant que els efectes de la pròpia resistivitat del substrate semiconductor, ja estant assumits a la simulació de la cèl·lula IBC ideal, són les contribucions de les

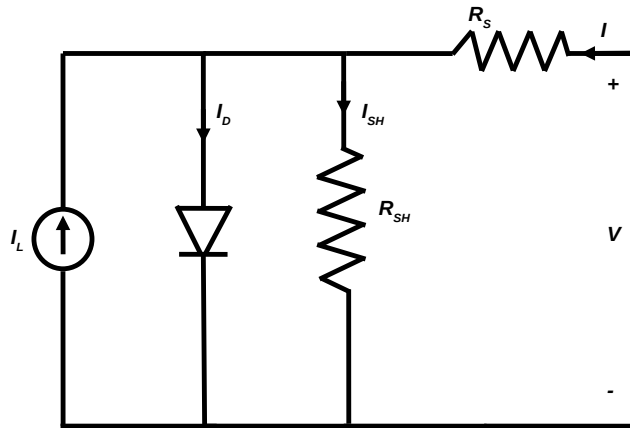


FIGURA 5.1: Circuit elèctric equivalent

interconnexions (fingers i bus metàl·lics) i contactes metall-semiconductor a la resistència sèrie els efectes que s'han de introduir als estudis de la cèl·lula IBC real. La  $R_{sh}$  es suposarà a les simulacions que no té influència sobre el dispositiu i, per tant, pren el valor d'infinít.

A aquest capítol es presenta l'estudi de l'estructura IBC real, partint d'algunes de les estructures de cèl·lula IBC ideal presentades a capítols anteriors, considerant l'efecte de la resistència sèrie deguda a la resistència de contacte i les interconnexions.

## 5.2 L'efecte de la resistència sèrie

Tal com es mostra a la Figura 5.2 la resistència sèrie  $R_s$  engloba el terme degut a la pròpia resistivitat del semiconductor a les regions de base ( $R_b$ ) i emissor ( $R_e$ ), la resistivitat de les interconnexions (fingers i busbars) i la resistència dels propis contactes.

Deixant de banda les pèrdues òhmiques inherents al propi semiconductor ( $R_b$  i  $R_e$ ) que ja es tenen en compte a les simulacions, la resistència sèrie  $R_s$  deguda al grid de metal·lització i resistències de contacte es modelitza afegint una resistència lumped a la unitat mínima de simulació.

Per tant, a una primera part del capítol es farà un estudi del càlcul anàlitic de la resistència sèrie deguda als grid metàl·lic, fingers i busbars col·lectors, i de la resistència dels contactes de base i emissor, per tal d'incloure aquestes pèrdues òhmiques a la simulació.

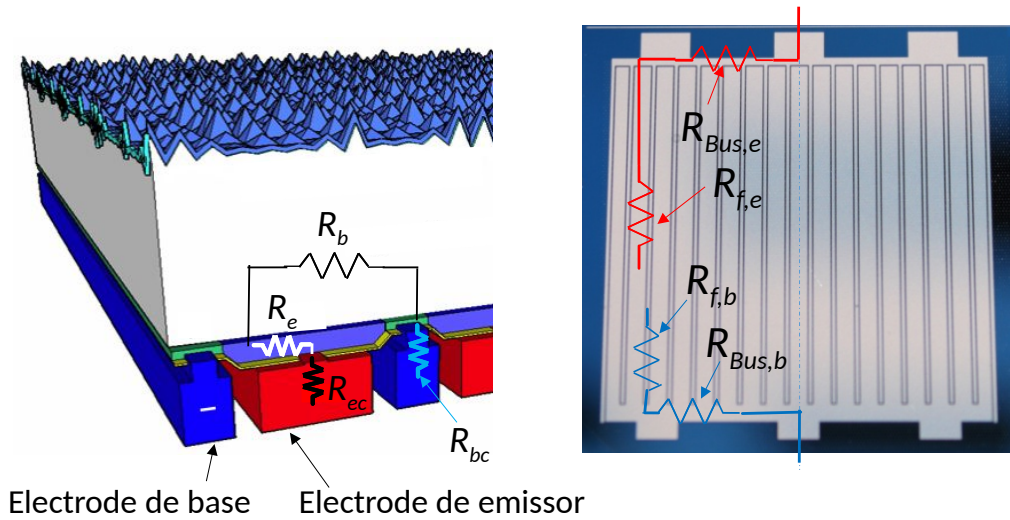


FIGURA 5.2: Diferents termes resistius que influeixen en la resistència sèrie del dispositiu.  $R_b$  i  $R_e$  ja es tenen en compte inherentment a les simulacions.

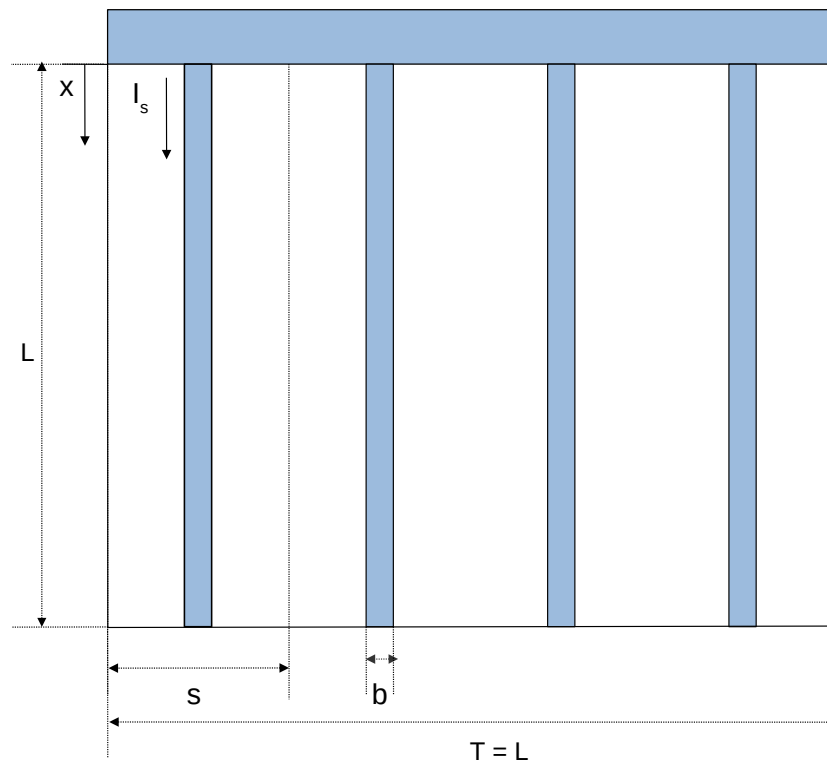


FIGURA 5.3: Cèl·lula IBC amb la línia d'interconnexió i els fingers.

### 5.2.1 L'efecte resistiu dels fingers

L'efecte resistiu dels fingers es pot analitzar fent un estudi de pèrdues de potència tal com es reporta a [38], i ve determinat primàriament per la pròpia resistivitat del metall,  $\rho_m$  i el gruix del finger  $h_m$ . Aquests dos aspectes determinen la resistència de quadre del finger metàl·lic (5.2):

$$R_{sh} = \frac{\rho_m}{h_m} \quad (5.2)$$

Considerant l'àrea d'influència del finger com la regió que comprén l'amplada de la secció  $s$ , la longitud del finger  $L$  i considerant l'àrea del finger com la la regió que comprén l'amplada del finger  $b$  i la longitud del finger  $L$ , es defineix el factor de metal·lització del finger (5.3), equivalent a la proporció de metall respecte a l'àrea de la secció, com:

$$f_m = \frac{b}{s} \quad (5.3)$$

Per tal de definir la resistència deguda a l'efecte dels fingers, s'ha de definir primerament la distribució de la corrent als fingers (5.4).

$$I_s(x=0) = I_s = \frac{I}{n} \text{ amb } n = \frac{T}{s} \text{ (\#seccions)} \quad (5.4)$$

Amb una distribució triangular de corrent (5.5):

$$I_s(x) = I_s \cdot \left[1 - \frac{x}{L}\right] \quad (5.5)$$

L'expressió del diferencial de potència dissipada associada a l'àrea d'influència del finger, amb distribució de la corrent als fingers (5.6) dividida per seccions  $n = \frac{T}{s}$ :

$$dP_{fs}(x) = I_s^2(x) \cdot dR_f = I_s^2(x) \cdot R_{sh} \cdot \frac{dx}{b} = I_s^2 \cdot \left[1 - \frac{x}{L}\right] \cdot \frac{R_{sh}}{b} \cdot dx \quad (5.6)$$

Integrant l'equació (5.6) per a obtenir l'expressió de potència (5.7):

$$\begin{aligned} P_{fs}(x) &= \int_0^L dP(x)_{fs} dx = \int_0^L I_s^2 \cdot \left[1 - \frac{x}{L}\right] \cdot \frac{R_{sh}}{b} dx = \frac{I_s^2 \cdot R_{sh} \cdot L}{3 \cdot b} \Rightarrow \\ &\left(I_s = \frac{I}{n} = \frac{I}{\frac{T}{s}}\right) \Rightarrow \frac{I^2 \cdot s^2 \cdot R_{sh} \cdot L}{3 \cdot T^2 \cdot b} = I^2 \cdot \frac{s^2 \cdot R_{sh} \cdot L}{3 \cdot T^2 \cdot b} \end{aligned} \quad (5.7)$$

La potència dissipada al finger (5.8) es defineix:

$$P_f(x) = n \cdot P_{fs}(x) = \frac{T}{s} \cdot I^2 \cdot \frac{s^2 \cdot R_{sh} \cdot L}{3 \cdot T^2 \cdot b} = I^2 \cdot \frac{s \cdot R_{sh} \cdot L}{3 \cdot T \cdot b} = I^2 \cdot \frac{R_{sh} \cdot L}{3 \cdot T \cdot \frac{b}{s}} = I^2 \cdot \frac{R_{sh} \cdot L}{3 \cdot T \cdot f_m} = I^2 \cdot R_f \quad (5.8)$$

Definint la resistència (5.9):

$$R_f = \frac{R_{sh} \cdot L}{3 \cdot T \cdot f_m} (\Omega) \quad (5.9)$$

La resistència per àrea ( $\Omega \cdot \text{cm}^2$ ) deguda a l'efecte dels fingers (5.10) es presenta com:

$$r_f = \frac{R_{sh} \cdot L}{3 \cdot T \cdot f_m} \cdot (T \cdot L) = \frac{R_{sh}}{3 \cdot f_m} \cdot L^2 (\Omega \cdot \text{cm}^2) \quad (5.10)$$

L'expressió final de 5.10 mostra una relació de dependència amb la resistència de quadre del finger i una relació de dependència inversa amb el factor de metal·lització del finger, amb una constant de correcció, i amb el factor proporcional de la longitud del finger al quadrat.

De les expressions de la resistència de quadre del finger (5.2), prenent com a element invariable la resistivitat pròpia del metall  $\rho_m$ , característica de cada tipus de metall, són la longitud del finger, al quadrat  $L^2$ , o el gruix del finger  $h_m$  els que donen la possibilitat de reduir la resistència de quadre del finger mitjançant una disminució de la longitud del finger o un increment del gruix del finger, conjugant-ho amb el marc tecnològic i estructural. Idealment, la tendència a un gruix del finger amb un increment del gruix portaria a una resistència de quadre del finger a un valor quasi-nul, i per tant, a un valor aproximat a zero de la resistència deguda a l'efecte dels fingers. Malgrat tot, un increment de gruix d'alumini podria provocar problemes tecnològics com pèrdues d'adherència del metall. Per tant, apareix un compromís entre posar un gruix alt i aconseguir que tecnològicament sigui possible fabricar la cèl·lula.

A més, posar gruixos alts de metall pot ser complicat amb les tècniques de fabricació d'evaporació o sputtering.

Un altra manera de reduir la resistència deguda a l'efecte dels fingers seria incrementar el factor de metal·lització del finger, incrementant l'amplada del finger. Amb les cèl·lules IBC és possible pel fet de que es troben els contactes, fingers i busbars a la regió posterior, i en conseqüència, no s'incrementa l'ombregat de l'espectre solar.

## 5.2.2 L'efecte resistiu del busbar

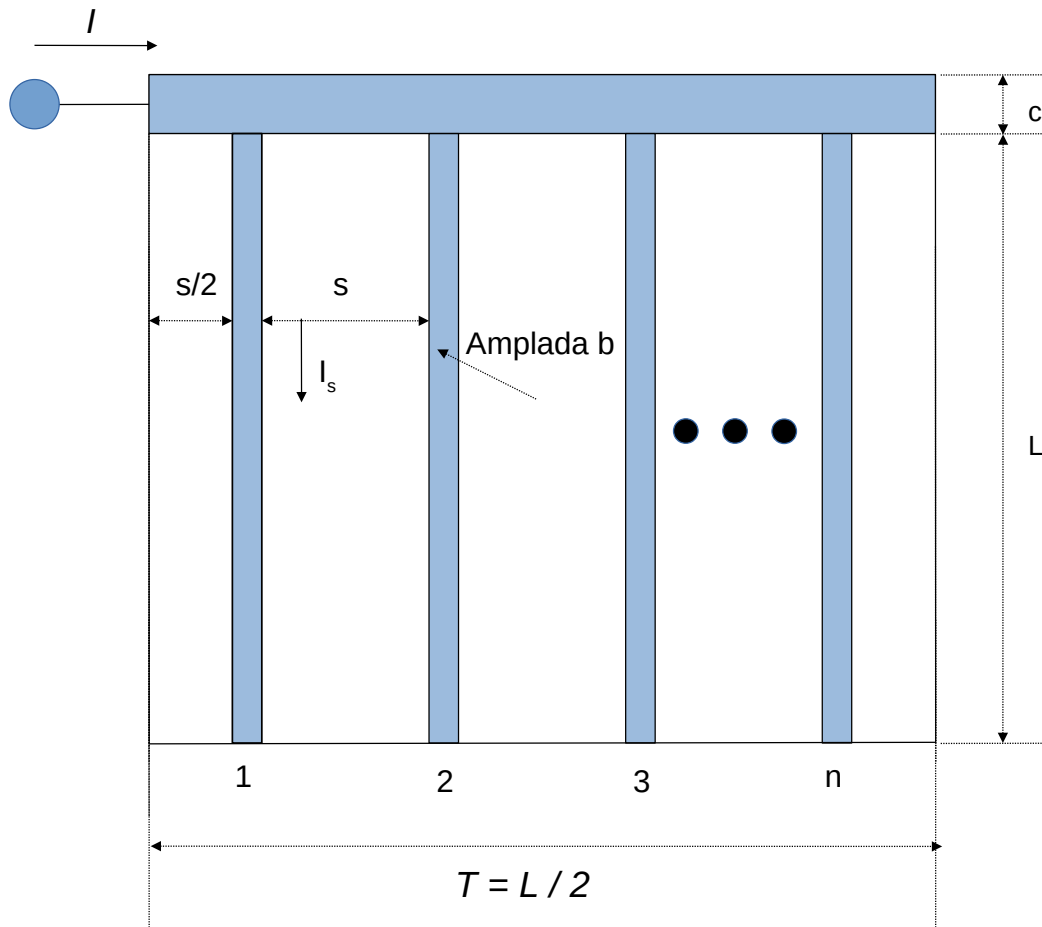


FIGURA 5.4: Cèl·lula IBC amb les línies d'interconnexió accedint al busbar pel punt mig.

De manera similar a l'efecte resistiu del finger, es defineix la contribució a l'efecte resistiu del busbar 5.4. Suposant una cèl·lula quadrada d' amplada/llargada  $L$  on s'accedeix al busbar pel punt mig, el corrent derivat per a secció, considerant el nombre de dits de la secció  $n$ , serà (5.11):

$$I_S = \frac{I}{n} \quad (5.11)$$

La potència dissipada als busbars (5.12) (5.13):

$$P_{Bus} = (n \cdot I_S)^2 \cdot \left(\frac{R_{sh}}{c}\right) \cdot \left(\frac{s}{2}\right) + ((n-1) \cdot I_S)^2 \left(\frac{R_{sh}}{c}\right) \cdot s + \dots + (I_S)^2 \cdot \left(\frac{R_{sh}}{c}\right) \cdot s \quad (5.12)$$

$$P_{Bus} = \left(\frac{R_{sh} \cdot s}{c}\right) \cdot I_s^2 \cdot \left[\frac{n^2}{2} + \sum_{i=1}^{n-1} i^2\right] \quad (5.13)$$

Aproximant la sèrie numèrica (5.14):

$$\sum_{i=1}^{n-1} i^2 = \frac{(n-1) \cdot n \cdot (2 \cdot n - 1)}{6} = n \cdot \left[\frac{2 \cdot n^2 - 3 \cdot n + 1}{6}\right] \quad (5.14)$$

I al cas particular de  $n \rightarrow \infty$  (5.15):

$$\sum_{i=1}^{n \rightarrow \infty} i^2 = n^2 \cdot \left[\frac{2 \cdot n - 3}{6}\right] \simeq n^2 \cdot \left(\frac{n}{3}\right) \quad (5.15)$$

Aplicant l'aproximació a (5.13):

$$P_{Bus} = \left(\frac{R_{sh} \cdot s}{c}\right) \cdot I_s^2 \cdot n^2 \cdot \left[\frac{n}{3}\right] = \left(\frac{R_{sh} \cdot s}{c}\right) \cdot (I_s \cdot n)^2 \cdot \left[\frac{n}{3}\right] = \left(\frac{R_{sh} \cdot s}{c}\right) \cdot I^2 \cdot \left[\frac{n}{3}\right] = R_{Bus} \cdot I^2 \quad (5.16)$$

On la resistència ( $\Omega$ ) deguda a l'efecte del busbar (5.17):

$$R_{Bus} = \left(\frac{R_{sh} \cdot s \cdot n}{3 \cdot c}\right) \rightarrow (T = s \cdot n) \rightarrow \left(\frac{R_{sh} \cdot T}{3 \cdot c}\right), (\Omega) \quad (5.17)$$

Finalment, la resistència per àrea ( $\Omega \cdot cm^2$ ) deguda a l'efecte del busbar (5.18) es defineix com:

$$r_{Bus} = \left(\frac{R_{sh} \cdot T}{3 \cdot c}\right) \cdot T \cdot L (\Omega \cdot cm^2) \quad (5.18)$$

De l'expressió de la resistència deguda a l'efecte del busbar, destaca la dependència amb la resistència de quadre del busbar metàl·lic i la relació de dependència inversa amb l'amplada del busbar  $c$  i una dependència proporcional a l'amplada de la secció al quadrat i de la longitud de la cèl·lula solar.

A banda de la longitud de la cèl·lula  $L$ , en el què la seva reducció permet minvar la resistència deguda a l'efecte del busbar, un paràmetre què permet una reducció és el gruix del busbar  $h_{mb}$ , incidint a la resistència de quadre del busbar metàl·lic  $R_{sh}$ . Incrementant el gruix del busbar, dins els marges tecnològics possibles, es redueix la



resistència deguda a l'efecte del busbar  $R_{Bus}$ . Una altra manera directa, a fi de reduir la resistència deguda a l'efecte del busbar, és per mitjà d'un increment de l'amplada del busbar  $c$ , o bé incrementar els punts d'accés al busbar, disminuint en conseqüència el valor de  $T$ . La inclusió d'un doble nivell de metal·lització tal com s'explica al següent punt, permet augmentar sensiblement el valor de  $c$  i facilita que es pugui contactar la totalitat del busbar externament.

### 5.2.3 El doble nivell de metal·lització i la resistència sèrie

Al capítol 3, *L'estructura IBC ideal de contactes puntuals*, s'ha presentat el doble nivell de metal·lització, cercant una reducció de les pèrdues òhmiques als dits metàl·lics i a les línies d'interconnexió modulars.

Tal com es mostra a la figura 5.5 una estructura amb doble nivell de metal·lització disposa d'una primera capa de metall, en el nostre cas d'alumini, que segueix un patró interdigitat sobre la regió posterior de la cèl·lula solar. Aquest primer nivell transporta el corrent extret de les regions de base i de emissor. Adicionalment, hi ha una segona capa de metal·lització també d'alumini, aïllada parcialment de la primera mitjançant un material aïllant (per exemple polyimide), destinada a transportar el corrent extret del primer nivell. Aquest segon nivell permet també la interconnexió modular (pads de gran amplada) en el què s'entèn com connexió coplanar [39], on tot el busbar del segon nivell és connectat al substrat d'interconnexió.

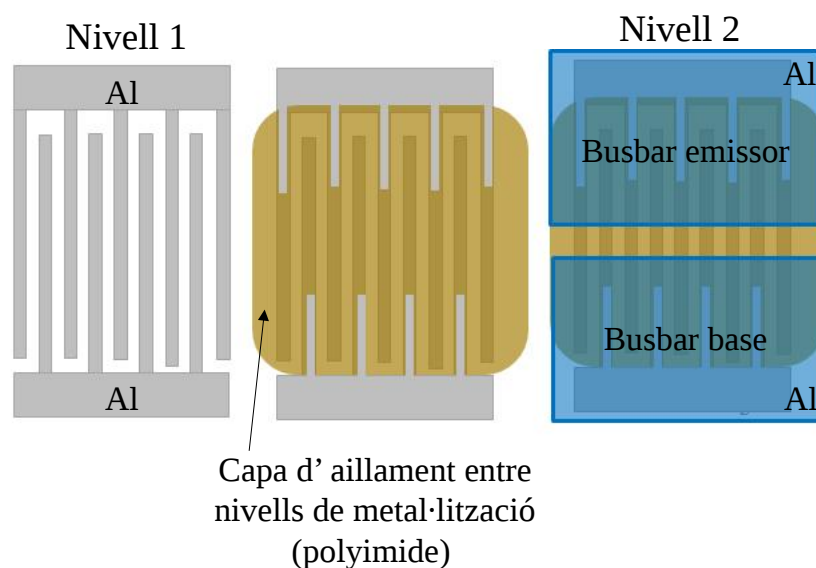


FIGURA 5.5: Doble nivell de metal·lització a una cèl·lula IBC.

Un avantatge del doble nivell de metal·lització, és permetre el disseny de grans seccions transversals de metall o pads, per a totes dues polaritats (veure figura ), cobrint completament un nivell de metal·lització, reduint les pèrdues òhmiques.

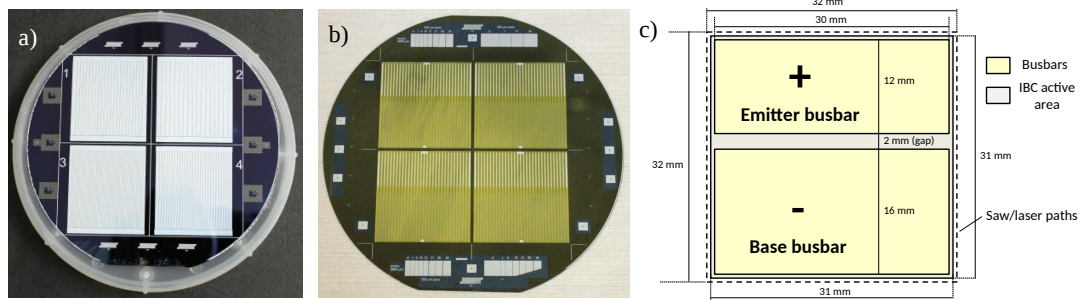


FIGURA 5.6: a) Imatge mostrant el primer nivell de metal·lització a 4 cèl·lules IBC fabricades a una oblea de silici. b) Imatge mostrant el segon nivell de metal·lització a aquestes 4 cèl·lules. c) Esquema mostrant les mesures dels busbars (pads) del segon nivell de metal·lització.

A les cèl·lules amb doble nivell de metal·lització es redueix la incidència de les pèrdues resistives associades a busbars i fingers (5.19):

$$r_{Bus} \cong 0, L_{ef} = \frac{L}{2} \quad (5.19)$$

On  $L_{ef}$  és el la mida efectiva del finger (veure Figura 5.7) que s'ha de posar a l'expressió per a calcular  $r_f$ . Així, utilitzant un doble nivell de metal·lització, es cancel·len les pèrdues al busbar i minimitzen les dels fingers, reduint a la meitat de la longitud de la cèl·lula (suposant que els pads siguin idèntics). El concepte de doble nivell de metal·lització es farà servir més endavant als capítols 6 i 7.

## 5.3 Estudi de la resistència sèrie $R_s$ a les estructures amb cèl·lula unitària no constant amb pitch constant

### 5.3.1 Introducció

Fent ús de les geometries d'estructures amb cèl·lula unitària no constant tipus  $p$  amb pitch constant amb un nivell de metal·lització ( $80 \mu\text{m}$  de gap entre els dits metàl·lics), presentades al capítol 4, *L'estructura IBC ideal de geometries complexes*, s'estudia l'efecte de la resistència sèrie  $R_s$  d'acord a diverses casuístiques.

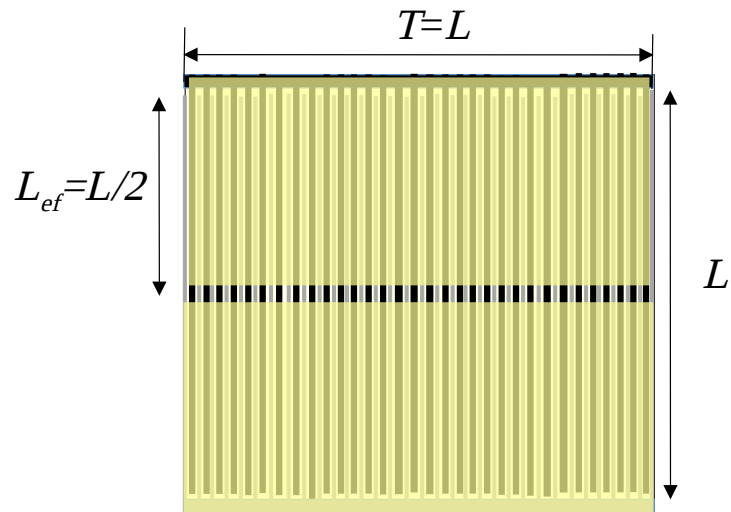


FIGURA 5.7: Reducció de la longitud efectiva dels fingers quan es fa servir un doble nivell de metal·lització.

### 5.3.2 Definició de les estructures de geometries IBC de contactes puntuals

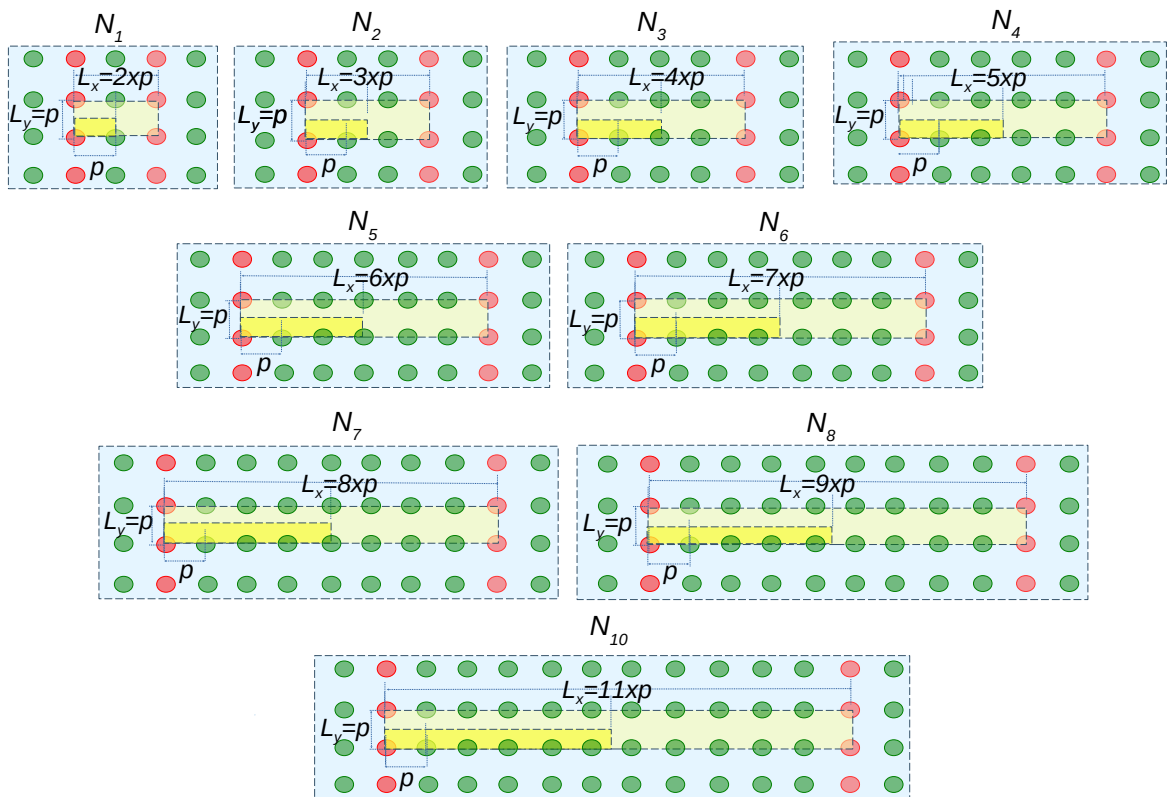


FIGURA 5.8: Cèl·lules unitàries i unitats mínimes de simulació per a les geometries de l'estructura IBC de contactes puntuals amb cèl·lula unitària no constant. En vermell contacte base i en verd contactes d'emissor.

Les geometries IBC es mostren a la figura 5.8, amb la definició de les unitats mínimes de simulació.

La resistivitat de referència és  $2.2 (\Omega \cdot cm)$ , equivalent a una concentració de bor de  $6.5 \cdot 10^{15} (cm^{-3})$ , amb una concentració de fòsfor de  $10^{20} (cm^{-3})$  i un factor de profunditat del perfil gaussià a l'emissor de  $0.48 \mu m$ .

### 5.3.2.1 Càlcul de la resistència sèrie

En aquest estudi es plantejen diversos escenaris donant lloc a diferents valors de la resistència sèrie  $R_s$ .

Considerant una estructura unitària  $pitch = 250 (\mu m)$  amb una resistivitat de l'Alumini  $R_{Al,\rho} = 2.80 \cdot 10^{-6} (\Omega \cdot cm)$ , gruix de l'Alumini a fingers i busbars  $h_{Al} = 4 (\mu m)$ , longitud de la cèl·lula  $L = 3 (cm)$ , semiamplada  $T = 1.5 (cm)$ , resistència de quadre de l'Alumini  $R_{sh,Al} = 7.10^{-3} (\Omega/sq)$ , àrea de la cèl·lula  $A = 9 (cm^2)$ , Gap metàl·lic  $80 (\mu m)$ , longitud  $L_{base,met} = 85 (\mu m)$ , radi dels contactes  $r = 0.003 (cm)$  i amplada del busbar  $c = 0.2 (cm)$ , es defineixen els següents paràmetres:

- Factor de metal·lització dels fingers de base (5.20) i contacte emissor (5.21), amb  $Nn$  definint el número d'emissors i  $L_{emitter,met} = (85, 210, 335, 460, 585, 710, 835, 960, 1085, 1210) (\mu m)$ .

$$f_{m,b} = \frac{L_{base,met}}{pitch + (Nn - 1) \cdot \frac{pitch}{2}} = \frac{85}{250 + (Nn - 1) \cdot \frac{250}{2}} \quad (5.20)$$

$$f_{m,e} = \frac{L_{emitter,met}}{pitch + (Nn - 1) \cdot \frac{pitch}{2}} = \frac{L_{emitter,met}}{250 + (Nn - 1) \cdot \frac{250}{2}} \quad (5.21)$$

- Resistència deguda a l'efecte resistiu dels fingers (5.22) (5.23) (5.24).

$$r_{fb} = \frac{R_{sh,Al}}{3 \cdot f_{m,b}} \cdot Area_{cel} = \frac{7.10^{-3}}{3 \cdot f_{m,b}} \cdot 9 (\Omega \cdot cm^2) \quad (5.22)$$

$$r_{fe} = \frac{R_{sh,Al}}{3 \cdot f_{m,e}} \cdot Area_{cel} = \frac{7.10^{-3}}{3 \cdot f_{m,e}} \cdot 9 (\Omega \cdot cm^2) \quad (5.23)$$

$$r_f = r_{fb} + r_{fe} (\Omega \cdot cm^2) \quad (5.24)$$

- Resistència deguda a l'efecte resistiu dels busbars (5.25).

$$r_{Bus} = 2 \cdot R_{sh,Al} \cdot T^2 \cdot \frac{L}{3 \cdot c} = 2 \cdot 7.0 \times 10^{-3} \cdot 1.5^2 \cdot \frac{3}{3 \cdot 0.2} = 0.16 \text{ } (\Omega \cdot \text{cm}^2) \quad (5.25)$$

- Resistència considerant la contribució dels efectes resistius dels fingers i busbars normalitzada a l'àrea de la unitat mínima de simulació (5.26). Aquesta resistència, en unitats de  $\Omega$ , s'afegeix en sèrie com a element concentrat a les simulacions, considerat l'àrea de la unitat mínima de simulació  $A_{sim}$

$$R_{met} = \frac{r_f + r_{Bus}}{A_{sim}} \text{ } (\Omega) \quad (5.26)$$

- Resistència sèrie total (5.28) associada a la unitat mínima de simulació, considerant la contribució dels efectes resistius dels fingers i busbars, i la resistència als contacte base  $R_{bc}$  ( $\Omega$ ) i emissor  $R_{ec}$  ( $\Omega$ ) (5.27), partint de la resistència de contacte  $r_{cont,b}$  ( $\Omega \cdot \text{cm}^2$ ) i  $r_{cont,e}$  ( $\Omega \cdot \text{cm}^2$ ) respectivament, amb  $Nn$  definint la geometria, el factor de divisió  $\frac{1}{4}$  corresponent al quart del contacte de la unitat mínima de simulació i  $r$  el radi del contacte. La resistència total  $R_s$  s'afegeix amb sèrie en les simulacions formant part de la unitat mínima de simulació.

$$R_{bc} = \frac{r_{cont,b}}{\frac{\pi \cdot r^2}{4}}, \quad R_{ec} = \frac{r_{cont,e}}{\frac{Nn \cdot \pi \cdot r^2}{4}} \quad (5.27)$$

$$R_s = R_{met} + R_{bc} + R_{ec} \text{ } (\Omega) \quad (5.28)$$

Es presenten diversos escenaris depenent de la resistència als contacte base  $R_{bc}$  ( $\Omega$ ) i emissor  $R_{ec}$  ( $\Omega$ ). Comparant amb els valors assolits idealment, es caracteritza la incidència de la resistència sèrie sobre el **Fill Factor** i l'**Eficiència**.

### 5.3.3 Resultats

La definició de l'entorn de simulació per a les diverses estructures geomètriques, representades per les unitats mínimes de simulació, considerant la resistència sèrie  $R_s$ , implica una redefinició conceptual.

Es defineix un dispositiu representatiu de la unitat mínima de simulació en condicions ideals, **SolarCell**, amb l'afegit d'una resistència **lumped** que prototipa els diversos valors de la resistència sèrie  $R_s$ .

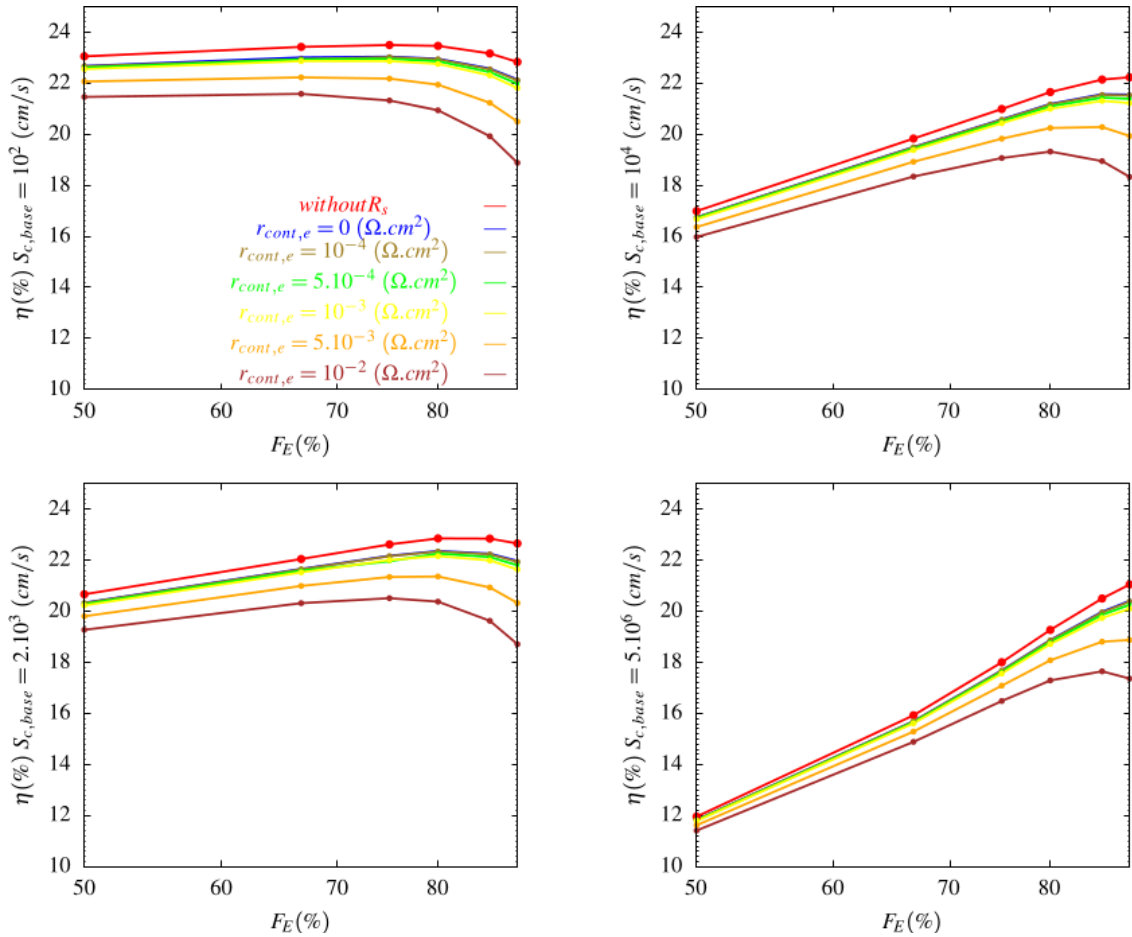


FIGURA 5.9: Evolució de l'Eficiència (%),  $\eta(\%)$ , vs.  $F_E$  per a diferents  $S_{c,base}$  ( $10^2$ ,  $2 \cdot 10^3$ ,  $10^4$ ,  $5 \cdot 10^6$ ) ( $cm/s$ ), amb  $r_{cont,b} = 10^{-5}$  ( $\Omega \cdot cm^2$ ) i  $r_{cont,e}$  ( $10^{-4}$ ,  $5 \cdot 10^{-4}$ ,  $10^{-3}$ ,  $5 \cdot 10^{-3}$ ,  $10^{-2}$ ) ( $\Omega \cdot cm^2$ ) i el cas de  $r_{cont,b} = 0$  ( $\Omega \cdot cm^2$ ) i  $r_{cont,e} = 0$  ( $\Omega \cdot cm^2$ ).

L'estudi es centra en l'efecte de la resistència sèrie  $R_s$  a les geometries IBC tipus  $p$  de contactes puntuals amb únic nivell de metal·lització (amb un gap  $80 \mu m$  intermetàl·lic) sobre l'Eficiència  $\eta(\%)$ .

La figura 5.9 mostra la influència de  $R_s$ , parametrizant les corbes respecte a  $r_{cont}$ , amb l'eficiència final en funció de  $F_E$ . Les gràfiques s'han obtingut per diferents valors de  $S_{c,base}$  representatius. S'ha considerat sempre a l'estudi que la resistència de contacte de base és molt petita ( $r_{cont,b} = 10^{-5} \Omega \cdot cm^2$ ) ja que és ben conegut que l'alumini contacta molt bé amb el silici  $p^+$  [40].

Genèricament, la resistència sèrie provoca una degradació en el **Fill Factor** i en conseqüència de l'Eficiència  $\eta(\%)$ . L'estrategia d'increment de la distància entre contactes, de les dimensions de la unitat mínima de simulació i número d'emissors, cercant un increment del  $F_E(\%)$ , pateix com a contrapartida, en condicions reals, un increment de la resistència sèrie. Per tant, el compromís de disseny òptim ha de cercar minimitzar la resistència sèrie en correlació amb un  $F_E(\%)$  el màxim possible. És important recalcar,

per una part, que resistències de contacte  $r_{cont,e}$  inferiors a  $10^{-3} \Omega \cdot cm^2$  [41], té poc efecte en el rendiment fotovoltaic independentment de  $F_E$  i  $S_{c,base}$ . Considerant el dopat  $n^+$  que es pot esperar als contactes d'emissor làser ( $N_D > 10^{19} cm^{-3}$ ), la resistència de contacte  $r_{cont,e}$ , estarà molt per sota del valor comentat [40], de manera que l'efecte de la resistència de contacte sigui menyspreable a les prestacions del dispositiu. D'altra banda, les pèrdues d'eficiència degudes a  $R_{met}$ , si es compara la corba sense  $R_s$  i la de  $r_{cont} = 0 \Omega cm^2$ , és en el cas pitjor ( $F_E$  grans) inferiors al 0.5%. Per tant, un gruix de Al de  $4 \mu m$  amb la geometria de fingers i busbars detallat a l'apartat 5.2.3 permet assolir eficiències al voltant del 21 % en el cas pitjor de passivació del contacte de base ( $S_{c,base} = 5 \cdot 10^6 cm/s$ ), i per sobre del 23 % amb contactes de base molt ben passivats ( $S_{c,base} = 100 cm/s$ ).

## 5.4 Estudi de la resistència sèrie $R_s$ a estructures IBC de contactes en tires

### 5.4.1 Introducció

Anteriorment, al capítol 4 de *L'estructura IBC ideal de geometries complexes*, s'han presentat aquests tipus d'estructures caracteritzades per la disposició dels contactes en forma de tires, amb una regió emissor fortament dopada  $n^{++}$  sobre una regió  $n^+$ . D'igual manera, la disposició en forma de tires permet una generació de la unitat mínima de simulació en 2D. En tot aquest estudi es suposarà un nivell de metal·lització.

Aprofitant l'estudi de les geometries sense la resistència sèrie  $R_s$  es planteja la influència de la resistència sèrie sobre l'*Eficiència (%)*.

#### 5.4.1.1 Càlcul de la resistència sèrie

Amb condicions similars a l'estudi de les geometries puntuals, es plantejen diversos escenaris que porten a diferents valors de la resistència sèrie  $R_s$ .

Es considera una estructura unitària  $pitch = 250 (\mu m)$  amb una resistivitat de l'Alumini  $R_{Al,\rho} = 2.80 \cdot 10^{-6} (\Omega \cdot cm)$ , gruix de l'Alumini  $h_{Al} = 4 (\mu m)$ , longitud de la cèl·lula  $L = 3 (cm)$ ,  $T = 1.5 (cm)$ , resistència de quadre de l'Alumini  $R_{sh,Al} = 7.10^{-3} (\Omega \cdot cm)$ , àrea de la cèl·lula  $A = 9 (cm^2)$ , Gap metàl·lic  $80 (\mu m)$ , longitud  $L_{base,met} = 85 (\mu m)$ , semi-amplada del contacte rectangular  $r_{contacte} = 0.003 (cm)$  i amplada del busbar  $c = 0.2 (cm)$ , es defineixen els paràmetres:

- Factor de metal·lització del contacte base (5.29) i contacte emissor (5.30), amb  $Nn_{2D}$  definint el pes dimensional de la regió emissor  $L_{emitter,met} = (85, 210, 335, 460, 585, 710, 835, 960, 1085, 1210)$  ( $\mu m$ ).

$$f_{m,b} = \frac{L_{base,met}}{pitch + (Nn_{2D} - 1) \cdot \frac{pitch}{2}} = \frac{85}{250 + (Nn_{2D} - 1) \cdot \frac{250}{2}} \quad (5.29)$$

$$f_{m,e} = \frac{L_{emitter,met}}{pitch + (Nn_{2D} - 1) \cdot \frac{pitch}{2}} = \frac{L_{emitter,met}}{250 + (Nn_{2D} - 1) \cdot \frac{250}{2}} \quad (5.30)$$

- Resistència deguda a l'efecte resistiu dels fingers (5.31) (5.32) (5.33).

$$r_{fb} = \frac{R_{sh,Al}}{3 \cdot f_{m,b}} \cdot Area_{cel} = \frac{7 \cdot 10^{-3}}{3 \cdot f_{m,b}} \cdot 9 \quad (\Omega \cdot cm^2) \quad (5.31)$$

$$r_{fe} = \frac{R_{sh,Al}}{3 \cdot f_{m,e}} \cdot Area_{cel} = \frac{7 \cdot 10^{-3}}{3 \cdot f_{m,e}} \cdot 9 \quad (\Omega \cdot cm^2) \quad (5.32)$$

$$r_f = r_{fb} + r_{fe} \quad (\Omega \cdot cm^2) \quad (5.33)$$

- Resistència deguda a l'efecte resistiu dels busbars (5.34).

$$r_{Bus} = 2 \cdot R_{sh,Al} \cdot T^2 \cdot \frac{L}{3 \cdot c} = 2 \cdot 7 \cdot 10^{-3} \cdot 1.5^2 \cdot \frac{3}{3 \cdot 0.2} = 0.1575 \quad (\Omega \cdot cm^2) \quad (5.34)$$

- Resistència considerant la contribució dels efectes resistius dels fingers i busbars normalitzada a l'àrea de la unitat mínima de simulació (5.35).

$$R_{met} = \frac{r_f + r_{Bus}}{Area_{sim}} \quad (\Omega) \quad (5.35)$$

- Resistència sèrie total (5.37) associada a la unitat mínima de simulació, considerant la contribució dels efectes resistius dels fingers i busbars i la resistència al contacte base  $R_{bc}$  ( $\Omega$ ) i emissor  $R_{ec}$  ( $\Omega$ ) (5.36), partint de la resistència de contacte  $r_{cont,b}$  ( $\Omega \cdot cm^2$ ) i  $r_{cont,e}$  ( $\Omega \cdot cm^2$ ), amb el factor  $pitch/2$  representatiu de l'amplada de la unitat mínima de simulació, el factor de conversió de  $\mu m \rightarrow cm$  ( $10^{-4}$ ),  $r_c$  la semiampçada del contacte en forma de tires..

$$R_{bc} = \frac{r_{cont,b}}{\frac{pitch}{2} \cdot 10^{-4} \cdot r_c} \quad R_{ec} = \frac{r_{cont,e}}{\frac{pitch}{2} \cdot 10^{-4} \cdot r_c} \quad (5.36)$$

$$R_s = R_{met} + R_{bc} + R_{ec} \quad (\Omega) \quad (5.37)$$



## 5.4.2 Resultats

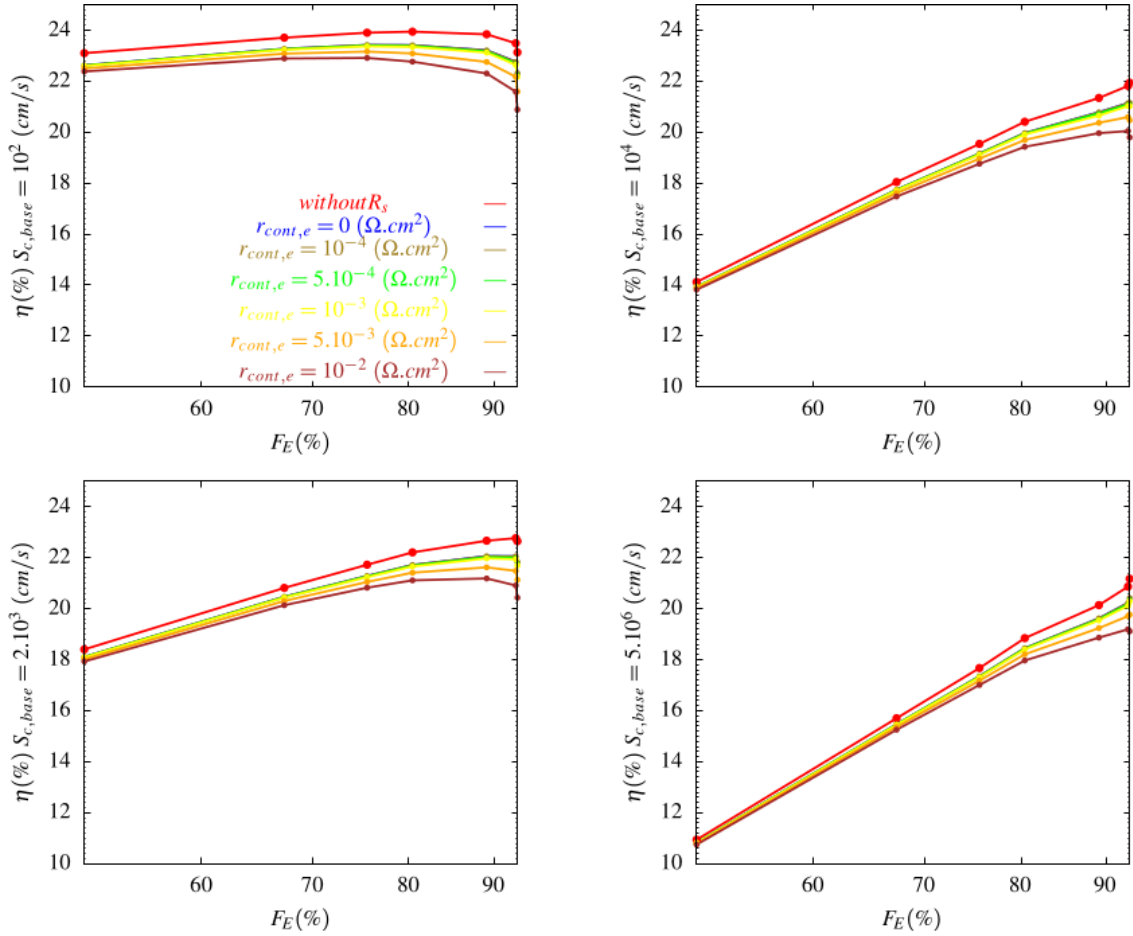


FIGURA 5.10: Evolució de l'**Eficiència (%)**,  $\eta(\%)$ , vs.  $F_E$  per a diferents  $S_{c,base}$  ( $10^2$ ,  $2 \cdot 10^3$ ,  $10^4$ ,  $5 \cdot 10^6$ ) ( $cm/s$ ), amb  $r_{cont,b} = 10^{-5}$  ( $\Omega \cdot cm^2$ ) i  $r_{cont,e}$  ( $10^{-4}$ ,  $5 \cdot 10^{-4}$ ,  $10^{-3}$ ,  $5 \cdot 10^{-3}$ ,  $10^{-2}$ ) ( $\Omega \cdot cm^2$ ) i el cas de  $r_{cont,b} = 0$  ( $\Omega \cdot cm^2$ ) i  $r_{cont,e} = 0$  ( $\Omega \cdot cm^2$ ).

Establint una comparativa amb les geometries de contactes puntuals a les cèl·lules IBC, hi ha una incidència menor respecte a l'efecte de la resistència sèrie  $R_s$  amb escenaris equivalents.

La diferència principal es troba en la pròpia idiosincràsia dels contactes, on en el cas dels contactes en forma de tires la contribució a la resistència sèrie és més petita, especialment quant la  $R_s$  es dominada per la resistència de contacte. En el cas de tenir una bona  $r_{cont}$ , tant als contactes d'emissor com a la base, els resultats són bastant semblants a estructures de contactes puntuals com de tires. En aquest cas,  $R_s$  es deguda a  $R_{met}$ , que és idèntica a les dues estructures.

## 5.5 Conclusions

La resistència sèrie provoca una degradació en el **Fill Factor** i en conseqüència de l'**Eficiència**  $\eta(\%)$ . L'estratègia d'increment de la distància entre contactes, de les dimensions de la unitat mínima de simulació i número d'emissors, cercant un increment del  $F_E(\%)$ , pateix com a contrapartida, en condicions reals, un increment de la resistència sèrie.

Al cas dels contactes en forma de tires la contribució a la resistència sèrie és més petita, quan aquesta es dominada per la resistència de contacte, degut a que les dimensions dels contactes són més grans que a les estructures IBC equivalents de contactes puntuals, es redueix l'efecte resistiu.

L'efecte resistiu esdevé en general un factor de degradació sobre l'**Eficiència**  $\eta(\%)$ . Malgrat tot, el seu efecte és poc rellevant en el cas de tenir bons contactes (baixa  $r_{cont} < 10^{-3} \text{ cm}^2$ ) i es dissenya correctament el grid metàl·lic amb gruixos de Al superiors a  $4 \mu\text{m}$ , sempre que sigui possible tecnològicament, a cèl·lules IBC de  $3 \text{ cm} \times 3 \text{ cm}$  amb un únic nivell de metal·lització, treballant a  $1 \text{ sun}$  (sense concentració).

## Capítol 6

# Estudi de les cèl·lules IBC Black Silicon

### 6.1 Introducció

L'objectiu central d'assolir valors més alts d'*Eficiència* a les cèl·lules IBC d'altres prestacions, per mitjà de l'increment de la transmissió òptica de la superfície frontal a la regió semiconductor, porta a presentar les cèl·lules IBC amb *black-silicon (b-Si)*, i passivació per mitjà del recobriment del *black-silicon (b-Si)* amb la tècnica de dipòsit de *ALD* (Atomic Layer deposition) amb capes ultrafines d'alumina  $Al_2O_3$  [42] i [27].

S'aconsegueix una baixa reflectivitat superficial per mitjà d'un nanotexturitzat de *black-silicon (b-Si)* disposat a la superfície frontal, on bona part del rang de longituds d'ona de l'espectre solar [300 – 1200] (nm), susceptible de ser absorbit a la regió semiconductor del dispositiu, es transmés degut a que el nanotexturitzat captura l'espectre solar, els fotons incidents, amb un ampli rang d'angles d'incidència a la superfície frontal, on experimenten reflexions internes succesives fins a transmetre's dins la regió del semiconductor. La idea és conduir l'espectre solar incident a la superfície frontal dins del nanotexturitzat, amb dimensions d'ordes de magnitud del nanometre, per tal de que les reflexions siguin dins d'aquestes nanoestructures i finalment capturar el fotó. Una analogia funcional seria el de la bola a la màquina recreativa del mil·lí que pateix múltiples rebots, però en aquest cas el que interessa és que les reflexions portin a una transmissió del fotó dins el gruix del semiconductor.

El principal inconvenient de l'ús d'aquestes estructures de nanotexturitzat és la incidència sobre la passivació de la superfície frontal, la qual pateix un increment de la recombinació superficial. Es on sorgeix la necessitat d'afegir el recobriment del nanotexturitzat de

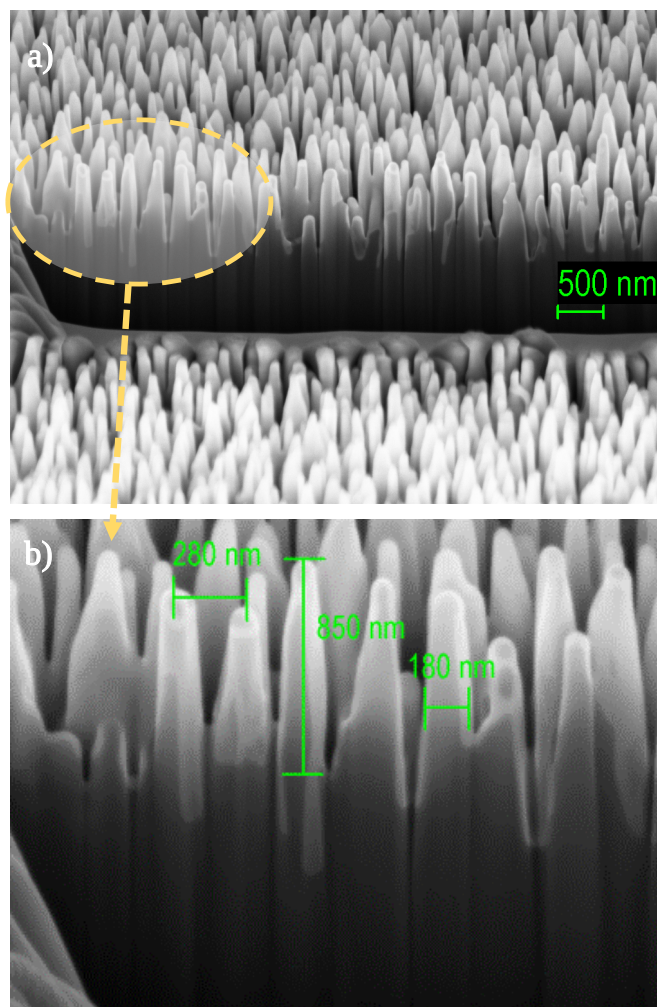


FIGURA 6.1: a) Imatge SEM (Scanning Electron Microscope) d'una superfície nano-texturitzada amb black silicon (b-Si). b) Ampliació mostrant les mides típiques de les nanoestructures. Figura adaptada de [27] © 2015 John Wiley & Sons Ltd.

**black-silicon (b-Si)** per mitjà *ALD*  $Al_2O_3$ , el qual proporciona una bona passivació superficial i d'aquesta manera es redueix l'efecte de la recombinació a la superfície frontal.

La figura 6.1 mostra l'aspecte del nanotexturitzat de **black-silicon (b-Si)** amb el recobriments de *ALD*  $Al_2O_3$ . Sense el recobriments de *ALD*  $Al_2O_3$ , la recombinació a la superfície frontal on es troben disposades les nanoestructures s'incrementa de manera notoria per l'increment de la relació d'aspecte de les nanoestructures. Aleshores, es per mitjà del recobriments del **black-silicon (b-Si)** amb alumina de *ALD* que s'aconsegueix millorar la passivació i reduir la recombinació a la superfície frontal.

A les seccions d'aquest capítol, es presenta l'estudi d'estructures IBC tipus *n* i tipus *p* a diverses variants geomètriques, depenents de l'amplada de la regió d'emissor, considerant l'efecte de la resistència sèrie  $R_s$  a diversos escenaris amb diferents gruixos de l'alumini al grid metàl·lic. Els resultats de la simulació han servit de base per al disseny i fabricació

de cèl·lules b-Si IBC al laboratori de sala blanca del grupo MNT en col·laboració amb la Universitat de Aalto a Finlàndia. Fruït d'aquesta col·laboració, s'ha aconseguit el record d'eficiència combinant una estructura IBC amb b-Si assolint a un 22.1 % d'eficiència [42] i [27]. A la seva vegada, també s'han intregat 9 cèl·lules b-Si en sèrie a un mínimòdul Black Silicon [39], el disseny dels quals s'ha fet atenent a les simulacions realitzades a aquest capítol. A aquest capítol es mostraran els resultats simulats conjuntament amb resultats experimentals. Adicionalment, la comparació de resultats experimentals i simulats ha permès l'ajustament d'alguns paràmetres de la simulació com és la reflectància a la part posterior de les zones no metal·litzades comparant la EQE mesurada i la simulada.

### 6.1.0.1 L'espectre ponderat AM1.5G

Al capítol 2, *Consideracions teòriques i pràctiques sobre l'entorn de simulació*, es defineix la font d'il·luminació espectral a partir de mesures experimentals de laboratori de l'espectre d'il·luminació incident sobre el semiconductor, espectre ponderat, on la transmissió òptica de la capa de *black-silicon (b-Si)*, nanotexturitzat amb el recobriment de *ALD Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>*, es inclosa en el càlcul de la il·luminació espectral.

Es fixa la interfície superficial frontal del dispositiu amb coeficient de transmissió extern de 1 i el coeficient de reflexió intern de 1. Als càlculs de l'Eficiència Quàntica Externa (EQE) cal tenir en compte que amb l'espectre ponderat el que es calcula realment es l'Eficiència Quàntica Interna (IQE) (6.2) i l'Eficiència Quàntica Externa (EQE) (6.1) es calcula tal com:

$$EQE = EQE_{ponderat} \cdot (1 - R(\lambda)) \quad (6.1)$$

$$IQE = EQE_{ponderat} \quad (6.2)$$

Fent ús de l'espectre ponderat amb el coeficient de transmissió extern ajustat i amb la definició del coeficient de reflexió a la superfície frontal i la posterior s'aplica el model de resolució òptic, Raytracing, en conjunció amb el coeficient d'absorció es generen els càlculs de resolució òptica.

L'espectre ponderat d'il·luminació incident sobre el semiconductor estalvia els càlculs a la transmissió òptica de la capa de texturació i passivació frontal, així com la complexitat de l'estructura a simular, especialment el nanotexturitzat a la superfície frontal.

La reflectància,  $R(\%)$ , aprofitant les prestacions òptimes del *Black silicon*, especialment en el rang entre  $[300-1000] \text{ nm}$  on la reflectància,  $R(\%)$ , a la capa del **black-silicon (b-Si)** amb el recobriments de *ALD Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>* és quasi-nul·la i es transmet  $\simeq (100 \%)$ . Fora d'aquest rang de longituds d'ona el creixement de la reflectància és molt pronunciat, com a conseqüència dels rebots dels fotons a la superfície del darrere del dispositiu i que surten finalment per la superfície frontal, pel que es redueix considerablement l'absorció de fotons al gruix de la regió semiconductor del dispositiu.

## 6.2 Definició de les cèl·lules IBC black-silicon

La figura 6.2 presenta genèricament una tipologia d'estructura d'unitat mínima de simulació d'una cèl·lula IBC black-silicon tipus  $p$  o  $n$  amb visió forntal i de planta. Adicionalment, la imatge 6.3 mostra una oblea procesada de 4 polzades per darrere (mostrant els electrodes interdigitats) i pel davant (superfície amb b-Si) [27].

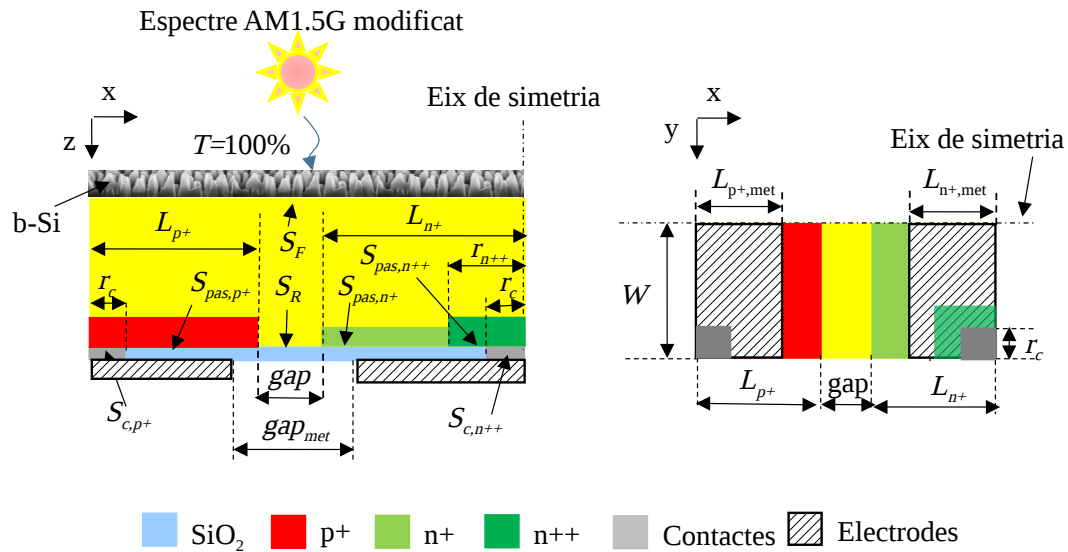


FIGURA 6.2: Estructura 3D simulada a substrats de silici tipus  $p$  o  $n$ . Tall transversal (esquerra) i vista inferior (dreta).

Les taules 6.I i 6.II presenten les condicions de simulació, els valors de paràmetres físics i geomètrics aplicats sobre les estructures tipus  $p$  i tipus  $n$  respectivament, veure figura 6.3, que permetran caracteritzar el seu comportament.

Les cèl·lules solars b-Si IBC de Black Silicon s'han simulat fent ús de la cèl·lula d'unitat simulada. Els efectes a les vores no s'han considerat a les simulacions, per tal de simplificar la complexitat d'aquestes. A més la cèl·lula d'unitat simulada es simplifica de la següent manera:

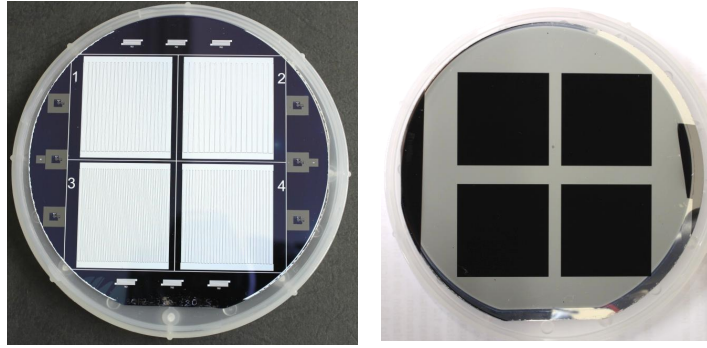


FIGURA 6.3: Imatges d'una oblea procesada de 4 polzades per darrere (mostrant els electrodes interdigitats) i pel davant (superfície amb b-Si). Cada oblea fabricada conté quatre cèl·lules solars de  $9 \text{ cm}^2$  amb diferent  $F_E$ , 67 %, 75 %, 80 % i 86 %. Figura adaptada de [27] © 2015 John Wiley & Sons Ltd

TAULA 6.I: Condicions de simulació a les estructures tipus  $p$ .

<b>Resistivity (<math>\Omega \cdot \text{cm}</math>)</b>	2.2
<b>Dopat de Base</b>	$5.7 \cdot 10^{15} \text{ (cm}^{-3}\text{)}$
<b>W(width)</b>	$125 \mu\text{m}$
<b><math>p^+</math> (Perfil Gaussià)</b>	$L_p^+ = 105 \mu\text{m}$ $Peak \text{ Doping } N_A^+ \Rightarrow 10^{19} \text{ (cm}^{-3}\text{)}$ $Depth = 5 \mu\text{m}$ $Depth \text{ Factor} = 1.83 \mu\text{m}$ $R_{sh,p}^+ \cong 40 \text{ (}\Omega/\text{square)}$
<b><math>n^+</math> (Perfil Gaussià)</b>	$L_{n \rightarrow N[1::8]}^+ = (105, 230, 355, 480, 605, 730, 855, 980) \mu\text{m}$ $Peak \text{ Doping } N_D^+ \Rightarrow 10^{19} \text{ (cm}^{-3}\text{)}$ $Depth = 1.4 \mu\text{m}$ $Depth \text{ Factor} = 0.51 \mu\text{m}$ $R_{sh,n}^+ \cong 110 \text{ (}\Omega/\text{square)}$
<b><math>n^{++}</math> (Perfil Gaussià)</b>	$r_n^{++} = 60 \mu\text{m}$ $Peak \text{ Doping } N_D^{++} \Rightarrow 7 \cdot 10^{19} \text{ (cm}^{-3}\text{)}$ $Depth = 2.5 \mu\text{m}$ $Depth \text{ Factor} = 0.81 \mu\text{m}$ $R_{sh,n}^{++} \cong 12 \text{ (}\Omega/\text{square)}$
<b>gap (<math>p^+ \iff n^+</math>)</b>	$40 \mu\text{m}$
<b>gap<sub>met</sub></b>	$80 \mu\text{m}$
<b>Square contacts</b>	$r_c = 25 \mu\text{m}$
<b><math>S_F</math></b>	$16 \text{ (cm/s)}$
<b><math>S_R</math></b>	$10 \text{ (cm/s)}$
<b><math>S_{c,p+}</math></b>	$5 \cdot 10^6 \text{ (cm/s)}$
<b><math>S_{c,n++}</math></b>	$5 \cdot 10^6 \text{ (cm/s)}$
<b><math>S_{pas,p+}</math></b>	$5 \cdot 10^4 \text{ (cm/s)}$
<b><math>S_{pas,n+}</math></b>	$10^3 \text{ (cm/s)}$
<b><math>S_{pas,n++}</math></b>	$7 \cdot 10^3 \text{ (cm/s)}$

- (i) Tots els contactes tenen forma quadrada amb una amplada de  $2 \cdot r_c = 60 \mu\text{m}$  i col·locat al mig de la base i els dits emissors amb un pitch vertical  $p$  (amplada

TAULA 6.II: Condicions de simulació a les estructures tipus  $n$ .

<b>Resistivity (<math>\Omega \cdot \text{cm}</math>)</b>	1.5
<b>Dopat de Base</b>	$3.23 \cdot 10^{15} \text{ (cm}^{-3}\text{)}$
<b>W(width)</b>	$125 \mu\text{m}$
<b><math>n^+</math> (Perfil Gaussià)</b>	$L_n^+ = 105 \mu\text{m}$ Peak Doping $N_D^+ \Rightarrow 10^{19} \text{ (cm}^{-3}\text{)}$ Depth = $1.4 \mu\text{m}$ Depth Factor = $0.49 \mu\text{m}$ $R_{sh,n}^+ \cong 110 \text{ (}\Omega/\text{square)}$
<b><math>n^{++}</math> (Perfil Gaussià)</b>	$r_n^{++} = 60 \mu\text{m}$ Peak Doping $N_D^{++} \Rightarrow 7 \cdot 10^{19} \text{ (cm}^{-3}\text{)}$ Depth = $2.5 \mu\text{m}$ Depth Factor = $0.79 \mu\text{m}$ $R_{sh,n}^{++} \cong 12 \text{ (}\Omega/\text{square)}$
<b><math>p^+</math> (Perfil Gaussià)</b>	$L_{p \rightarrow N[1::8]}^+ = (105, 230, 355, 480, 605, 730, 855, 980) \mu\text{m}$ Peak Doping $N_A^+ \Rightarrow 10^{19} \text{ (cm}^{-3}\text{)}$ Depth = $5 \mu\text{m}$ Depth Factor = $1.76 \mu\text{m}$ $R_{sh,p}^+ \cong 40 \text{ (}\Omega/\text{square)}$
<b>gap (<math>p^+ \iff n^+</math>)</b>	$40 \mu\text{m}$
<b>gap<sub>met</sub></b>	$80 \mu\text{m}$
<b>Square contacts</b>	$r_c = 25 \mu\text{m}$
<b><math>S_F</math></b>	$7 \text{ (cm/s)}$
<b><math>S_R</math></b>	$10 \text{ (cm/s)}$
<b><math>S_{c,p+}</math></b>	$5 \cdot 10^6 \text{ (cm/s)}$
<b><math>S_{c,n++}</math></b>	$5 \cdot 10^6 \text{ (cm/s)}$
<b><math>S_{pas,p+}</math></b>	$5 \cdot 10^4 \text{ (cm/s)}$
<b><math>S_{pas,n+}</math></b>	$10^3 \text{ (cm/s)}$
<b><math>S_{pas,n++}</math></b>	$7 \cdot 10^3 \text{ (cm/s)}$

vertical de la cèl·lula unitària de simulació  $p = 2 \cdot W$ , de  $250 \mu\text{m}$ , a una estructura de contactada localment.

- (ii) El gruix de l'oblea es fixa a  $275 \mu\text{m}$ .
- (iii)  $S_F$  i  $S_R$  són les velocitats efectives de recombinació superficial a les superfícies no dopades davantera i posterior, respectivament.  $S_F$  s'ajusta als valors de **b-Si** tipus  $p$ ,  $S_F = 16 \text{ cm/s}$ , i **b-Si** tipus  $n$ ,  $S_F = 7 \text{ cm/s}$  [27], mentre que  $S_R$  es fixa a  $10 \text{ cm/s}$ .
- (iv) Les difusions de bor  $p^+$  i fòsfor  $n^+$  es defineixen de manera semblant a una tira amb amplades  $L_p^+$  i  $L_n^+$ , respectivament, amb un gap entre ells de  $40 \mu\text{m}$ . A més, s'inclou un regió  $n^{++}$  quadrada dopada amb fòsfor que envolta el seu corresponent contacte amb una amplada de  $2 \cdot r_n^{++} = 120 \mu\text{m}$ . Variant  $L_p^+$  o  $L_n^+$  a partir d'un valor mínim de  $105 \mu\text{m}$ , (105, 230, 355, 480, 605, 730, 855, 980)  $\mu\text{m}$ . Els diferents



valors d'amplada d'emissor es parametritzen fent servir el paràmetre  $N_n$  des d'un valor 1 fins a 8 que es corresponen a les amplades de  $105 \mu m$  fins a  $980 \mu m$ , respectivament.

El factor de cobertura d'emissor  $F_E$  es pot calcular atenent al paràmetre  $L_{emitter}$ , que és igual a  $L_n^+$  o alternativament  $L_p^+$  a oblees tipus  $p$  i  $n$  respectivament, segons:

$$F_E = \frac{L_{emitter} + \frac{gap}{2}}{L_n^+ + L_p^+ + gap} \quad (6.3)$$

Es considera dopat gaussià per a les regions  $n^+$ ,  $n^{++}$  i  $p^+$  amb unes profunditats de junció de  $1.4 \mu m$ ,  $2.5 \mu m$ , and  $5 \mu m$ , respectivament.

A més, el pic de dopatge  $N_s$  per a difusions de  $n^+$  i  $p^+$  es fixa a  $10^{19} cm^{-3}$  a ambdós casos i  $7 \cdot 10^{19} cm^{-3}$  per a la regió  $n^{++}$ . La velocitat de recombinació superficial a  $n^+$ ,  $n^{++}$  a regions no contactades  $S_{pas,n^+}$  i  $S_{pas,n^{++}}$  es fixa a  $10^3 cm/s$  i  $7 \cdot 10^3 cm/s$ , respectivament.  $S_{pas,p^+}$  s'estableix a  $5 \cdot 10^4 cm/s$ . La velocitat recombinació superficial als contactes es fixa a ( $S_{c,p^+} = S_{c,n^+} = 5 \cdot 10^6 cm/s$ ). Aquests paràmetres són conseqüents amb els perfils de dopats esperables als dispositius fabricats, tal com es justifica a la referència [27].

### 6.2.1 Càlcul de la reflectància a la regió posterior

La reflectància de la regió posterior s'expressa d'acord els valors de la reflectivitat dels materials de les regions localitzades a la superfície posterior. A l'hora de determinar la reflectància posterior, especialment a les zones no metal·litzades, es fa un ajustament de les simulacions amb una mesura de EQE certificada al laboratori extern de **Fraunhofer ISE** d'una cèl·lula **IBC b-Si**.

Per a aquest ajustament s'utilitza una cèl·lula IBC b-Si tipus  $p$   $F_E = 80 \%$  amb resultats experimentals. S'ajusta primerament la velocitat de recombinació a la superfície frontal  $S_F$  a un rang de longituds d'ona al **UV-Vis** on la EQE és pràcticament constant. El millor ajustament s'aconsegueix amb una  $S_F$  lleugerament per sobre al valor nominal, passant de  $16 cm/s$  a  $40 cm/s$  a aquesta cèl·lula en qüestió. Un cop ajustada la  $S_F$ , s'ajusta la reflectància posterior de les superfícies no metal·litzades a  $85 \%$  per a aconseguir el millor ajustament al **IR** proper al voltant de  $1100 nm$ . Per a aquestes longituds d'ona la EQE és molt sensible a la reflectància posterior.

Prenent en consideració els contactes base i emissor amb costats de  $r_c = 25 \mu m$ , Gap metàl·lic de  $80 \mu m$ , Gap entre la regió  $L_p^+$  i  $L_n^+$ , la reflectivitat de les zones metal·litzades fixada a  $96 \%$ , la reflectivitat de les zones no metal·litzades amb un valor de

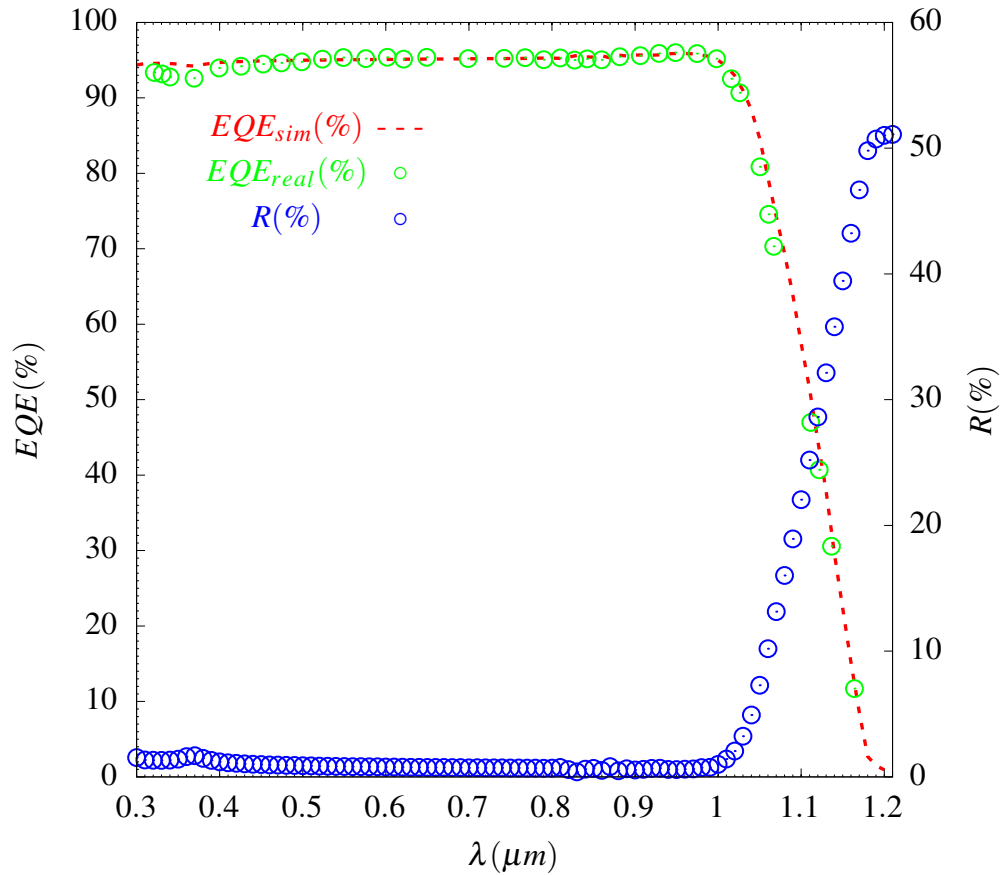


FIGURA 6.4:  $EQE(\lambda)$  simulada i real, amb la reflectància  $R(\lambda)$ . S'ha inclòs també al gràfic la reflectància  $R(\lambda)$  mesurada a la cèl·lula b-Si.

85 %, fent ús de l'ajustament, i la reflectivitat als contactes de 86 %, per a l'estructura unitària de cèl·lula solar de la geometria  $Nn$  s'expressa el percentatge d'àrea de les zones no metal·litzades (6.4) com, on  $A_{Nn}$  representa l'àrea de la cèl·lula unitària:

$$A(\%)_{Nn, \text{nomet}} = \left( \frac{\text{gap}_{\text{met}} \cdot 2 \cdot W}{A_{Nn}} \right) \cdot 100 = \left( \frac{80 \mu\text{m} \cdot 250 \mu\text{m}}{A_{Nn}} \right) \cdot 100 \quad (6.4)$$

El percentatge de l'àrea contactada (6.5) de la geometria  $Nn$ , on l'àrea total de les fraccions dels contactes inclosos a l'estructura unitària de cèl·lula solar equival a  $\frac{n+1}{2}$  contactes:

$$A(\%)_{Nn, \text{cont}} = 4 \cdot \left( \frac{A_{Nn, \text{contactes}}}{A_{Nn}} \right) \cdot 100 = 4 \cdot \left( \frac{r_c^2}{A_{Nn}} \right) \cdot 100 = 4 \cdot \left( \frac{25^2}{A_{Nn}} \right) \cdot 100 \quad (6.5)$$

El percentatge d'àrea de les zones metal·litzades de la geometria  $Nn$  (6.6):

$$A(\%)_{Nn, Met} = 100 - (A(\%)_{Nn, noMet} + A(\%)_{Nn, cont}) \quad (6.6)$$

La reflectància de la geometria  $Nn$  (6.7) es calcula com:

$$R(\%)_{Nn} = R(\%)_{met} \cdot \left( \frac{A(\%)_{Nn, Met}}{100} \right) + R(\%)_{noMet} \cdot \left( \frac{A(\%)_{Nn, noMet}}{100} \right) + R(\%)_{cont} \cdot \left( \frac{A(\%)_{Nn, cont}}{100} \right) \quad (6.7)$$

### 6.2.1.1 Càlcul de la resistència sèrie

Considerant com a base una estructura unitària  $pitch = 250$  ( $\mu m$ ) amb una resistivitat de quadre de l'Alumini  $R_{Al} = 2.80 \cdot 10^{-6}$  ( $\Omega \cdot cm$ ), gruix de l'Alumini variable  $h_{Al} = (2, 4, \infty)$  ( $\mu m$ ), longitud de la cèl·lula quadrada amb costat  $L = 3$  ( $cm$ ), semiamplada dels bubars (contactats al punt mig)  $T = 1.5$  ( $cm$ ), resistència de quadre de l'Alumini  $R_{sh} = (1.4 \cdot 10^{-2}, 7 \cdot 10^{-3}, 0)$  ( $\Omega/sh$ ), àrea de la cèl·lula  $A = 9$  ( $cm^2$ ), Gap metàl·lic  $80$  ( $\mu m$ ), semi-amplada del contacte rectangular  $r_c = 0.0025$  ( $cm$ ) i amplada del busbar  $c = 0.2$  ( $cm$ ),  $L_{base, met} = 85$   $\mu m$  es defineixen els paràmetres:

- Factors de metal·lització del contacte base (6.8) i contacte emissor (6.9)  $f_{m,b}$  i  $f_{m,e}$  respectivament, calculats segons:

$$f_{m,b} = \frac{L_p^+ - \left( \frac{gap_{met} - gap}{2} \right)}{L_p^+ + L_n^+ + gap} = \frac{L_p^+ - 20}{L_p^+ + L_n^+ + gap} \quad (6.8)$$

$$f_{m,e} = \frac{L_n^+ - \left( \frac{gap_{met} - gap}{2} \right)}{L_p^+ + L_n^+ + gap} = \frac{L_n^+ - 20}{L_p^+ + L_n^+ + gap} \quad (6.9)$$

On els paràmetres s'han calculat en micres i s'ha considerat un substrat tipus  $p$ . Pel cas de substrats tipus  $n$ , s'ha de reemplaçar  $L_p^+$  i  $L_n^+$  al numerador pel paràmetres  $L_n^+$  i  $L_p^+$  respectivament.

- Resistència deguda a l'efecte resistiu dels fingers (6.12), contribució respecte al contacte base (6.10) i contacte emissor (6.9).

$$r_{fb} = \frac{R_{sh}}{3 \cdot f_{m,b}} \cdot L^2 = \frac{R_{sh}}{3 \cdot f_{m,b}} \cdot 9 \text{ } (\Omega \cdot cm^2) \quad (6.10)$$

$$r_{fe} = \frac{R_{sh}}{3 \cdot f_{m,e}} \cdot L^2 = \frac{R_{sh}}{3 \cdot f_{m,e}} \cdot 9 \text{ } (\Omega \cdot cm^2) \quad (6.11)$$

$$r_f = r_{fb} + r_{fe} \quad (\Omega \cdot cm^2) \quad (6.12)$$

- Resistència deguda a l'efecte resistiu dels busbars (6.13).

$$r_{busbar} = 2 \cdot R_{sh} \cdot T^2 \cdot \frac{L}{3 \cdot c} = 2 \cdot R_{sh} \cdot 1.5^2 \cdot \frac{3}{3 \cdot 0.2} = 0,1575 \quad (\Omega \cdot cm^2) \quad (6.13)$$

- Resistència considerant la contribució dels efectes resistius dels fingers i busbars normalitzada a l'àrea de la unitat mínima de simulació (6.14).

$$R_{met} = \frac{r_f + r_{busbar}}{Area_{unitat,sim}} \quad (\Omega) \quad (6.14)$$

On  $Area_{unitat,sim}$  és l'àrea de la unitat mínima de simulació de valor:

$$Area_{unitat,sim} = W \cdot (L_p^+ + L_n^+ + gap) \quad (6.15)$$

- Resistència sèrie total (6.17) associada a la unitat mínima de simulació, considerant la contribució dels efectes resistius dels fingers i busbars, normalitzada a l'àrea de la unitat mínima de simulació, resistència als contacte base  $R_{bc}$  ( $\Omega$ ) i emissor  $R_{ec}$  ( $\Omega$ ) (6.16), partint de la resistència de contacte  $r_{cont,b}$  ( $\Omega \cdot cm^2$ ) i  $r_{cont,e}$  ( $\Omega \cdot cm^2$ ), on el factor de divisió  $\frac{1}{4}$  corresponent al quart del contacte de la unitat mínima de simulació i  $r_c$  que és la semiamplada del contacte quadrat. S'han fixat les resistències de contacte a la base i a l'emissor a  $10^{-5} \Omega \cdot cm^2$  atenent al alt dopat sota els contactes:

$$R_{bc} = \frac{r_{cont,b}}{\frac{r_c^2}{4}}, \quad R_{ec} = \frac{r_{cont,e}}{\frac{r_c^2}{4}} \quad (6.16)$$

$$R_T = R_{met} + R_{bc} + R_{ec} \quad (\Omega), \quad r_T = R_T \cdot Area_{unitat,sim} \quad (\Omega \cdot cm^2) \quad (6.17)$$

### 6.2.2 Resultats cèl·lules IBC Black Silicon

Considerant els paràmetres definits anteriorment, es presenten a la figura 6.5 els resultats de simulacions obtinguts per a les cèl·lules IBC black silicon tipus  $p$  i  $n$ , en combinació de mesures reals.

Les mesures reals es basen en 2 oblees, una de tipus  $p$  i una de tipus  $n$ . A cada oblea es defineixen quatre topologies de  $3 \text{ cm} \times 3 \text{ cm}$  amb un factor de cobertura d'emissor

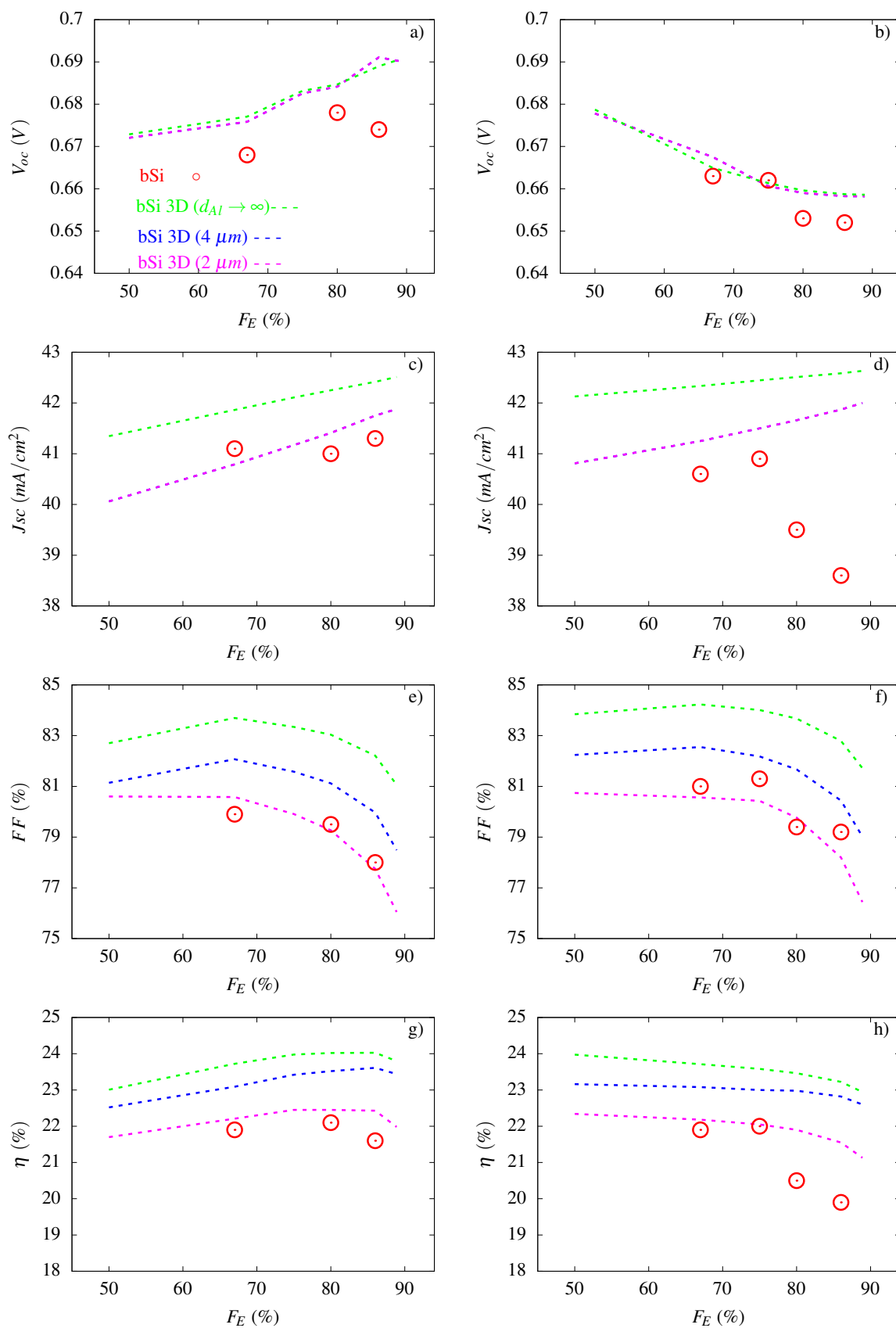


FIGURA 6.5: Evolució de la  $V_{oc}$  (V),  $J_{sc}$  ( $mA/cm^2$ ),  $FF$  (%), **Eficiència**  $\eta$  (%).

diferent,  $F_E$ , un rang de valors que va des del 67% fins al 86%, amb els busbars de base i emissor fora de les zones actives.

Les simulacions 3D d'estructures b-Si, es basen en dues topologies, una amb un gruix d'alumini finit de  $d_{Al} = (2, 4) \mu m$  al grid de metal·lització posterior i un cas ideal obviant les pèrdues òhmiques als dits metàl·lics i busbars,  $d_{Al} \rightarrow \infty$ .

Tal com s'ha presentat al capítol 4 d'estructures IBC ideals de geometries complexes, idealment quan més propers es troben la regió BSF de la base amb el seu contacte base i la regió de l'emissor amb el seu contacte emissor, la tendència dominant és la de l'efecte de les pèrdues recombinatives mentre que contràriament quan més llunyans es troben la regió BSF de la base amb el seu contacte base i la regió de l'emissor amb el seu contacte emissor les pèrdues dominants són les resistives de la base.

Respecte el concepte de la resistència sèrie, l'efecte negatiu sobre el  $FF$  (%) i l'**Eficiència** (%) és evident per a qualsevol valor de gruix d'alumini. Lògicament, per al cas de  $h_{Al}$  infinit, s'assoleixen els valors més alts d'eficiència. Malgrat tot, el millor ajust dels valors experimentals amb les simulacions, es correspon amb el gruix de  $h_{Al}$  de  $2 \mu m$ , valor molt semblant al real, utilitzat a les cèl·lules fabricades.

Els resultats de les simulacions de les estructures són les esperades, atenent a la qualitat de la passivació superficial esperable als nostres emissors, pitjor a emissors tipus  $p^+$  que a  $n^+$ :

D'una banda, a substrats tipus  $p$ , l'emissor  $n^+$  es troba relativament ben passivat, i tant  $V_{oc}$ ,  $J_{sc}$  i el rendiment milloren a mesura que  $F_E$  augmenta. Aquesta tendència amb  $F_E$  es deguda bàsicament a que s'apantalla l'efecte de tenir una passivació dolenta del contacte de base, que és el que en la literatura s'anomena electrical shadowing [36]. Lògicament per a valors alts de  $F_E$ , el  $FF$  comença a minvar notablement degut l'augment de les pèrdues resistives a la regió de base i als fingers col·lectors a aquesta regió ( $f_{m,b}$  petits). D'aquesta manera, sorgeix una situació de compromís entre pèrdues baixes per recombinació i pèrdues resistives reduïdes, donant lloc a un òptim al voltant de  $F_E = 85$  %. Les cèl·lules fabricades segueixen aquesta tendència present a les simulacions.

Per altra banda, a les simulacions a substrats tipus  $n$ , s'observa un pitjor comportament de  $V_{oc}$  i de l'**Eficiència**, quan  $F_E$  augmenta degut a la pitjor passivació dels emissors  $p^+$  de Bor, passivats amb òxid tèrmic ( $S_{pas,p^+}$  de  $5 \cdot 10^4$   $cm/s$  en front a  $S_{pas,n^+}$  de  $10^3$   $cm/s$ ). A aquest cas, les simulacions indiquen que la millor **Eficiència** s'aconseguiria per a  $F_E$  petits (aprox. 50%). És important remarcar que a les cèl·lules fabricades s'accentua aquest fenomen, inclòs la  $J_{sc}$  minva de manera inesperada per a  $F_E$  grans, allunyant-se dels valors simulats. Aquest fenomen podria indicar que durant la difusió de Bor per a

la creació de l'emissor  $p^+$ , s'ha pogut fer malbé la superfície/volum a aquesta regió, tal com suggereixen diversos estudis [43].

Els valors de  $J_{sc}$  experimentals difereixen dels  $J_{sc}$  teòrics (màx al voltant de  $43.5 \text{ mA/cm}^2$  per la lleugera caiguda al voltant de 5% en EQE amb longituds d'ona de 300 a 1000 nm. S'assoleixen valors experimentals de  $J_{sc}$  aproximadament de  $41 \text{ mA/cm}^2$ , a ambdós substrats, indicant una bona passivació superficial en conjunció amb temps de vida alts de portadors al volum del semiconductor.

Tal com es pot veure a la figura 6.5.a i 6.5.b, ajustant convenientment la  $F_E$  (%), s'aconsegueixen eficiències per sobre de 22.1 % ( $F_E = 80$  %) a tipus p i 22.0 % ( $F_E = 75$  %) a tipus n.

De les mesures extretes de les cèl·lules IBC fabricades tant en tipus p com n s'han aconseguit una eficiència fotovoltaica superior al 22 % amb cel·les de  $9 \text{ cm}^2$ . Considerant els valors obtinguts a les simulacions 3D, suggereixen que amb el futur es poden obtenir eficiències de fins al 24 % ajustant per exemple el gruix d'alúmina a  $4 \mu\text{m}$ , i/o fent servir un segon nivell de metal·lització.

Tanmateix, si es vol aprofitar al màxim les prestacions d'aquest tipus d'estructura, un gran temps de vida útil dels portadors minoritaris, excel·lent passivació superficial davantera i posterior, i la reflectància frontal baixa, són condicions obligatòries.

### 6.3 Estructures IBC per la fabricació de mínimòduls Black Silicon

A aquesta secció es simulen les cèl·lules IBC que s'utilitzaran per a implementar mínimòduls Black Silicon en col·laboració amb la *Universitat d'Aalto* i l'empresa finlandesa *Valoe*. Per a aquesta fabricació, s'ha optat per utilitzar oblees tipus  $n$  per les següents avantatges:

- (a) Els substrats tipus  $n$  permeten obtenir major grau de passivació superficial a la nanoestructuració Black Silicon amb cobertura d'alúmina per *ALD*. A més, aquest grau de passivació és de major estabilitat temporal [44].
- (b) Els substrats tipus  $n$  pateixen de la degradació induïda per llum (Light induced Damage LID) [45] que degrada el temps de vida en volum, i en conseqüència, les prestacions del dispositiu a llarg plaç. A substrats tipus  $p$  també es produeix aquest fenomen.

- (c) Es pot millorar la passivació dels emissors  $p^+$  de Bor mitjançant la passivació amb alúmina de ALD, tal com es mostra a la figura 6.6 [46] amb velocitats de recombinació  $S_{p+,pas}$  al voltant de  $200 \text{ cm/s}$  a diferència de les regions passivades amb òxid tèrmic amb un valor que, al cas millor, es troba al voltant de  $1500 \text{ cm/s}$ . Aquest últim valor, tal com es va estudiar a l'apartat precedent, pot ser molt pitjor a cèl·lules finalitzades ( $5 \cdot 10^4 \text{ cm/s}$ ).

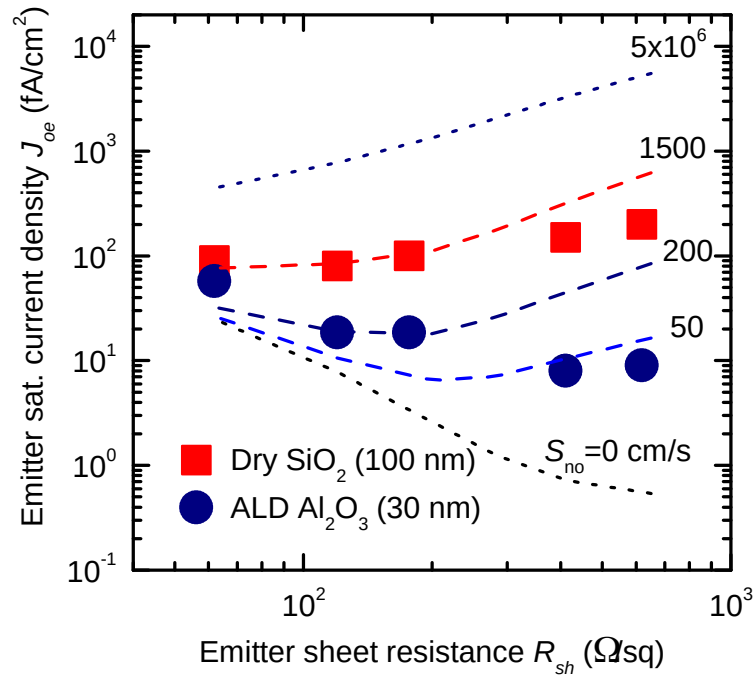


FIGURA 6.6: Current de saturació en inversa  $J_{oe}$  d'emissors dopats amb bor en funció de la resistència de quadre amb diferents passivacions, mitjançant  $\text{Al}_2\text{O}_3$  de ALD (gruix  $30 \text{ nm}$ ) o alternativament òxid tèrmic sec. Els símbols són resultats experimentals en mostres de test i les línies són dades simulades amb PC-1D per diferents velocitats de recombinació fonamental del portador minoritari  $S_{no}$  (paràmetre que es correspon a  $S_{pas,p+1}$  o  $S_{pas,p+2}$  a les simulacions). Gràfica extreta d'un informe tècnic intern del *grup MNT* [46].

Com a principal inconvenient dels substrats tipus  $n$ , és el possible dany a volum que sorgeix arrel de la difusió de bor si es realitza de manera no controlada [43], tal com es va observar a la secció precedent. Per a la fabricació de las cèl·lules IBC, s'ha pensat a utilitzar difusions en forma de tira (veure figura 6.6) separades un gap petit de  $4 \mu\text{m}$  i un emissor parcialment passivat amb  $\text{Al}_2\text{O}_3$  dipositat per ALD. Adicionalment, s'ha utilitzat a doble nivell de metal·lització con dos grans busos (veure figura 6.7) per a facilitar l'ensamblat coplanar (busbars totalment contactats), d'aquesta manera es minimitzen les pèrdues òhmiques degudes a busbars i fingers metàl·lics, que s'han considerat nul·les



a l'estudi. A les simulacions s'han considerat la possibilitat de contactes en tires o mitjançant contactes quadrats, estructura IBC 2D i 3D respectivament. A tots els casos la resistivitat de l'oblea s'ha considerat de  $2.5 (\Omega \cdot cm)$  (dopat de substrat  $1.88 \cdot 10^{15} cm^{-3}$ ), cèl·lules quadrades d'àrea  $9 cm^2$  i costat  $L = 3 cm$ , i un gruix de substrat de  $260 \mu m$ . El factor de  $F_E$  es calcula utilitzant l'equació presentada a la secció anterior (6.3).

L'objectiu d'aquestes simulacions és estudiar quin és el rendiment potencial que es poden aconseguir amb estructures IBC b-Si amb una passivació frontal estable en temps, així com obtenir quin és el  $F_E$  òptim a utilitzar al disseny de les cèl·lules solars per a la fabricació dels mínimòduls black silicon, ja sigui utilitzant una estructura amb contactes en tira (2D) o puntual (3D).

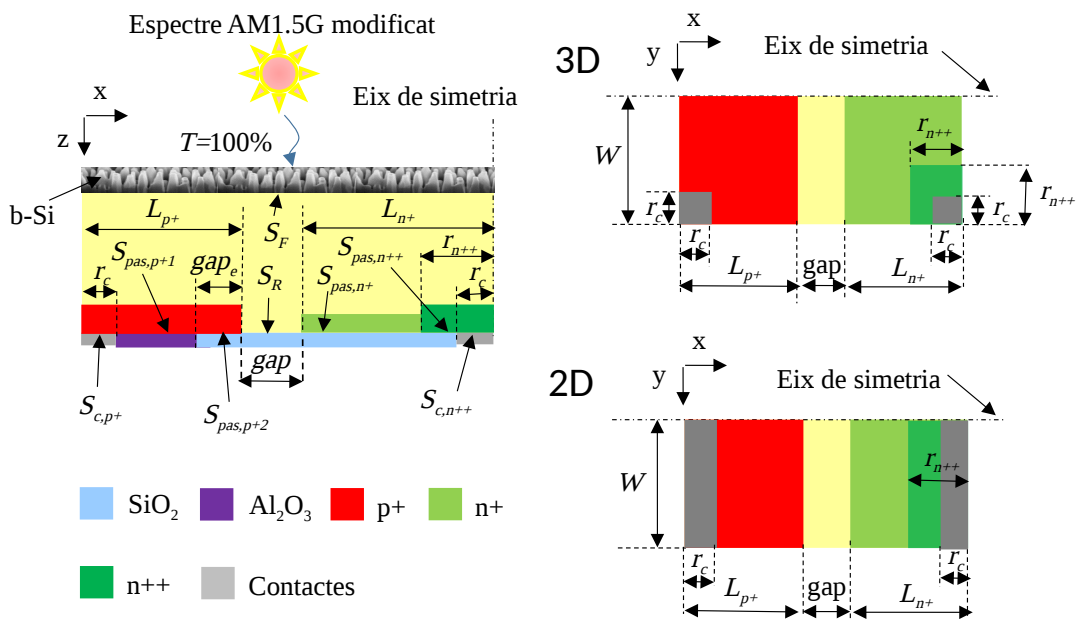


FIGURA 6.7: (Esquerra) Secció recta de la cèl·lula mínima de simulació utilitzant substrats de silici tipus n. (Dreta) Vista inferior de l'estructura 3D (dalt) i 2D (baix). Per claretat del dibuix, s'ha obviat la metal·lització posterior al ser una estructura amb doble nivell de metal·lització.

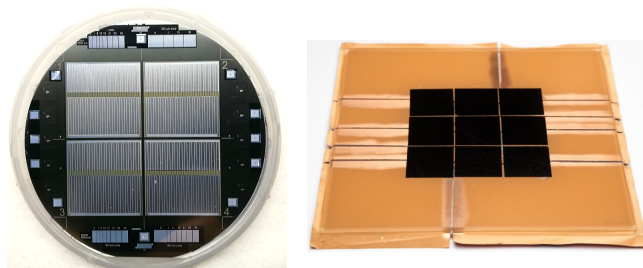


FIGURA 6.8: (esquerra) 4 cèl·lules IBC fabricades a una obla de 4 polzades mostrant els dos pads del segon nivell de metal·lització. Aquests dispositius es van utilitzar per a fabricar un mínimòdul black amb 9 cèl·lules solars en sèrie (dreta).

La base geomètrica es fixa amb un *pitch* vertical de  $200 \mu\text{m}$  ( $W = 100 \mu\text{m}$ ), on es presenten les diverses estructures geomètriques en dependència de la longitud de la regió  $L_{emitter}^+$  cobrint un rang de  $F_E$  des del 50 % fins a 90 %.

TAULA 6.III: Condicions de simulació a l'estructura Large Emitter Coverage IBC black-silicon.

<b>Resistivity (<math>\Omega \cdot \text{cm}</math>)</b>	2.5
<b>Base n</b>	$1.88 \cdot 10^{15} \text{ (cm}^{-3}\text{)}$
<b>n<sup>+</sup></b>	$L_n^+ = 98 \mu\text{m}$ & $Width = 100 \mu\text{m}$ <i>Peak Doping</i> $N_D^+ \Rightarrow 3.4 \cdot 10^{18} \text{ (cm}^{-3}\text{)}$ <i>Depth</i> = $2.6 \mu\text{m}$ <i>Depth Factor</i> = $0.95 \mu\text{m}$ <i>R<sub>m,square</sub></i> $\cong 110 \text{ (}\Omega/\text{square)}$
<b>n<sup>++</sup></b>	$r_n^{++} = 50 \mu\text{m}$ & $Depth = 4.5 \mu\text{m}$ <i>Peak Doping</i> $N_D^{++} \Rightarrow 6.5 \cdot 10^{18} \text{ (cm}^{-3}\text{)}$ <i>Depth</i> = $4.5 \mu\text{m}$ <i>Depth Factor</i> = $1.39 \mu\text{m}$ <i>R<sub>m,square</sub></i> $\cong 5 \text{ (}\Omega/\text{square)}$
<b>p<sup>+</sup></b>	$L_{p \rightarrow N[1::8]} = (98, 198, 298, 398, 498, 598, 798) \mu\text{m}$ <i>Peak Doping</i> $N_A^+ \Rightarrow 5 \cdot 10^{18} \text{ (cm}^{-3}\text{)}$ <i>Depth</i> = $1.56 \mu\text{m}$ <i>Depth Factor</i> = $0.56 \mu\text{m}$ <i>R<sub>m,square</sub></i> $\cong 195 \text{ (}\Omega/\text{square)}$
<b>Gap (p<sup>+</sup> <math>\iff</math> n<sup>+</sup>)</b>	$4 \mu\text{m}$
<b>Gap<sub>e</sub></b>	$100 \mu\text{m}$
<b>Contacts</b>	$r_c = 15 \mu\text{m}$
<b>S<sub>F</sub></b>	$7 \text{ (cm/s)}$
<b>S<sub>R</sub></b>	$10 \text{ (cm/s)}$
<b>S<sub>c,p+</sub></b>	$5 \cdot 10^6 \text{ (cm/s)}$
<b>S<sub>c,n++</sub></b>	$5 \cdot 10^6 \text{ (cm/s)}$
<b>S<sub>pas,n+</sub></b>	$4 \cdot 10^2 \text{ (cm/s)}$
<b>S<sub>pas,n++</sub></b>	$7 \cdot 10^3 \text{ (cm/s)}$
<b>S<sub>pas,p+1</sub></b>	$2 \cdot 10^2 \text{ (cm/s)}$
<b>S<sub>pas,p+2</sub></b>	$1.5 \cdot 10^3 \text{ (cm/s)}$

Al càlcul de la reflectància a la superfície posterior es considera reflectivitat de les zones metal·litzades fixada a 96 %, què les zones amb dielèctric reflexen a 96 % ( $gap_{met} = 0$  al disposar d'un segon nivell de metal·lització), i la reflectivitat als contactes de 86 %. El càlcul de la reflectància posterior es fa de manera similar a l'explicada a la secció 6.2.1.

### 6.3.1 Resultats

Un aspecte rellevant, és el fet, de que aquestes estructures es caracteritzen per ser estructures amb doble nivell de metal·lització on en conseqüència es considera la resistència sèrie  $R_s$  menyspreable, donat que el busbar és totalment contactat.

A aquest estudi s'ha considerat l'evolució dels paràmetres fotovoltaics en funció de  $F_E$  tant a estructura 2D com a 3D, atenent al valor de passivació frontal  $S_F$  de la superfície de Black silicon passivat amb  $Al_2O_3$ . A l'estudi realitzat a [44] es va observar que el paràmetre  $S_F$  evoluciona des de valors tan baixos d'unos  $7 \text{ cm/s}$  (just després de passivar la superfície b-Si con alumina) fins a uns  $25 \text{ cm/s}$  transcorreguts tres anys des d'aquest dipòsit.

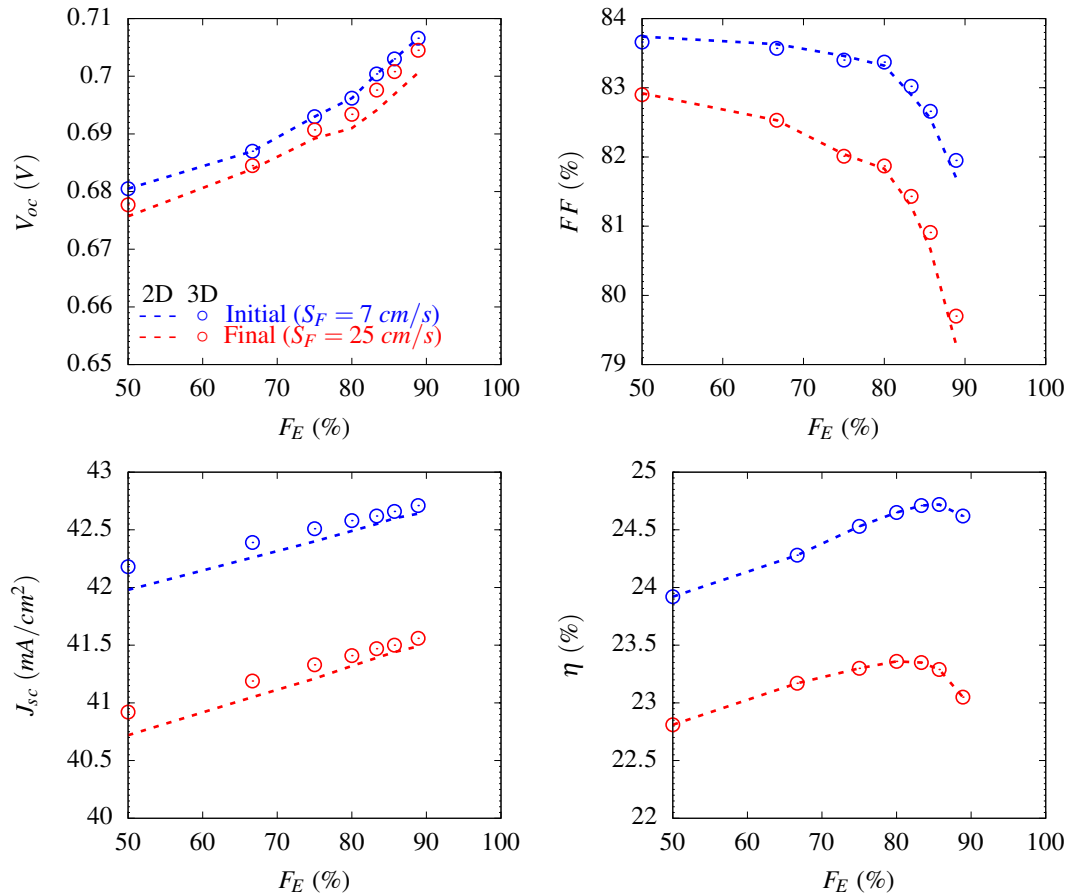


FIGURA 6.9: Comparativa de la  $V_{oc}$  (V),  $J_{sc}$  ( $\text{mA}/\text{cm}^2$ ),  $FF$  (%), **Eficiència**  $\eta$  (%) entre de l'estructura 3D i 2D (contactes de tires) (simbols) i 2D (línees).

Es pot veure a la figura 6.9 la  $V_{oc}$ (V) en condicions d'idealitat creix en dependència amb l'increment de l'estructura geomètrica, d'igual manera que la  $J_{sc}$ ( $\text{mA}/\text{cm}^2$ ). Contraposat a aquest comportament, el  $FF$ (%) decau en incrementar les dimensions de l'estructura unitària. L'**Eficiència**  $\eta$  (%) es comporta presentant un pic màxim, punt a partir del qual el factor de degradació del  $FF$ (%) esdevé l'efecte dominant, en augmentar les pèrdues òhmiques atribuïdes a la resistència lateral de base.

Tal com s'observa a les simulacions, es poden aconseguir eficiències, inicials i una vegada estabilitzada la passivació frontal, properes a 24.5 % i 23.5 % respectivament, tant a estructures 2D com a 3D. El valor òptim d'eficiència es produeix per a una  $F_E$  al voltant de 80 %, amb un compromís entre pèrdues per recombinació als contactes de base baixes

i una resistència sèrie lateral, deguda al substrat semiconductor, baixa. A més, al disseny de les cèl·lules solars per al mínimòdul Black silicon s'ha optat per una estructura 2D (pràcticament obté idèntics resultats que l'estructura de contactes puntuals 3D) amb una  $F_E$  del 80 %.

## 6.4 Conclusions

A aquesta secció s'han presentat diversos estudis basats en cèl·lules IBC amb **black-silicon (b-Si)**, el disseny de les quals sorgeix de la necessitat d'incrementar l'**Eficiència** de les cèl·lules IBC d'altres prestacions, basada aquesta millora en l'increment de la transmissió òptica de la superfície frontal a la regió semiconductor, amb una passivació per mitjà del recobriment del **black-silicon (b-Si)** amb *ALD*  $Al_2O_3$ .

A aquest capítol s'han simulat cèl·lules IBC b-Si amb la finalitat, per una banda dissenyar els dispositius a fabricar, amb les millors prestacions en relació a rendiment fotovoltaic, i per una altra banda, determinar el rendiment fotovoltaic potencial que es pot obtenir per a aquests dispositius, atenent a la velocitat de recombinació frontal  $S_F$  prevista a la superfície nanotexturitzada, passivada amb alumina de ALD.

A estructures amb un únic nivell de metal·lització, les simulacions han permès analitzar l'impacte del gruix d'alumini a l'eficiència, permetent ajustar les simulacions amb dades experimentals provinents de cèl·lules IBC fabricades pel grup **MNT** en col·laboració amb l'Universitat finlandesa d'**Aalto**. Els rendiments fotovoltaics obtinguts a cèl·lules reals es troben per sobre del 22 % tant a substrats tipus  $p$  com  $n$ , i amb el millor ajustament per a aquests resultats reals amb els simulats, s'ajusten amb un gruix d'alumini de 2  $\mu m$ . Aquest valor és similar a l'utilitzat al procés de fabricació el que permet constatar l'adequació/exactitud de les simulacions que preveuen rendiments propers al 24 % per al cas d'utilitzar majors gruixos d'alumini, o alternativament un doble nivell de metal·lització. Per al cas de substrat tipus  $n$ , les diferències importants entre les simulacions i les dades reals per a  $F_E$  altes, constaten la presència d'un dany produït durant la difusió de Bor.

Per últim, les simulacions realitzades a aquest capítol també han permès dissenyar les cèl·lules IBC b-Si per a la seva fabricació i integració a mínimòduls black silicon. Per això s'ha optat amb una estructura 2D de contactes en tires i una  $F_E$  del 80 % amb doble nivell de metal·lització. A aquest cas, les simulacions preveuen rendiments estables en el temps per sobre del 23 % a substrats tipus  $n$ .

## Capítol 7

# Estudi de les cèl·lules de concentració

### 7.1 Introducció

A aquest capítol s'explora la utilització d'una estructura IBC a sistemes de baixa-mitjana concentració fruit d'una possible col·laboració amb l'empresa espanyola Abengoa S.A i la Universitat de Sevilla.

Els sistemes de concentració fotovoltaics es caracteritzen per utilitzar uns sistemes òptics que permeten concentrar el llum solar sobre la cèl·lula solar, augmentant la irradiància a la cèl·lula, un factor que es coneix com a factor de concentració  $C$  en unitats de *Sols* (anglès *Suns*) [47] [48]. En concentrar el llum, l'eficiència de conversió fotovoltaica augmenta sempre i quan les pèrdues resistives i tèrmiques no siguin rellevants. Amb aquesta finalitat, l'estructura IBC permet un disseny amb pèrdues resistives baixes sense provocar pèrdues d'ombra per metal·lització frontal, així com un bon acoblament tèrmic amb els subsistemes de refrigeració, ja siguin passius o actius, al poder disposar d'una connexió coplanar amb grans superfícies metal·litzades de contacte elèctric i tèrmic. En conseqüència, l'arquitectura IBC és molt indicada per a aquest tipus d'aplicacions.

Els sistemes de concentració es classifiquen atenent al nivell de concentració en, baixa (1-10 *Suns*), mitjana (10-100) i alta concentració ( $> 100$ ) [47]. Els sistemes de baixa-mitjana concentració, en general, són més simples de desenvolupar, donat que no necessiten, normalment, de sistemes de seguiment solar en dos eixos [48]. Considerant aquesta idea, a aquest capítol es simularà una possible estructura IBC per a aquest tipus d'aplicació, amb la finalitat de verificar la seva viabilitat de construcció i el seu comportament des d'una baixa concentració fins a un màxim de 40 *Suns*.

Com a requeriment imposat per l'empresa Abengoa, el disseny de la cèl·lula solar IBC ha de ser compatible per a ser transferida a un procés industrial estàndar basat en serigrafia (screen printing technology [49]) el que implica unes mides mínimes de les regions de base, emissor, contactes i metal·litzacions que permetin en un futur els processos serigràfics. Una de les limitacions més importants és l'amplada mínima de les regions que s'ha fixat de  $40 \mu m$  per a les tires de contacte atenent a l'estat de l'art de d'aquesta tecnologia [49].

Donat que les cèl·lules de concentració són molt sensibles a les pèrdues resistives, s'ha pensat en utilitzar un sistema multibusbar (veure figura 7.1) totalment connectat mitjançant un ensamblat coplanar amb un substrat o backplane on es realitza la connexió entre cèl·lules del mòdul [39]. Per això, s'utilitzarà un doble nivell de metal·lització, on el primer nivell col·lecta els portadors de base i emissor en forma de dits o fingers interdigitats, mentre al segon nivell es sintetitzen els busbars col·lectors de cada polaritat mitjançant pads d'àrea gran.

Un avantatge adicional del disseny multibusbar, és que es redueix substancialment la contribució resistiva dels fingers del primer nivell en minvar la longitud efectiva d'aquests, amb una  $L_{ef}$  molt menor que la longitud dels dits metàl·lics del primer nivell ( $L$ ). El valor de  $L_{ef}$  es pot calcular tenint en compte la longitud de la cèl·lula solar  $L$  i el nombre de busbars del disseny ( $N_{Busbars}$ ), suposadament de mateixa dimensió, segons:

$$L_{ef} = \frac{L}{N_{Busbars}} \quad (7.1)$$

## 7.2 L'estructura 2D de cèl·lula industrial de concentració

Una restricció important al disseny de les cèl·lules IBC, és ajustar-se a la mida màxima que permet la fabricació d'aquestes a una oblea de 4 polzades de diàmetre (100 mm de diàmetre), les disponibles al laboratori del grup MNT. Amb aquest objectiu, el disseny final que es simularà, obedeix a una cèl·lula quadrada amb costat  $L = 6 \text{ cm}$  (Àrea  $36 \text{ cm}^2$ ) amb 4 o 6 busbars, el que es correspon a una  $L_{ef}$  de 1.5 cm o 1 cm respectivament.

Per a la transferència senzilla del disseny de la IBC a un procés industrial, es simplifica el procés de fabricació amb les següents consideracions:

- (a) Superfície frontal texturitzada amb piràmides aleatòries i passivades amb 90 nm de  $Al_2O_3$  (ALD). A aquest cas, a les simulacions s'ha introduït l'espectre ponderat, prenent en consideració la reflectància mesurada a una mostra de test (veure figura 7.2).

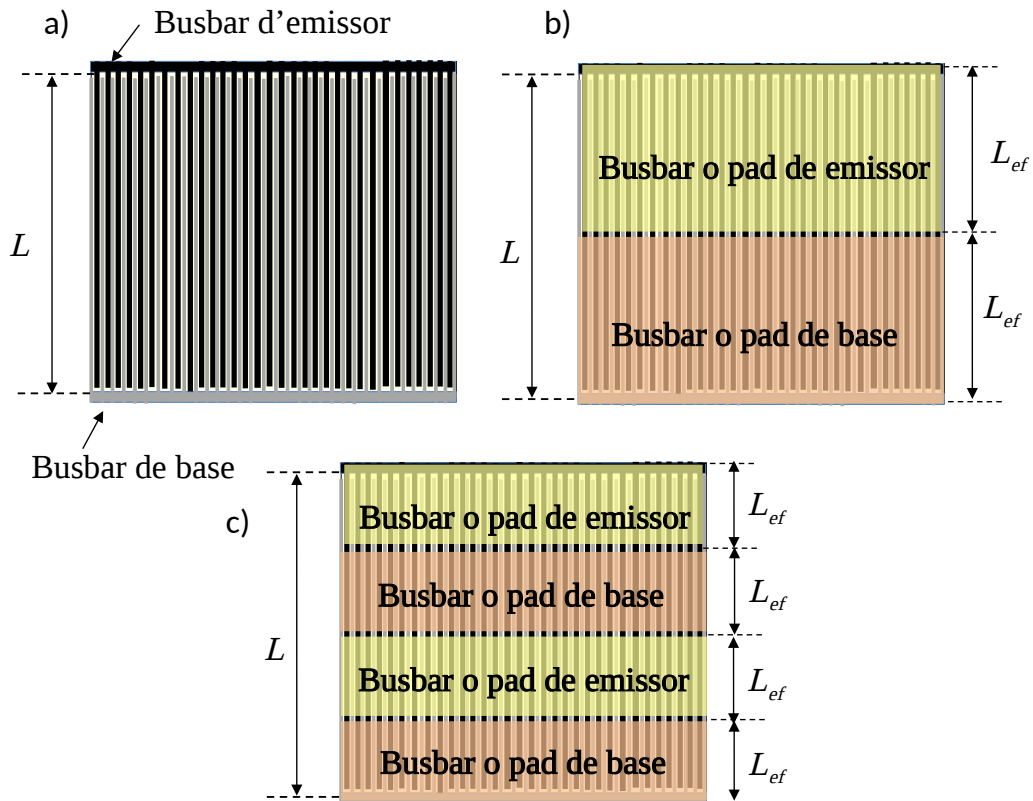


FIGURA 7.1: a) Esquema de metal·lització interdigitat posterior d'una cèl·lula IBC amb un únic nivell de metal·lització. b) Estructura amb doble nivell de metal·lització i dos busbars de mateixes dimensions ( $N_{Busbar} = 2$ ) c) Concepte d'estructura multibusbar amb 4 busbars ( $N_{Busbar} = 4$ ) d'identiques dimensions utilitzant un doble nivell de metal·lització.

- (b) Estructura 2D amb difusions  $n^+$ ,  $n^{++}$  i  $p^+$  en forma de tires i passivades amb  $SiO_2$  tèrmic, i tires de contactes de  $40 \mu m$  d'amplada (semiamplades de contacte  $r_c = 20 \mu m$ ).
- (c) Amb la finalitat de minvar les pèrdues òhmiques per transport lateral de majoritaris al substrat, s'ha dissenyat una geometria amb un factor de cobertura d'emissor  $F_E$  del 50 % (tires dopades d'emissor i base idèntiques).
- (d) Substrats tipus  $n$  de resistivitat  $3 \Omega \cdot cm$  (dopat de substrat  $1.56 \cdot 10^{15} cm^{-3}$ ).

A la figura 7.3 es mostra l'esquema de la cèl·lula mínima utilitzada a les simulacions i a la taula 7.I es resumeixen el valors dels paràmetres utilitzats a les simulacions.

A l'hora de calcular la reflectància posterior, de manera similar a la presentada ja al capítol 6, s'ha considerat que les zones contactades reflexen el 86 % i la resta un 96 % en ser una estructura amb doble nivell de metal·lització.

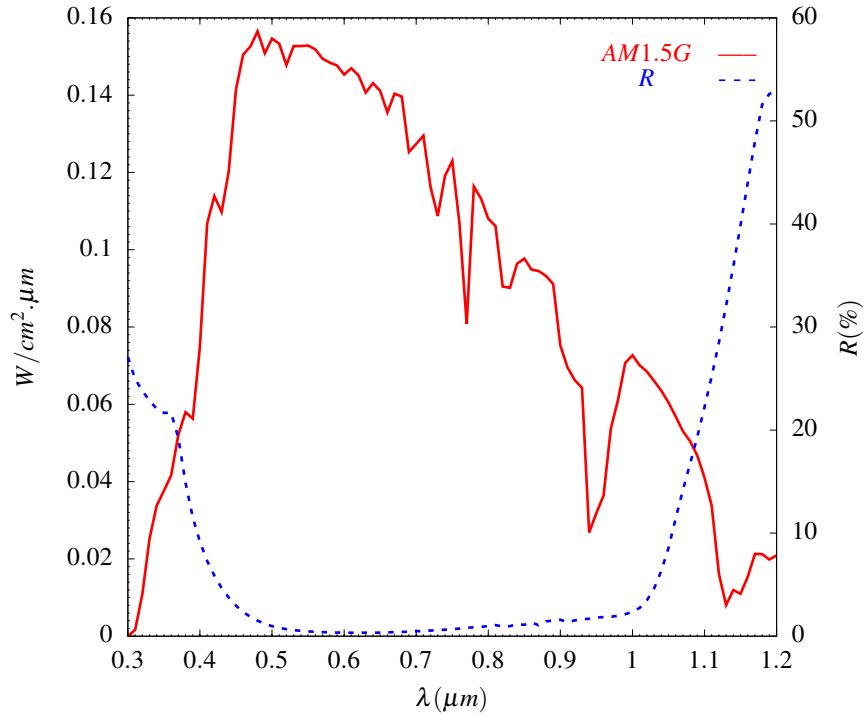


FIGURA 7.2: Espectre ponderat AM1.5G ( $W/cm^2 \cdot \mu m$ ) i reflectància respecte al rang de longituds d'ona  $[0.3 - 1.2] \mu m$  sobre una capa de texturació i passivació frontal formada per  $Al_2O_3$  (90 nm) aplicada a l'estudi de la cèl·lula IBC de concentració.

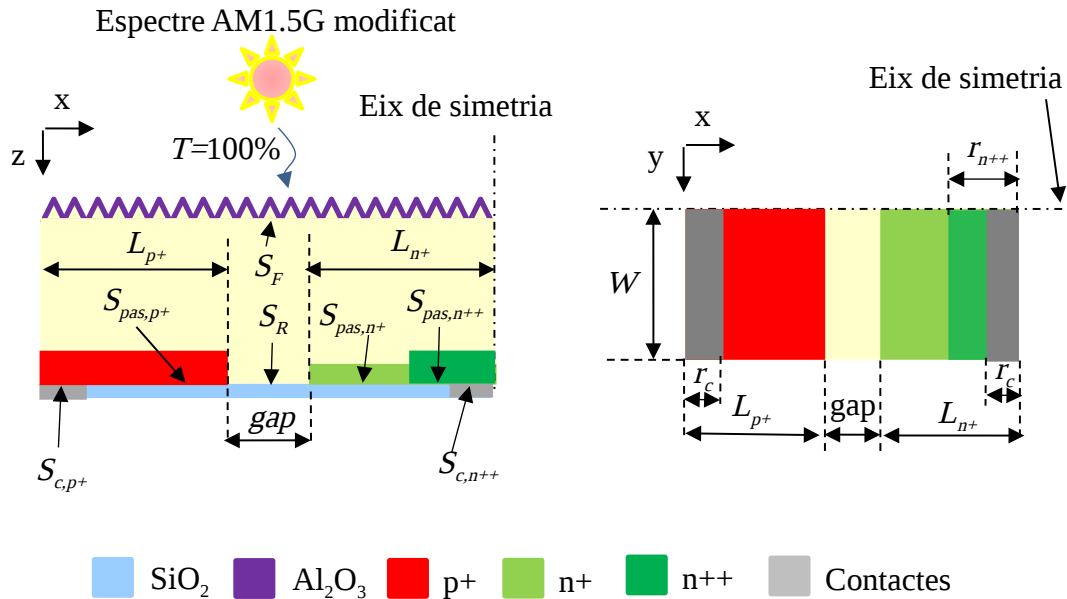


FIGURA 7.3: Tall transversal (esquerra) i planta inferior (dreta) de l'esquema de la cèl·lula IBC de concentració a substrats tipus  $n$  (estructura 2D). Per claretat del dibuix, s'ha obviat la metalització posterior amb un doble nivell de metalització.

En relació al càlcul de la resistència sèrie que s'ha d'introduir a les simulacions, s'han considerat els valors de la taula 7.II, on  $h_{AL}$ ,  $\rho_{AL}$ ,  $R_{sh,AL}$  són el gruix, la resistivitat i



TAULA 7.I: Condicions de simulació, Large Emitter Coverage IBC  $b - Si(n)$ .

<b>Resistivity (<math>\Omega \cdot \text{cm}</math>)</b>	3
<b>Base n</b>	$1.56 \cdot 10^{15} \text{ (cm}^{-3}\text{)}$
<b>W(width)</b>	$125 \mu\text{m}$
<b>n<sup>+</sup></b>	$L_n^+ = 195 \mu\text{m}$ $\text{Peak Doping } N_D^+ \Rightarrow 3.8 \cdot 10^{18}$ $\text{Depth} = 2.26 \mu\text{m}$ $R_{sh,n}^+ \cong 38 \text{ (}\Omega/\text{square)}$
<b>n<sup>++</sup></b>	$L_n^{++} = 50 \mu\text{m}$ $\text{Peak Doping } N_D^{++} \Rightarrow 5.7 \cdot 10^{19}$ $\text{Depth} = 3.83 \mu\text{m}$ $R_{sh,n}^{++} \cong 10 \text{ (}\Omega/\text{square)}$
<b>p<sup>+</sup></b>	$L_p^+ = 195 \mu\text{m}$ $\text{Peak Doping } N_A^+ \Rightarrow 8.9 \cdot 10^{18} \text{ (cm}^{-3}\text{)}$ $\text{Depth} = 1.63 \mu\text{m}$ $R_{sh,p}^+ \cong 140 \text{ (}\Omega/\text{square)}$
<b>Contactes en tires</b>	$r_c = 20 \mu\text{m}$
<b>S<sub>F</sub></b>	$10 \text{ (cm/s)}$
<b>S<sub>R</sub></b>	$10 \text{ (cm/s)}$
<b>S<sub>c,n++</sub></b>	$5 \cdot 10^6 \text{ (cm/s)}$
<b>S<sub>c,p+</sub></b>	$5 \cdot 10^6 \text{ (cm/s)}$
<b>S<sub>pas,p+</sub></b>	$2.5 \cdot 10^4 \text{ (cm/s)}$
<b>S<sub>pas,n+</sub></b>	$4 \cdot 10^2 \text{ (cm/s)}$
<b>S<sub>pas,n++</sub></b>	$6 \cdot 10^3 \text{ (cm/s)}$

la resistència de quadre de la metal·lització d'alumini, respectivament. A més,  $L_{met}$  és l'amplada dels fingers de base i emissor, suposadament iguals, i  $gap_{met}$  la separació de l'interdigitat metàl·lic.

TAULA 7.II: Paràmetres relacionats amb el càlcul de la resistència sèrie.

<b>h<sub>Al</sub></b>	$4 \mu\text{m}$
<b><math>\rho_{Al}</math></b>	$2.8 \cdot 10^7 \Omega \cdot \text{cm}$
<b>R<sub>sh,AL</sub></b>	$7 \text{ m}\Omega/\text{sq}$
<b>N<sub>busbar</sub></b>	4 (cas 1) o 6 (cas 2)
<b>L</b>	$6 \text{ cm}$
<b>L<sub>ef</sub></b>	$1.5 \text{ cm}$ (cas 1) o $1 \text{ cm}$ (cas 2)
<b>gap<sub>met</sub> (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	80 (primer nivell metal·lització)
<b>L<sub>met</sub></b>	$160 \mu\text{m}$

Considerant que el factor de metal·lització de base  $f_{m,b}$  i d'emissor són iguals  $f_{m,e}$  ( $f_{m,b} = f_{m,e} = f_m$ ) i de valor:

$$f_m = \frac{L_{met}}{L_{p+} + L_{n+} + gap} = \frac{160}{400} = 0.4 \quad (7.2)$$

I la resistència associada als fingers de base i emissor,  $r_{fe}$  i  $r_{fb}$  respectivament, es calcularà com a:

$$r_{fe} = r_{fb} = r_f = \frac{R_{sh,AL}}{3 \cdot f_m} \cdot L_{ef}^2 \Omega cm^2 \quad (7.3)$$

Considerant els valors de  $L_{ef}$ , que poden prendre el valor de 1.5 cm i 1 cm, la contribució dels fingers serà de 26.25 i 11.67 ( $m\Omega \cdot cm^2$ ) respectivament, per a aquests escenaris.

Prenent en consideració que els busbars es troben totalment contactats, la seva contribució a les simulacions suposarem que és pràcticament nul·la ( $r_{busbars} \cong 0 \Omega \cdot cm^2$ ). D'aquesta manera, la resistència s'ha d'afegir a les simulacions degudes al grid metàl·lic  $R_{met}$  en unitats de  $\Omega$ , es calcularà, considerant l'àrea mínima de simulació ( $Area_{unitat,sim}$ ), com a:

$$R_{met} = \frac{r_f + r_{busbars}}{Area_{unitat,sim}} \simeq \frac{r_f}{Area_{unitat,sim}} = \frac{r_f}{W \cdot (L_{p+} + L_{n+} + gap)} = \frac{r_f}{5 \cdot 10^{-4}} \Omega \quad (7.4)$$

Finalment, s'ha d'afegir l'efecte de la resistència de contacte a les simulacions. Considerant la resistència específica del contacte d'emissor ( $r_{cont,e}$ ) i de base ( $r_{cont,b}$ ) es definirà la resistència als respectius contactes,  $R_{ec}$  i  $R_{bc}$  respectivament, en unitats d'ohms, com:

$$R_{ec} = \frac{r_{cont,e}}{W \cdot r_c}, \quad R_{bc} = \frac{r_{cont,b}}{W \cdot r_c} \quad (\Omega) \quad (7.5)$$

On s'ha suposat contactes en tires. Finalment, la resistència total  $R_T$  a incloure a les simulacions com a element de paràmetres concentrats, serà:

$$R_T = R_m + R_{ec} + R_{bc} \quad (7.6)$$

### 7.2.0.1 Resultats

Les figures 7.4 i 7.5 presenten, per al cas de  $L_{ef} = 1.5 \text{ cm}$  i  $L_{ef} = 1 \text{ cm}$  respectivament, l'evolució de l'**Eficiència**  $\eta(\%)$  respecte la concentració solar 0.1 **suns** fina a 40 **suns**.

S'assoleixen valors més òptims al cas de l'estructura de  $L = 1 \text{ cm}$ , veure figura 7.5, on l'efecte de degradació degut al factor de concentració  $C$  sobre l'efecte resistiu es veu esmorteït, en tenir una resistència sèrie associada als fingers més petita.

En general, l'eficiència fotovoltaica augmenta en augmentar la concentració sempre i quan les pèrdues resistives no siguin rellevants. Si només considerem les pèrdues òhmiques intrínseques al si del dispositiu, l'eficiència creix de manera monòtona fins el 26 % a 40 sols. Tanmateix, per al cas més realista, de suposar unes pèrdues mínimes addicionals als fingers ( $r_{cont,e} = r_{cont,b} = 0 \Omega \cdot cm^2$ ), el màxim d'eficiència s'aconsegueix a un rang de 15 a 20 sols amb eficiències al voltant del 25.0 %, independentment del valor de  $L_{ef}$ . Aquest valor d'eficiència és aproximadament un 2 % major que el que s'obté sense concentració (23.0 %). També, a cèl·lules de baixa concentració, la resistència de contacte hauria de ser inferior a  $10^{-4} \Omega \cdot cm^2$ , un factor 10 menor que per al cas de treballar sense concentració, tal com veiem al capítol 5, on aquest paràmetre relaxaba a  $10^{-3} \Omega \cdot cm^2$ .

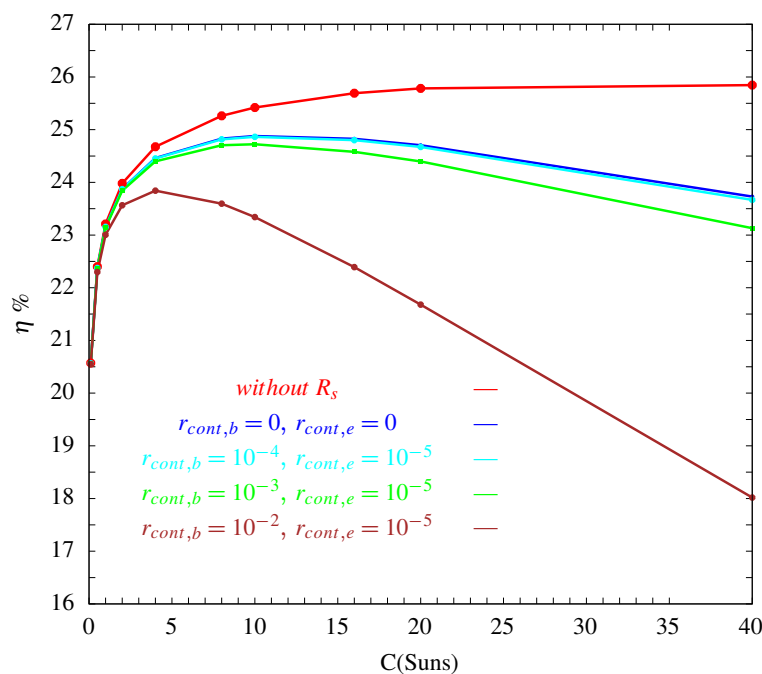


FIGURA 7.4: Evolució de l'Eficiència  $\eta(\%)$  respecte la concentració solar 0.1 *suns* fins a 40 *suns* considerant  $L_{ef} = 1.5 \text{ cm}$ .

Un altre estudi interessant, veure figura 7.6, és el de l'efecte de la velocitat de recombinació superficial de la regió posterior,  $S_R$ , sobre les prestacions del dispositiu en condicions de concentració. A aquest estudi es considerarà únicament el cas de l'efecte resistiu amb  $r_{cont,e} = 0 (\Omega \cdot cm^2)$  i  $r_{cont,b} = 0 (\Omega \cdot cm^2)$  i  $L_{ef} = 1 \text{ cm}$ . El rang d'estudi de les velocitat de recombinació superficial de la regió posterior és de  $[10, 100, 1000, 10000] (\text{cm}/s)$ , amb increments per dècada de cadascun dels valors de la sèrie.

L'impacte de  $S_R$  a les prestacions de la cèl·lula solar és l'esperat. A major  $S_R$  s'incrementa bàsicament, a més d'una lleugera disminució de  $V_{oc}$  per despassivació del contorn

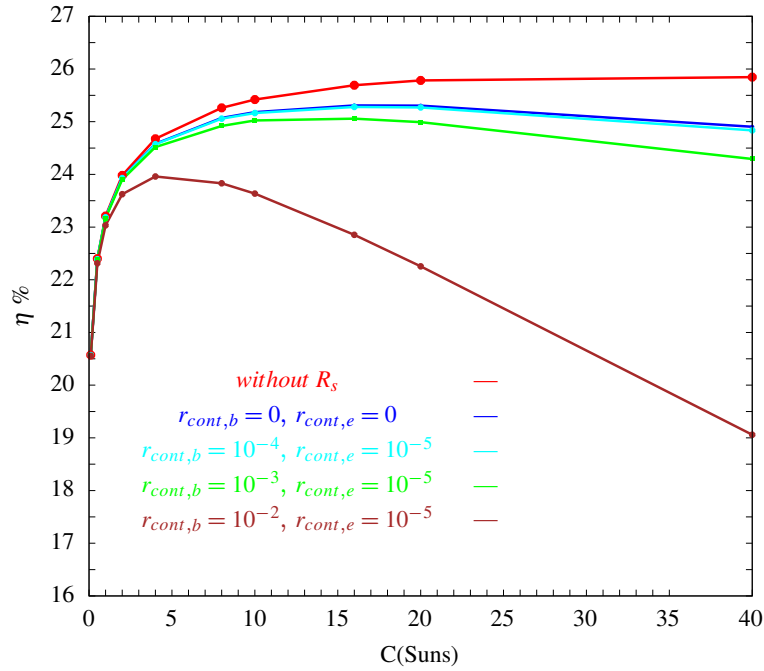


FIGURA 7.5: Evolució de l'Eficiència  $\eta(\%)$  respecte la concentració solar 0.1 *suns* fins a 40 *suns* considerant  $L_{ef} = 1 \text{ cm}$ .

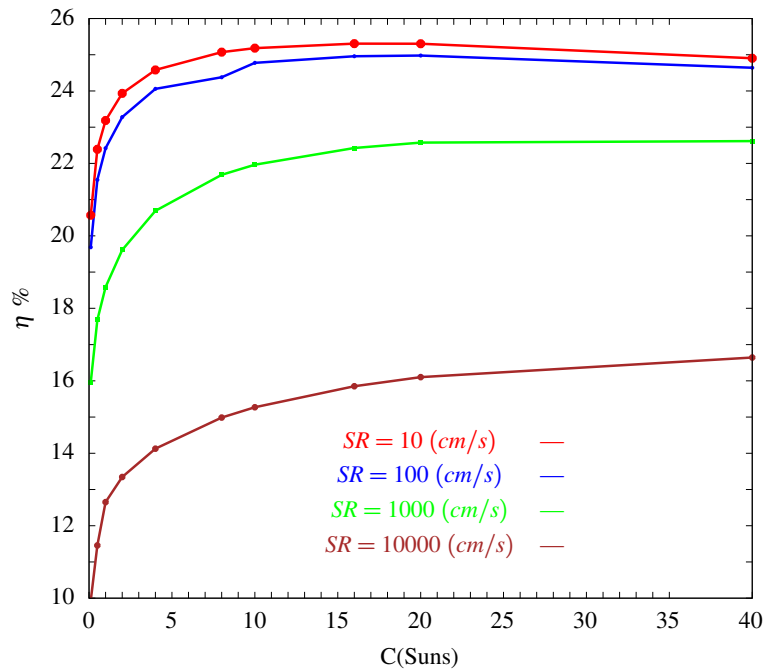


FIGURA 7.6: Evolució de l'Eficiència  $\eta(\%)$  respecte la concentració solar 0.1 *suns*, 40 *suns*,  $r_{cont,e} = r_{cont,b} = 0 \text{ } (\Omega \cdot \text{cm}^2)$ .

d'emissor, les pèrdues de fotocorrent per electrical shadowing [36]. Per tant, és important que  $S_R$  es mantingui per sota de 100  $\text{cm/s}$ , donat que pateix una pèrdua dramàtica d'eficiència per a valors més alts independentment de la concentració.

Finalment, s'estudia l'impacte de la separació entre regions difuses d'emissor i base

envers la velocitat de recombinació superficial posterior  $S_R$  (veure figura 7.7). Partint de l'estructura anterior, s'estudia l'efecte del gap, considerant valors desde  $5 \mu m$  fins a  $80 \mu m$ , una concentració  $C$  d'un sol ( $C = 1 \text{ Suns}$ ) com a valor representatiu, i un rang de  $S_R$  desde 10 fins a  $5 \cdot 10^4 \text{ cm/s}$ .

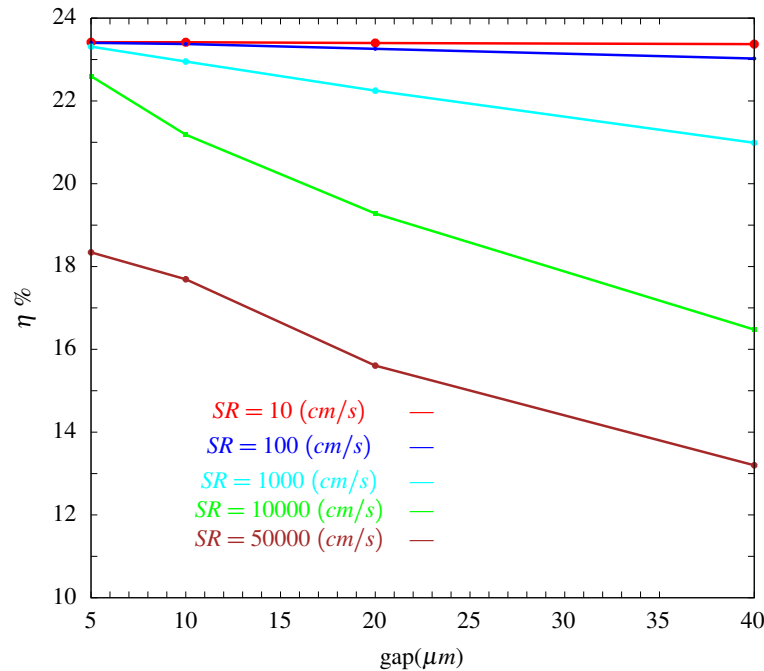


FIGURA 7.7: Evolució de l'**Eficiència**  $\eta(\%)$  respecte una concentració  $C$  d'un sol ( $C = 1 \text{ Suns}$ ) amb la variació del gap, considerant valors desde  $5 \mu m$  fins a  $80 \mu m$  i  $r_{cont,e} = r_{cont,b} = 0 (\Omega \cdot cm^2)$ .

Tal com s'observa a la figura 7.7, una manera de mitigar l'efecte d'una passivació dolenta a la regió posterior, al gap entre difusions, com era d'esperar, és minvant la mida del gap. Mides de gap de  $5 \mu m$  són factibles utilitzant fotolitografia i màscares de vidre (en el nostre disseny preindustrial aquest paràmetre es fixa a  $10 \mu m$ ), però són totalment inviables en processos industrials basats en serigrafia, on el gap ha de ser major, típicament al voltant de  $40 \mu m$ , pel què és crucial obtenir una bona passivació en aquest cas, amb  $S_R < 100 \text{ cm/s}$ , essent en particular, lleugerament insensible al gap.

### 7.3 Conclusions

A aquest capítol s'ha estudiat el comportament i el potencial de una cèl·lula IBC per a una aplicació de baixa-mitja concentració i especialment dissenyada per a ser transferida fàcilment a un procés industrial. Un dels objectius, és assolir eficiències altes en funció de la concentració de l'espectre solar, fent ús d'elements òptics per tal de concentrar l'espectre solar amb un factor multiplicatiu o concentració de la intensitat de llum incident de l'espectre solar, en els què es cerca una major absorció de fotons per unitat d'àrea.

En els diferents estudis s'observa l'impacte del factor de concentració  $C$  sobre l'Eficiència millorant aquest paràmetre fins que els efectes resistius que disminueixen el  $FF$  es fan rellevants. D'aquesta manera, apareix una situació de compromís entre alta eficiència i pèrdues resistives baixes, que fan que la concentració òptima per al nostre disseny de cèl·lula solar IBC estigui al voltant del 15  $Suns$  per a resistències de contacte inferiors a  $10^{-4} \text{ cm}^2$ , assolint eficiències de fins a 25.5 %. Tanmateix, aquest tipus d'estructura és molt sensible a la passivació posterior entre regions difoses, on la velocitat de recombinació superficial  $S_R$  pren un paper rellevant i ha d'estar per sota de 100  $\text{cm/s}$ . Alternativament, per a mitigar l'efecte de  $S_R$ , el gap entre regions dopades d'emissor i base ha de ser el més petit possible, considerant les restriccions tecnològiques de fabricació d'un procés industrial.

## Capítol 8

# Valoracions i conclusions

### 8.1 Valoracions i conclusions

L'estudi de les cèl·lules solars IBC, amb les seves variants morfològiques són representatives de la família de cel·lules solars caracteritzades per tenir els contactes a la regió posterior, cercant una optimització en la recepció de l'espectre solar, eliminant l'efecte de l'ombregat propi de les cèl·lules solars convencionals, a més d'aconseguir una integració modular més eficient.

Una eina predictiva del comportament de la cèl·lula solar, i genèricament de dispositius semiconductors, és Sentaurus TCAD de Synopsis, i específicament atractiva en el cas de les cèl·lules solars amb disposició dels contactes posteriors en els que les seves entitats o unitats mínimes de simulació representatives s'entenen en 2D i 3D dimensions, i per tant, el seu comportament només és a l'abast d'eines com Sentaurus.

Justificant la raó de l'ús de l'eina, ens permetrà fer-ne ús per tal d'enmarcar límits ideals de funcionament d'estructures conegudes, explorar noves propostes de disseny, establir comparacions amb dissenys reals, ajustar la parametrització per tal de retroalimentar la modelització, ajustar dissenys reals i, sobretot, esdevenir una eina de predicció de comportament i de recerca de noves propostes de disseny.

El primer capítol d'estudi, es fixa en l'estructura de cèl·lula IBC ideal on s'ha caracteritzat l'efecte del radi dels contactes puntuals a les estructures IBC ideals amb doble nivell de metal·lització, introduint el concepte de relació òptima en condicions ideals, entre el radi dels contactes puntuals i la distància entre ells.

L'estudi de les estructures bàsiques IBC ideals de contactes puntuals [17] serveix per a fixar les fites de valors ideals envers determinats topologies. A ambdues estructures

ideals IBC de contactes puntuals, per a les tipologies amb velocitats de recombinació a la regió BSF del contacte base altes, incrementar la distància entre els contactes permet millorar l'eficiència. La finalitat és mitigar l'efecte negatiu de les velocitats de recombinació altes a la regió BSF del contacte base, conjugant la variable geomètrica de la distància entre els contactes. En condicions ideals, manca de l'efecte resistiu, permet cercar el punt de compromís òptim de la distància entre els contactes per a l'estructura IBC de contactes puntuals. La característica dominant, incident sobre l'efecte de les pèrdues, ve determinada pel valor de la distància entre els contactes o *pitch*. Així, quan més propers es troben la regió BSF de la base amb el seu contacte base i la regió de l'emissor amb el seu contacte emissor, la tendència dominant és la de l'efecte de les pèrdues recombinatives mentre que contràriament quan més llunyans es troben la regió BSF de la base amb el seu contacte base i la regió de l'emissor amb el seu contacte emissor les pèrdues dominants són les resistives de la base, així com les pèrdues de col·lecció de portadors per recombinació a la base, malgrat tenir longituds de difusió elevades.

Al capítol posterior, *Estructura IBC ideal de geometries complexes*, es presenten tècniques enfocades a mitigar l'efecte de la recombinació al contacte base, seguint l'argument del primer capítol on s'ha presentat la influència del contacte base i la seva regió BSF sobre les prestacions del dispositiu. S'introdueixen els conceptes de l'Àrea d'Influència Geomètrica de l'Emissor normalitzada al plà  $XY$ , la regió posterior que es conforma amb els contactes base i emissor, subàrea conformada pels punts  $(x_n, y_n)$  en què donat un punt  $(x_e, y_e)$  del plà  $XY$  la distància al contacte de l'emissor  $d_e$  és menor que la distància al contacte de la base  $d_b$ . De la definició de l'Àrea d'Influència Geomètrica de l'Emissor sorgeix el concepte Factor de Cobertura Geomètrica de l'Emissor  $F_E(\%)$  que es defineix com la relació percentual normalitzada d'Àrea d'Influència Geomètrica de l'Emissor envers l'àrea total del plà  $XY$  de la regió posterior de la unitat mínima de simulació.

Es presenten dues tècniques per tal de millorar la  $F_E(\%)$ , la primera es basa en l'estructura unitària de cèl·lula solar constant (line-like, ring-like i estructures Large Emitter Coverage) i les altres en estructures unitàries de cèl·lula solar no constant. Per tal d'assolir una  $F_E(\%) > 50 \%$  és la de l'ús asimètric de les dimensions entre contactes base i emissor, de manera que l'emissor i el seu contacte és més gran que la regió BSF de la base i el seu contacte base. D'aquesta manera, s'incrementa la  $F_E(\%)$ . Un requeriment important, és tenir en compte que incrementar les dimensions dels contactes incideix sobre un decreixement de la  $V_{oc}$  pel que l'assimetria és realitza reduint el contacte base o de manera compensada reduint el contacte base i incrementant l'emissor de manera que és manté la relació òptima.



Per a les estructures unitàries de cèl·lula solar constant, es cerca mitjaçant tècniques de disposició d'emissors confrontats a localitzacions específiques dins l'estructura geomètrica aconseguir una  $F_E(\%) > 50 \%$ , incrementar el pes de l'emissor sobre la base.

Al cas de les estructures unitàries de cèl·lula solar no constant, en combinació amb l'increment del pitch entre contactes i en correlació amb l'increment del número d'emissors en relació a l'estructura unitària, ja sigui en el cas regular o híbrid o en forma de tires, s'aconsegueix apantallar la influència de la base i per tant preponderar la contribució de l'emissor, expressat en un increment de l' **Eficiència**, especialment per a valors de  $S_{c,base}$  reals.

Enllaçant amb l'estructura IBC ideal, es presenta al capítol següent l'estudi de la l'estructura IBC real, focalitzat sobre l'efecte resistiu, on la consideració dels efectes de la resistència sèrie implica una influència centrada principalment en una ostensible disminució del **Fill Factor**. La resistència sèrie  $R_s$  es intrínseca a la pròpia resistivitat del semiconductor, per la resistivitat de les interconnexions i contactes, i la resistència en paral·lel  $R_{sh}$  ve donada per defectes a la regió de buidament i pel corrent de pèrdues al voltant dels marges físics del dispositiu. Considerant l'efecte de la resistència sèrie, prenent diversos casos, l'estudi de l'estructura IBC real es basa en algunes de les estructures de cèl·lula IBC ideal presentades a capítols anteriors. La resistència sèrie provoca una degradació en el **Fill Factor** i en conseqüència de l'**Eficiència**  $\eta(\%)$ .

S'han presentat diversos estudis basats en cèl·lules IBC amb **black-silicon (b-Si)**, el disseny de les quals sorgeix de la necessitat d'incrementar l'**Eficiència** de les cèl·lules IBC d'altres prestacions, basada aquesta millora en l'increment de la transmissió òptica de la superfície frontal a la regió semiconductor, amb una passivació per mitjà del recobriment del **black-silicon (b-Si)** amb *ALD*  $Al_2O_3$ .

A aquest capítol s'han simulat cèl·lules IBC b-Si amb la finalitat, per una banda dissenyar els dispositius a fabricar, amb les millors prestacions en relació a rendiment fotovoltaic, i per una altra banda, determinar el rendiment fotovoltaic potencial que es pot obtenir per a aquests dispositius, atenent a la velocitat de recombinació frontal  $S_F$  prevista a la superfície nanotexturitzada passivada amb alumina de ALD.

Al capítol de les cèl·lules de concentració IBC, s'ha estudiat el comportament i el potencial de una cèl·lula IBC per a una aplicació de baixa-mitja concentració i especialment dissenyada per a ser transferida fàcilment a un procés industrial. Un dels objectius és assolir eficiències altes en funció de la concentració de l'espectre solar, fent ús d'elements òptics per tal de concentrar l'espectre solar amb un factor multiplicatiu o concentració de la intensitat de llum incident de l'espectre solar, en els què es cerca una major absorció de fotons per unitat d'àrea.

Propers i futurs estudis, es centrarien en la introducció de càrrega a la superfície de la regió posterior per tal de generar un canal que minimitzi l'efecte de la resistència sèrie, o explorar noves tipologies de cèl·lules solars de contactes posteriors, partint de cèl·lules solars IBC o MWT, o estructures híbrides. Un altre futur estudi es pot centrar en la caracterització de l'efecte de la temperatura sobre aquest tipus de cèl·lules solars, i en especial, sobre les cèl·lules de concentració, en combinació amb l'efecte de la resistència sèrie i el seu efecte divisor sobre les prestacions de la cèl·lula.

---

***3D simulations of back-contact back-junction c-Si(P) solar cells with doped point contacts***

Carrió, D.; Ortega, P.; López, G.; López-González, Juan M.; Martín, I.; Voz, C.; Alcubilla, R.

*European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibitio - 2013*

*Paris Nord Villepinte, France (2013)*

2013

---

***High efficiency interdigitated back-contact c-Si solar cells***

Calle, E.; Ortega, P.; López, G.; Martín, I.; Carrió, D.; Voz, C.; Orpella, A.; Puigdollers, J.; Alcubilla, R.

*Spanish Conference on Electron Devices*

*Madrid, Espanya (2015)*

2015

---

***Rear contact pattern optimization based on 3D simulations for IBC solar cells with point-like doped contacts***

Carrió, D.; Ortega, P.; Martín, I.; López, G.; López-González, Juan M.; Orpella, A.; Voz, C.; Alcubilla, R.

*Elsevier, Energy procedia, 09/2014, 55, 47 - 52, 1876-6102*

2014

---

***High efficiency black silicon Interdigitated Back Contacted solar cells on p- and n-type c-Si substrates***

Ortega, P.; Calle, E.; von Gastrow, G.; Repo, P.; Carrió, D.; Savin, H.; Alcubilla, R

*Progress in photovoltaics, 2015, 23, 11, 1448 - 1457, 1062-7995*

2015

---

***Black silicon back-contact module with wide light acceptance angle***

*Ortega, P.; Garín, M.; von Gastrow, G.; Carrió, D.; Alcobilla, R.*

*Progress in photovoltaics, 01/01/2019, 1 - 7, 1062-7995*

*2019*

---

# Bibliografía

- [6] M. A. Green. Silicon solar cells: advanced principles & practice. *Centre for Photovoltaic Devices and Systems, University of New South Wales*, 1995.
- [11] M. Späth, P.C. de Jong, I.J. Bennet, T.P. Visser, and J. Bakker. A novel module assembly line using back contact solar cells. *in proc. 23rd IEEE Photovoltaic Specialist Conference, San Diego, CA, USA, May 11-15, 2008*.
- [12] A.U. Rehman and S. H. Lee. Advancements in n-type base crystalline silicon solar cells and their emergence in the photovoltaic industry. *Scientific World Journal, vol. 13*, 2013.
- [30] A. Richter, F. Werner, A. Cuevas, J. Schmidt, and S.W. Glunz. Improved parameterization of auger recombination in silicon. *Energy Procedia 27 ( 2012 ) 88 – 94 / SiliconPV: April 03-05, 2012, Leuven, Belgium*, 2012.
- [37] Pablo Ortega, Gema López, David Muñoz, Isidro Martín, Cristóbal Voz, Carlos Molpeceres, and Ramón Alcubilla. Fully low temperature interdigitated back-contacted c-si(n) solar cells based on laser-doping from dielectric stacks. *Solar Energy Materials and Solar Cells 169 (2017) 107–112*, 2017.
- [27] Pablo Ortega, Eric Calle, Guillaume von Gastrow, Päivikki Repo, David Carrió, Hele Savin, and Ramón Alcubilla. High efficiency black silicon interdigitated back contacted solar cells on p- and n-type c-si substrates. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications (2015) - Volume23 Issue11, November 2015, Pages 1448-1457*, 2015.
- [46] Grupo MNT. Informe técnico interno del grupo MNT. 2018.
- [1] Peter Würfel and Uli Würfel. *Physics of Solar Cells: From Basic Principles to Advanced Concepts*. Ed. WILEY-VCH, 2009.
- [2] Jean Pierre Colinge and Cynthia A. Colinge. *Physics of Semiconductor Devices, pp 128-132*. Ed. Kluwer Academic Publishers, 2005.
- [3] Jef Poortmans and Belgium Vladimir Arkhipov IMEC, Leuven. *Thin Film Solar Cells Fabrication, Characterization and Applications*. Ed. John Wiley & Sons Ltd, 2006.

- [4] Martin A. Green. *Solar cells: operating principles, technology, and system applications*. Ed. Longman Higher Education, 1982.
- [5] Martin A. Green. *Crystalline Silicon Solar cells*. Photovoltaics Special Research Centre, University of New South Wales, Sydney, N.S.W. AUSTRALIA, 2052, 2015.
- [7] C.Ulzhöfer, S.Hermann, N.P.Harder, P.Altermatt, and R.Brendel. Vire-effect: Via-resistance induced recombination enhancement – the origin of reduced fill factors of emitter wrap through solar cells. *24th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Hamburg, Germany, Sept. 2009*, 2009.
- [8] Marisa Castro Delgado. Celulas solares de silicio para alta concentración: Industrialización y celulas de contacto posterior. Master's thesis, Universidad Politécnica de Madrid, 2009.
- [9] Emmanuel Van Kerschaver and Guy Beaucarne. *Back-contact Solar Cells: A Review*. Progress in photovoltaics: Research and applications Wiley InterScience (www.interscience.wiley.com), 2005.
- [10] Finlay Colville. The hole lasers take the wrap. *INTERPV, April. 2009*, 2009.
- [13] Evan Franklin, Kean Fong, Keith McIntosh, Andreas Fell, Andrew Blakers, Teng Kho, Daniel Walter, Da Wang, Ngwe Zin, Matthew Stocks, Er-Chien Wang, Nicholas Grant, Yimao Wan, Yang Yang, Xueling Zhang, Zhiqiang Feng, and Pierre J. Verlinden. Design, fabrication and characterisation of a 24.4 % efficient interdigitated back contact solar cell. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 29th EU PVSEC, Amsterdam, The Netherlands, 2014*, 2014.
- [14] Kaneka Corporation. World's highest conversion efficiency of 26.33 % achieved in a crystalline silicon solar cell. *New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO)*, 2016.
- [15] Ruud E.I. Schropp. Fundamentals and technology of silicon heterojunction solar cell. *MRS Spring Meeting - Symposium E: Advanced Solar Cells - Components to Systems - Moscone West, San Francisco, CA, USA*, 2015.
- [16] Delfina Muñoz. High efficiency rear contact solar cell and ultra powerful modules. *5th Silicon PV – EHRUCLES project Workshop*, 2015.
- [17] E. Calle, P. Ortega, G. López, I. Martín, D. Carrió, G. Masmitjà, C. Voz, A. Orpella, J. Puigdollers, and R. Alcubilla. Interdigitated back contacted c-si(p) solar cells with photovoltaic efficiencies beyond 22 %. *Spanish Conference on Electron Devices (CDE), 2017*, 2017.
- [18] Donald A. Clugston and Paul A. Basore. Pc1d version 5:32-bit solar cell modeling on personal computers. *Photovoltaics Special Research Centre - UNSW, Presented at the 26th IEEE Photovoltaic Specialists Conf., October 1997. IEEE*, 1997.

- [19] Stuart Bowden. Carrier density in lifetime measurements of silicon blocks. *Institute of Energy Conversion, University of Delaware, Newark DE, USA*, 2004.
- [20] UNSW. Other links products and services. *Photovoltaics Special Research Centre - UNSW*, <http://www.pv.unsw.edu.au>, 2010.
- [21] PV Lighthouse. Pc1d version 5. *Photovoltaics Special Research Centre - UNSW*, <https://www2.pvlighthouse.com.au>, 2019.
- [22] Synopsis. *Sentaurus Device User Guide*. Synopsis Version G-2012.06, June 2012, 2012.
- [23] Synopsis. *Sentaurus Structure Editor User Guide*. Synopsis Version G-2012.06, June 2012, 2012.
- [24] Synopsis. *Mesh Generation Tools User Guide*. Synopsis Version G-2012.06, June 2012, 2012.
- [25] Silvaco. Silvaco user's manual device simulation software. *3D Device Simulator*, 2016.
- [26] COMSOL Multiphysics. Comsol multiphysics reference manual. *Material Properties Reference — Semiconductors Material Properties*, 2018.
- [28] Päivikki Repo, Antti Haarahiltunen, Lauri Sainiemi, Marko Yli-Koski, Heli Talvitie, Martín C. Schubert, and Hele Savina. Effective passivation of black silicon surfaces by atomic layer deposition. *EEE Journal of Photovoltaics*, VOL. 3, NO. 1, January 2013, 2013.
- [29] G. Masetti, M. Severi, and S. Solmi. Modeling of carrier mobility against carrier concentration in arsenic-, phosphorus-, and boron-doped silicon. *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. ED-30, no. 7, pp. 764–769, 1983.
- [31] Pablo Ortega, Isidro Martín, Gema López, Mónica Colina, Albert Orpella, Cristóbal Voz, and Ramón Alcubilla. p-type c-si solar cells based on rear side laser processing of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  /  $\text{SiC}_x$  stacks. *Solar Energy Materials & Solar Cells* 106 (2012) 80–83, 2012.
- [32] I. Martín, P. Ortega, M. Colina, A. Orpella, G. López, and R. Alcubilla. Laser processing of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  / a- $\text{SiC}_x$  : H stacks: a feasible solution for the rear surface of high-efficiency p-type c-si solar cells. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications Prog. Photovolt: Res. Appl.* 2013; 21:1171–1175, 2012.
- [33] Armin G. Aberle. Surface passivation of crystalline silicon solar cells: A review. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications, Prog. Photovolt. Res. Appl.* 2000;8: 473 - 487, 2000.

- [34] Mark J. Kerr and Andres Cuevas. Very low bulk and surface recombination in oxidized silicon wafers. *Institute of physics publishing Semicond. Sci. Technol.* 17 (2002) 35–38 - *Semiconductor science and technology PII: S0268-1242(02)26399-3*, 2002.
- [35] D. Carrió, P. Ortega, G. López, J.M. López-González, I. Martín, A. Orpella, C. Voz, and R. Alcubilla. Rear contact pattern optimization based on 3d simulations for ibc solar cells with point-like doped contacts. *4th International Conference on Silicon Photovoltaics, SiliconPV 2014 - Energy Procedia* 55 ( 2014 ) 47 – 52, 2014.
- [36] Martin Hermle, Filip Granek, Oliver Schultz-Wittmann, and Stefan W. Glunz. Shading effects in back-junction back-contacted silicon solar cells. *2008 33rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference - San Diego, CA, USA*, 2008.
- [38] A. Luque. Solar cells and optics for photovoltaic concentration. *1st ed. Ed.: Bristol and Philadelphia: Adam Hilger series on Optics and Optoelectronics*, 1989, pp. 118-123., 1989.
- [39] Pablo Ortega, Moises Garín, Guillaume von Gastrow, Tuukka Savisalo, Antti Tolvanen, Henri Vahlman, Ville Vähänissi, Toni P. Pasanen, David Carrió, Hele Savin, and Ramón Alcubilla. Black silicon back-contact module with wide light acceptance angle. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications - Volume 28 Issue 3, March 2020, Pages 210-216*, 2019.
- [40] DK. Schroder. Semiconductor material and device characterisation. *Ed. John Wiley & Sons: New York, 1990*, 1990.
- [41] Andres Cuevas and David A. Russell. Co-optimisation of the emitter region and the metal grid of silicon solar cells. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications, Prog: Photovolt: Res. Appl.* 2000; 8: 603-616, 2000.
- [42] Hele Savin, Päivikki Repo, Guillaume von Gastrow, Pablo Ortega, Eric Calle, Moises Garín, and Ramón Alcubilla. Black silicon solar cells with interdigitated contacts achieve 22.1 % efficiency. *Nature Nanotechnology volume 10, pages 624–628 (2015)*, 2015.
- [43] Michael Andreas Kessler, Tobias Ohrdes, Bettina Wolpensinger, and Nils-Peter Harder. Semiconductor science and technology charge carrier lifetime degradation in cz silicon through the formation of a boron-rich layer during  $bbr_3$  diffusion processes. *Semiconductor Science and Technology, Volume 25, Number 5*, 2010.
- [44] Eric Calle, Pablo Ortega, Guillaume von Gastrow, Isidro Martín, Hele Savin, and Ramón Alcubilla. Long-term stability of  $al_2o_3$  passivated black silicon. *6th International Conference on Silicon Photovoltaics, SiliconPV 2016 - Chambéry, France*, 2016.



- [45] Jeanette Lindroos and Hele Savin. Review of light-induced degradation in crystalline silicon solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells Volume 147*, April 2016, Pages 115-126, 2016.
- [47] Yupeng Xing, Peide Han, Shuai Wang, Peng Liang, Shishu Lou, Yuanbo Zhang, Shaoxu Hu, Huishi Zhu, Chunhua Zhao, and Yanhong Mi. A review of concentrator silicon solar cells. *Renewable and Sustainable Energy Reviews 51 (2015) 1697–1708*, 2015.
- [48] Ranga Vihari Parupudi, Harjit Singh, and Maria Kolokotroni. Low concentrating photovoltaics (lcpv) for buildings and their performance analyses. *Applied Energy 279 (2020) 115839*, 2020.
- [49] Ranga Vihari Parupudi, Harjit Singh, and Maria Kolokotroni. Double screen printed metallization of crystalline silicon solar cells as low as 30 mm metal line width for mass production. *Minkyu Ju and Youn-Jung Lee and Jonghwan Lee and Bonggi Kim and Kyungyul Ryu and Kyuho Choi and Kyuwan Song and Kyungsoo Lee and Changsoon Han and Youngmi Jo and Junsin Yi*, 2012.