



**I  
N  
A  
O  
E**

# **Estudio para la optimización de los parámetros de desempeño de celdas solares de heterounión**

**c-Si/a-Si:H**

Por

**Ing. Sarah Hincapié Úsuga**

Tesis sometida al programa de Ciencias en electrónica  
como requisito parcial para obtener el grado de:

**Maestra en Ciencias en la especialidad  
de Electrónica**

Bajo la supervisión de:

**Dr. Mario Moreno Moreno**

**Dr. Pedro Rosales Quintero**

En el

**Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica**

Diciembre, 2020

Santa María Tonantzintla, San Andrés Cholula, Puebla, México

©INAOE 2020

El autor otorga al INAOE el permiso de  
reproducir y distribuir copias de esta tesis  
en partes o en su totalidad mencionando la fuente



## RESUMEN

---

En este trabajo se realizó una investigación encaminada a la optimización del proceso de fabricación de celdas solares de heterounión con película delgada (HIT) que se desarrolla en el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE). Una celda HIT está compuesta por una oblea de silicio monocristalino (*c-Si*), la cual está rodeada por capas delgadas de silicio amorfo hidrogenado (*a-Si:H*) intrínseco y dopado.

Dentro de los principales aspectos que permiten alcanzar una alta eficiencia en una celda solar de heterounión, algunos de los más importantes son las figuras de mérito  $V_{oc}$ ,  $I_{sc}$ ,  $FF$  y  $Eff$ . El voltaje de circuito abierto  $V_{oc}$ , se ve influenciado por la recombinación de los portadores en la interfaz *a-Si:H/c-Si*, y la corriente de corto circuito  $I_{sc}$ , es principalmente afectada por la metalización, la capa *a-Si:H tipo p* y el confinamiento óptico logrado por el texturizado de la superficie de *c-Si*.

Las celdas fueron fabricadas sobre obleas de silicio cristalino *CZ* y *FZ tipo n* sobre las cuales se depositaron películas de silicio amorfo hidrogenado (*a-Si:H*) intrínseco y dopado utilizando el equipo de depósito químico en fase de vapor asistido por plasma (PECVD) del Laboratorio de Microelectrónica del INAOE. Los pasos más importantes que se optimizaron fueron los procesos relacionados a las condiciones ideales de depósito de los sistemas PECVD y pulverización catódica, el nivel de dopado de la película *a-Si:H tipo n* y el espesor de la película emisora *a-Si:H tipo p*.

La optimización del proceso de fabricación permitió aumentar el factor de llenado, la corriente de corto circuito y el voltaje de circuito abierto de las celdas de  $1\text{ cm}^2$  y  $2''$  fabricadas anteriormente en el INAOE. Las celdas de  $1\text{ cm}^2$  alcanzaban valores máximos de  $FF$  de 55% y este logró aumentarse a 65.43%; además, el valor de la corriente de corto circuito se aumentó de 40.4 mA a 46.4 mA. Las celdas de  $2''$  presentaban eficiencias máximas de 3.2% y esta logró aumentarse a 5.8%, con un factor de llenado de 28%.

# ÍNDICE GENERAL

---

<b>RESUMEN</b> .....	<b>I</b>
<b>ÍNDICE GENERAL</b> .....	<b>II</b>
<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	<b>V</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>VI</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....	<b>VIII</b>
<b>LISTA DE ACTRÓNIMOS</b> .....	<b>IX</b>
<b>CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
1.1 ENERGÍAS RENOVABLES Y ENERGÍA SOLAR .....	1
1.2 SECTOR SOLAR EN MÉXICO Y EL MUNDO .....	2
1.3 CELDA SOLAR Y TIPOS DE CELDAS SOLARES .....	4
1.4 CELDAS SOLARES A BASE DE SILICIO .....	6
1.5 CELDAS SOLARES HIT .....	7
1.6 ESTA TESIS .....	9
1.7 REFERENCIAS CAPÍTULO 1 .....	10
<b>CAPÍTULO 2: FUNDAMENTO TEÓRICO</b> .....	<b>13</b>
2.1 CUERPO NEGRO Y ESPECTRO DE RADIACIÓN SOLAR .....	13
2.1.1 CUERPO NEGRO .....	13
2.1.2 ESPECTRO DE RADIACIÓN SOLAR .....	13
2.2 COEFICIENTE DE MASA DE AIRE .....	14
2.3 EFECTO FOTOVOLTAICO .....	16
2.4 MATERIALES CRISTALINOS Y AMORFOS .....	16
2.4.1 MATERIALES CRISTALINOS .....	17
2.5 SILICIO CRISTALINO (C-Si) .....	18
2.5.1 MATERIALES AMORFOS .....	19
2.6 SILICIO AMORFO HIDROGENADO (A-Si:H) .....	20
2.7 ÓXIDOS CONDUCTORES TRANSPARENTES (TCO) .....	21
2.7.1 ÓXIDO DE INDIO DOPADO CON ESTAÑO (ITO) .....	22
2.8 PARÁMETROS ELÉCTRICOS Y DE DESEMPEÑO .....	22
2.8.1 CURVAS CORRIENTE VS. VOLTAJE .....	22
2.8.2 FACTOR DE LLENADO Y EFICIENCIA DE CONVERSIÓN .....	24
2.9 PÉRDIDAS ÓPTICAS, RECOMBINACIÓN Y RESISTENCIA (SERIE Y PARALELO) .....	25
2.9.1 PÉRDIDAS ÓPTICAS .....	25
2.9.2 PÉRDIDAS POR RECOMBINACIÓN .....	26
2.9.3 PÉRDIDAS POR RESISTENCIA .....	26

2.10 REDUCCIÓN DE COSTOS .....	27
2.11 REFERENCIAS CAPÍTULO 2 .....	28
<b><u>CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA Y TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN .....</u></b>	<b><u>31</u></b>
3.1 PERFILÓMETRO .....	31
3.2 SIMULADOR SOLAR .....	31
3.3 GRABADO IÓNICO REACTIVO.....	32
3.4 DEPÓSITO QUÍMICO EN FASE VAPOR (CVD) Y DEPOSITO QUÍMICO EN FASE VAPOR ASISTIDO POR PLASMA (PECVD).....	33
3.4.1 DEPÓSITO DE PELÍCULAS DE SILICIO AMORFO HIDROGENADO DOPADO E INTRÍNSECO .....	34
3.5 PULVERIZACIÓN CATÓDICA .....	36
3.6 REFERENCIAS CAPÍTULO 3 .....	37
<b><u>CAPÍTULO 4: PROCESO DE FABRICACIÓN DE CELDAS HIT .....</u></b>	<b><u>39</u></b>
4.1 LIMPIEZA INICIAL PARA EL DESENGRASADO .....	40
4.2 TEXTURIZADO SELECTIVO POR MEDIO DE KOH/IPA/DI (TEXTURA PIRAMIDAL USANDO UNA SOLUCIÓN DE HIDRÓXIDO DE POTASIO, ALCOHOL ISOPROPÍLICO Y AGUA DESIONIZADA).....	40
4.3 ELIMINACIÓN DE NANO-RUGOSIDAD POR MEDIO DE HNO <sub>3</sub> +HF+DI. ....	41
4.4 DEPÓSITO DE PELÍCULAS DE SILICIO AMORFO HIDROGENADO INTRÍNSECO Y DOPADO. ....	42
4.5 DEPÓSITO DE PELÍCULAS DE ITO. ....	43
4.6 LIMPIEZA CON EL EQUIPO DE GRABADO IÓNICO REACTIVO EN PLASMA DE O <sub>2</sub> Y CF <sub>4</sub> (PARTE POSTERIOR Y PARTE SUPERIOR) .....	44
4.7 DEPÓSITO DE CONTACTOS DE ALUMINIO (POSTERIORES Y SUPERIORES). ....	45
4.8 LITOGRAFÍA POR LIFT-OFF PARTE SUPERIOR .....	46
4.9 CORTE DE CELDAS .....	46
4.10 REFERENCIAS CAPÍTULO 4 .....	47
<b><u>CAPÍTULO 5: RESULTADOS Y ANÁLISIS .....</u></b>	<b><u>49</u></b>
5.1 PROCESO 1 .....	50
5.2 PROCESO 2 .....	54
5.3 PROCESO 3 .....	62
5.4 REFERENCIAS CAPÍTULO 5 .....	69
<b><u>CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO .....</u></b>	<b><u>70</u></b>
6.1 CONCLUSIONES .....	70
6.2 TRABAJO A FUTURO.....	70
6.2.1 ESTUDIO DEL AUMENTO DE LA TEMPERATURA DE DEPÓSITO DE LAS PELÍCULAS DE ITO .....	70
6.2.2 ESTUDIO DEL USO DE OBLEAS DE C-SI MÁS DELGADAS .....	71
6.2.3 ESTUDIO DE TEXTURIZADO SELECTIVO POR MEDIO DEL PLASMA PRODUCIDO POR EL SISTEMA RIE (TEXTURA PIRAMIDAL USANDO SF <sub>6</sub> /O <sub>2</sub> PARA CREAR BLACK SILICON (B-SI)) .....	72
6.2.4 ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DEL CAMBIO DE TEMPERATURA DE DEPÓSITO DE LAS CAPAS A-Si:H INTRÍNSECA, A-Si:H TIPO P Y A-Si:H TIPO N.....	73

6.2.5 ESTUDIO DEL EFECTO DE DEPOSITAR LOS CONTACTOS SUPERIORES E INFERIORES POR MEDIO DE SCREEN PRINTING O SERIGRAFÍA .....	74
6.2.6 ESTUDIO DEL DEPÓSITO DE CONTACTOS SUPERIORES Y POSTERIORES DE PLATA.....	74
6.2.7 MEJORA DE CELDAS DE 2'' – GRAN ESCALA.....	75
<b>6.3 REFERENCIAS CAPÍTULO 6 .....</b>	<b>75</b>
<b><u>APÉNDICE A .....</u></b>	<b><u>77</u></b>
<b>A.1 CARACTERIZACIÓN DE LA RAZÓN DE DEPÓSITO DE PELÍCULAS A-Si:H INTRÍNSECA, A-Si:H TIPO P Y A-Si:H TIPO N, VARIANDO LA TEMPERATURA DEL SUSTRATO DE C-Si. ....</b>	<b>77</b>

## **AGRADECIMIENTOS**

---

Quiero comenzar agradeciéndole a mi familia; mi madre Nora Úsuga Lopera, mi padre Luis Eduardo Hincapié Palmezano y mi hermano Andrés Felipe Hincapié Úsuga, que me apoyaron desde que decidí embarcarme en esta aventura y siempre estuvieron a mi lado.

Quiero darles las gracias a mis compañeros de maestría; muchas gracias por el apoyo y por los recuerdos.

Agradezco infinitamente a las personas que nunca soltaron mi mano.

Agradezco a mis asesores el Dr. Mario Moreno y el Dr. Pedro Rosales por su acompañamiento, por las clases que me brindaron durante la maestría y por todo su apoyo. Gracias por su tiempo y su confianza en mi trabajo.

Agradezco al Dr. Javier de la Hidalga Wade, al Dr. Alfredo Morales Sánchez y al Dr. Alfonso Torres Jacome, quienes aceptaron ser mis sinodales y suministrar de su tiempo y esfuerzo para la evaluación de este trabajo.

Agradezco a todo el personal del Laboratorio de Microelectrónica, especialmente a los técnicos Armando Hernández, Víctor Aca, Adrián Itzmoyotl e Ignacio Juárez; gracias a su paciencia, aportes y asistencia pude alcanzar los resultados presentados en este trabajo.

Finalmente, gracias al INAOE por confiar en mí al aceptarme a la maestría, y gracias al CONACYT por la oportunidad que me brindó al otorgarme la beca *No. 936815*.

# ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. CRECIMIENTO DE LA CAPACIDAD DE ENERGÍAS RENOVABLES EN EL MUNDO ENTRE 2019 Y 2024 [1.10].	3
FIGURA 2. CAPACIDAD DE CRECIMIENTO PV POR PAÍS/REGIÓN [1.10].	3
FIGURA 3. REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DEL FUNCIONAMIENTO DE LA REGIÓN DE AGOTAMIENTO DE UNA CELDA SOLAR	4
FIGURA 4. ESQUEMA BÁSICO DEL FUNCIONAMIENTO DE UNA INSTALACIÓN SOLAR.	5
FIGURA 5. TIPOS DE CELDAS SOLARES BASADAS EN SILICIO.	6
FIGURA 6. A) ESTRUCTURA BÁSICA DE UNA CELDA SOLA HIT.	8
FIGURA 7. A) EFICIENCIA NORMALIZADA DE UNA CELDA HIT Y UNA CELDA DE C-SI VS. TEMPERATURA Y B) SALIDA DE POTENCIA NORMALIZADA DE UNA CELDA HIT Y UNA CELDA DE C-SI VS. TIEMPO DEL AÑO [1.21].	9
FIGURA 8. ESPECTRO DE RADIACIÓN SOLAR.	14
FIGURA 9. ESQUEMA DE LAS CONDICIONES DE LA REFERENCIA ESPECTRAL AM0, AM1, AM1.5 Y AM2 [2.2].	15
FIGURA 10. DENSIDAD DE POTENCIA ESPECTRAL DE LA LUZ SOLAR. LOS DIFERENTES ESPECTROS SE REFIEREN A LA RADIACIÓN EXTRATERRESTRE AM0 Y LA RADIACIÓN AM1.5 [2.3].	15
FIGURA 11. REPRESENTACIÓN DE SÓLIDOS CRISTALINOS Y AMORFOS [2.5].	17
FIGURA 12. EJEMPLOS DE ESTRUCTURAS CRISTALINAS Y SUS CORRESPONDIENTES ÁNGULOS.	17
FIGURA 13. ESQUEMA DE LA CONFIGURACIÓN DEL SILICIO CRISTALINO.	19
FIGURA 14. ESQUEMA DE LA DISTRIBUCIÓN DE LA DENSIDAD DE ESTADOS DE UN SEMICONDUCTOR AMORFO QUE MUESTRA LAS BANDAS, LAS COLAS DE BANDA Y LA DENSIDAD DE ESTADOS DENTRO DE LA BANDA PROHIBIDA. LAS LÍNEAS PUNTEADAS SON EL EQUIVALENTE DE LA DENSIDAD DE ESTADOS EN UN CRISTAL.	19
FIGURA 15 ESTRUCTURA ATÓMICA DEL SILICIO AMORFO HIDROGENADO.	21
FIGURA 16. REPRESENTACIÓN DE LAS CURVAS I-V (ROJA) Y P-V(AZUL) DE UNA CELDA SOLA [2.17].	23
FIGURA 17. REPRESENTACIÓN DEL FACTOR DE LLENADO EN LA CURVA I-V [2.20].	24
FIGURA 18. PÉRDIDAS ÓPTICAS, RECOMBINACIÓN Y RESISTENCIA DE UNA CELDA SOLAR HIT.	25
FIGURA 19. PÉRDIDAS POR RESISTENCIA EN SERIE Y PARALELO DE LA CURVA CORRIENTE VS. VOLTAJE [2.25].	27
FIGURA 20. SIMULADOR SOLAR NEWPORT ORIEL SOL 2.	32
FIGURA 21. A) SUSTRATO CON ENMASCARANTE ANTES DEL PROCESO DE GRABADO POR PLASMA, B) COMPORTAMIENTO DEL PLASMA DENTRO DE LA CÁMARA DEL EQUIPO DE GRABADO IÓNICO REACTIVO Y C) SUSTRATO GRABADO DESPUÉS DEL TRATAMIENTO EN EL PLASMA DE RIE.	33
FIGURA 22. ESQUEMA ILUSTRATIVO DE UN EQUIPO DE PECVD [3.11].	35
FIGURA 23. DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE UN EQUIPO DE PULVERIZACIÓN CATÓDICA.	37
FIGURA 24. ESQUEMA DEL PROCESO DE FABRICACIÓN DE UNA CELDA SOLAR HIT.	39
FIGURA 25. ESQUEMA DE UNA CELDA HIT TERMINADA.	40
FIGURA 26. SUSTRATO DE SILICIO CRISTALINO TEXTURIZADO: 100 MIN EN KOH/IPA/DI [4.6].	41
FIGURA 27. MEDICIONES DE REFLECTANCIA DE UNA OBLEA CORTADA DE SILICIO (LÍNEA NEGRA) Y UNA OBLEA TEXTURIZADA POR KOH/IPA/DI (LÍNEA AZUL) [4.5].	41
FIGURA 28. SOFTWARE HMI MVSYSTEMS MX CT UTILIZADO PARA EL DEPÓSITO DE LAS PELÍCULAS DE SILICIO AMORFO HIDROGENADO DOPADO E INTRÍNSECO. EL SOFTWARE ES UNA REPRESENTACIÓN DEL PECVD.	42
FIGURA 29. CÁMARAS DEL PECVD UTILIZADAS PARA EL DEPÓSITO DE PELÍCULAS DE SILICIO AMORFO DOPADO E INTRÍNSECO.	43
FIGURA 30. PIRÁMIDES CREADAS A PARTIR DE DIFERENTES TIPOS DE GRABADOS Y SU CORRESPONDIENTE FACTOR DE ESCALA PARA LAS PELÍCULAS DEPOSITADAS.	43
FIGURA 31 EQUIPO DE PULVERIZACIÓN CATÓDICA DEL LABORATORIO DE MICROELECTRÓNICA.	44
FIGURA 32. EVAPORADORA E-BEAM BALZERS.	46
FIGURA 33. A) DIMENSIONES UNA CELDA DE 1CM <sup>2</sup> Y B) ESQUEMÁTICO DE NUEVAS CELDAS DE 1CM <sup>2</sup> .	47
FIGURA 34. VARIACIONES REALIZADAS EN EL PROCESO 1 PARA LAS MUESTRAS 1A Y 1D: A) MUESTRA 1A CELDA DE PRUEBA Y B) MUESTRA 1D CELDA DE PRUEBA CON AUMENTO DE TIEMPO EN EL SISTEMA DE GRABADO IÓNICO REACTIVO.	51
FIGURA 35. MUESTRAS 1A 6 Y 1D 4 BAJO ILUMINACIÓN AM 1.5 – PROCESO 1.	53
FIGURA 36. VARIACIONES REALIZADAS EN EL PROCESO 2 PARA LAS MUESTRAS 2A, 2C, 2D Y 2E: MUESTRA 2A [PH <sub>3</sub> /SiH <sub>4</sub> ]=0.1%, MUESTRAS 2C Y 2D [PH <sub>3</sub> /SiH <sub>4</sub> ]=0.5%, MUESTRA 2E [PH <sub>3</sub> /SiH <sub>4</sub> ]=0.7%.	56

FIGURA 37. A) NUEVE CELDAS DE 1 CM <sup>2</sup> – MUESTRAS 2A, 2C Y 2E; Y B) UNA CELDA DE 2” – MUESTRA 2D.....	57
FIGURA 38. CELDAS DE 1CM <sup>2</sup> BAJO ILUMINACIÓN – CELDAS 2A-4, 2C-7 Y 2E-2.....	59
FIGURA 39. CELDAS DE 1CM <sup>2</sup> EN OSCURIDAD – CELDAS 2A-4, 2C-7 Y 2E-2.....	59
FIGURA 40. CELDA DE 2” BAJO ILUMINACIÓN – MUESTRA 2D-1.....	60
FIGURA 41. CELDA DE 2” EN OSCURIDAD – MUESTRA 2D 1.....	60
FIGURA 42. CELDAS HIT FABRICADAS EN EL PROCESO 3 PARA LAS MUESTRAS 3A, 3B, 3C, 3D, 3E Y 3F: MUESTRA 3A CAPA A-Si:H TIPO P DE ESPESOR 5 NM; MUESTRAS 3B, 3D, 3E Y 3F CAPA A-Si:H TIPO P DE ESPESOR 7 NM; Y MUESTRA 3C CAPA A-Si:H TIPO P DE ESPESORR 16 NM. ....	63
FIGURA 43. CURVA I-V BAJO ILUMINACIÓN – CELDAS 3A-5, 3B-7, 3C-2, 3D-1.....	66
FIGURA 44. CURVA I-V EN OSCURIDAD – CELDAS 3A-5, 3B-7, 3C-2, 3D-1. ....	66
FIGURA 45. CURVA I-V BAJO ILUMINACIÓN – MUESTRAS 3E Y 3F. ....	67
FIGURA 46. CURVA I-V EN OSCURIDAD – MUESTRAS 3E Y 3F. ....	67
FIGURA 47. VALOR DE ISC, VOC Y EFF DEPENDIENDO DEL ESPESOR DEL C-Si [6.5]. ....	72
FIGURA 48. RAZÓN DE DEPÓSITO DE LA PELÍCULA A-Si:H INTRÍNSECA EN UN RANGO DE 160 A 200°C.....	78
FIGURA 49. RAZÓN DE DEPÓSITO DE LA PELÍCULA A-Si:H TIPO N EN UN RANGO DE 160 A 200°C.....	79
FIGURA 50. RAZÓN DE DEPÓSITO DE LA PELÍCULA A-Si:H TIPO P EN UN RANGO DE 160 A 200°C. ....	79



# ÍNDICE DE TABLAS

---

TABLA 1. MEJORES EFICIENCIAS REPORTADAS PARA DIFERENTES TIPOS DE CELDAS SOLARES [1.23] –	5
TABLA 2. CORRESPONDENCIA ENTRE LAS CARACTERÍSTICAS DE LA ESTRUCTURA ATÓMICA Y LAS PROPIEDADES ELECTRÓNICAS RESULTANTES DE LOS MATERIALES AMORFOS.	20
TABLA 3. PARÁMETROS PARA EL DEPÓSITO DE LAS PELÍCULAS DE ITO.	44
TABLA 4. PARÁMETROS PARA LA LIMPIEZA DE LAS OBLEAS EN EL PLASMA DE RIE.	45
TABLA 5. CONDICIONES DE DEPÓSITO DE LAS PELÍCULAS DE ITO PARA TODOS LOS PROCESOS.	49
TABLA 6. TIEMPOS DE DEPÓSITO DE LAS CAPAS DE ITO SUPERIOR Y POSTERIOR DE LAS CELDAS HIT.	50
TABLA 7. PROCESO 1 – TIEMPOS DE LIMPIEZA EN EL PLASMA DE RIE PARA LAS MUESTRAS 1A Y 1D.	51
TABLA 8. CONDICIONES DE DEPÓSITO DE LAS PELÍCULAS DE SILICIO AMORFO DOPADO E INTRÍNSECO PARA EL PROCESO DE FABRICACIÓN 1.	52
TABLA 9. PROCESO 1 – MUESTRA 1A: CONDICIONES DE PRUEBA.	53
TABLA 10. PROCESO 1 – MUESTRA 1D: AUMENTO DE TIEMPO EN EL PLASMA DE RIE.	53
TABLA 11. RESULTADOS OBTENIDOS CON EL PERFILÓMETRO PARA LOS ESPESORES A DIFERENTES CONCENTRACIONES DE PH <sub>3</sub> – PROCESO 2.	55
TABLA 12. PARÁMETROS DE LIMPIEZA EN PLASMA DE RIE – PROCESO 2	57
TABLA 13. PARÁMETROS DEL DEPÓSITO DE PELÍCULAS INTRÍNSECAS, DOPADAS TIPO P Y TIPO N, CON UNA CONCENTRACIÓN DE [PH <sub>3</sub> /SiH <sub>4</sub> ]=0.1% - MUESTRA 2A	57
TABLA 14. PARÁMETROS DEL DEPÓSITO DE PELÍCULAS INTRÍNSECAS, DOPADAS TIPO P Y TIPO N, CON UNA CONCENTRACIÓN DE [PH <sub>3</sub> /SiH <sub>4</sub> ]=0.5% - MUESTRAS 2C Y 2E.	58
TABLA 15. PARÁMETROS DEL DEPÓSITO DE PELÍCULAS INTRÍNSECAS, DOPADAS TIPO P Y TIPO N, CON UNA CONCENTRACIÓN DE [PH <sub>3</sub> /SiH <sub>4</sub> ]=0.7% - MUESTRA 2E.	58
TABLA 16. PROCESO 2 - MUESTRA 2A: CELDAS DE 1CM <sup>2</sup> CON [PH <sub>3</sub> /SiH <sub>4</sub> ]=0.1%.	61
TABLA 17. PROCESO 2 - MUESTRA 2C: CELDAS DE 1CM <sup>2</sup> CON [PH <sub>3</sub> /SiH <sub>4</sub> ]=0.5%.	61
TABLA 18. PROCESO 2 - MUESTRA 2D: CELDA DE 2" CON [PH <sub>3</sub> /SiH <sub>4</sub> ]=0.5%.	61
TABLA 19. PROCESO 22 - MUESTRA E: CELDAS DE 1CM <sup>2</sup> CON [PH <sub>3</sub> /SiH <sub>4</sub> ]=0.7%.	61
TABLA 20. TIEMPOS DE LIMPIEZA UTILIZADOS EN EL EQUIPO DE GRABADO IÓNICO REACTIVO PARA LAS CELDAS DE 1CM <sup>2</sup> Y 2" – PROCESO 3.	64
TABLA 21. PARÁMETROS DEL DEPÓSITO DE LAS PELÍCULAS INTRÍNSECAS, DOPADAS TIPO P Y TIPO N - MUESTRA 3A.	64
TABLA 22. PARÁMETROS DEL DEPÓSITO DE LAS PELÍCULAS INTRÍNSECAS, DOPADAS TIPO P Y TIPO N – MUESTRAS 3B, 3D, 3E Y 3F.	65
TABLA 23. PARÁMETROS DEL DEPÓSITO DE LAS PELÍCULAS INTRÍNSECAS, DOPADAS TIPO P Y TIPO N - MUESTRA 3C.	65
TABLA 24. PROCESO 3 - MUESTRA 3A: A-Si:H TIPO P SUPERIOR DE 5 NM.	67
TABLA 25. PROCESO 3 – MUESTRA 3B: A-Si:H TIPO P SUPERIOR DE 7 NM.	68
TABLA 26. PROCESO 3 - MUESTRA 3C: A-Si:H TIPO P SUPERIOR DE 16 NM.	68
TABLA 27. PROCESO 3 - MUESTRA 3D: A-Si:H TIPO P SUPERIOR DE 7 NM.	68
TABLA 28. PROCESO 3 - MUESTRA 3E: CELDA DE 2" CON FOTOLITOGRAFÍA.	69
TABLA 29. PROCESO 3 - MUESTRA 3F: CELDA DE 2" CON MASCARILLA METÁLICA.	69
TABLA 30. COMPARATIVO DE LOS DIFERENTES VALORES DE REFLECTANCIA DEPENDIENDO DEL TIPO DE GRABADO [6.1].	73
TABLA 31. PARÁMETROS DEL DEPÓSITO DE PELÍCULAS DOPADAS TIPO P Y TIPO N A DIFERENTES TEMPERATURAS.	74

## LISTA DE ACTRÓNIMOS

---

- μm** → Micrómetro
- Ar** → Argón
- a-Si** → Silicio amorfo
- a-Si:H** → Silicio amorfo hidrogenado
- a-Si:H intrínseco** → Silicio amorfo hidrogenado intrínseco
- a-Si:H tipo n** → Silicio amorfo hidrogenado dopado tipo n
- a-Si:H tipo p** → Silicio amorfo hidrogenado dopado tipo p
- a-SiC:H** → Carburo de silicio amorfo hidrogenado
- ASTM** → American Society for Testing and Materials
- B<sub>2</sub>H<sub>6</sub>** → Diborano
- BSF** → Back Source Field
- b-Si** → Silicio negro
- CF<sub>4</sub>** → Tetrafluoruro de carbono
- c-Si** → Silicio cristalino
- CVD** → Depósito químico de vapor
- CZ** → Proceso Czochralski
- DC** → Corriente directa
- DI** → Agua desionizada
- EBPVD** → Electron-beam physical vapor deposition
- eV** → Electrón Volt
- FZ** → Proceso de Zona Flotante
- g** → gramos
- GAP** → Intervalo de banda prohibida
- GW** → Giga Watts
- H<sub>2</sub>** → Hidrógeno
- HF** → Ácido fluorhídrico
- HIT** → Heterounión con capa intrínseca delgada (Heterojunction with Intrinsic Thin Layer)
- HNO<sub>3</sub>** → Ácido nítrico
- Imp** → Corriente a máxima potencia

**IPA** → Alcohol isopropílico

**I<sub>sc</sub>** → Corriente en corto circuito

**ITO** → Indium Thin Oxide (Óxido de Indio dopado con Estaño)

**J<sub>sc</sub>** → Densidad de corriente de corto circuito

**K** → Kelvin

**KOH** → Hidróxido de potasio

**L** → Litros

**min** → Minutos

**ml** → mililitros

**MW** → Mega Watts

**NaOH** → Hidróxido de sodio

**nm** → Nanómetros

**O<sub>2</sub>** → Oxígeno

**PCD** → Photo-Conductance Decay

**PECVD** → Depósito químico de vapor asistido por plasma

**PH<sub>3</sub>** → Fosfina

**PV** → Fotovoltáico, por sus siglas en inglés

**PVD** → Depósito físico de vapor

**QSSPC** → Quasi-Steady State Photo-Conductance

**RF** → Radio Frecuencia

**RIE** → Grabado Iónico Reactivo

**Rs** → Resistencia en Serie

**R<sub>shunt</sub>** → Resistencia en paralelo

**s** → Segundo

**Sccm** → Standard cubic centimeters per minute

**SF<sub>6</sub>** → Hexafluoruro de azufre

**SiH<sub>4</sub>** → Silano

**TCE** → Tricloroetileno

**TCO** → Óxido conductor transparente

**Torr** → Medida de presión

**ULSI** → Ultra large-scale integration

**VLSI** → Very large-scale integration

**V<sub>mp</sub>** → Voltaje a máxima potencia

**V<sub>oc</sub>** → Voltaje en Corto circuito

**W** → Watts

**XeF<sub>2</sub>** → Difluoruro de xenón

**XRD** → Difracción de rayos X

**Ωcm** → Ohm por centímetro

# CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

---

Actualmente, el impacto ambiental de los combustibles fósiles y el incremento de la demanda que existe con las fuentes de energía disponibles deja en evidencia un escenario de crisis energética global. Una alternativa que se ha propuesto es utilizar energías limpias como la energía eólica, la energía de biomasa y la energía solar fotovoltaica.

## 1.1 Energías renovables y energía solar

Los combustibles predominantes (el petróleo, el carbón y el gas natural) no sólo son finitos y se vuelven cada vez más escasos, sino que incluso en abundancia su combustión está alterando la composición de la atmósfera y, por lo tanto, causando un efecto significativo y medible en el clima [1.1].

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), adoptados por la Asamblea General de las Naciones Unidas (AGNU) en 2015, proporcionan un marco poderoso de cooperación internacional para lograr un futuro sostenible para el planeta. Los 17 ODS y sus 169 objetivos, en el corazón de la "Agenda 2030", definen un camino para terminar con la pobreza extrema, combatir la desigualdad e injusticia, y proteger el medio ambiente del planeta [1.2]. El objetivo global sobre energía abarca tres puntos clave: garantizar el acceso asequible, confiable y universal a los servicios energéticos modernos; aumentar sustancialmente la participación de las energías renovables de manera global; y duplicar la tasa global de mejora en eficiencia energética.

La energía solar fotovoltaica, junto con todas las demás formas de energía que no consumen combustibles fósiles, compite directamente con los intereses económicos de las corporaciones que se benefician de la extracción y venta de petróleo, carbón y gas natural [1.3]. Cada *Joule* de energía que se consume de un recurso renovable reemplaza un *Joule* de energía que de otro modo necesitaría estar disponible a través de la combustión química, generalmente de un combustible fósil o energía nuclear.

El término fotovoltaico se refiere a la conversión de energía directa de la radiación solar en electricidad. La energía fotovoltaica está atrayendo un gran interés académico e industrial, y es considerada por muchos como la tecnología de generación de energía más prometedora para el futuro [1.4]. Los sistemas fotovoltaicos pueden suministrar energía eléctrica desde unos pocos cientos de vatios hasta decenas de megavatios, dependiendo del número de módulos solares y su ubicación. La conversión de energía tiene lugar en las

celdas solares, que generalmente están hechas de un material semiconductor como el silicio, el germanio o el arseniuro de galio.

## 1.2 Sector solar en México y el mundo

Los sistemas solares fotovoltaicos distribuidos en hogares, edificios comerciales e industria están listos para despegar, trayendo cambios significativos en los sistemas de energía. Un rápido aumento en la capacidad de los consumidores para generar su propia electricidad presenta nuevas oportunidades y desafíos para los proveedores y los responsables políticos de todo el mundo (*Figura 1*) [\[1.5\]](#).

En el caso específico de la energía solar, México es uno de los cinco países con mayor potencial en el mundo, pues la cantidad de energía solar promedio que se recibe en el país es de  $5 \text{ kWh/m}^2$  al día, por lo que se estima que el potencial solar bruto representa alrededor de 50 veces el total de energía eléctrica generada en el país [\[1.6\]](#). Estudios de la *Asociación Mexicana de la Industria Fotovoltaica* (AMIF) han identificado que cada megavatio de energía solar genera 20 empleos directos que se requieren durante un año de trabajo para instalar 3000 paneles en el país. De esta forma, y con miras hacia el 2024, México tiene la posibilidad de crear miles de empleos y el potencial de generar  $25000 \text{ MW}$  de capacidad instalada de energía solar fotovoltaica si sustituye sólo aproximadamente  $10\%$  de generación basada en combustibles fósiles por energía eléctrica solar.

Hasta noviembre del 2019 el sector solar creció  $32\%$ , al pasar de pasar de  $3075 \text{ MW}$  en diciembre de 2018 a  $4057 \text{ MW}$  en junio de 2019, informó la *Asociación Mexicana de Energía Solar* (Asolmex) [\[1.7\]](#).

Las ambiciones de los objetivos de energía renovable se plantean constantemente en muchos países por diferentes razones. Por ejemplo, la Unión Europea ha ajustado su objetivo vinculante para 2030 del  $27\%$  que se estableció en 2014, al  $32\%$  en junio de 2018. El nuevo objetivo incluye un artículo que establece que en 2023 los países se volverán a reunir para discutir una actualización al alza [\[1.8\]](#). El Gobierno de la India estableció un ambicioso objetivo de energía renovable de  $175 \text{ GW}$  para 2022, que incluye  $60 \text{ GW}$  de energía eólica y  $100 \text{ GW}$  de energía solar [\[1.9\]](#). A medida que el país hizo un buen progreso, el Gobierno de la India aumentó el objetivo a  $227 \text{ GW}$  para 2027.

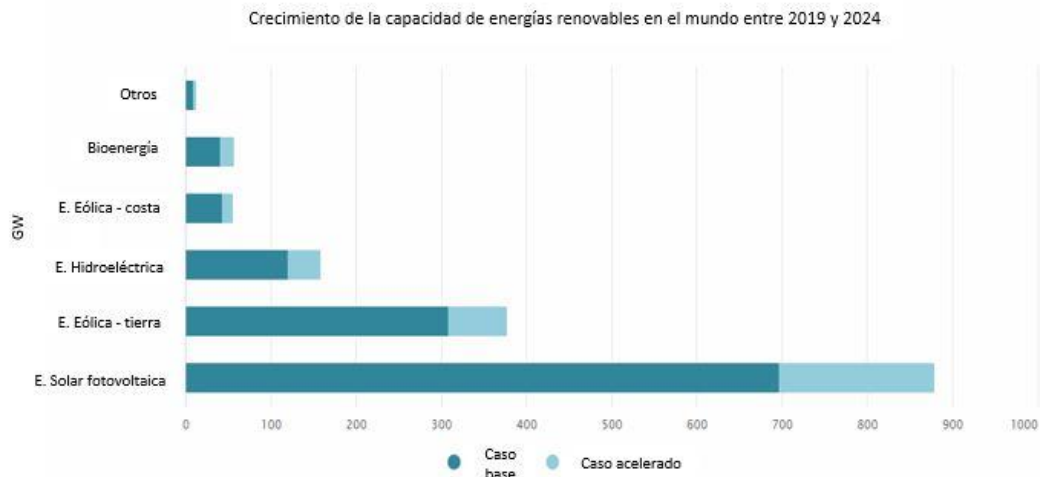


Figura 1. Crecimiento de la capacidad de energías renovables en el mundo entre 2019 y 2024 [1.10].

Se pronostica que China representará casi la mitad del crecimiento global de la energía fotovoltaica distribuida, superando a la Unión Europea para convertirse en el líder mundial en capacidad instalada a partir de 2021. Si bien Japón sigue siendo un mercado fuerte, India y Corea del Sur emergen como motores del crecimiento de la capacidad en Asia. La expansión de la energía solar fotovoltaica distribuida en América del Norte es el doble de rápida entre 2019 y 2024 (Figura 2) que entre 2013 y 2018, impulsada principalmente por los Estados Unidos [1.10].

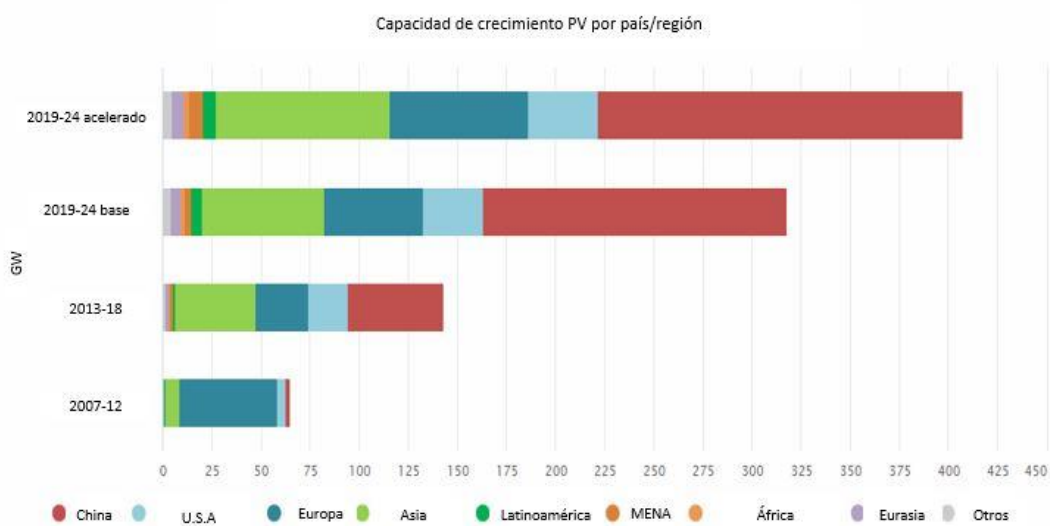


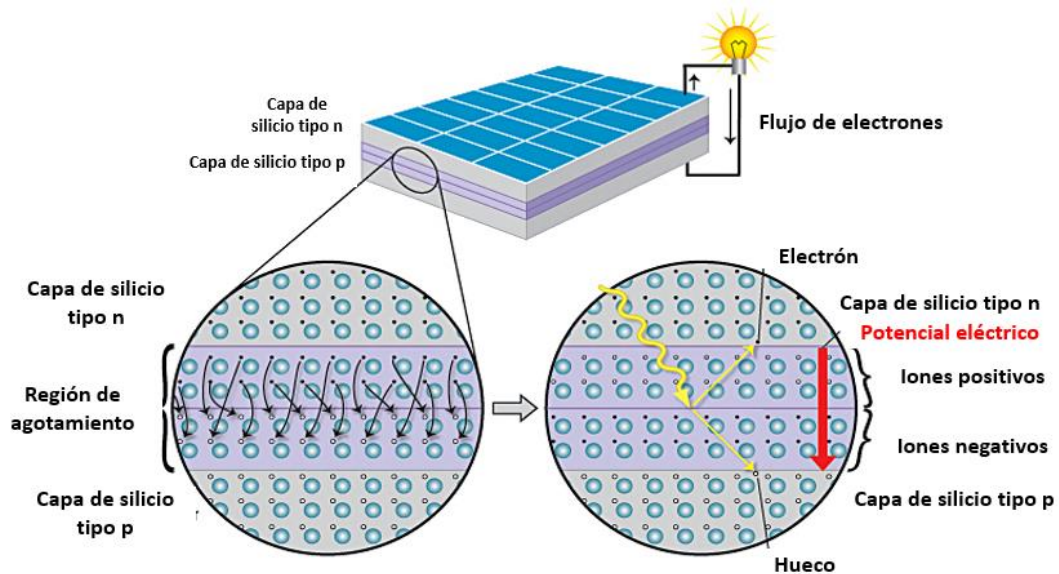
Figura 2. Capacidad de crecimiento PV por país/región [1.10]

La proporción de energía renovable puede crecer del 15% en 2015, al 63% del suministro total de energía primaria en 2050. Tal crecimiento, en combinación con una mayor eficiencia energética, puede proporcionar el 94% de la

reducción de emisiones que se necesita para permanecer dentro del límites del *Acuerdo Climático de París* [\[1.11\]](#).

### 1.3 Celda solar y tipos de celdas solares

Una celda solar, básicamente, es una unión *pn* (*Figura 3*). En la capa tipo *n* los portadores mayoritarios son los electrones, y en la capa de tipo *p* los portadores mayoritarios son los huecos. Al formar la unión *pn*, los electrones en la capa tipo *n* se mueven hacia la capa tipo *p*, mientras los huecos de la capa *p* se mueven hacia la capa tipo *n*. Esto crea un área, alrededor de la unión, llamada región de agotamiento (*Figura 3, primer plano*), o región de carga espacial, o región de vaciamiento, entre otros nombres. Cuando la luz solar incide en una celda solar, se arrancan electrones de los enlaces de silicio, lo que da como resultado la generación de pares electrón-hueco. Si estos pares fotogenerados se producen dentro de la región de carga espacial o muy cercana a ella (a una longitud de difusión), el campo eléctrico moverá electrones fotogenerados a la capa tipo *n* y los huecos fotogenerados a la capa de tipo *p*. Si se conectan las capas tipo *n* y tipo *p* por, medio de un conductor, a una carga (en este caso foco o lámpara) se producirá un flujo de corriente.



*Figura 3. Representación esquemática del funcionamiento de la región de agotamiento de una celda solar*

Las celdas solares se pueden organizar en grandes grupos llamados matrices o arreglos. Estas matrices, compuestas por celdas individuales, pueden funcionar como estaciones centrales de energía, convirtiendo la luz solar en energía eléctrica para su distribución a usuarios industriales, comerciales y residenciales (*Figura 4*).



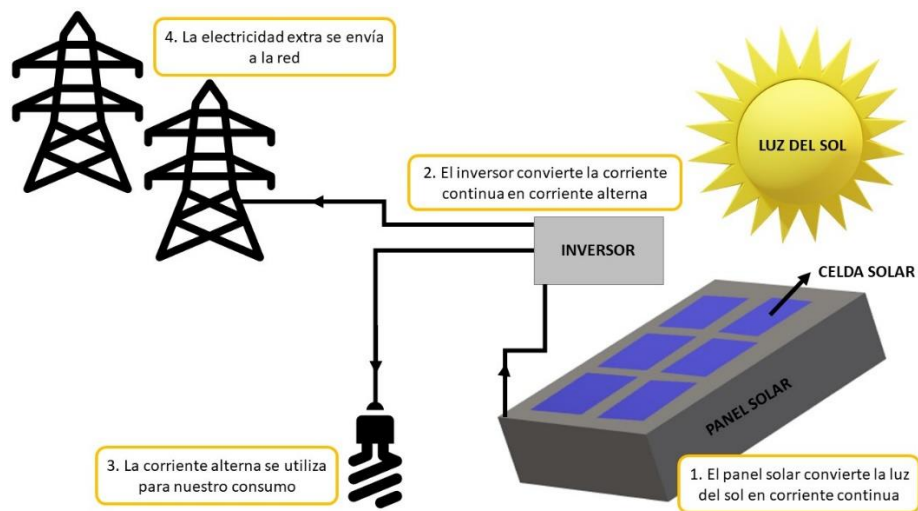


Figura 4. Esquema básico del funcionamiento de una instalación solar.

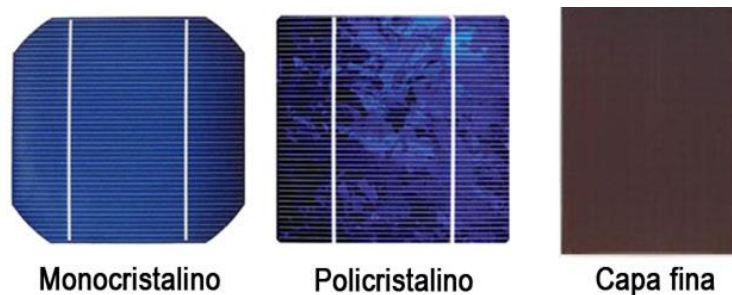
Los diferentes tipos de celdas solares incluyen las celdas solares orgánicas, las celdas HIT, las celdas de silicio cristalino y las celdas de multiunión; sus eficiencias más altas, alcanzadas a nivel laboratorio en 2019, se presentan en la *Tabla 1*.

Tipo de celda	Mejor eficiencia reportada* para celdas de área pequeña** creadas en laboratorios
Silicio cristalino (c-Si)	25.6% (PERL, UNSW)
Silicio multicristalino (multi-c-Si)	20.3% (FhG, ISE)
Silicio amorfo hidrogenado ( $\alpha$ -Si:H)	10.1% (Kaneka)
Celda HIT	25.6% (Sanyo)
Celda GaAs	25.1% (Kopin)
Celdas multiunión (GaInP/GaAs/Ge)	32.0% (Spectrolab)
Celda de InP	21.9% (Spire)
Celdas de CdTe	16.5% (NREL)
Celdas CIGS	19.5% (NREL)
Celdas orgánicas	8.2% (ECN)

Tabla 1. Mejores eficiencias reportadas para diferentes tipos de celdas solares [1.23] –  
 \*En 2019  
 \*\*1cm<sup>2</sup>

## 1.4 Celdas solares a base de silicio

Las celdas solares a base de silicio se han convertido en la tecnología fotovoltaica dominante porque el silicio exhibe una buena estabilidad y grandes beneficios económicos, derivados de la industria de la microelectrónica. Las celdas solares a base de silicio se pueden dividir en dos grupos principales como muestra la *Figura 5*: celdas solares de silicio cristalino (ya sea monocristalino, policristalino o microcristalino) a base de obleas de homounión y celdas solares de silicio de película delgada o capa fina.



*Figura 5. Tipos de celdas solares basadas en silicio.*

Las celdas solares de silicio monocristalino, policristalino o microcristalino tienen una eficiencia teórica máxima de alrededor del 29.1%, ya que existe un límite a la cantidad de luz solar que se puede convertir en electricidad útil (denominado el límite de *Shockley-Queisser*) [1.13]. También, al ser un semiconductor de banda indirecta, el silicio tiene un coeficiente de absorción de luz relativamente bajo. A pesar de esto, con una textura simple de la superficie de la oblea, combinada con el uso de recubrimientos antirreflejantes bien diseñados (u otros recubrimientos ópticos) y espejos en la superficie trasera, es posible una absorción eficiente de la luz, incluida la parte infrarroja del espectro solar, incluso con obleas relativamente delgadas ( $100 - 150 \mu\text{m}$ ) [1.14]. Por otro lado, en comparación con otras tecnologías fotovoltaicas, las celdas solares de silicio tienen la ventaja de usar un material absorbente fotoactivo que es estable, no tóxico, abundante y ampliamente estudiado. El año 2014 fue testigo de la ruptura del histórico récord de eficiencia de conversión de energía del 25% para las celdas solares de silicio cristalino, que fue establecido por la *Universidad de Nueva Gales del Sur* (UNSW), Australia. Casi simultáneamente, Panasonic (Japón) y SunPower, (EE. UU.), informaron eficiencias certificadas independientemente de 25.6% y 25.0%, respectivamente, ambas utilizando obleas de silicio de tamaño industrial [1.15]. Sin embargo, la reducción de costos es el principal desafío para las celdas solares de *c-Si* debido al uso de obleas costosas y al requisito de procesamiento a alta temperatura durante la formación de la unión. Algunas de

las vías más fructíferas de investigación en materiales fotovoltaicos han involucrado la búsqueda de alternativas a la clásica celda de silicio. Las celdas solares de silicio de película delgada basadas en silicio amorfo hidrogenado ( $a\text{-Si:H}$ ) dopado y silicio microcristalino hidrogenado ( $\mu\text{c-Si:H}$ ) son candidatos prometedores para la tecnología fotovoltaica de bajo costo debido a su bajo consumo de material y procesamiento de baja temperatura en comparación a las celdas solares de  $c\text{-Si}$  [1.16].

## 1.5 Celdas solares HIT

Las celdas solares de silicio de heterounión ( $HJ$ ) utilizan obleas de silicio cristalino tanto para el transporte como para la generación del portador, y capas de silicio delgadas amorfas y/o microcristalinas para la pasivación y la formación de uniones. El electrodo superior está compuesto por una capa de óxido conductor transparente ( $TCO$ ) en combinación con una rejilla metálica (que en muchos casos es de plata o aluminio) [1.17].

En la estructura de la celda solar HIT, o celda solar de heterounión con película intrínseca (Figura 6), una capa intrínseca de silicio amorfo hidrogenado ( $(i) a\text{-Si:H}$ ) seguida de una capa dopada tipo  $p$  de silicio amorfo hidrogenado ( $a\text{-Si:H}$  de tipo  $p$ ) se deposita sobre una oblea de  $c\text{-Si}$  de tipo  $n$  o  $p$  con textura aleatoria para formar una heterounión  $p/n$ . En el otro lado del  $c\text{-Si}$ , se depositan capas de  $a\text{-Si:H}$  intrínseco y  $a\text{-Si:H}$  tipo  $n$  para obtener una estructura de *Back Surface Field* (BSF). En ambos lados de las capas dopadas de  $a\text{-Si:H}$  se forman capas de óxido conductor transparente ( $TCO$ ) y, finalmente, se forman electrodos de rejilla metálica mediante un método de serigrafía o evaporación *e-beam*. Al insertar una capa de  $a\text{-Si:H}$  intrínseca de alta calidad, los defectos en la superficie de  $c\text{-Si}$  pueden pasivarse de manera efectiva, y lo que conlleva a un alto voltaje de corto circuito [1.18]. El objetivo principal de la pasivación de interfaz es reducir la recombinación de portadores fotogenerados en la superficie del silicio.

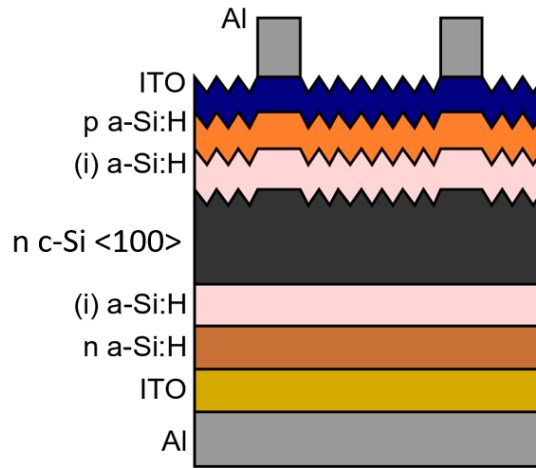


Figura 6. a) estructura básica de una celda sola HIT

La heterounión de las celdas solares HIT es un desarrollo importante en el campo de los dispositivos fotovoltaicos ya que el potencial para lograr altas eficiencias es uno de los principales factores que atrae el interés en la tecnología HIT [1.19], pero, además, esta tecnología cuenta con otra ventaja muy importante sobre los procesos convencionales de *c-Si*, y es el uso de temperaturas relativamente bajas para los procesos de fabricación. Mientras que las celdas solares *c-Si* convencionales se fabrican por difusión térmica a temperaturas de alrededor de  $1000^{\circ}\text{C}$ , las celdas HIT se pueden fabricar a temperaturas menores o iguales a  $200^{\circ}\text{C}$  [1.20], además de tener un tiempo de fabricación más corto. Otro beneficio de este tipo de celda es su eficiencia a temperaturas de operación más altas [1.21], como se muestra en la Figura 7.a. A medida que una celda solar se calienta durante la exposición prolongada a la luz solar, la eficiencia tiende a disminuir. Sin embargo, la eficiencia de las celdas HIT no disminuye tan rápidamente con el aumento de la temperatura de funcionamiento como en las celdas de *c-Si* convencionales. Mientras que los módulos fotovoltaicos de silicio cristalino típicamente exhiben un coeficiente de temperatura de aproximadamente  $-0.50\%/^{\circ}\text{C}$ , algunos módulos *a-Si* en realidad exhiben un coeficiente de temperatura positivo en un rango de temperatura apreciable [1.22]. Una ventaja adicional es su rendimiento mejorado a lo largo de los meses del año [1.21], como se muestra en la Figura 7.b.

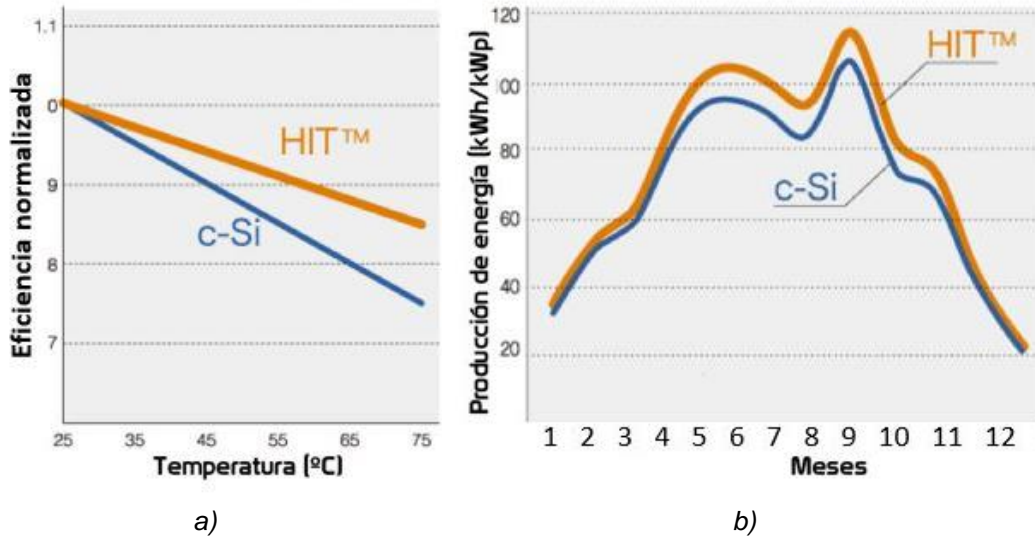


Figura 7. a) Eficiencia normalizada de una celda HIT y una celda de c-Si vs. Temperatura y b) Salida de potencia normalizada de una celda HIT y una celda de c-Si vs. Tiempo del año [1.21].

Otro beneficio de las celdas HIT es que su simetría proporciona la capacidad de fabricar módulos bifaciales, que logran una mayor eficiencia aprovechando la luz reflejada desde atrás y entrando por la parte posterior de la oblea.

No obstante, para lograr un alto rendimiento de las celdas HIT y sacar provecho de todas las ventajas y beneficios previamente mencionados, es necesario reducir las pérdidas ópticas, de recombinación y de resistencia en las celdas solares de silicio de heterounión. Estos desafíos tienen que ver con la limpieza de obleas, la supresión del crecimiento epitaxial, el control del espesor de las capas delgadas de silicio amorfo hidrogenado dopado, la reducción de las pérdidas de absorción en capas delgadas de silicio y óxido conductor transparente, la textura de la superficie y la mejora de los electrodos de rejilla

## 1.6 Esta tesis

La búsqueda en la reducción de los costos para la fabricación de tecnologías fotovoltaicas de alta eficiencia enfoca este trabajo en el estudio de celdas solares HIT. Con el objetivo de optimizar el proceso de fabricación de las celdas solares HIT en el Laboratorio de Microelectrónica se plantean los siguientes objetivos:

- Desarrollar celdas solares HIT a bajas temperaturas (iguales o menores a 200°C) dentro de las Instalaciones del Laboratorio de Microelectrónica del Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica.
- Identificar los factores en el proceso de fabricación que pueden reducir la eficiencia de conversión de una celda solar HIT.

- Proponer métodos de fabricación que permitan incrementar el valor de la corriente de corto circuito, el voltaje de circuito abierto y el factor de llenado de las celdas HIT.
- Estudiar el efecto del cambio de temperatura sobre las propiedades físicas de las capas de *a-Si:H* intrínseco, *a-Si:H* dopado tipo *p* y *a-Si:H* dopado tipo *n*.

## 1.7 Referencias capítulo 1

[1.1] Haeberli W, Beniston M. *Climate change and its impacts on glaciers and permafrost in the alps*. *Ambio* 1998; 27:258–65

[1.2] United Nations Department of Economic and Social Affairs (UN DESA), *Sustainable Development Goal 7: Ensure Access to Affordable, Reliable, Sustainable and Modern Energy for All*, UN DESA, New York, NY, 2017 <https://sustainabledevelopment.un.org/sdg7>.]

[1.3] L. Phillips, "Solar energy", *Managing Global Warming*, pp. 317-332, 2019. Available: 10.1016/b978-0-12-814104-5.00009-0

[1.4] Green, M.: *Crystalline Silicon Solar cells*. In: Archer, M., Hill, R. (eds.) *Crystalline Silicon Solar Cells*, p. 149. Imperial College Press, London (2001)

[1.5] "Renewables 2019 – Analysis - IEA", IEA, 2019. [Online]. Available: <https://www.iea.org/renewables2019/>.

[1.6] Carlos Ortiz Diaz 26 de agosto de 2019, "FOMIF 2019 proyectará a México como una potencia solar", *El Economista*, 2019. [Online]. Available: <https://www.eleconomista.com.mx/opinion/FOMIF-2019-proyectara-a-Mexico-como-una-potencia-solar-20190826-0115.html>.

[1.7] R. Press, "Energía solar en México crece 32% en los primeros seis meses de 2019", *MyPress.mx*, 2019. [Online]. Available: <https://www.mypress.mx/tecnologia/energia-solar-en-mexico-crece-32-en-los-primeros-seis-meses-de-2019-5625>.

[1.8] European Commission. *Renewable Energy. Moving towards a Low Carbon Economy*. European Commission: Brussels. <https://ec.europa.eu/energy/en/topics/renewableenergy>

[1.9] MNRE. Tentative State-wise break-up of Renewable Power target to be achieved by the year 2022 so that cumulative achievement is 175,000 MW. Delhi: MNRE (n.d.). <https://mnre.gov.in/file-manager/UserFiles/Tentative-State-wise-break-up-of-Renewable-Power-by-2022.pdf>.

[1.10] "Renewables 2019 – Analysis - IEA", IEA, 2019. [Online]. Available: <https://www.iea.org/renewables2019/>.

[1.11] D. Gielen, F. Boshell, D. Saygin, M. Bazilian, N. Wagner and R. Gorini, "The role of renewable energy in the global energy transformation", *Energy Strategy Reviews*, vol. 24, pp. 38-50, 2019. Available: 10.1016/j.esr.2019.01.006

[1.12] C. Battaglia, A. Cuevas and S. De Wolf, "High-efficiency crystalline silicon solar cells: status and perspectives", *Energy & Environmental Science*, vol. 9, no. 5, pp. 1552-1576, 2016. Available: 10.1039/c5ee03380b

[1.13] R. M. Swanson, *Proc. 31st IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Lake Buena Vista, FL, USA, 2005*, pp. 889–894.

[1.14] A. Richter, M. Hermle and S. W. Glunz, *IEEE J. Photovoltaics*, 2013, 3, 1184–1191.

[1.15] J. H. Zhao, A. H. Wang and M. A. Green, *Prog. Photovoltaics*, 1999, 7, 471. -- M. A. Green, *Prog. Photovoltaics*, 2009, 17, 183.

[1.16] W. Sark, L. Korte and F. Roca, *Physics, and technology of amorphous-crystalline heterostructure silicon solar cells*. Berlin: Springer, 2012.

[1.17] W. Sark, L. Korte and F. Roca, *Physics, and technology of amorphous-crystalline heterostructure silicon solar cells*. Berlin: Springer, 2012. Pag 13

[1.18] Tsunomura, Yasufumi & Yoshimine, Yukihiro & Taguchi, Mikio & Kinoshita, Toshihiro & Kanno, Hiroshi & Sakata, Hitoshi & Maruyama, Eiji & Tanaka, Makoto. (2007). 22%EFFICIENCY HIT SOLAR CELL.

[1.19] Panasonic Press Release, 10 April 2014. "Panasonic HIT® solar cell achieves world's highest energy conversion efficiency of 25.6% at research level" (<http://panasonic.co.jp/corp/news/official.data/data.dir/2014/04/>) (2014)

[1.20] M. Kushner. *Journal of Applied Physics*, 1988. Pag 63 [Accessed: 21-Sep-2020]

[1.21] "Panasonic Solar HIT | Life Solutions | Business | Panasonic Global",  
Panasonic.net, 2018. [Online]. Available:  
<http://panasonic.net/ecosolutions/solar/hit/>

[1.22] K. Akhmad, A. Kitmura, F. Yamamoto, H. Okamoto, H. Takakura, and Y. Hamakawa, "Outdoor Performance of Amorphous Silicon and Polycrystalline Silicon PV Modules", *Solar Energy Materials and Solar Cells* 46, 209-218 (1997).



## CAPÍTULO 2: FUNDAMENTO TEÓRICO

---

En este capítulo se hace un breve resumen de los conceptos teóricos necesarios para entender el funcionamiento de una celda solar de película delgada. Estos conceptos incluyen el espectro de radiación solar, el efecto fotovoltaico, los materiales cristalinos y amorfos, y los parámetros eléctricos que miden el desempeño ( $V_{oc}$ ,  $I_{sc}$ ,  $FF$  y  $Eff$ ).

### 2.1 Cuerpo negro y espectro de radiación solar

#### 2.1.1 Cuerpo negro

Muchas fuentes de luz que se encuentran comúnmente, incluido el sol y las bombillas incandescentes, se modelan de cerca como emisores de "cuerpo negro". Un cuerpo negro absorbe toda la radiación que incide en su superficie y emite radiación en función de su temperatura. Los cuerpos negros derivan su nombre del hecho de que, si no emiten radiación en el rango visible, parecen negros debido a la absorción completa de todas las longitudes de onda. Las fuentes de cuerpo negro que son de interés para la energía fotovoltaica emiten luz en la región visible [\[2.1\]](#). La irradiancia espectral de un cuerpo negro viene dada por la *ley de radiación de Planck*, que se muestra en la siguiente ecuación:

$$F(\lambda) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 (\exp(\frac{hc}{\lambda kT}) - 1)} \quad (1)$$

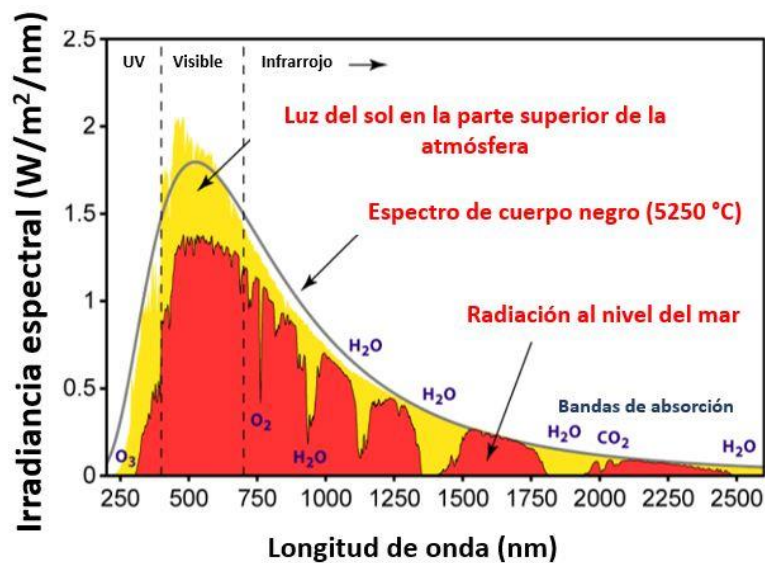
Donde,  $\lambda$  es la longitud de onda de la luz;  $T$  es la temperatura del cuerpo negro (en  $K$ );  $F$  es la irradiancia espectral; y  $h, c$  y  $k$  con constantes.

#### 2.1.2 Espectro de radiación solar

La energía emitida por el sol se propaga en todas las direcciones a través del espacio mediante ondas electromagnéticas; esta energía, conocida como radiación solar, tiene un valor de  $1366.1 \text{ W/m}^2$ . Después de pasar por la atmósfera, donde sufre un proceso de debilitamiento por la difusión, reflexión en las nubes y de absorción por las moléculas de gases (como el ozono y el vapor de agua) y por partículas en suspensión, la radiación solar alcanza la superficie terrestre oceánica y continental con un valor de aproximadamente  $1000 \text{ W/m}^2$ . La cantidad de radiación absorbida por la superficie es devuelta

en dirección al espacio exterior en forma de radiación de onda larga, con lo cual se transmite calor a la atmósfera.

El sol emite energía principalmente en la banda del ultravioleta, visible y el infrarrojo cercano, con longitudes de onda desde  $0.2$  a  $3.0 \mu\text{m}$  ( $200$  a  $3000 \text{ nm}$ ), como lo muestra la *Figura 8*. Aproximadamente un  $99\%$  de la radiación solar que llega a la superficie de la Tierra está contenida en la región entre  $0.2$  y  $3.0 \mu\text{m}$  mientras que la mayor parte de la radiación terrestre de onda larga está contenida en la región entre  $3.5$  y  $50 \mu\text{m}$ .



*Figura 8. Espectro de radiación solar.*

## 2.2 Coeficiente de Masa de Aire

El coeficiente de masa de aire se utiliza para caracterizar el espectro solar después de que la radiación haya viajado a través de la atmósfera terrestre (*Figura 9*).

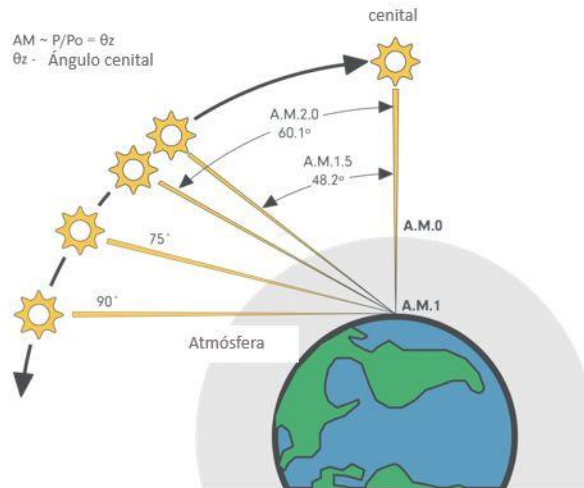


Figura 9. Esquema de las condiciones de la referencia espectral AM0, AM1, AM1.5 y AM2 [2.2].

El coeficiente de masa de aire está definido por la siguiente ecuación [2.28]:

$$AM = \frac{1}{\cos \theta} \quad (2)$$

Donde  $\theta$  es el ángulo de la vertical o ángulo cenital.

El espectro de radiación solar fuera de la atmósfera terrestre, también conocido como masa de aire 0 (AM 0), así como el estándar de radiación solar terrestre que se utiliza para las pruebas de rendimiento de celdas solares (AM 1.5) se presentan en la Figura 10.

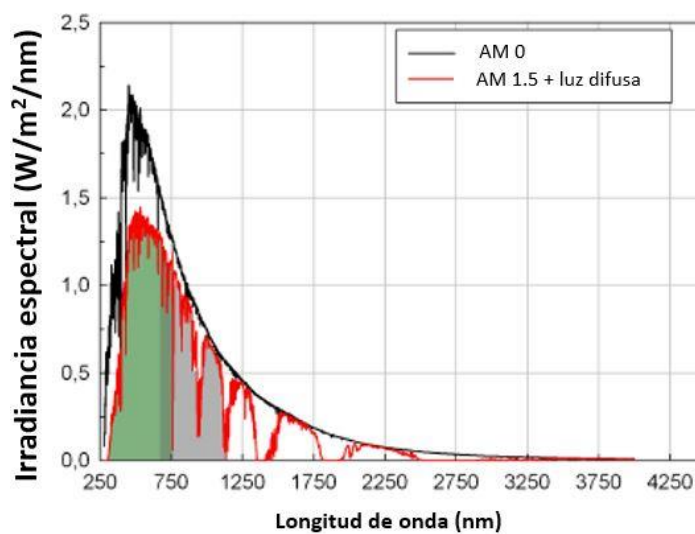


Figura 10. Densidad de potencia espectral de la luz solar. Los diferentes espectros se refieren a la radiación extraterrestre AM0 y la radiación AM1.5 [2.3].

En la *Figura 10*, el área sombreada verde indica el rango de longitudes de onda en el que operan las celdas solares *a-Si:H* (de 400 a 750 nm, aproximadamente), el área sombreada gris visualiza el rango de longitud de onda en el que operan las celdas solares  $\mu\text{c-Si:H}$  (de 600 a 1100 nm, aproximadamente). Estas dos áreas sombreadas combinadas indican el rango de longitud de onda en el que operan las celdas solares HIT (de 400 a 1100 nm, aproximadamente) [2.3].

Los espectros de referencia *AM1.5* se usan para realizar las mediciones de rendimiento de las celdas fotovoltaicas; estos son necesarios para comparar de manera unificada a los diferentes dispositivos fotovoltaicos y para registrar las mejoras de rendimiento porque los dispositivos *PV* son espectralmente selectivos y las mediciones de rendimiento varían en función del espectro incidente [2.2].

## 2.3 Efecto fotovoltaico

El Efecto fotovoltaico es el fenómeno por el cual las partículas cargadas eléctricamente se liberan desde un material semiconductor cuando este absorbe radiación electromagnética, generando una corriente eléctrica en un circuito cerrado [2.4].

La explicación de cómo se genera dicha corriente, o el efecto fotovoltaico, sería la siguiente:

- La unión de dos elementos semiconductores, uno tipo *n* y otro tipo *p*, provoca una diferencia de potencial.
- Los fotones transfieren la energía de la radiación solar incidente a los electrones de los semiconductores, liberándolos de los enlaces a los que estaban unidos y creando pares electrón-hueco.
- La diferencia de potencial que existente en la unión provoca un flujo de electrones fotogenerados, originando una diferencia de potencial en la celda solar.
- Mediante los contactos metálicos, la celda solar puede conectarse a una carga, por la que circulará una corriente eléctrica.

## 2.4 Materiales cristalinos y amorfos

Se denominan sólidos cristalinos (*Figura 11.a*) aquellos en los que los átomos, iones o moléculas se distribuyen de forma ordenada y periódica en las tres direcciones. En contraste, los materiales amorfos (*Figura 11.b*) no tienen una distribución regular dentro del sólido. Se puede diferenciar un sólido cristalino de uno amorfo por el espectro de difracción de rayos X (*XRD*): los sólidos

crystalinos presentan picos de difracción muy agudos mientras que los amorfos dan espectrogramas con picos muy anchos.



a) Cristalinos.

b) Amorfos.

Figura 11. Representación de sólidos cristalinos y amorfos [2.5].

### 2.4.1 Materiales cristalinos

En los materiales cristalinos los átomos, iones o moléculas muestran una distribución regular que da como resultado un patrón que se repite en las tres dimensiones del espacio, y a lo largo de muchas distancias atómicas; los materiales cristalinos presentan los mismos átomos vecinos y a idénticas distancias [2.6]. Debido a la variedad de órdenes de enlace disponibles, los tipos más comunes de configuraciones de celdas unitarias incluyen: cúbica simple, tetragonal, romboédrica, ortorrómbica, monoclinica y hexagonal (Figura 12).

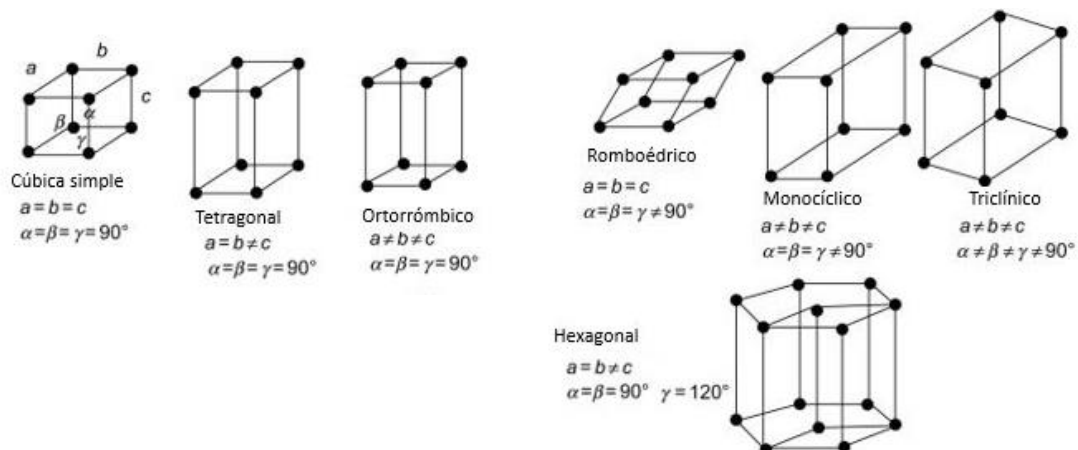


Figura 12. Ejemplos de estructuras cristalinas y sus correspondientes ángulos.

La importancia tecnológica de los sólidos cristalinos está en relación con sus propiedades eléctricas, ópticas o magnéticas que son distintivas de las estructuras periódicas y en base a las cuales se fabrican muchos dispositivos

de la vida actual: láseres, dispositivos emisores de luz (LED), fotómetros, celdas solares, transistores, chips, pantallas de televisión y sensores de temperatura o de humedad. Todas estas propiedades están relacionadas con la estructura del material y con la distribución de los electrones de valencia de los átomos que forman parte del cristal.

## 2.5 Silicio cristalino (c-Si)

El silicio cristalino (*Figura 13*) tiene una banda de energía prohibida de  $1.12 \text{ eV}$ , a  $300 \text{ K}$ , que corresponde a una longitud de onda de corte de absorción de luz de aproximadamente  $1160 \text{ nm}$  [2.15]. El silicio es un material muy abundante (aproximadamente el 25% de la corteza terrestre está compuesta de silicio) y no es tóxico; esto es especialmente importante para una tecnología ecológica. Los módulos fotovoltaicos con celdas solares de silicio cristalino son estables a largo plazo en exteriores ( $> 20 \text{ años}$ ); esto es decisivo para la competitividad de costos de la energía fotovoltaica porque actualmente la inversión comienza a pagar alrededor del décimo año después de la instalación inicial del sistema fotovoltaico. Finalmente, presentan alta eficiencia de conversión de energía, lo que reduce costos y permite la instalación de sistemas de alta potencia en sitios con espacio disponible limitado, como los techos de hogares o edificios. [2.7].

En el caso específico para la fabricación de celdas HIT, las obleas de silicio monocristalino utilizadas son de tipo Czochralski (CZ) y Zona Flotante (FZ). El uso de crisoles de cuarzo en la fabricación de sustratos CZ provoca la incorporación de  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$  partículas de oxígeno en el lingote de silicio; el oxígeno en sí es relativamente benigno, pero crea complejos con el dopaje de boro que degrada la vida útil del portador. Las obleas crecidas por el método FZ no presentan las desventajas de las obleas CZ; sin embargo, debido a la dificultad en el crecimiento de lingotes de gran diámetro y el costo a menudo más alto, las obleas FZ típicamente sólo se utilizan para las celdas de laboratorio y son menos comunes en la producción comercial.

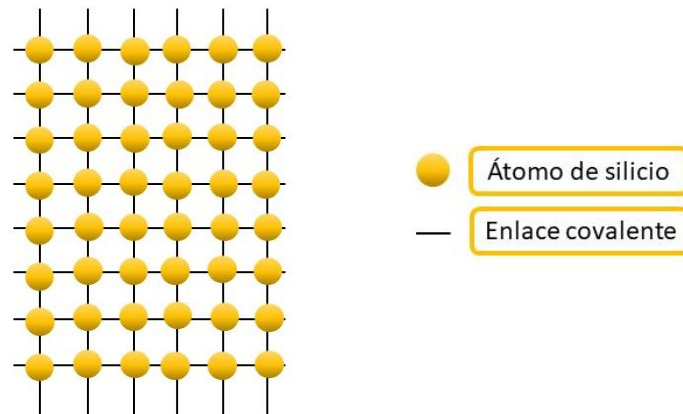


Figura 13. Esquema de la configuración del silicio cristalino.

### 2.5.1 Materiales amorfos

A diferencia de los materiales cristalinos, los amorfos se caracterizan porque los átomos que los componen no tienen una estructura con un orden periódico definido que se extiende a grandes regiones del sólido [2.8]. Esta falta de orden propicia la existencia de un número considerable de enlaces incompletos entre los átomos y, consecuentemente, una alta densidad de estados permitidos dentro del ancho de banda prohibida (Figura 14), cuyo valor en el silicio amorfo es del orden de 1.5 a 2.0 eV, a 300 K. El resultado de esta situación es que el tiempo de vida de los portadores de carga en este material es muy baja.

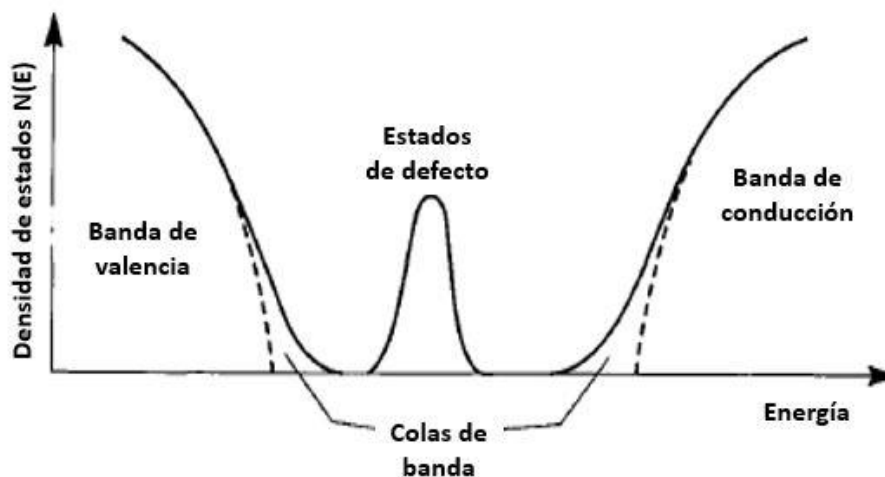


Figura 14. Esquema de la distribución de la densidad de estados de un semiconductor amorfo que muestra las bandas, las colas de banda y la densidad de estados dentro de la banda prohibida. Las líneas punteadas son el equivalente de la densidad de estados en un cristal.

El desorden representado por las desviaciones en las longitudes y los ángulos de enlace amplía la distribución electrónica de estados y provoca la localización de electrones y huecos, así como una fuerte dispersión de los portadores. Los defectos estructurales, como los enlaces rotos, tienen estados electrónicos correspondientes que se encuentran cerca de la mitad dentro de la banda prohibida. También hay nuevos fenómenos que se derivan del énfasis en los enlaces químicos locales en lugar de la simetría traslacional de largo alcance. La posibilidad de configuraciones alternativas de enlace de cada átomo conduce a una fuerte interacción entre los estados electrónicos y estructurales y provoca el fenómeno de metaestabilidad. La *Tabla 2* presenta algunas de las propiedades electrónicas de los materiales amorfos.

ESTRUCTURA	PROPIEDADES ELECTRÓNICAS
Desorden en los enlaces	Colas de banda, localización, dispersión
Defectos estructurales	Estados electrónicos en la banda prohibida
Configuraciones alternativas a los enlaces	Estados metaestables electrónicamente inducidos

*Tabla 2. Correspondencia entre las características de la estructura atómica y las propiedades electrónicas resultantes de los materiales amorfos.*

## 2.6 Silicio amorfo hidrogenado (*a-Si:H*)

El silicio amorfo (*a-Si*) es un material de estado sólido donde los átomos de silicio que están dispuestos en un orden de corto alcance [2.9]. Con la ausencia de las restricciones de periodicidad que existen en el silicio cristalino elemental, existe una gran densidad de enlaces incompletos. En comparación con el silicio cristalino, los ángulos de enlace promedio entre los átomos vecinos más cercanos están distorsionados (*Figura 15*). Algunos enlaces incluso se rompen y resultan en los llamados enlaces incompletos o enlaces abiertos (*dangling bonds*).



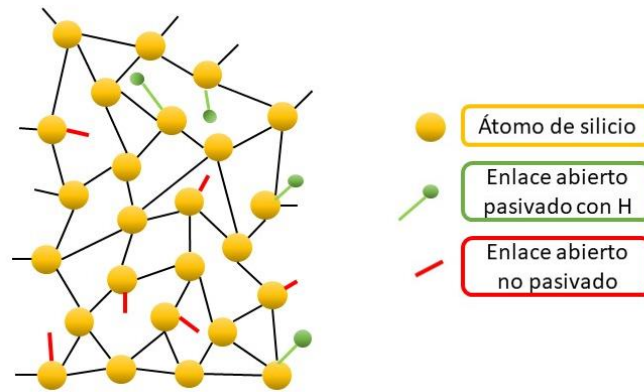


Figura 15 Estructura atómica del silicio amorfo hidrogenado

Estos dos defectos principales de la red de un  $a\text{-Si}$ , distorsión de enlace y enlaces abiertos, crean grandes densidades de estados permitidos dentro del intervalo de la banda prohibida de tal manera que el material no puede ser dopado. Sin embargo, si durante su depósito se agrega hidrógeno, los átomos de hidrógeno saturan los enlaces abiertos y reducen la densidad de los estados dentro de la banda prohibida.

Las primeras películas de silicio amorfo hidrogenado ( $a\text{-Si:H}$ ) se realizaron a finales de la década de 1960. Antes de ese momento, se ejecutó una investigación sobre silicio amorfo sin hidrógeno, que se preparó por pulverización catódica o por evaporación térmica. El material no hidrogenado tiene una gran densidad de defectos que evitan el dopado, la fotoconductividad y otras características deseables de un semiconductor útil [2.10]. Se determinó que la alta densidad de defectos del silicio y el germanio amorfo impidió que estos materiales fueran útiles para dispositivos electrónicos y se trató de encontrar formas de eliminar los defectos, eventualmente esto se logró introduciendo hidrógeno en el sistema de pulverización catódica. El hidrógeno causó una mejora que se tradujo en alta fotoconductividad, baja densidad de defectos y un aumento en la eficiencia del dopado. Las capas de silicio amorfo hidrogenado se utilizan en diversos dispositivos como sensores de imagen [2.11], celdas solares [2.12], entre otros.

## 2.7 Óxidos Conductores Transparentes (TCO)

El TCO es un componente fundamental de las celdas solares de película delgada y tiene un papel decisivo en las eficiencias alcanzadas actualmente. Forma el electrodo superior e inferior de la celda solar y, por lo tanto, su función principal es la conducción efectiva de los portadores de carga al circuito externo, al tiempo que ofrece una alta transparencia en un amplio espectro [2.14].

### 2.7.1 Óxido de indio dopado con estaño (ITO)

El óxido de indio dopado con estaño es una mezcla de óxido de indio ( $In_2O_3$ ) y óxido de estaño ( $SnO_2$ ) con una fórmula total descrita por  $In_{2-x}Sn_xO_3$ ; su proporción de estaño puede ascender hasta un 20%. Además, las capas delgadas de ITO de aproximadamente 200 nm son transparentes a la luz visible mientras se refleja la luz infrarroja [2.15]. Los mercados dominantes para este y otros óxidos conductores transparentes son las aplicaciones arquitectónicas (por ejemplo, ventanas de bajo consumo), las pantallas planas y los dispositivos fotovoltaicos. Sus atractivas propiedades incluyen alta transparencia óptica (85% para longitudes de onda entre 200 y 900 nm), baja resistividad ( $5.32 \times 10^{-4} \Omega \text{cm}$ ) y una fuerte adhesión a muchos tipos de sustratos.

La película de ITO en la parte superior de una celda solar actúa como ventana óptica, la cual permite que los fotones entren en la celda solar; además, también cumple la función de transportar los electrones fotogenerados a los terminales metálicos superiores. La capa de ITO posterior [2.21] funciona como una capa amortiguadora entre el contacto metálico trasero y las capas delgadas de silicio amorfo, para evitar que el metal se filtre al silicio amorfo. Esto es necesario si las capas delgadas de silicio amorfo tienen orificios o algún otro defecto estructural. Además, también facilita el transporte de los electrones fotogenerados a los terminales metálicos posteriores.

## 2.8 Parámetros eléctricos y de desempeño

### 2.8.1 Curvas Corriente vs. Voltaje

La curva *corriente vs. voltaje* de una celda solar describe su capacidad de conversión de energía en las condiciones existentes de irradiancia (nivel de luz) y temperatura [2.16]. A partir de esta curva se obtienen los parámetros voltaje en circuito abierto ( $V_{oc}$ ), corriente de corto circuito ( $I_{sc}$ ), voltaje de máxima potencia ( $V_{mp}$ ) y corriente de máxima potencia ( $I_{mp}$ ), los cuales son puntos clave para la comprensión del comportamiento de las celdas solares. La *Figura 16* muestra una curva  $I$ - $V$  típica y el voltaje de potencia (o la curva  $P$ - $V$ ) que se calcula a partir de ella.

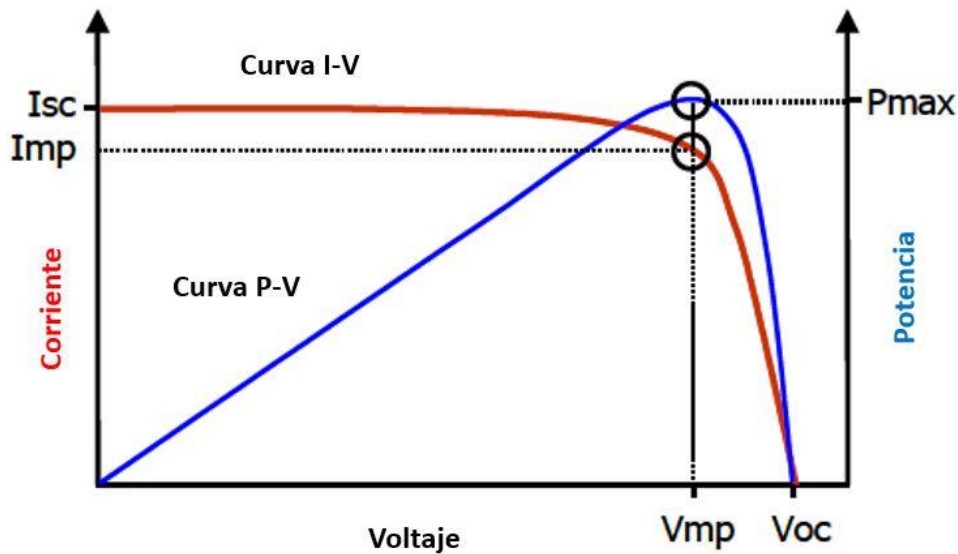


Figura 16. Representación de las curvas I-V (roja) y P-V(azul) de una celda sola [2.17].

**El voltaje de circuito abierto ( $V_{oc}$ )** constituye la máxima tensión que puede obtenerse de una celda solar. Hay varios factores importantes que afectan las características de las celdas solares HIT, una de las de mayor interés es el  $V_{oc}$ . Para lograr un alto voltaje de circuito abierto, se deben pasivar eficazmente los defectos en la superficie del sustrato de silicio cristalino. Esto significa que la capa *a-Si:H* intrínseca en ambos lados del sustrato de *c-Si* debe ser de alta calidad. *Tanaka et al* [2.18] explicaron que sin las capas intrínsecas no es posible lograr un  $V_{oc}$  alto (aproximadamente  $0.750\text{ V}$ ) debido a los enlaces abiertos de la heterounión. Además, la inserción de la capa *a-Si:H intrínseca* en la superficie posterior funciona para aumentar el voltaje de circuito abierto al reducir la velocidad de recombinación de la interfaz en la estructura del campo de superficie posterior (BSF).

El espesor de la oblea de silicio cristalino (*c-Si*) es otro factor que influye en las características eléctricas de las celdas HIT. *Mishima et al* [2.19] determinaron que el voltaje de circuito abierto disminuye y la corriente de cortocircuito aumenta al cambiar el espesor de la oblea.

**La corriente de Cortocircuito ( $I_{sc}$ )** se define como la intensidad de la corriente eléctrica que se obtiene de la celda cuando, en ausencia de cargas externas y tras haber sido cortocircuitada en sus terminales, la tensión entre los contactos es nula. Constituye la máxima corriente que puede obtenerse en una celda solar.

## 2.8.2 Factor de llenado y Eficiencia de conversión

El **factor de llenado (FF)** de una celda solar es un indicador de rendimiento importante. Representa el cuadrado (o "rectangularidad") de la curva  $I$ - $V$ , y es la relación de dos áreas ( $I_{mp}$  y  $V_{mp}$ ) definidas por la curva  $I$ - $V$  (Figura 17).

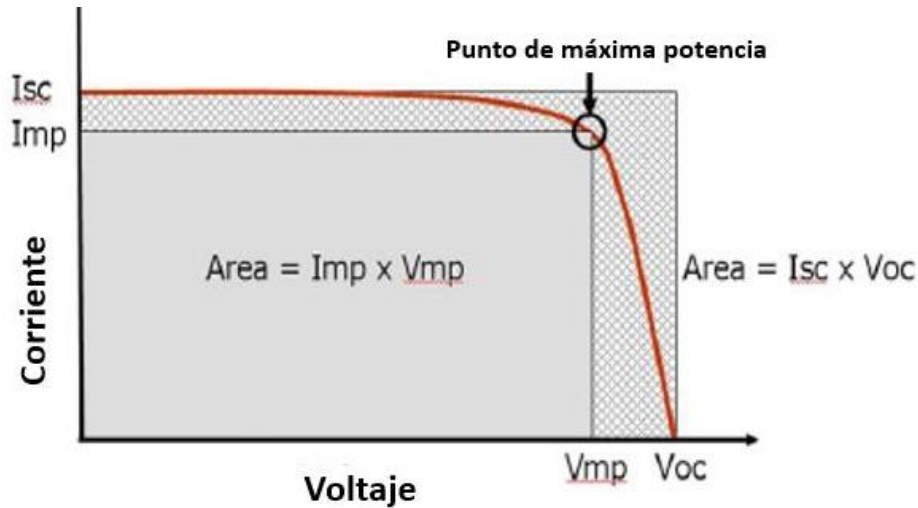


Figura 17. Representación del factor de llenado en la curva  $I$ - $V$  [2.20].

Aunque físicamente irrealizable, una celda solar ideal produciría una curva  $I$ - $V$  perfectamente rectangular en la que el punto de máxima potencia coincidía con  $I_{sc}$  y  $V_{oc}$ , para un factor de llenado de 1. Sin embargo, para las mejores celdas solares reportadas, este valor se encuentra alrededor de 0.8 [2.21]. La razón por la que el  $FF$  es tan importante es porque si las curvas  $I$ - $V$  de dos celdas solares individuales tienen los mismos valores de  $I_{sc}$  y  $V_{oc}$ , la matriz con el factor de llenado más alto (curva  $I$ - $V$  más cuadrada) producirá más potencia. Además, cualquier reducción del factor de llenado reducirá la potencia de salida al disminuir  $I_{mp}$  o  $V_{mp}$ , o ambos.

**La eficiencia de conversión de una celda solar ( $\eta$ )** es una medida de la cantidad de energía solar que cae sobre la superficie de una celda y se convierte en electricidad [2.21]. Usualmente la eficiencia de la celda solar no es igual a la eficiencia del arreglo fotovoltaico. La eficiencia del panel es generalmente de 1 a 3% inferior a la eficiencia de las celdas solares debido a la reflexión de vidrio, marco de sombra, las temperaturas más altas, entre otros [2.22].

## 2.9 Pérdidas ópticas, recombinación y resistencia (serie y paralelo)

En una celda solar las pérdidas estimadas por el reflejo de luz y transmitancia representa aproximadamente un tercio; la pérdida de absorción de luz en el TCO y *a-Si:H*, y la pérdida de recombinación de los portadores representan aproximadamente otro tercio; y el tercio restante consiste en pérdidas por la sombra del electrodo y la resistencia en serie (Figura 18) [2.23].

La mayor parte de la pérdida de potencia está relacionada con la pérdida de luz incidente y la recombinación de los portadores en la celda. Por lo tanto, el objetivo es fabricar películas de ITO y películas de *a-Si:H* con mejores propiedades ópticas. Si se reducen estas pérdidas en el futuro, se puede mejorar la eficiencia de conversión.

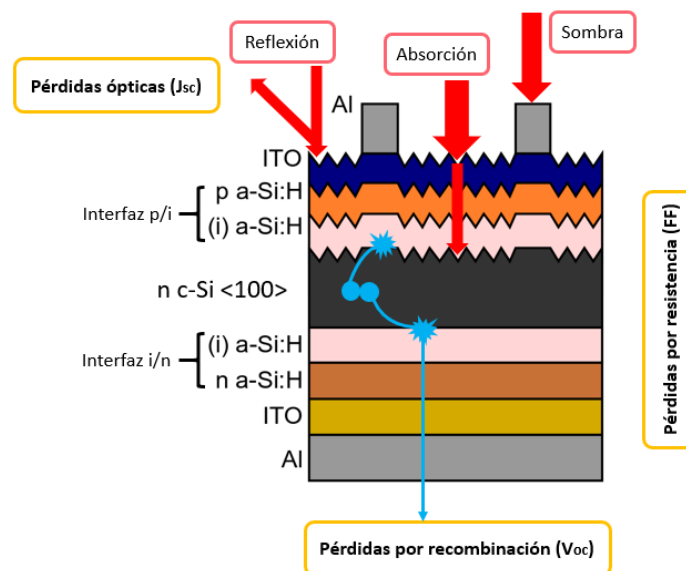


Figura 18. Pérdidas ópticas, recombinación y resistencia de una celda solar HIT.

### 2.9.1 Pérdidas ópticas

Estas pérdidas se ven directamente reflejadas en el valor que alcanza  $I_{sc}$ . Las pérdidas ópticas se dividen en pérdida por reflexión, pérdida por absorción y pérdida por sombra. Optimizar la estructura texturizada lleva a una mejora en el confinamiento óptico. También se puede reducir la pérdida por absorción óptica mediante el uso de un TCO de alta transparencia.

### 2.9.2 Pérdidas por recombinación

Estas pérdidas se ven directamente reflejadas en el valor que alcanza  $V_{oc}$ . La característica más distintiva de la celda solar HIT es la excelente pasivación superficial de *c-Si* lograda por el depósito de una capa *a-Si:H* intrínseca de alta calidad [2.24]. Esta capa *a-Si:H intrínseca* muy delgada completa los enlaces abiertos en la hetero interface y disminuye la densidad de defectos, lo cual permite un  $V_{oc}$  alto (en algunos casos de más de  $720\text{ mV}$ ).

Al optimizar pasos del proceso durante la fabricación se pueden disminuir estas pérdidas. Algunos son mencionados a continuación:

- Limpiar la superficie de la oblea de *c-Si* utilizando una limpieza húmeda de bajo costo antes del depósito de las capas de silicio amorfo dopado e intrínseco.
- Depositar una capa intrínseca de silicio amorfo de alta calidad por medio de PECVD.
- Garantizar un bajo daño por plasma y calor a la superficie de *c-Si* y de la heterounión.

Al optimizar estos procesos, la pérdida de recombinación del portador en la interfaz *a-Si:H/c-Si* en ambos lados se suprime de manera efectiva, lo que resulta en un  $V_{oc}$  más alto.

### 2.9.3 Pérdidas por resistencia

Los efectos de las pérdidas de resistencia en serie y las pérdidas por resistencia en paralelo se representan en la *Figura 19*.

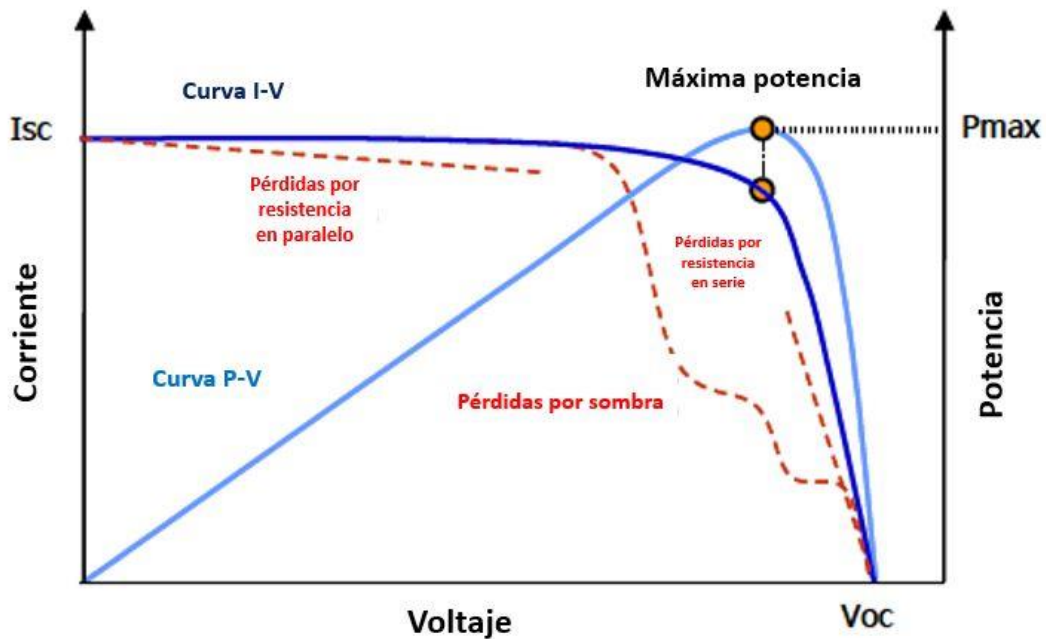


Figura 19. Pérdidas por resistencia en serie y paralelo de la curva corriente vs. voltaje [2.25].

El principal impacto de la **Resistencia en serie** es el de reducir el factor de llenado, aunque valores excesivamente altos también pueden reducir la corriente de corto circuito. Suele ser atribuida a la resistividad alta de las capas de ITO, de los contactos metálicos y de los materiales utilizados para la fabricación de las celdas solares. El valor de la resistencia en serie debe ser menor a  $1 \Omega$ .

Las pérdidas más significativas de energía causadas por la presencia de una **Resistencia en paralelo** son por lo general debidas a defectos de fabricación. Una baja resistencia en paralelo provoca pérdidas de energía en las celdas solares. El efecto de una resistencia en paralelo en la resistencia en paralelo es particularmente grave en los niveles de luz baja, ya que habrá menos corriente generada por luz. El valor de la resistencia en paralelo debe ser mayor o igual a  $10 \text{ k}\Omega$ .

## 2.10 Reducción de costos

Para reducir el costo de producción de las celdas solares HIT, es muy efectivo usar una oblea de silicio más delgada. Sin embargo, el uso de una oblea más delgada también plantea varios problemas: uno es la fácil deformación de las celdas solares, lo que puede disminuir el rendimiento del proceso; otro es la caída de la fotocorriente debido al bajo coeficiente de absorción del silicio cristalino; otro es el mayor impacto de la recombinación superficial en la vida útil efectiva de los portadores en exceso, lo que tiene un efecto negativo sobre el valor de  $V_{oc}$  [2.26].

## 2.11 Referencias capítulo 2

[2.1] R. Serway and J. Jewett, *Principles of physics*. Boston, MA: Brooks/Cole, Cengage Learning, 2013. Pags 946-948

[2.2] *Standard Tables for Terrestrial Solar Spectral Irradiance at Air Mass 1.5 for 37 deg. Tilted Surface, E892-87*, American Society for Testing and Materials, Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, PA

[2.3] B. Bolman, "Optimization of ITO TCO for thin-film silicon and HIT solar cells", Delft Univeristy of Technology, 2010

[2.4] "Photoelectric effect | physics", *Encyclopedia Britannica*, 2020. [Online]. Available: <https://www.britannica.com/science/photoelectric-effect>.

[2.5] De: sites Google – características de los sólidos

[2.6] Torquato, S., Stillinger, F.H., 2002. Controlling the short-range order and packing densities of many-particle systems. *J. Phys. Chem. B* 106.

[2.7] S. Glunz, R. Preu and D. Biro, "Crystalline Silicon Solar Cells", *Comprehensive Renewable Energy*, pp. 353-387, 2012. Available: 10.1016/b978-0-08-087872-0.00117-7

[2.8] D. Kehuarucho Cardenas, *Elaboración de celdas solares de silicio amorfo hidrogenado, para el aprovechamiento de la energía solar*, 1st ed. Arequipa: Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, 2018.

[2.9] H. Zhou, S. Xu and S. Xiao, "High-Density Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition of Si-Based Materials for Solar Cell Applications", *Chemical Vapor Deposition - Recent Advances and Applications in Optical, Solar Cells and Solid State Devices*, 2016. Available: 10.5772/63529

[2.10] R. Street, *Hydrogenated amorphous silicon*. Cambridge u.a: Cambridge Univ. Press, 2005, pp. 16-17.

[2.11] K.S. Karim, P. Servati, N. Mohan, A. Nathan, J.A. Rowlands 2001, *IEEE Int. Symp. On Circuits and Systems*, vol. 5, 479-482.

[2.12] Senft, Donna Cowell, *Journal of Electronics Material*, 2005.

[2.13] A.C. Tam, R.D. Balanson, "Lasers in Electrophotography".

[2.14] B. Bolman, "Optimization of ITO TCO for thin-film silicon and HIT solar cells", Delft Univeristy of Technology, 2010.



- [2.15] G. Swain, "Solid Electrode Materials", *Handbook of Electrochemistry*, pp. 111-153, 2007. Available: 10.1016/b978-044451958-0.50006-9
- [2.16] "Solmetric - Home of the SunEye, PV Analyzer, and other solar test and measurement equipment.", Solmetric.com, 2011. [Online]. Available: <http://www.solmetric.com/>.
- [2.17] "Solmetric - Home of the SunEye, PV Analyzer, and other solar test and measurement equipment.", Solmetric.com, 2011. [Online]. Available: <http://www.solmetric.com/>.
- [2.18] N. Moritake, Y. Fukui, M. Oonuki, K. Tanaka and H. Uchiki, "Preparation of Cu<sub>2</sub>ZnSnS<sub>4</sub> thin film solar cells under non-vacuum condition", *physical status solidi (c)*, vol. 6, no. 5, pp. 1233-1236, 2009. Available: 10.1002/pssc.200881158
- [2.19] T. Mishima, M. Taguchi, H. Sakata and E. Maruyama, "Development status of high-efficiency HIT solar cells", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 95, no. 1, pp. 18-21, 2011. Available: 10.1016/j.solmat.2010.04.030
- [2.20] "Solmetric - Home of the SunEye, PV Analyzer, and other solar test and measurement equipment.", Solmetric.com, 2011. [Online]. Available: <http://www.solmetric.com/>.
- [2.21] Barzola-Monteses, Julio. (2013). *Eficiencia de una celda solar común y su comparación con celdas de tecnología HIT*. RTE ESPOL. 26. 1-15.
- [2.22] N. Flores Rivera, *Medición de la eficiencia energética de los paneles solares de silicio*, 1st ed. Chihuahua: CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES AVANZADOS, S. C. POSGRADO, 2017.
- [2.23] T. Mishima, M. Taguchi, H. Sakata, and E. Maruyama, "Development status of high-efficiency HIT solar cells", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 95, no. 1, pp. 18-21, 2011. Available: 10.1016/j.solmat.2010.04.030
- [2.24] M. Tanaka, et al., *Development of new a-Si/c-Si heterojunction solar cells: ACJ-HIT (artificially constructed junction–heterojunction with intrinsic thin-layer)*, *Jpn. J. Appl. Phys.* 31 (1992) 3518–3522.
- [2.25] "Solmetric - Home of the SunEye, PV Analyzer, and other solar test and measurement equipment.", Solmetric.com, 2011. [Online]. Available: <http://www.solmetric.com/>.

[2.26] S. Tohoda et al., "Future directions for higher-efficiency HIT solar cells using a Thin Silicon Wafer", *Journal of Non-Crystalline Solids*, vol. 358, no. 17, pp. 2219-2222, 2012. Available: 10.1016/j.jnoncrysol.2012.03.025

[2.27] Air Mass | PVEducation", *Pveducation.org*, 2020. [Online]. Available: <https://www.pveducation.org/pvcdrom/properties-of-sunlight/air-mass>.

## CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA Y TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN

---

En este capítulo se describe la metodología para el depósito de las películas de ITO y *a-Si:H* dopadas e intrínsecas usadas en este trabajo, además de los equipos de medición utilizados para caracterizar las celdas HIT y obtener sus parámetros de desempeño o figuras de mérito.

### 3.1 Perfilómetro

Un perfilómetro de contacto es un instrumento de medida que se utiliza con el fin de cuantificar la rugosidad de una superficie. Las dimensiones críticas como escalón, curvatura y planitud se calculan a partir de la topografía de esta [\[3.1\]](#). En un perfilómetro, una aguja se mueve verticalmente contactando con la superficie de una muestra y, luego, se mueve lateralmente a través de la muestra una distancia y una fuerza de contacto especificadas, lo que permite medir pequeñas características verticales que varían en altura desde  $10\text{ nm}$  hasta  $1\text{ mm}$ .

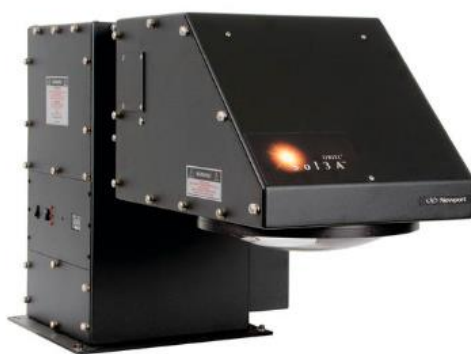
La posición de altura de la aguja genera una señal analógica que se convierte en una señal digital que se almacena y analiza. El radio de la aguja puede variar de  $20\text{ nm}$  a  $50\text{ }\mu\text{m}$ , y la resolución horizontal está controlada por la velocidad de escaneo y la frecuencia de muestreo de la señal de datos. La fuerza de seguimiento de la aguja puede oscilar entre  $1$  y  $50\text{ mg}$ .

Las ventajas de los perfilómetros [\[3.2\]](#) de contacto incluyen independencia de la superficie, alta resolución y es una técnica directa que no requiere modelado. La mayoría de los estándares de acabado de superficies del mundo están escritos para perfilómetros de contacto. El contacto con la superficie es a menudo una ventaja en entornos sucios donde los métodos sin contacto pueden terminar midiendo los contaminantes de la superficie en lugar de la superficie en sí. Debido a que la aguja está en contacto con la superficie, este método no es sensible a la reflectancia o al color de la superficie.

### 3.2 Simulador solar

El simulador solar es un dispositivo que provee una iluminación aproximada a la entregada por la luz solar natural (*Figura 20*). Estos dispositivos simulan el espectro solar *AM 1.5*, cuyo estándar ha sido establecido por la American Society for Testing and Materials en la norma *ASTM-G173-03* (ASTM 2012) [\[3.3\]](#). El espectro *AM 1.5* tiene una intensidad total de  $100\text{ mW/cm}^2$ . El

propósito del simulador solar es proporcionar una instalación de prueba interior controlable en condiciones de laboratorio; este simulador puede entregar un gran rango de longitudes de onda (usualmente de la infrarroja a la ultravioleta). Estas fuentes de área grande utilizan una lámpara de xenón y un filtro para cumplir de manera eficiente y confiable parámetros de rendimiento ultravioleta sin compromisos [\[3.4\]](#).



*Figura 20. Simulador solar Newport Oriel Sol 2.*

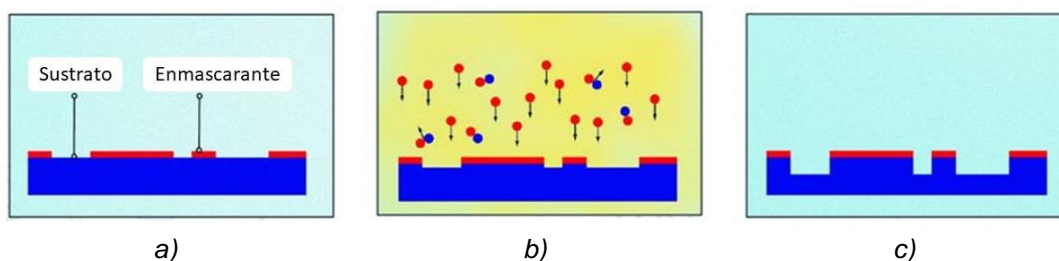
La luz de un simulador solar se controla en tres dimensiones: contenido espectral, uniformidad espacial y estabilidad temporal. El simulador solar utilizado en el laboratorio de microelectrónica del INAOE es el Newport Oriel Sol 2A. La lámpara de xenón es el centro del simulador; a una temperatura de  $5800\text{ K}$ , emite un espectro similar al de un cuerpo negro. La potencia de la lámpara de xenón del simulador solar es controlada por una fuente de alimentación *Newport modelo 69922* [\[3.5\]](#).

### **3.3 Grabado iónico reactivo**

El tipo de plasma utilizado en el grabado iónico reactivo (RIE) se produce cuando un campo eléctrico es aplicado a un gas dentro de una cámara en vacío, causando colisión entre electrones, moléculas y radicales del gas para volverse parcialmente ionizado. Para permanecer ionizado, el gas debe recibir constantemente impulsos de energía para compensar la recombinación de las partículas cargadas en él, por lo que la aplicación del campo eléctrico debe ser en radiofrecuencia (RF). El plasma, al crearse a baja presión, reduce las colisiones entre partículas y, por lo tanto, la recombinación de los iones. La formación del plasma comienza con la creación de electrones libres. El campo es generado por la diferencia de potencial entre los electrodos dentro de la cámara, por ejemplo, alimentados por una fuente de potencia RF. Este campo debe ser lo suficientemente grande para poder arrancar electrones de los átomos del gas. Una vez generado el plasma, los electrones libres ganan

energía cinética del campo eléctrico y se aceleran. Las especies químicamente reactivas que son aceleradas se dirigen hacia el sustrato (en este trabajo es una oblea de silicio y es representada en la *Figura 21.b*), para eliminar un material específico. Un atributo clave de la tecnología de grabado iónico reactivo es su capacidad de grabado direccional (generalmente anisotrópico), como se muestra en la *Figura 21.c*. El grabado iónico reactivo combina especies químicamente activas como el  $XeF_2$  y partículas que transmiten energía física (principalmente argón) y le confieren la anisotropía deseable al proceso de grabado.

El método de grabado se desarrolló originalmente como consecuencia de la reducción continua de los circuitos integrados. Con el grabado químico húmedo, las estructuras más pequeñas que pueden obtenerse son de tres micrómetros, mientras con el grabado de RIE se pueden crear estructuras de orden nanométrico.



*Figura 21. a) Sustrato con enmascarante antes del proceso de grabado por plasma, b) Comportamiento del plasma dentro de la cámara del equipo de grabado iónico reactivo y c) Sustrato grabado después del tratamiento en el plasma de RIE.*

Existen tres razones principales por las que se utiliza este método para la fabricación de celdas solares: 1) el grabado en plasma de RIE utiliza un bombardeo físico para separar las partículas de elementos indeseados que puedan quedar en la superficie después del depósito de las películas de silicio amorfo dopado, 2) no se presentan efectos por reacciones químicas en las películas previamente depositadas durante esta limpieza ya que se utiliza un gas inerte como el argón; y finalmente 3) evita la formación en exceso de micro defectos en la superficie.

### **3.4 Depósito Químico en fase Vapor (CVD) y Deposito químico en fase vapor Asistido por plasma (PECVD)**

Existen tres métodos bien establecidos para el depósito de películas delgadas de silicio: el depósito químico en fase vapor (CVD), el depósito químico en fase vapor asistido por plasma (PECVD) y el depósito físico en fase vapor (PVD) [\[3.7\]](#).

El depósito químico en fase vapor (CVD) es un proceso mediante el cual una película sólida se deposita sobre un sustrato al hacer reaccionar productos químicos en fase de vapor que contienen los componentes de la película. Los gases reactivos se alimentan a una cámara de reacción, allí se descomponen y/o reaccionan en una superficie calentada para formar la película delgada [3.8]. Es importante tener en cuenta que en el CVD los gases reactivos no reaccionan con el sustrato, y por lo tanto no consumen ningún material de superficie de este.

Los métodos de CVD aseguran un depósito uniforme bajo la condición donde el crecimiento está limitado por la reacción superficial. Por esta razón, es necesaria una temperatura alta para una alta tasa de depósito [3.9]. El depósito químico en fase vapor asistido por plasma (PECVD) es una excelente alternativa para depositar películas delgadas a una temperatura más baja que las utilizadas en un proceso convencional de CVD [3.10]. El plasma generado por una descarga luminosa absorbe la energía eléctrica y, por lo tanto, los gases neutros se disocian en radicales reactivos, iones, átomos y moléculas neutras, y otras especies altamente excitadas a través del impacto de electrones en lugar de la energía térmica convencional. Estos fragmentos atómicos y moleculares interactúan con un sustrato y, dependiendo de la naturaleza de estas interacciones, se producen procesos de grabado o depósito en el sustrato. La naturaleza de baja temperatura, junto con la alta calidad de las películas depositadas hacen que la técnica PECVD sea una ruta importante para la fabricación de materiales a base de *Si*.

#### **3.4.1 Depósito de películas de silicio amorfo hidrogenado dopado e intrínseco**

Las películas depositadas en el PECVD son tres: la película *a-Si:H* intrínseca, la película *a-Si:H* dopada tipo *p* y la película *a-Si:H* dopada tipo *n*. Las películas intrínsecas superior e inferior [3.6] funcionan como películas pasivantes de defectos en la superficie del sustrato *c-Si* tipo *n*. Además, tienen como principal característica una banda prohibida de energía mayor a la del *c-Si* tipo *n* logrando así que fotones con energía menor a su banda prohibida puedan ser absorbidos por el sustrato de *c-Si*. La película *a-Si:H* tipo *p*, al igual que las películas (*i*) *a-Si:H*, son transparentes a fotones con menor energía a su banda prohibida, por esto la película *a-Si:H* tipo *p* suele ser llamada película de ventana (window layer) [3.13]. Desde el punto de vista eléctrico su principal función en las celdas HIT consiste en servir de emisor de la heterounión *pn* formada en conjunto con el sustrato *c-Si* tipo *n*. Finalmente, la película *a-Si:H* tipo *n* tiene una banda prohibida mayor a la del *c-Si*, por lo que se espera que haga las funciones de contacto de campo posterior (Back Surface Field, BSF)

logrando así que los huecos fotogenerados en el sustrato sean arrastrados hacia el emisor *a-Si:H tipo p* debido a este campo eléctrico.

Las cuatro secciones principales de un sistema PECVD son la cámara de reacción, la fuente de alimentación, las redes de monitoreo de plasma y la bomba de vacío. La Figura 22 ilustra el diagrama esquemático de un sistema PECVD.

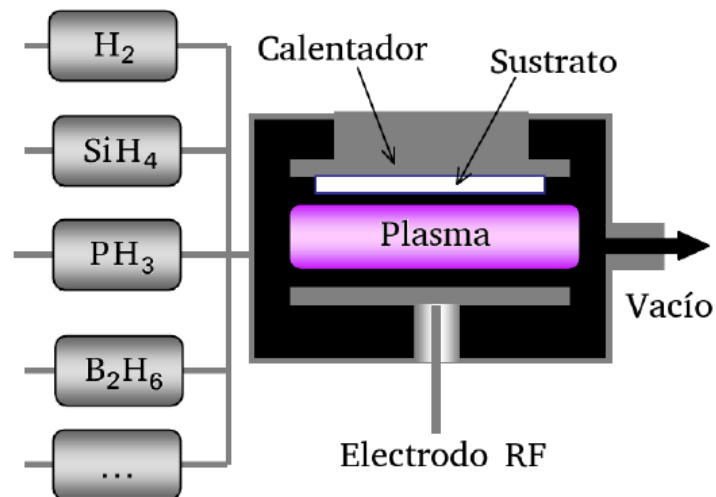


Figura 22. Esquema ilustrativo de un equipo de PECVD [3.11].

En lugar de depender únicamente de la energía térmica para iniciar y mantener reacciones químicas, el PECVD utiliza una descarga luminosa inducida por RF para transferir energía a los gases reactivos, lo que permite mayores tasas de depósito a temperaturas más bajas. Una temperatura más baja del sustrato es la principal ventaja de PECVD y, de hecho, el PECVD proporciona un método para depositar películas en sustratos que no tienen la estabilidad térmica para aceptar el recubrimiento por otros métodos.

Un sistema PECVD debe presentar condiciones de alta limpieza y vacío, de lo contrario las películas de silicio amorfo dopado hidrogenado e intrínseco pueden presentar alta resistividad en serie (lo que lleva a una disminución importante en el *FF*, y una consecuente baja eficiencia de conversión) y baja uniformidad.

Entre las principales ventajas del uso del sistema PECVD se tiene una reducción de la contaminación cruzada entre los diferentes depósitos, una frecuencia de plasma más estable, un alto vacío en cada una de las cámaras, buena cobertura de escalones y compatibilidad con procesos de transferencia de patrones de líneas finas.

El sistema PECVD utilizado en el Laboratorio de Microelectrónica del INAOE es el *MVSystems PECVD* alimentado por una fuente de *RF* de *13.56 MHz*.

### 3.5 Pulverización catódica

La pulverización catódica es un proceso, comúnmente, utilizado para el depósito de óxidos conductores transparentes en la industria de los semiconductores, debido a que suele ser más rápida y simple que la evaporación térmica u otras técnicas. En el proceso de depósito de las capas de *ITO* un blanco es atacado con argón de alta energía; los iones de argón empujan el material fuera del objetivo y el *ITO* se deposita en el sustrato. Para obtener películas de mejor calidad y mayores tasas de depósito se utiliza un plasma *RF*.

Un equipo de pulverización catódica que posea una cámara de depósito con un vacío incorrecto (mayor a *1mTorr*) puede ocasionar que las capas de *ITO* presenten poca uniformidad, y, por lo tanto:

- En los lados más gruesos puede ocasionar que no funcionen correctamente como ventana (por lo que los fotones no pueden cruzar la barrera) para llegar al *c-Si*.
- En los lados más delgados puede ocasionar que los electrones fotogenerados no puedan viajar a los contactos de manera correcta debido a la baja conductividad.

Un diagrama simple del equipo de pulverización catódica con fuente *RF* se presenta en la *Figura 23*. Este es un reactor de placas paralelas en cámara de vacío donde en la placa superior se encuentran las obleas y en la inferior el blanco de *ITO*, que en este caso es el material utilizado como óxido transparente conductivo.



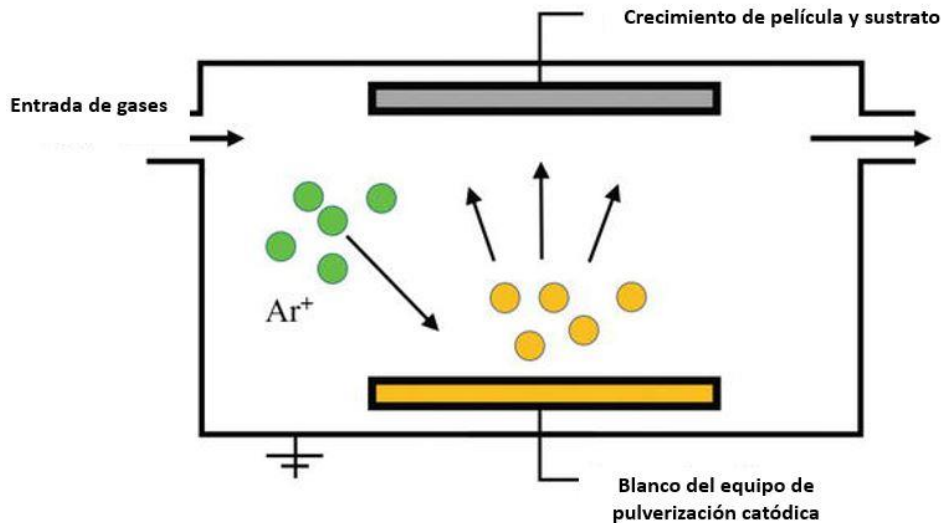


Figura 23. Diagrama esquemático de un equipo de pulverización catódica.

El equipo utilizado en el laboratorio de microelectrónica es el *ATC Orion Sputtering System* de la compañía AJA International Inc. [3.12]. Este sistema puede ser operado en RF o DC y el calentador del sustrato puede llegar hasta 800 °C; el sistema cuenta con dos cámaras y dos bombas: bombeo por vacío criogénico en la cámara principal (presión base  $3 \cdot 10^{-9}$  Torr) y sistema de bloqueo de carga con una turbobomba. El blanco utilizado es de ITO con diámetro de 2", espesor de 0.125" y pureza de 99.99%.

### 3.6 Referencias capítulo 3

[3.1] "Correction to: Compendium of Surface and Interface Analysis", *Compendium of Surface and Interface Analysis*, pp. 20-25, 2019. Available: 10.1007/978-981-10-6156-1\_135

[3.2] O. Velandia Caballero, "Estudio y desarrollo de celdas solares basadas en estructuras de silicio cristalino / silicio amorfo dopado.", *Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, Tonantzintla, Puebla*, 2018.

[3.3] ASTM G173-03(2012), *Standard Tables for Reference Solar Spectral Irradiances: Direct Normal and Hemispherical on 37° Tilted Surface*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012, [www.astm.org](http://www.astm.org)

[3.4] "Sol2A Class ABA Solar Simulators", *Newport.com*, 2020. [Online]. Available: <https://www.newport.com/f/class-aba-solar-simulators>.

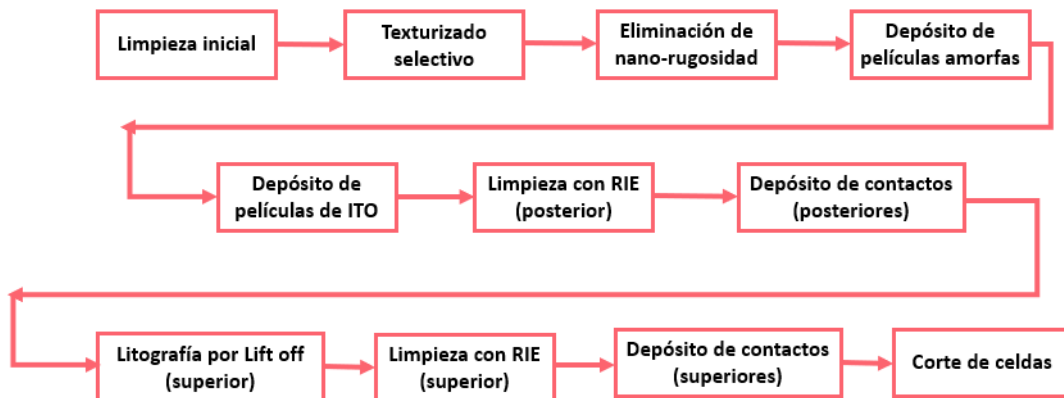
- [3.5] K. A. Emery, «Solar simulators and I-V measurement methods Solar Cells, » review paper, U.S.A: 1617 Cole Boulevard, Golden, CO 80401, 1986.
- [3.6] M. Zeman and D. Zhang, "Heterojunction Silicon Based Solar Cells," in *Physics and Technology of Amorphous-Crystalline Heterostructure Silicon Solar Cells*, Springer, 2012.
- [3.7] Y. Ong, B. Chen, F. Tay, and C. Iliescu, "Process Analysis and Optimization on PECVD Amorphous Silicon on Glass Substrate", *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 34, pp. 812-817, 2006. Available: 10.1088/1742-6596/34/1/134
- [3.8] S. Wolf and R. Tauber, *Silicon processing for the VLSI era*. Sunset Beach, Calif.: Lattice Press, 2002, p. 269.
- [3.9] Y. Ong, B. Chen, F. Tay, and C. Iliescu, "Process Analysis and Optimization on PECVD Amorphous Silicon on Glass Substrate", *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 34, pp. 812-817, 2006. Available: 10.1088/1742-6596/34/1/134
- [3.10] H. Zhou, S. Xu and S. Xiao, "High-Density Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition of Si-Based Materials for Solar Cell Applications", *Chemical Vapor Deposition - Recent Advances and Applications in Optical, Solar Cells and Solid-State Devices*, 2016. Available: 10.5772/63529
- [3.11] S. Wolf and R. Tauber, *Silicon processing for the VLSI era*. Sunset Beach, Calif.: Lattice Press, 2002, p. 282
- [3.12] I. AJA INTERNATIONAL, "ATC Orion Series Sputtering Systems", *AJA International*, 2019. [Online]. Available: <http://www.ajaint.com/atc-orion-series-sputtering-systems.html>.
- [3.13] D. Muñoz, T. Desrues, and P.-J. Ribeyron, "a-Si:H/c-Si Heterojunction Solar Cells: A Smart Choice for High Efficiency Solar Cells," in *Physics and Technology of Amorphous-Crystalline Heterostructure Silicon Solar Cells*, Springer, 2012.

## CAPÍTULO 4: PROCESO DE FABRICACIÓN DE CELDAS HIT

---

A continuación, se describen los pasos que se optimizaron durante el proceso de fabricación de la celda solar HIT en este trabajo de investigación, siendo todos resultados de estudios desarrollados previamente en el INAOE [4.12, 4.13, 4.14, 4.15, 4.16]. Para esto se utilizaron nueve pasos como se muestra en la *Figura 24*:

1. Limpieza inicial para el desengrasado
2. Texturizado selectivo por medio de KOH/IPA/DI (textura piramidal usando una solución de hidróxido de potasio, alcohol isopropílico y agua desionizada)
3. Eliminación de nano-rugosidad por medio de  $\text{HNO}_3+\text{HF}+\text{DI}$ .
4. Depósito de películas de silicio amorfo hidrogenado intrínseco y dopado.
5. Depósito de películas de ITO.
6. Limpieza con el equipo de grabado iónico reactivo en plasma de  $\text{O}_2$  y  $\text{CF}_4$  (parte posterior y parte superior)
7. Depósito de contactos de aluminio (posteriores y superiores).
8. Litografía Lift off
9. Corte de celdas



*Figura 24. Esquema del proceso de fabricación de una celda solar HIT.*

Al finalizar el proceso de fabricación se obtiene una celda solar HIT como la presente en la *Figura 25*.

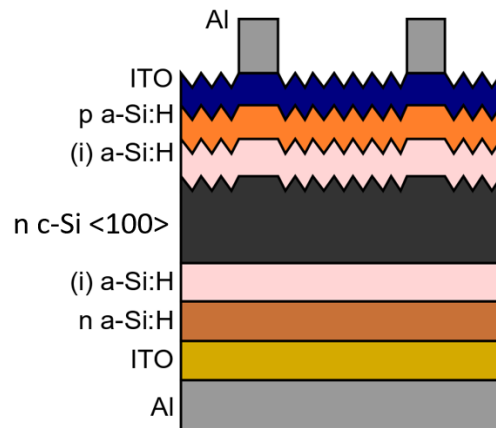


Figura 25. Esquema de una celda HIT terminada.

## 4.1 Limpieza inicial para el desengrasado

Esta primera parte incluye la limpieza de la oblea de silicio por solventes; esto es, el proceso de eliminar la suciedad de una superficie con un solvente orgánico sin alterar física o químicamente el material que se limpia [4.1]. Algunos de los más utilizados incluyen acetona, metiletilcetona, tolueno, nPB y tricloroetileno (TCE) [4.2]. En el caso del Laboratorio de Microelectrónica del INAOE, para realizar el desengrasado inicial se siguen los siguientes pasos:

1. Se sitúan las obleas de *c-Si* adentro un vaso de precipitado relleno acetona y este se ubica dentro del baño ultrasónico durante diez minutos.
2. Se sitúan las obleas de *c-Si* en un vaso de precipitado relleno de tricloroetileno dentro del baño ultrasónico durante diez minutos
3. Terminados estos pasos, se enjuagan las obleas de *c-Si* con agua desionizada.

Este desengrasado inicial es ideal para remover grasa, aceite, suciedad y pegamento. La aplicación más importante de este primer paso es eliminar suciedades no deseadas en la superficie del sustrato de *c-Si* que pueden llevar a mal funcionamientos de la celda.

## 4.2 Texturizado selectivo por medio de KOH/IPA/DI (textura piramidal usando una solución de hidróxido de potasio, alcohol isopropílico y agua desionizada)

El texturizado superficial no solo determina la reflectancia total de una celda solar, sino que también tiene un impacto en cómo se captura la luz y la posterior

absorción a través de dispersión; por lo tanto, es determinante para el valor que alcanza la corriente de corto circuito [4.3].

Cuando el lingote de silicio es cortado, las obleas reciben daño por corte de la sierra [4.4]. Si este daño no es eliminado se puede presentar recombinación superficial por ambos lados de la oblea. El proceso de texturizado para las obleas monocristalinas de silicio generalmente se lleva a cabo utilizando una solución de grabado alcalino que consiste en agua desionizada (DI), hidróxido de potasio (KOH) y alcohol isopropílico (IPA). Para las celdas HIT fabricadas se utiliza una solución de 6.8 g de KOH, 19 ml de IPA y 373 ml de agua DI. El proceso se realiza a 80 °C.

Después del proceso de texturizado húmedo, las muestras presentan en la superficie estructuras piramidales (Figura 26), que además de eliminar el daño por corte de la superficie de las obleas, también ayudan a mejorar la absorción de la luz incidente, como se muestra en la Figura 27.

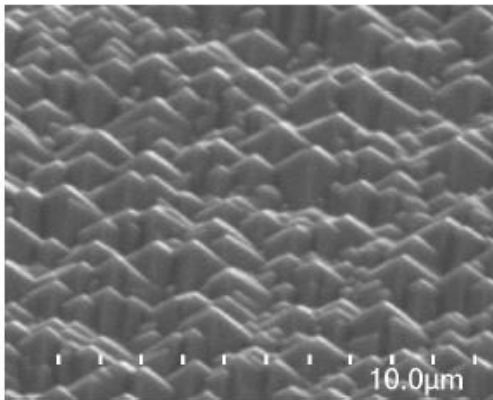


Figura 26. Sustrato de silicio cristalino texturizado: 100 min en KOH/IPA/DI [4.6].

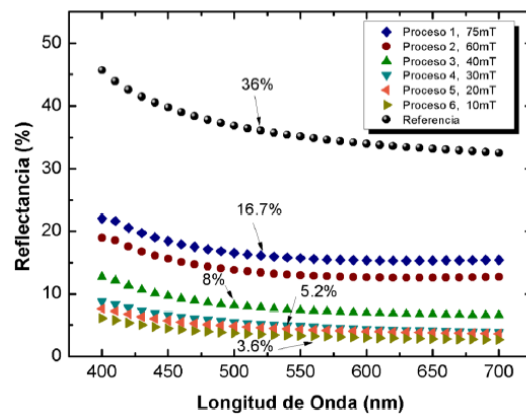


Figura 27. Mediciones de reflectancia de una oblea cortada de silicio (línea negra) y una oblea texturizada por KOH/IPA/DI (línea azul) [4.5].

La textura piramidal reduce drásticamente la reflectancia total de las obleas de silicio, de aproximadamente 33% a aproximadamente 12% [4.7].

### 4.3 Eliminación de nano-rugosidad por medio de $\text{HNO}_3+\text{HF}+\text{DI}$ .

Después de crear estructuras piramidales por medio de una solución de KOH/IPA/DI, en la superficie de la oblea quedan desperfectos que llevan a una interfaz  $a\text{-Si:H}/c\text{-Si}$  con defectos, lo que incrementa la recombinación y limita el voltaje de circuito abierto ( $V_{oc}$ ) [4.8]. Para reducir la densidad de defectos en la interfaz es necesario realizar un tratamiento antes del depósito de las

películas de silicio amorfo para remover cualquier nano-rugosidad o irregularidades estructurales en la superficie del *c-Si* inducidas por el texturizado húmedo. Estos defectos estructurales son removidos de la oblea al aplicar ciclos de oxidación química, y el posterior baño del sustrato en ácido fluorhídrico (HF). Por lo tanto, se realizaron ciclos de oxidación con ácido nítrico: tres ciclos de oxidación con 175 ml de agua DI y 75 ml de HNO<sub>3</sub> a 80°C; después de realizar los ciclos de oxidación, el óxido se graba con 0.55% de HF diluido en agua desionizada a temperatura ambiente. Deligiannis et al. [4.11], demostraron que el uso de ciclos de oxidación por medio de HNO<sub>3</sub> remueve eficientemente la contaminación por nano-rugosidades y, por lo tanto, promueve un V<sub>oc</sub> de un valor más alto.

#### 4.4 Depósito de películas de silicio amorfo hidrogenado intrínseco y dopado.

El PECVD utilizado en el Laboratorio de Microelectrónica del INAOE es el *MVSystems PECVD*, como se presenta en la *Figura 28*. Este utiliza una configuración capacitiva (es decir, placas paralelas) para generar el plasma; el sustrato está conectado a un electrodo de tierra, mientras que la otra placa (electrodo) está alimentada por una fuente de RF de 13.56 MHz. En el caso específico de este trabajo, para las capas de silicio intrínseco se utiliza SiH<sub>4</sub> (silano) diluido en H<sub>2</sub> (hidrógeno); mientras que para las películas de silicio amorfo dopado tipo p y tipo n, se utiliza B<sub>2</sub>H<sub>6</sub> (diborano) y PH<sub>3</sub> (fosfina) junto con SiH<sub>4</sub> diluido en H<sub>2</sub>, respectivamente.

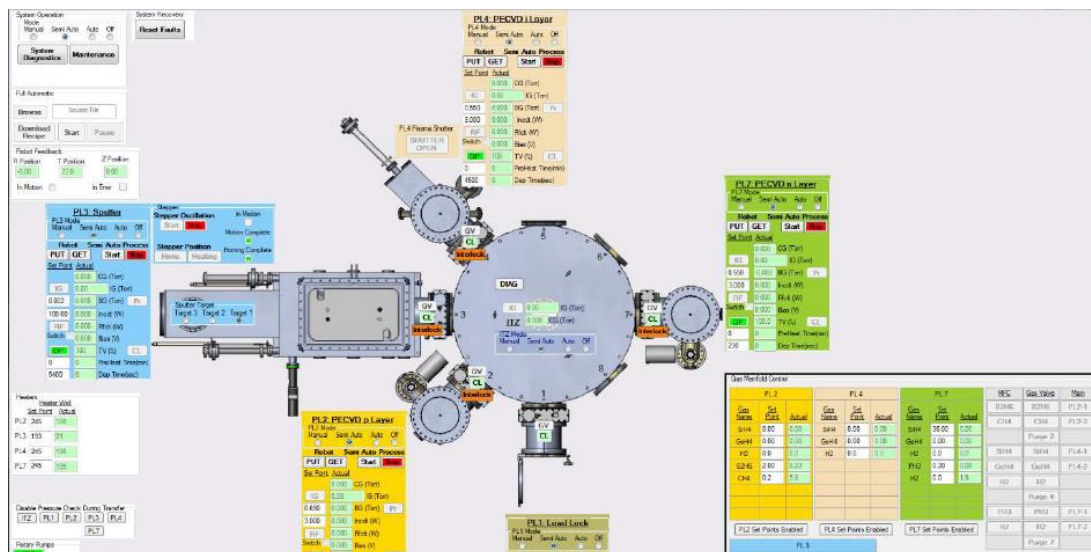
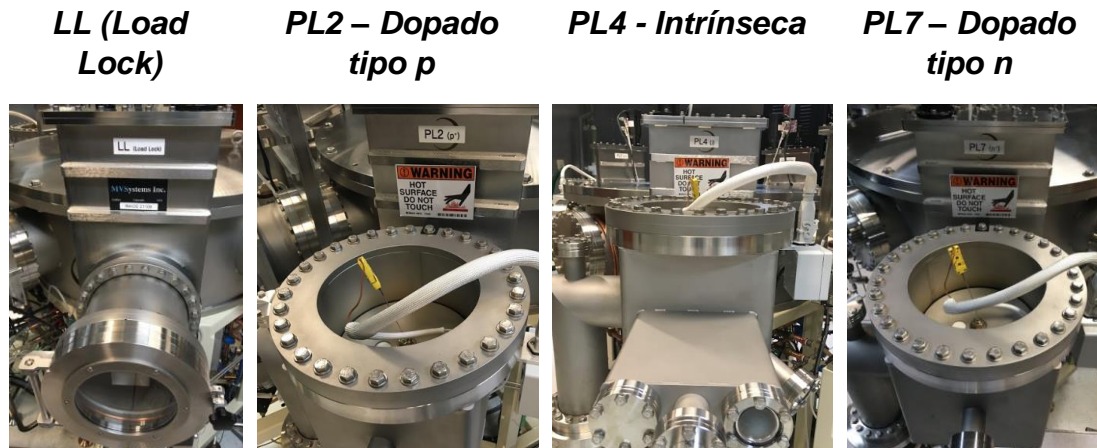


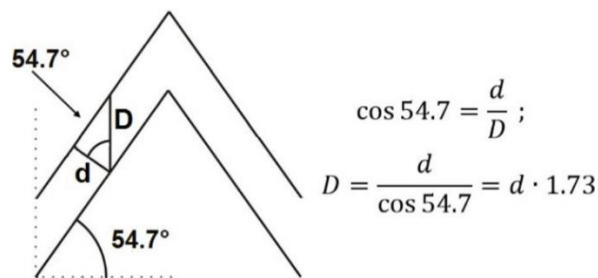
Figura 28. Software HMI MVSystems MX CT utilizado para el depósito de las películas de silicio amorfo hidrogenado dopado e intrínseco. El software es una representación del PECVD.

El sistema con el que se cuenta en el INAOE tiene cuatro cámaras de depósito y una cámara de carga. En la cámara de carga, o *Load Lock*, se ingresan las muestras al PECVD; en la cámara *PL2* se realizan los depósitos de las películas de silicio amorfo dopado tipo *p*; en la cámara *PL4* se realizan los depósitos de las películas intrínsecas; y, finalmente, en la cámara *PL7* se realiza el depósito de las películas de silicio amorfo dopado tipo *n*. Las cámaras del PECVD son presentadas en la *Figura 29*.



*Figura 29. Cámaras del PECVD utilizadas para el depósito de películas de silicio amorfo dopado e intrínseco.*

Para garantizar que las pirámides son cubiertas completamente por las películas de *a-Si:H* dopadas e intrínsecas, se debe de multiplicar el valor de espesor requerido (*d*) por un factor de 1.73 (*Figura 30*) [4.9].



*Figura 30. Pirámides creadas a partir de diferentes tipos de grabados y su correspondiente factor de escala para las películas depositadas.*

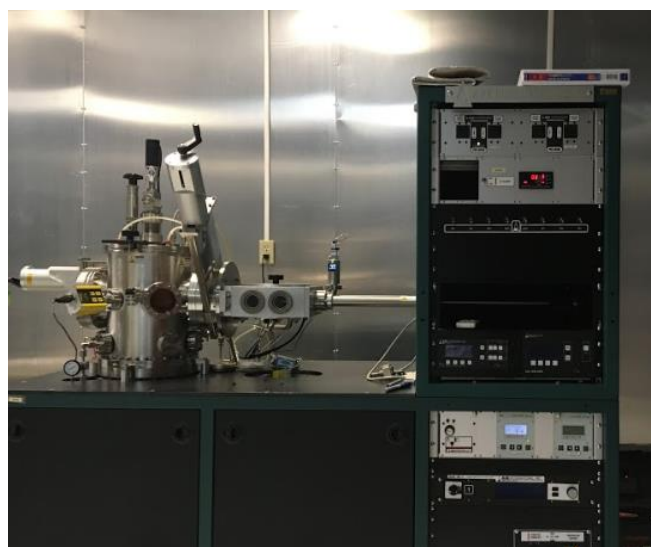
## 4.5 Depósito de películas de ITO.

Para el depósito de las películas de ITO se utiliza el *ATC Orion Sputtering System* de la compañía *AJA International Inc.* (*Figura 31*) usando un blanco con un diámetro de 2", espesor de 0.125" y con una pureza del 99.99%. El depósito de la película superior se realizó por 16 min para un espesor de 80 nm, lo que corresponde a una razón de depósito de 5nm/min. Para la película posterior, el tiempo de depósito fue de 10 min para obtener un espesor de 50

nm. Las condiciones utilizadas para este trabajo son presentadas en la *Tabla 3*, y se mantuvieron constantes durante todos los procesos.

Fuente	Presión	Potencia	Temp en cámara	Flujo de argón
	mTorr	W	°C	Sccm
RF	6	150	160	9

*Tabla 3. Parámetros para el depósito de las películas de ITO.*



*Figura 31 Equipo de pulverización catódica del Laboratorio de Microelectrónica*

#### **4.6 Limpieza con el equipo de grabado iónico reactivo en plasma de O<sub>2</sub> y CF<sub>4</sub> (parte posterior y parte superior)**

Con el fin de depositar los contactos de aluminio se realiza, primero, una limpieza con el equipo de grabado iónico reactivo. El equipo de grabado iónico reactivo utiliza un plasma químicamente reactivo para eliminar residuos orgánicos procedentes de las resinas. En general, en el caso de las celdas HIT, no retira las películas de silicio amorfo depositadas ni las películas de ITO, pero cumple el propósito de eliminar cualquier contaminante o polvo que pudiera quedar sobre las mismas. El equipo utilizado fue el *MICRO-RIE SERIES 800* de *TECHNICS*. Las condiciones, para este proceso de limpieza, se muestran en la *Tabla 4*; el tiempo se variará dependiendo del tamaño de la oblea (ya sea de 2" para obleas CZ o ¼ de oblea FZ de 4").



Plasma	Presión	Potencia
Tipo	mTorr	W
Oxígeno	150	300
CF <sub>4</sub>	200	300

Tabla 4. Parámetros para la limpieza de las obleas en el plasma de RIE.

#### 4.7 Depósito de contactos de aluminio (posteriores y superiores).

El depósito de los contactos posteriores y superiores se realizó por medio de evaporación por haz de electrones (e-beam evaporation) usando la evaporadora e-beam de Balzers (*Figura 32*) presente en el Laboratorio de Microelectrónica del INAOE.

Inicialmente los electrones generados por la fuente son direccionados a través de campos eléctricos y magnéticos al material ubicado en el crisol para que especies sean desprendidas de este; con el obturador retirado, se espera que el flujo de material llegue hasta las muestras, es decir que el camino libre medio de las partículas desprendidas sea mayor a la distancia entre el material y los sustratos de silicio; para cumplir esta condición se requiere un alto vacío en la cámara (aproximadamente  $10^{-1}mTorr$ ) [\[4.10\]](#). Se buscará que en cada ciclo se deposite el espesor máximo que da esta evaporadora (alrededor de  $1 \mu m$ ). Para el caso de las celdas fabricadas en este trabajo se utilizaron balas de aluminio.

En el proceso de fabricación primero se depositan los contactos posteriores de aluminio y, después de la litografía por la parte superior, se depositan los contactos superiores.



Figura 32. Evaporadora e-beam Balzers.

#### 4.8 Litografía por Lift-off parte superior

La litografía se realiza con el objetivo de crear el patrón de rejilla de la parte superior de las celdas HIT, la cual consta de nueve celdas individuales (*Figura 33. b*). Esta se realiza con la alineadora de 4" que se encuentra en el Laboratorio de Microelectrónica y haciendo uso de las mascarillas adecuadas.

El proceso consiste en que, una vez las obleas de *c-Si* sean recubiertas con las capas de silicio amorfo hidrogenado dopado e intrínseco y películas de ITO, se debe recubrir la superficie delantera y trasera con la resina positiva *map1275* para posteriormente hacerse la alineación por la parte superior y, finalmente, revelar con una solución de 0.8 L de agua DI y 12 gr de *NaOH*. Después de la litografía lift off de la parte superior se puede proceder al depósito de los contactos de aluminio superiores.

#### 4.9 Corte de celdas

Para terminar el proceso de fabricación de las celdas HIT se procede a realizar el corte de estas. El patrón de la mascarilla incluye nueve celdas individuales (*Figura 33.b*) que deben ser separadas hasta tener una celda de 1 cm<sup>2</sup>, como lo muestra la *Figura 33.a*

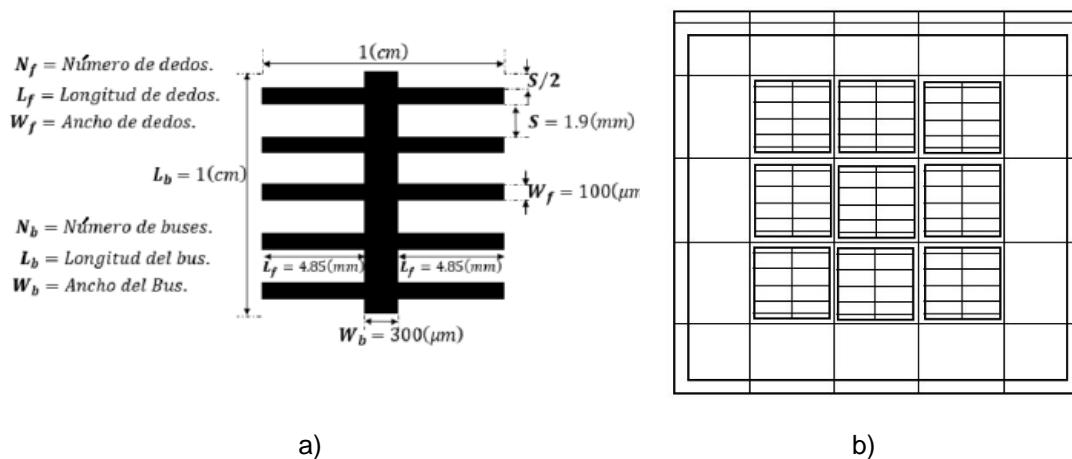


Figura 33. a) Dimensiones una celda de  $1\text{ cm}^2$  y b) esquemático de nueve celdas de  $1\text{ cm}^2$ .

## 4.10 Referencias capítulo 4

[4.1] "Solvent Cleaning - an overview | ScienceDirect Topics", Sciencedirect.com, 2020. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/solvent-cleaning>.

[4.2] "A Thorough Comparison of Water Based Cleaners and Solvent Cleaners | Techspray", Techspray.com, 2020. [Online]. Available: <https://www.techspray.com/a-thorough-comparison-of-water-based-cleaners-and-solvent-cleaners>.

[4.3] D. Payne, T. Fung, M. Khan, J. Cruz-Campa, K. McIntosh and M. Abbott, "Understanding the optics of industrial black silicon", p. 1, 2018. Available: 10.1063/1.5049297

[4.4] J. Ximello Quiebras, *Wet chemical textures for crystalline silicon solar cells*, 1st ed. Konstanz: Universidad de Konstanz, 2013, p. 27.

[4.5] J. Ximello Quiebras, *Wet chemical textures for crystalline silicon solar cells*, 1st ed. Konstanz: Universidad de Konstanz, 2013, p. 29.

[4.6] J. Ramirez Rios, "Optimización del proceso de fabricación de celdas solares de heterounión de silicio cristalino / silicio amorfo", Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, Santa María de Tonantzintla, Puebla, 2019.

[4.7] J. Ximello Quiebras, *Wet chemical textures for crystalline silicon solar cells*, 1st ed. Konstanz: Universidad de Konstanz, 2013, p. 26.

- [4.8] D. Deligiannis et al., "Wet-chemical Treatment for Improved Surface Passivation of Textured Silicon Heterojunction Solar Cells", *Energy Procedia*, vol. 55, pp. 197-202, 2014. Available: 10.1016/j.egypro.2014.08.117
- [4.9] Murias Figueroa, D., 2016. *Estudio De Pasivación De Sustratos De C-Si Y Texturizado Por Plasma Para Aplicaciones En Celdas Solares De Heterounión*. 1st ed. Puebla: INAOE.
- [4.10] D. Muñoz, T. Desrues, and P.-J. Ribeyron, "a-Si:H/c-Si Heterojunction Solar Cells: A Smart Choice for High Efficiency Solar Cells," in *Physics and Technology of Amorphous-Crystalline Heterostructure Silicon Solar Cells*, Springer, 2012.
- [4.11] D. Deligiannis et al., "Wet-chemical Treatment for Improved Surface Passivation of Textured Silicon Heterojunction Solar Cells", *Energy Procedia*, vol. 55, pp. 197-202, 2014. Available: 10.1016/j.egypro.2014.08.117
- [4.12] D. Murias, "Texturizado de sustratos de silicio cristalino para aplicaciones en celdas solares", *Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE)*, 2011.
- [4.13] J. Martínez, "Desarrollo de celdas solares de heterounión c-Si / a-Si:H", *Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE)*, 2011
- [4.14] D. Murias, "Estudio de Pasivación de Sustratos de c-Si y Texturizado por Plasma para Aplicaciones en Celdas Solares de Heterounión", *Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE)* 2016.
- [4.15] O. Velandia, "Estudio y desarrollo de celdas solares basadas en estructuras de silicio cristalino/silicio amorfo," *Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE)*, 2018.
- [4.16] J. Ramirez Rios, "Optimización del proceso de fabricación de celdas solares de heterounión de silicio cristalino / silicio amorfo", *Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, Santa María de Tonantzintla, Puebla*, 2019.

## CAPÍTULO 5: RESULTADOS Y ANÁLISIS

---

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos para la caracterización de las celdas HIT fabricadas en el Laboratorio de Microelectrónica del Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica. El objetivo principal de este trabajo es optimizar los parámetros de las celdas solares HIT fabricadas anteriormente por los M. C. Oscar Velandia Caballero y M. C. Juan Federico Ramírez [5.1,5.2]. Además, de identificar los factores en el proceso de fabricación, que puedan llevar a reducir o aumentar la corriente de corto circuito, el voltaje de circuito abierto, el factor de llenado y la eficiencia de conversión.

En el *Proceso 1* se buscó documentar las condiciones de los equipos de laboratorio, en específico los niveles de limpieza del sistema PECVD y presión del equipo de pulverización catódica, y aumentar el tiempo de las muestras en el equipo de grabado iónico reactivo con el fin de obtener una mejor limpieza de la superficie trasera y delantera, lo que podría disminuir la recombinación superficial y favorecer el incremento del factor de llenado. En el *Proceso 2* se estudió el efecto de variar la relación de los gases  $[PH_3/SiH_4]$  en 0.1%, 0.5% y 0.7%, con el fin de conocer su influencia sobre los parámetros de desempeño de las celdas. Finalmente, en el *Proceso 3* se varió el espesor de la película *a-Si:H* tipo *p* para encontrar el valor óptimo que favorezca el tuneleo y disminuya la resistencia en serie.

Para todas las celdas HIT fabricadas se utilizaron sustratos de *c-Si* tipo *n* FZ 4" de orientación  $\langle 100 \rangle$  dopados con fósforo, de resistividad 1 a 5  $\Omega cm$  y espesor de 260 a 300  $\mu m$  de la marca *Topsil*; y sustratos de *c-Si* tipo *n* CZ de orientación  $\langle 100 \rangle$  dopados con fosforo, de resistividad 3 a 10  $\Omega cm$  y espesor de  $300 \pm 25 \mu m$  de la marca *Addison*.

Las condiciones de depósito de las películas de ITO no se variaron para los procesos de este trabajo debido a que las condiciones presentadas en la *Tabla 5*, dan como resultado altos valores de transmitancia (82.2% para las longitudes de onda de 200 a 900 *nm*) y baja resistividad ( $5.32 \times 10^{-4} \Omega cm$ ).

Fuente	Presión	Potencia	Temp en cámara	Flujo de argón	Razón de depósito
	mTorr	W	°C	Sccm	nm/min
RF	6	150	160	9	8.625

*Tabla 5. Condiciones de depósito de las películas de ITO para todos los procesos.*

Los tiempos utilizados para el depósito de las películas de ITO de las celdas HIT, se mantuvieron constantes en *16 min* para la parte superior y *10 min* para la parte posterior como se muestra en la *Tabla 6*.

Lado del sustrato de c-Si	Tipo de película	Tiempo	Espesor D	Espesor d
		min	nm	
Superior	ITO	16	138	80
Posterior		10	87	50

*Tabla 6. Tiempos de depósito de las capas de ITO superior y posterior de las celdas HIT.*

Para el depósito de contactos de aluminio se espera que un ciclo de la evaporadora se produzcan películas con espesores cercanos a  $1.00 \mu\text{m}$ .

## 5.1 Proceso 1

Este proceso se realizó con dos objetivos: el primero de ellos fue documentar las condiciones de los equipos de laboratorio para las celdas de referencia, en las cuales se ha obtenido una eficiencia de  $14.9\%$  en promedio [5.2], en específico los niveles de limpieza del sistema PECVD y presión del equipo de pulverización catódica. El segundo objetivo de este proceso fue aumentar el tiempo de las muestras en el equipo de grabado iónico reactivo con el fin de obtener una mejor limpieza de la superficie trasera y delantera, lo podría favorecer el incremento del factor de llenado [5.5].

En este proceso se utilizaron obleas de *c-Si tipo n FZ* nombradas como *1A* y *1D*. La *muestra 1A* corresponde a las celdas en condiciones de prueba, mientras que la *muestra 1D* también corresponde a la celda en condiciones de prueba, pero con un aumento de tiempo de limpieza en plasma de RIE, como se presenta en la *Tabla 7*. Las variaciones en el proceso de fabricación para las muestras *1A* y *1D* se presentan en la *Figura 34*. Además, de cada muestra, se obtuvieron entre cuatro y ocho celdas de  $1 \text{ cm}^2$ .

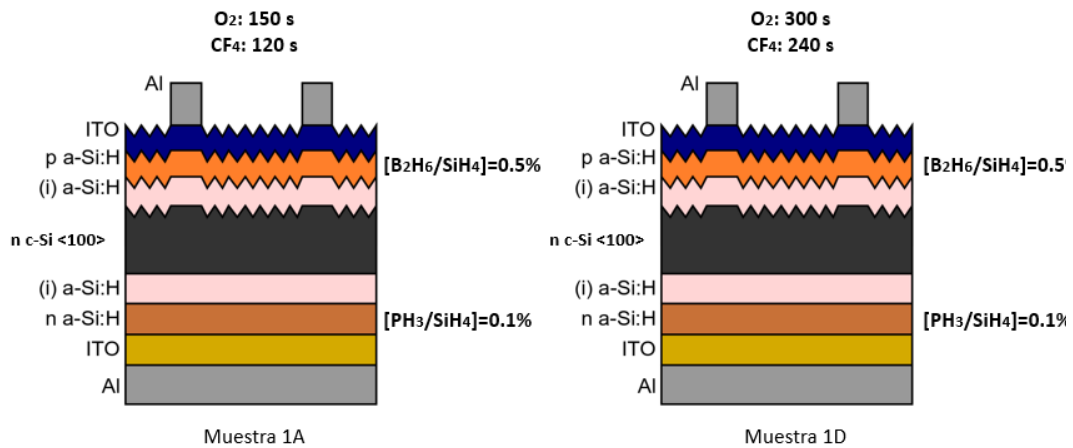


Figura 34. Variaciones realizadas en el proceso 1 para las muestras 1A y 1D: a) muestra 1A celda de prueba y b) muestra 1D celda de prueba con aumento de tiempo en el sistema de grabado iónico reactivo.

Plasma	Presión	Potencia	Tiempo
Tipo	mTorr	W	s
<b>Muestra 1A</b>			
Oxígeno	150	300	150
CF <sub>4</sub>	250	300	120
<b>Muestra 1D</b>			
Oxígeno	150	300	300
CF <sub>4</sub>	250	300	240

Tabla 7. Proceso 1 – Tiempos de limpieza en el plasma de RIE para las muestras 1A y 1D

Los depósitos de las capas de *a-Si:H* dopadas e intrínsecas para las muestras 1A y 1D se realizaron bajo las mismas condiciones de presión, temperatura, potencia en cámara y tiempo (Tabla 8). Los parámetros de depósito de las capas de ITO se mantuvieron constantes, como se presentó al principio de este capítulo (ver Tablas 5 y 6). Finalmente, el espesor alcanzado para los contactos de aluminio de todas las muestras fue de 1.00  $\mu\text{m}$  para la parte posterior y superior.

Cámara	Muestra	Tipo de película	$SiH_4$	$B_2H_6$	$PH_3$	Presión	Potencia RF	Temp. Calentador/sustrato	Tiempo	Espesor d
			al 10 % en $H_2$	al 1 % en $H_2$	al 1 % en $H_2$					
			SCCM			mTorr	W	°C	s	nm
PL4	1A y 1D	(i) a-Si:H	10	~	~	0.55	4/3	265/160	170	10
PL2	1A y 1D	p a-Si:H	30	1.5	~	0.69	4/3	265/160	120	7
PL7	1A y 1D	n a-Si:H	30	~	0.3	0.69	4/3	265/160	230	6

Tabla 8. Condiciones de depósito de las películas de silicio amorfo dopado e intrínseco para el Proceso de Fabricación 1.

Terminando el proceso de fabricación se realizó la caracterización eléctrica para obtener y cuantificar el desempeño de las celdas HIT, las curvas  $I$ - $V$  bajo iluminación tipo AM 1.5 se presentan en la *Figura 35*. Los valores de las figuras de mérito  $V_{oc}$ ,  $J_{sc}$ ,  $FF$  y  $Eff$ , para cada una de las muestras 1A y 1D, se presentan en las Tablas 9 y 10.

En las *Tablas 9 y 10* se puede observar que las máximas eficiencias son las obtenidas para la celda 1A-6 y la celda 1D-4, con valores de 8.95% y 5.48%, respectivamente. Sin embargo, el valor de eficiencia obtenido para la celda 1A-6 es mucho más bajo que el reportados por el Ms C. Juan Federico Ramírez [5.2], quién fabricó celdas HIT con una eficiencia máxima de 14.90% en promedio; esto se debe a que la celda 1A-6 presenta baja resistencia en paralelo ( $124 \Omega$ ), como se muestra en la *Figura 35*. La baja  $R_p$  se puede atribuir, entre otras causas, a que las capas de ITO presentaron baja uniformidad. También, es posible que el campo eléctrico posterior (BSF) no sea óptimo, lo que es consecuencia de un bajo nivel de dopado de la película posterior de a-Si:H tipo n. El nivel de dopado de la película de silicio amorfo hidrogenado tipo n se estudiará en futuros procesos.

Para la muestra 1D-4, si bien el objetivo de aumentar el tiempo de limpieza en plasma de RIE era incrementar el factor de llenado, no fue posible realizarlo debido a las condiciones de funcionamiento de los equipos de laboratorio.

Las bajas eficiencias obtenidas son un indicador de que las condiciones de funcionamiento, bajo las cuales operan los equipos del laboratorio, deben ser revisadas y optimizadas. Por lo tanto, se plantean algunas consideraciones para los futuros procesos: en primer lugar, la cámara del equipo de pulverización catódica debe alcanzar niveles de presión mayores o iguales a  $1 mTorr$ , antes del depósito de las capas de ITO; en segundo lugar, las cámaras del sistema PECVD deben ser limpiadas de manera minuciosa antes de



realizar el primer depósito después de un periodo vacacional. Finalmente, se debe hacer un pre-depósito en el equipo de pulverización catódica para evitar contaminación cruzada por materiales diferentes al blanco de ITO utilizado.

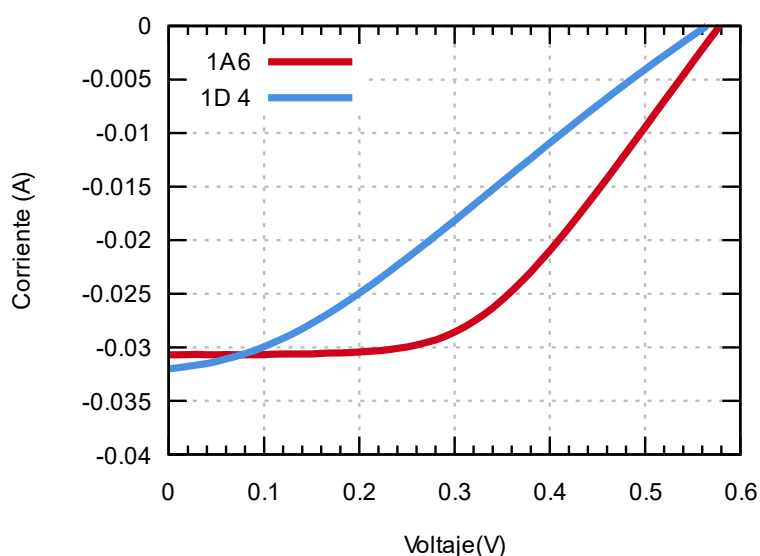


Figura 35. Muestras 1A 6 y 1D 4 bajo iluminación – Proceso 1.

<b>Proceso 1 – Muestra 1A: celdas de 1 cm<sup>2</sup> en condiciones de prueba (eficiencia de 14.9%)</b>					
Celda	Voc [V]	Jsc [A/CM2]	Pmpp [W]	FF [%]	Eff [%]
1A-2	0.57	0.03	0.007	39.62	7.13
1A-4	0.57	0.03	0.008	47.74	8.34
1A-5	0.58	0.03	0.007	40.85	7.46
1A-6	0.58	0.03	0.009	50.29	8.95
1A-7	0.56	0.03	0.006	37.34	6.59
1A-8	0.56	0.03	0.006	40.34	6.91

Tabla 9. Proceso 1 – Muestra 1A: Condiciones de prueba.

<b>Proceso 1 – Muestra 1D: celdas de 1 cm<sup>2</sup> con un aumento de tiempo en el plasma de RIE</b>					
Celda	Voc [V]	Jsc [A/CM2]	Pmpp [W]	FF [%]	Eff [%]
1D-1	0.58	0.03	0.005	26.73	4.71
1D-2	0.58	0.03	0.005	28.94	5.36
1D-3	0.57	0.02	0.004	25.99	4.00
1D-4	0.56	0.03	0.005	30.61	5.48

Tabla 10. Proceso 1 – Muestra 1D: Aumento de tiempo en el plasma de RIE.

Adicionalmente se fabricó la *muestra 1E*, una celda de 2” en una oblea CZ tipo  $n <100>$ ; esto se hizo con el objetivo de aumentar la eficiencia de 1.7% obtenida en trabajos previos [5.2]. Para este proceso se utilizaron los gases O<sub>2</sub>

y  $CF_4$  combinados durante 600 s. Sin embargo, después de la primera limpieza en el plasma de RIE, se observó que las películas de ITO se grabaron debido al alto tiempo utilizado. La muestra presentó una eficiencia menor al 1% y, por lo tanto, se descarta el uso combinado de los gases, y el alto tiempo, de las celdas en el plasma de RIE para realizar la limpieza.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos para esta sección, especialmente los enseñados por la *Figura 35*, en el siguiente proceso se buscará disminuir el valor de la resistencia en serie e incrementar el valor de la resistencia en paralelo. Así mismo, se buscará alcanzar eficiencias de conversión mayores.

## 5.2 Proceso 2

El objetivo de este proceso es realizar un estudio sobre el comportamiento que tendrán las figuras de mérito ( $V_{oc}$ ,  $I_{sc}$ ,  $FF$  y  $Eff$ ) al variar la relación  $[PH_3/SiH_4]$  de las capas  $a-Si:H$  tipo  $n$  en 0.1%, 0.5% y 0.7%, ya que, en función de la concentración de los gases utilizados, el espesor, el dopado y otras propiedades físicas y eléctricas de las capas de  $a-Si:H$  tipo  $n$  cambian. Se espera obtener una película con una alta conductividad que reduzca la resistencia en serie de las celdas fabricadas. Para elegir la capa de silicio amorfo hidrogenado tipo  $n$  con las propiedades físicas y eléctricas adecuadas, se realizaron tres experimentos en el sistema PECVD depositando las capas a diferentes concentraciones sobre vidrios *Corning 1737* nombrados  $V1$ ,  $V2$  y  $V3$  y, posteriormente, se realizaron mediciones de espesor en el perfilómetro de contacto. Los resultados son presentados en la *Tabla 11*. Además, el tiempo utilizado para todos los depósitos fue de 230 s.

<b>Resultados obtenidos con el perfilómetro – Proceso 2</b>			
<b>Concentración</b>	<b>Muestra</b>	<b>Espesor [nm]</b>	<b>Promedio [nm]</b>
<b><math>[PH_3/SiH_4]=0.1\%</math></b>	V1	11.5	9.49
		15.5	
		6.31	
		3.18	
		11.1	
<b><math>[PH_3/SiH_4]=0.5\%</math></b>	V2	4.52	6.69
		8.11	
		8.72	
		8.72	
		4.80	
<b><math>[PH_3/SiH_4]=0.7\%</math></b>	V3	4.70	5.29
		5.84	
		4.71	
		5.38	
		5.84	

Tabla 11. Resultados obtenidos con el perfilómetro para los espesores a diferentes concentraciones de  $PH_3$  – Proceso 2.

Como referencia se usó la razón  $[PH_3/SiH_4]=0.1\%$ , obteniéndose películas con un espesor promedio de  $10\text{ nm}$ , valor que concuerda con aquellos que se han reportado en trabajos previos [5.1,5.2]. Para la concentración  $[PH_3/SiH_4]=0.5\%$ , el espesor disminuyó a  $6.69\text{ nm}$ . Finalmente, para la concentración de  $[PH_3/SiH_4]=0.7\%$ , se obtuvo un espesor de  $5.29\text{ nm}$ . Así, en esta tesis, se concluye que el espesor de la capa de silicio amorfo hidrogenado tipo  $n$  disminuye al aumentar la concentración de  $PH_3$ .

Al conocer la relación entre el espesor promedio y la concentración de  $[PH_3/SiH_4]$  se procede a replicar el proceso sobre celdas HIT. En este proceso se utilizaron obleas de  $c$ -Si tipo  $n$  CZ nombradas como 2A, 2C, 2D y 2E; el uso de obleas CZ se debió a que no se tenían disponibles obleas FZ en el Laboratorio de Microelectrónica. La muestra 2A posee una capa  $a$ -Si:H tipo  $n$  con una relación  $[PH_3/SiH_4]=0.1\%$ ; las muestras 2C y 2D poseen una capa  $a$ -Si:H tipo  $n$  con una relación  $[PH_3/SiH_4]=0.5\%$ ; finalmente, la muestra 2E poseen una capa  $a$ -Si:H tipo  $n$  con una relación  $[PH_3/SiH_4]=0.7\%$ . Las variaciones en el proceso de fabricación para todas las muestras se presentan en la Figura 36.

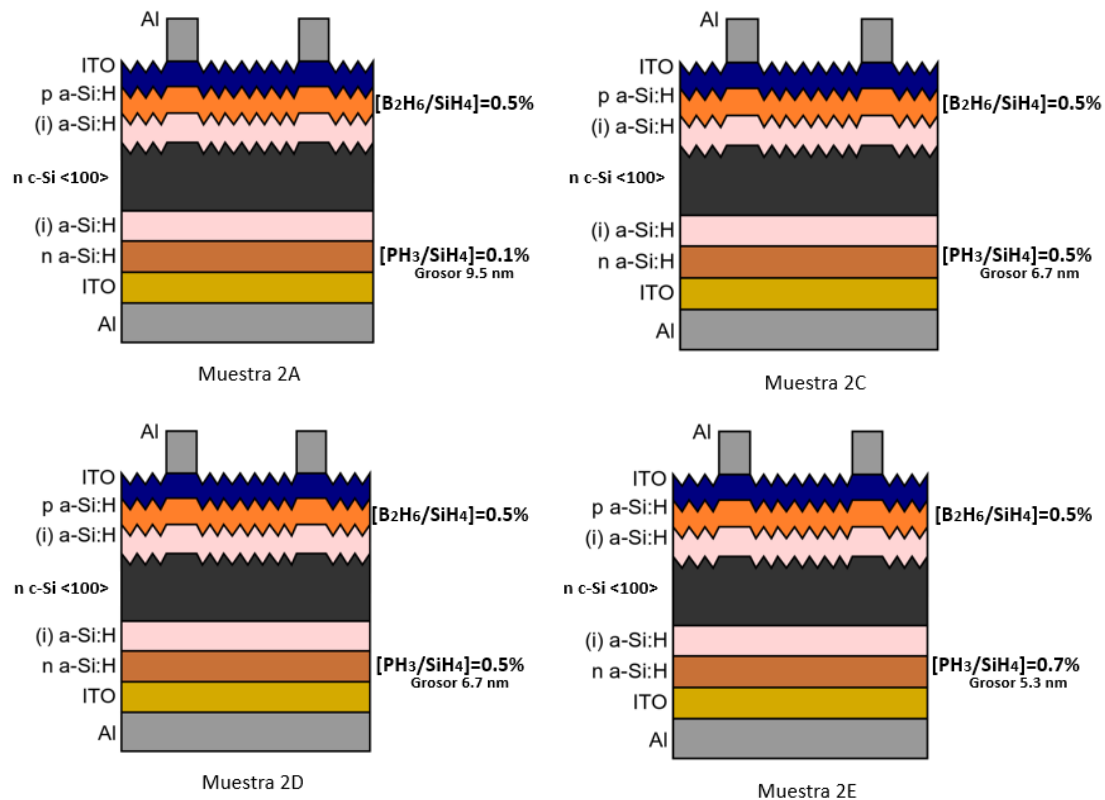


Figura 36. Variaciones realizadas en el proceso 2 para las muestras 2A, 2C, 2D y 2E: muestra 2A  $[PH_3/SiH_4]=0.1\%$ , muestras 2C y 2D  $[PH_3/SiH_4]=0.5\%$ , muestra 2E  $[PH_3/SiH_4]=0.7\%$ .

En las muestras 2A, 2C y 2E se utilizó el patrón para los contactos de aluminio que contiene nueve celdas de  $1\text{ cm}^2$ , como lo indica la Figura 37.a. Para la muestra 2D se utilizó el patrón para los contactos de aluminio de una celda hexagonal de  $2''$ , como lo indica la Figura 37.b. Los tiempos de limpieza en el plasma de RIE se mantuvieron iguales para las muestras 2A, 2C y 2E, con un valor de  $150\text{ s}$  para  $O_2$  y  $120\text{ s}$  para  $CF_4$ ; la muestra 2D, debido a que es una celda hexagonal de  $2''$ , utilizó tiempos más altos de limpieza, con un valor de  $300\text{ s}$  para  $O_2$  y  $240\text{ s}$  para  $CF_4$ . Los valores utilizados son presentados en la Tabla 12.

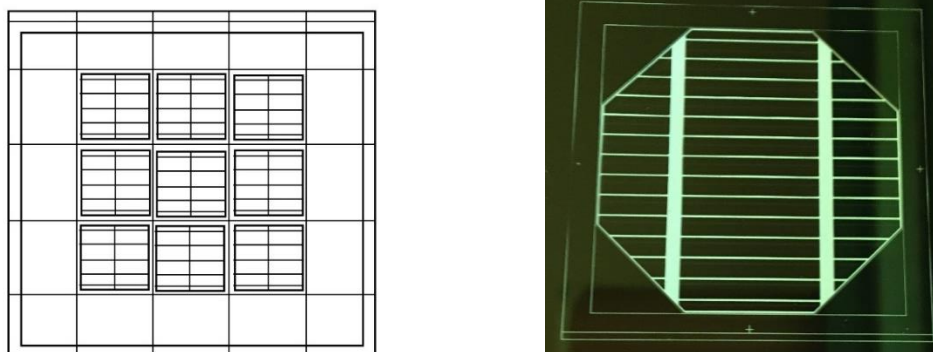


Figura 37. a) Nueve celdas de 1 cm<sup>2</sup> – Muestras 2A, 2C y 2E; y b) Una celda de 2'' – Muestra 2D.

Plasma	Presión	Potencia	Tiempo 1cm <sup>2</sup>	Tiempo 2''
Tipo	mTorr	W	s	
<b>Muestras 2A, 2C, 2E</b>				
O <sub>2</sub>	150	300	150	NA*
CF <sub>4</sub>	250	300	120	NA*
<b>Muestra 2D</b>				
O <sub>2</sub>	150	300	NA*	300
CF <sub>4</sub>	250	300	NA*	240

Tabla 12. Parámetros de limpieza en plasma de RIE – Proceso 2  
\* NA: No aplica.

El depósito de las capas de *a-Si:H* dopado tipo *p* e intrínseco, fue realizado bajo las mismas condiciones de presión, temperatura, potencia en cámara y tiempo. Sin embargo, el depósito de las capas *a-Si:H* tipo *n*, se realizó de acuerdo con las condiciones que se muestran en las Tablas 13, 14 y 15.

Cámara	Tipo de película	SiH <sub>4</sub> al 10 % en H <sub>2</sub>	B <sub>2</sub> H <sub>6</sub> al 1 % en H <sub>2</sub>	PH <sub>3</sub> al 1 % en H <sub>2</sub>	Presión  mTorr	Potencia RF display/ plasma  W	Temp calentador/ sustrato  °C	Tiempo de depósito  s
		SCCM						
PL4	(i) <i>a-Si:H</i>	10	~~	~~	0.55	4/3	265/160	170
PL2	<i>p a-Si:H</i>	30	1.5	~~	0.69	4/3	265/160	120
PL7	<i>n a-Si:H</i>	30	~~	0.3	0.69	4/3	265/160	230

Tabla 13. Parámetros del depósito de películas intrínsecas, dopadas tipo *p* y tipo *n*, con una concentración de [PH<sub>3</sub>/SiH<sub>4</sub>]=0.1% - Muestra 2A

Cámara	Tipo de película	$SiH_4$ al 10 % en $H_2$	$B_2H_6$ al 1 % en $H_2$	$PH_3$ al 1 % en $H_2$	Presión	Potencia RF display/ plasma	Temp calentador/ sustrato	Tiempo de depósito
		SCCM						
PL4	(i) a-Si:H	10	~~	~~	0.55	4/3	265/160	170
PL2	p a-Si:H	30	1.5	~~	0.69	4/3	265/160	120
PL7	n a-Si:H	30	~~	1.5	0.69	4/3	265/160	230

Tabla 14. Parámetros del depósito de películas intrínsecas, dopadas tipo p y tipo n, con una concentración de  $[PH_3/SiH_4]=0.5\%$  - Muestras 2C y 2E.

Cámara	Tipo de película	$SiH_4$ al 10 % en $H_2$	$B_2H_6$ al 1 % en $H_2$	$PH_3$ al 1 % en $H_2$	Presión	Potencia RF display/ plasma	Temp calentador/ sustrato	Tiempo de depósito
		SCCM						
PL4	(i) a-Si:H	10	~~	~~	0.55	4/3	265/160	170
PL2	p a-Si:H	30	1.5	~~	0.69	4/3	265/160	120
PL7	n a-Si:H	30	~~	2.1	0.69	4/3	265/160	230

Tabla 15. Parámetros del depósito de películas intrínsecas, dopadas tipo p y tipo n, con una concentración de  $[PH_3/SiH_4]=0.7\%$  - Muestra 2E.

Los parámetros de depósito de las capas de ITO se mantuvieron constantes, como se presentó al principio de este capítulo (ver [Tablas 5](#) y [6](#)). El espesor alcanzado para los contactos de aluminio al final del proceso para todas las muestras fue de  $0.95 \mu m$  para la parte posterior y  $1.00 \mu m$  para la parte superior.

Finalmente, se realizó la caracterización eléctrica y se extrajeron los parámetros de desempeño de las celdas HIT. Los valores de las figuras de mérito  $V_{oc}$ ,  $J_{sc}$ ,  $FF$  y  $Eff$  extraídas para cada una de las muestras se presentan en las [Tablas 16](#), [17](#), [18](#) y [19](#). Los mejores resultados para el *Proceso 2* son las celdas 2A-4, 2C-7, 2D-1 (celda de 2") y 2E-2, con eficiencias de 7.23%, 13.01%, 5.58% (celda de 2") y 13.19%, respectivamente.

Las curvas  $I-V$  bajo iluminación y oscuridad de las celdas 2A-4, 2C-7, 2D-1 y 2E-2 se presentan en las [Figuras 38](#), [39](#), [40](#) y [41](#). Con respecto a las [Figuras 38](#) y [39](#), se distingue que la celda menos resistiva es la muestra 2E-2 y, por lo tanto, presenta la corriente en corto circuito más alta del *Proceso 2*, con un valor de  $40.4 mA$ ; sin embargo, se plantea aumentar este valor en futuros procesos con el fin de obtener una eficiencia de conversión más alta. La celda

2C-7 presentó un alto valor de eficiencia (13.01%) y, además, presentó el valor de factor de llenado, de 65.43%, más alto obtenido para este tipo de celdas.

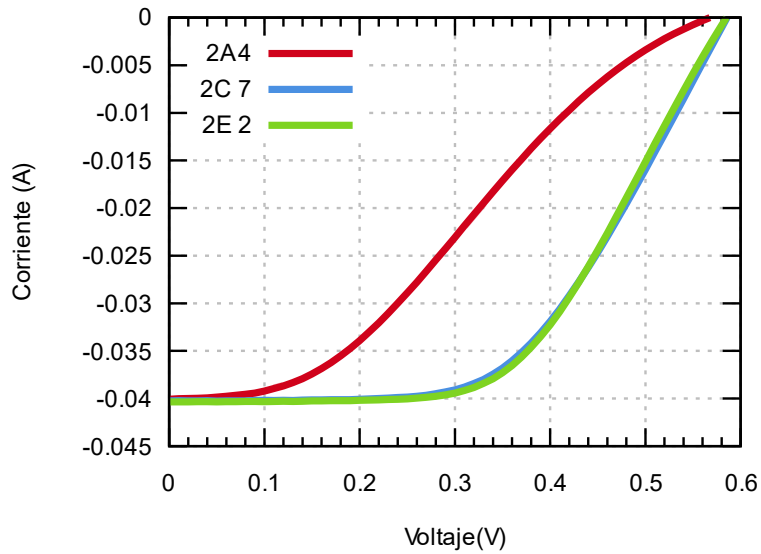


Figura 38. Celdas de 1cm<sup>2</sup> bajo iluminación – celda 2A-4 [PH3/SiH4]=0.1%, celda 2C-7 [PH3/SiH4]=0.5%, celda 2E-2 [PH3/SiH4]=0.7%.

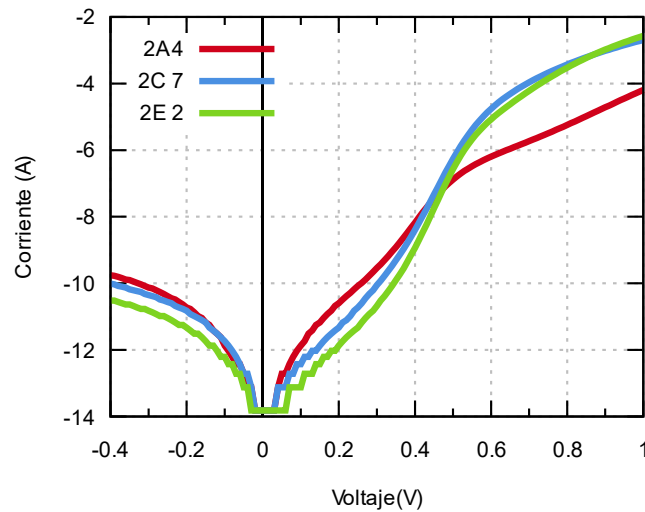


Figura 39. Celdas de 1cm<sup>2</sup> en oscuridad – celda 2A-4 [PH3/SiH4]=0.1%, celda 2C-7 [PH3/SiH4]=0.5%, celda 2E-2 [PH3/SiH4]=0.7%.

Las Figuras 40 y 41 presentan que la celda de 2", que corresponde a 2D-1, tiene el valor más alto de eficiencia reportado hasta el momento para estas celdas, con un valor de 5.58%; sin embargo, presenta bajos valores de resistencia en paralelo, y disminución en el valor de  $I_{sc}$  como resultado de las pérdidas por sombra.

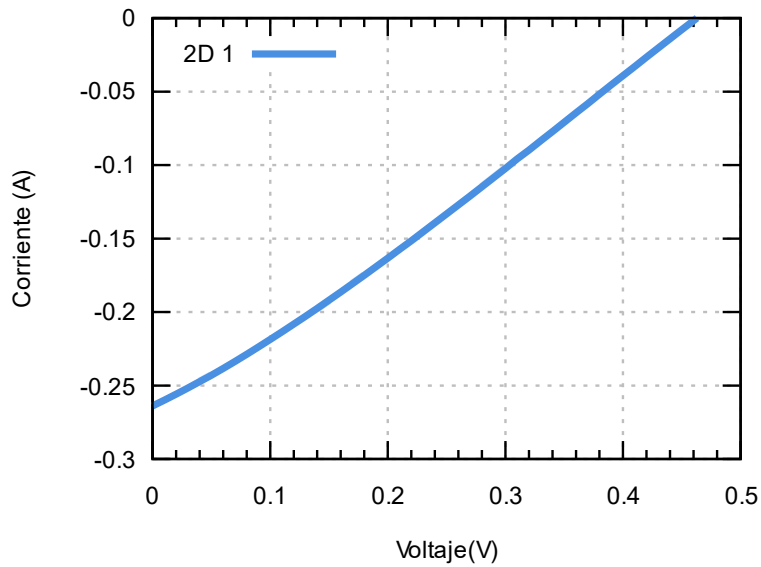


Figura 40. Celda de 2" bajo iluminación – celda 2D-1 [PH3/SiH4]=0.5%.

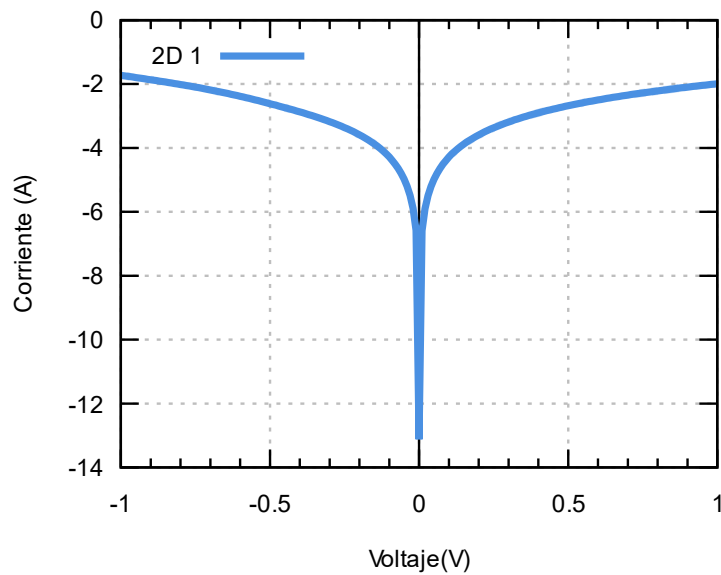


Figura 41. Celda de 2" en oscuridad – celda 2D-1 [PH3/SiH4]=0.5%.



<b>Proceso 2 - Muestra 2A: Celdas de 1 cm<sup>2</sup> con [PH<sub>3</sub>/SiH<sub>4</sub>]=0.1%</b>					
<b>Celda</b>	<b>Voc [V]</b>	<b>Jsc [A/cm<sup>2</sup>]</b>	<b>Pmpp [W]</b>	<b>FF [%]</b>	<b>Eff [%]</b>
2A-1	0.56	0.03	0.007	40.00	7.00
2A-2	0.57	0.03	0.006	36.51	6.43
2A-3	0.45	0.02	0.004	35.53	4.32
2A-4	0.57	0.04	0.007	31.63	7.23

Tabla 16. Proceso 2 - Muestra 2A: Celdas de 1cm<sup>2</sup> con [PH<sub>3</sub>/SiH<sub>4</sub>]=0.1%.

<b>Proceso 2 - Muestra 2C: Celdas de 1 cm<sup>2</sup> con [PH<sub>3</sub>/SiH<sub>4</sub>]=0.5%</b>					
<b>Celda</b>	<b>Voc [V]</b>	<b>Jsc [A/cm<sup>2</sup>]</b>	<b>Pmpp [W]</b>	<b>FF [%]</b>	<b>Eff [%]</b>
2C-1	0.56	0.03	0.010	61.89	10.58
2C-2	0.56	0.02	0.009	60.12	9.88
2C-3	0.58	0.03	0.011	64.14	11.64
2C-4	0.57	0.03	0.011	64.50	11.65
2C-5	0.56	0.03	0.010	62.57	10.57
2C-6	0.57	0.03	0.011	54.78	11.77
2C-7	0.59	0.04	0.013	65.43	13.01

Tabla 17. Proceso 2 - Muestra 2C: Celdas de 1cm<sup>2</sup> con [PH<sub>3</sub>/SiH<sub>4</sub>]=0.5%.

<b>Proceso 2 - Muestra 2D: Celda de 2" con [PH<sub>3</sub>/SiH<sub>4</sub>]=0.5%</b>					
<b>Celda</b>	<b>Voc [V]</b>	<b>Jsc [A/cm<sup>2</sup>]</b>	<b>Pmpp [W]</b>	<b>FF [%]</b>	<b>Eff [%]</b>
2D-1	0.46	0.004	0.034	27.55	5.57

Tabla 18. Proceso 2 - Muestra 2D: Celda de 2" con [PH<sub>3</sub>/SiH<sub>4</sub>]=0.5%.

<b>Proceso 2 - Muestra 2E: Celdas de 1 cm<sup>2</sup> con [PH<sub>3</sub>/SiH<sub>4</sub>]=0.7%</b>					
<b>Celda</b>	<b>Voc [V]</b>	<b>Jsc [A/cm<sup>2</sup>]</b>	<b>Pmpp [W]</b>	<b>FF [%]</b>	<b>Eff [%]</b>
2E-1	0.58	0.040	0.011	47.71	11.16
2E-2	0.59	0.040	0.013	55.39	13.18
2E-3	0.59	0.040	0.012	52.12	12.46
2E-4	0.58	0.040	0.010	45.52	10.72

Tabla 19. Proceso 22 - Muestra E: Celdas de 1cm<sup>2</sup> con [PH<sub>3</sub>/SiH<sub>4</sub>]=0.7%.

### 5.3 Proceso 3

El objetivo de este proceso fue aumentar el valor de  $I_{sc}$ , ya que en el trabajo del M. C. Juan Federico Ramírez se alcanzó un valor de 45.5 mA. para ello se realizó una variación del espesor de la película *a-Si:H* tipo *p*, la cual es el emisor de la celda solar. El variar el espesor busca evitar la recombinación de los portadores en la película de silicio amorfo tipo *p*, debido a la alta densidad de defectos que hay en esta y, además, ayuda a disminuir la resistencia en serie.

Para este proceso se fabricaron celdas solares sobre obleas de *c-Si* tipo *n FZ*, las cuales fueron nombradas como 3A, 3B, 3C; también se fabricaron celdas solares sobre obleas de *c-Si* tipo *n CZ*, las cuales fueron nombradas como 3E y 3F. Las variaciones en el espesor de la capa *a-Si:H* tipo *p* para el proceso de fabricación se presentan en la *Figura 42*. El cambio de espesor se controló por medio del aumento del tiempo de las muestras en la cámara del sistema PECVD, como se indica a continuación:

- **Muestra: 3A – Tiempo en cámara: 76 s – Grosor de la capa a-Si:H tipo p: 5 nm.**
- **Muestras: 3B, 3D, 3E, 3F – Tiempo en cámara: 120 s – Grosor de la capa a-Si:H tipo p: 7 nm.**
- **Muestra: 3C – Tiempo en cámara: 262 s – Grosor de la capa a-Si:H tipo p: 16 nm.**

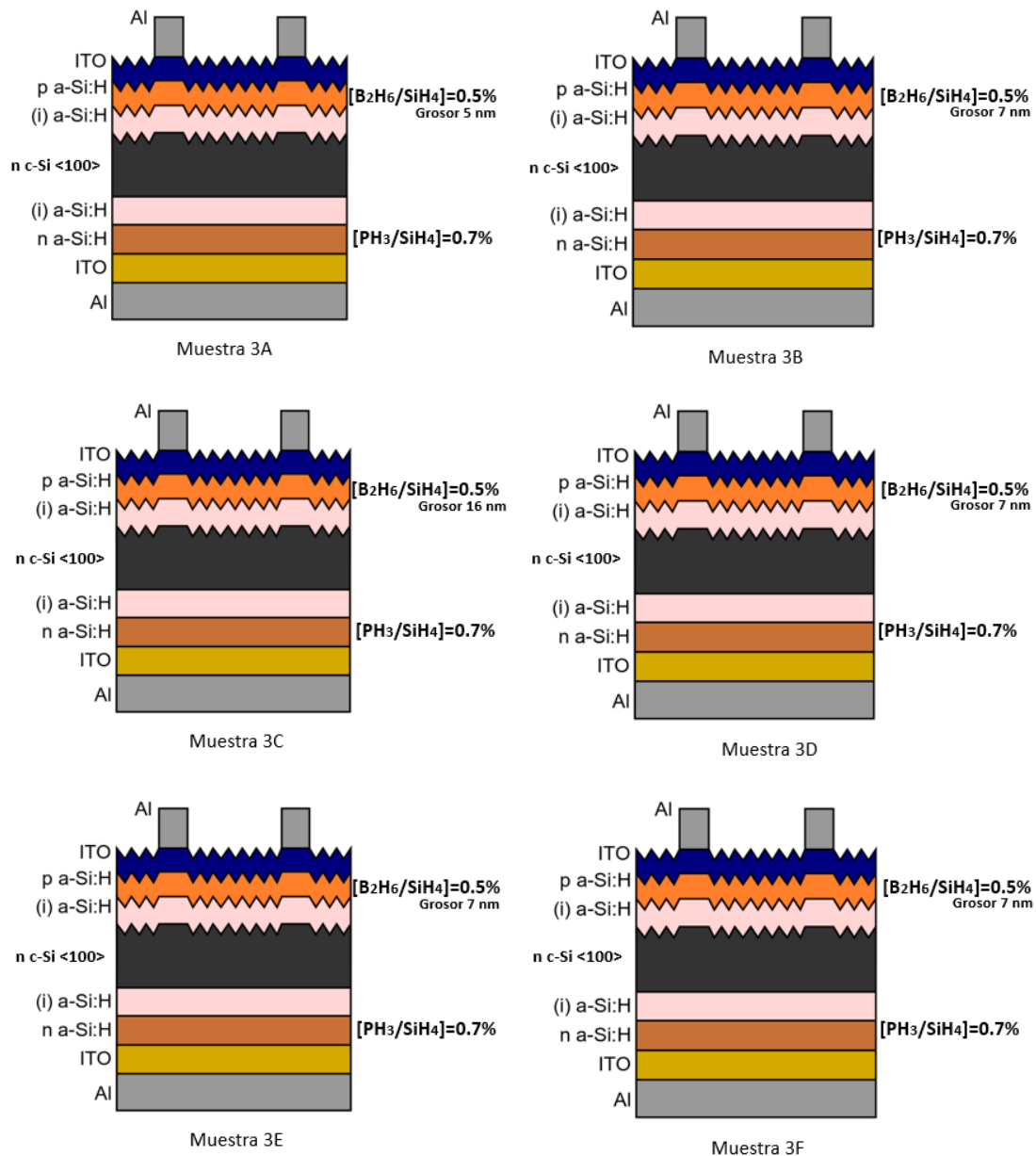


Figura 42. Celdas HIT fabricadas en el proceso 3 para las muestras 3A, 3B, 3C, 3D, 3E y 3F: muestra 3A capa a-Si:H tipo p de espesor 5 nm; muestras 3B, 3D, 3E y 3F capa a-Si:H tipo p de espesor 7 nm; y muestra 3C capa a-Si:H tipo p de espesor 16 nm.

Para las muestras 3A, 3B, 3C y 3D se utilizó el patrón para los contactos de aluminio que contiene nueve celdas de 1cm<sup>2</sup>, como se indicó en la Figura 37.a. Para la muestra 3E se utilizó el patrón para los contactos de aluminio de una celda hexagonal de 2", como se indicó en la Figura 37.b.

Para la muestra 3F (Tabla 29) se utilizó una mascarilla metálica, la cual fue diseñada y fabricada previamente por el Ms. C Juan Federico Ramírez [5.2], para posicionar los contactos superiores; dicho procedimiento permite evitar el proceso de fotolitografía, el cual puede aportar residuos de fotoresina, los cuales disminuyen la resistencia en paralelo. Sin embargo, sus resultados de

eficiencia fueron más bajas a los presentados por la *muestra 3E* (Tabla 28), la cual se fabricó utilizando la técnica de fotolitografía. Se cree que el método de la mascarilla metálica es poco preciso y, además, el área de sombreado es mayor debido a la mascarilla utilizada por lo que se presentan pérdidas ópticas que llevan a disminuir  $I_{sc}$ .

Los tiempos de limpieza en el plasma de RIE para las muestras 3A, 3B, 3C y 3D fueron de 150 s para  $O_2$  y 120 s para  $CF_4$ . Así mismo, en las muestras 3E y 3F el tiempo utilizado fue de 300 s para  $O_2$  y 120 s para  $CF_4$ , como se presenta en la Tabla 20.

Plasma	Presión	Potencia	Tiempo $1cm^2$ Muestras 3A, 3B, 3C y 3D	Tiempo $2''$ Muestras 3E y 3F
Tipo	mTorr	W	s	
$O_2$	150	300	150	300
$CF_4$	200	300	120	240

Tabla 20. Tiempos de limpieza utilizados en el equipo de grabado iónico reactivo para las celdas de  $1cm^2$  y  $2''$  – Proceso 3.

Los depósitos de las capas de *a-Si:H* dopado e intrínseco, fueron realizados bajo las mismas condiciones de presión, temperatura y potencia en cámara. Sin embargo, para obtener capas de *a-Si:H* tipo *p* de un espesor mayor a 4 nm se aumentaron los tiempos de depósito, como muestran las Tablas 21, 22 y 23.

Cámara	Tipo de película	$SiH_4$ al 10 % en $H_2$	$B_2H_6$ al 1 % en $H_2$	$PH_3$ al 1 % en $H_2$	Presión mTorr	Potencia RF display/ plasma W	Temp calentador/ sustrato °C	Tiempo de depósito s
		SCCM						
PL4	(i) <i>a-Si:H</i>	10	~~	~~	0.55	4/3	265/160	170
PL2	<i>p a-Si:H</i>	30	1.5	~~	0.69	4/3	265/160	76
PL7	<i>n a-Si:H</i>	30	~~	2.1	0.69	4/3	265/160	230

Tabla 21. Parámetros del depósito de las películas intrínsecas, dopadas tipo *p* y tipo *n* - Muestra 3A.

Cámara	Tipo de película	$SiH_4$ al 10 % en $H_2$	$B_2H_6$ al 1 % en $H_2$	$PH_3$ al 1 % en $H_2$	Presión	Potencia RF display/ plasma	Temp calentador/ sustrato	Tiempo de depósito
		SCCM						
PL4	(i) a-Si:H	10	~~	~~	0.55	4/3	265/160	170
PL2	p a-Si:H	30	1.5	~~	0.69	4/3	265/160	120
PL7	n a-Si:H	30	~~	2.1	0.69	4/3	265/160	230

Tabla 22. Parámetros del depósito de las películas intrínsecas, dopadas tipo p y tipo n – Muestras 3B, 3D, 3E y 3F.

Cámara	Tipo de película	$SiH_4$ al 10 % en $H_2$	$B_2H_6$ al 1 % en $H_2$	$PH_3$ al 1 % en $H_2$	Presión	Potencia RF display/ plasma	Temp calentador/ sustrato	Tiempo de depósito
		SCCM						
PL4	(i) a-Si:H	10	~~	~~	0.55	4/3	265/160	170
PL2	p a-Si:H	30	1.5	~~	0.69	4/3	265/160	262
PL7	n a-Si:H	30	~~	2.1	0.69	4/3	265/160	230

Tabla 23. Parámetros del depósito de las películas intrínsecas, dopadas tipo p y tipo n – Muestra 3C.

Los parámetros de depósito de las capas de ITO se mantuvieron constantes, como se presentó al principio de este capítulo (ver *Tablas 5 y 6*). El espesor alcanzado para los contactos de aluminio al final del proceso fue de  $0.90 \mu m$  para la parte posterior y superior.

Finalmente, se realizó la caracterización eléctrica y se extrajeron los parámetros de desempeño de las celdas HIT. Los valores de las figuras de mérito  $V_{oc}$ ,  $J_{sc}$ ,  $FF$  y  $Eff$  obtenidas de la caracterización de las celdas HIT se muestran en las *Tablas 24, 25, 26, 27, 28 y 29*. Los mejores resultados para cada muestra corresponden a las celdas 3A-5, 3B-7, 3C-2 y 3D-1 con eficiencias de 13.9%, 11.98%, 12.63% y 14.91%, respectivamente. Así mismo, la muestras 3E y 3F (ambas celdas de 2") presentaron eficiencias de 3.13% y 1.70%, respectivamente.

Las curvas  $I-V$  bajo iluminación y oscuridad de las celdas 3A-5, 3B-7, 3C-2, 3D-1, 3E y 3F se presentan en las *Figuras 43, 44, 45 y 46*. La celda 3D-1 (*Figuras 43 y 44*) posee la eficiencia de conversión más alta de este trabajo de investigación (14.91%) y, además, cumplió el objetivo de este proceso de aumentar  $I_{sc}$ , cuyo valor alcanzó  $46.4 mA$ . Este valor se logró debido a que un

espesor delgado no actúa como una barrera para los portadores fotogenerados, lo que permite el paso de estos a los contactos metálicos.

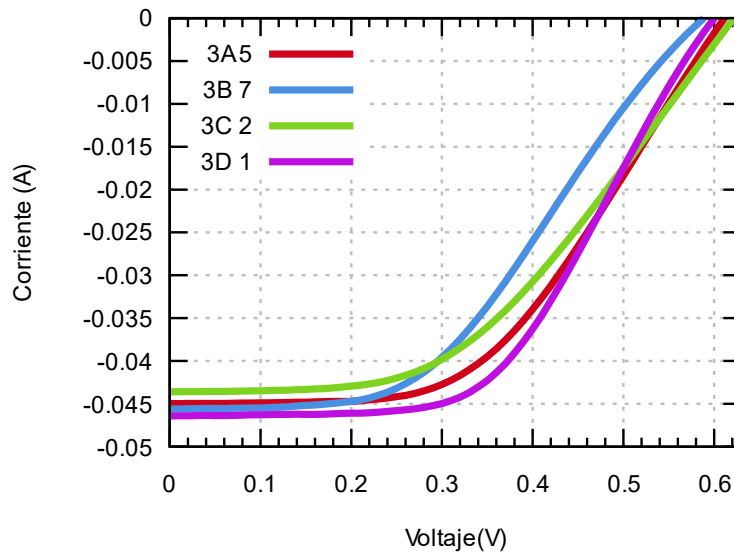


Figura 43. Curva I-V bajo iluminación – Celdas 3A-5 (a-Si:H tipo p 5 nm), 3B-7 (a-Si:H tipo p 7 nm), 3C-2 (a-Si:H tipo p 16 nm), 3D-1 (a-Si:H tipo p 7 nm).

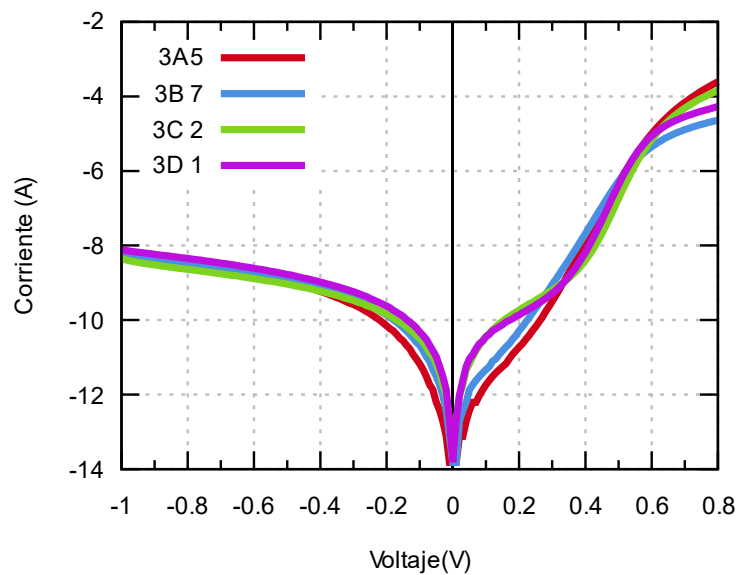


Figura 44. Curva I-V en oscuridad – Celdas 3A-5 (a-Si:H tipo p 5 nm), 3B-7 (a-Si:H tipo p 7 nm), 3C-2 (a-Si:H tipo p 16 nm), 3D-1 (a-Si:H tipo p 7 nm).

De la Figura 46 se puede apreciar que la resistencia en paralelo para las muestras 3E y 3F es de valores relativamente bajos, y de la Figura 45 se puede apreciar que las muestras presentan un muy bajo FF, por lo tanto, baja eficiencia de conversión. En trabajos futuros se planea corregir esto por medio de mejores procesos de limpieza y optimización del depósito de capas de silicio amorfo hidrogenado dopado e intrínseco.

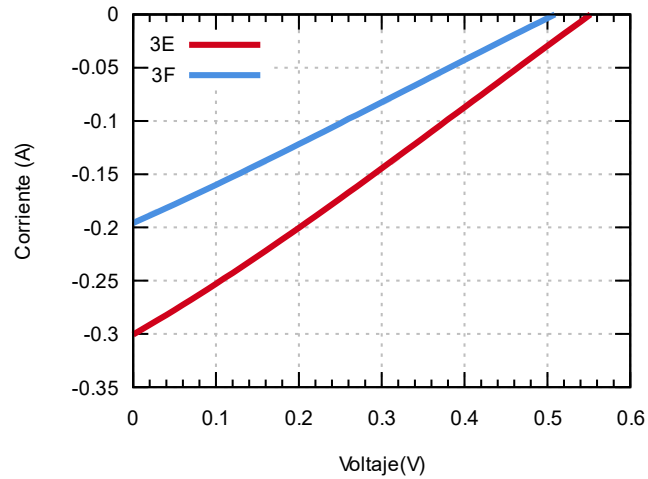


Figura 45. Curva I-V bajo iluminación – Muestras 3E (a-Si:H tipo p 7 nm) y 3F (a-Si:H tipo p 7 nm).

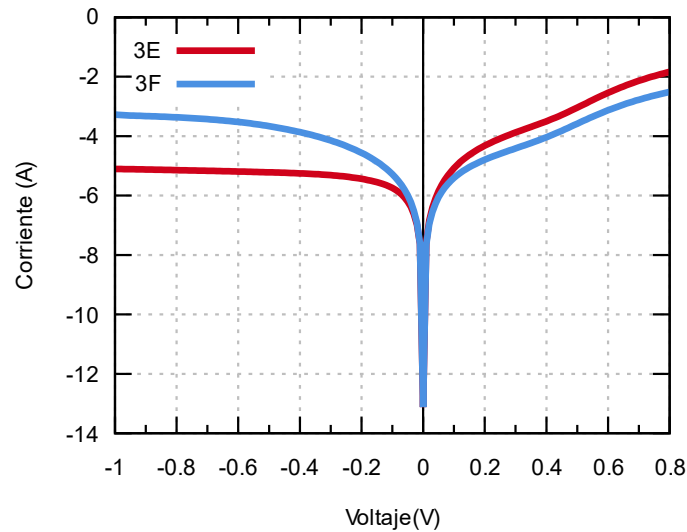


Figura 46. Curva I-V en oscuridad – Muestras 3E y 3F (a-Si:H tipo p 7 nm) y 3F (a-Si:H tipo p 7 nm).

<b>Proceso 3 - Muestra 3A: a-Si:H tipo p superior de 5 nm</b>					
<b>Celda</b>	<b>Voc [V]</b>	<b>Jsc [A/cm<sup>2</sup>]</b>	<b>Pmpp [W]</b>	<b>FF [%]</b>	<b>Eff [%]</b>
3A-1	0.60	0.04	0.012	44.02	11.77
3A-2	0.58	0.04	0.012	48.48	12.34
3A-3	0.62	0.04	0.014	49.30	13.62
3A-4	0.60	0.05	0.014	49.80	13.54
3A-5	0.61	0.04	0.014	50.67	13.89
3A-6	0.58	0.04	0.012	50.04	12.47
3A-7	0.60	0.04	0.013	52.34	13.45
3A-8	0.57	0.04	0.013	49.65	12.54

Tabla 24. Proceso 3 - Muestra 3A: a-Si:H tipo p superior de 5 nm.

<b>Proceso 3 - Muestra 3B: a-Si:H tipo p superior de 7 nm</b>					
<b>Celda</b>	<b>Voc [V]</b>	<b>Jsc [A/cm<sup>2</sup>]</b>	<b>Pmpp [W]</b>	<b>FF [%]</b>	<b>Eff [%]</b>
3B-1	0.58	0.041	0.010	42.28	10.12
3B-2	0.59	0.042	0.009	37.20	9.33
3B-3	0.57	0.043	0.011	43.23	10.74
3B-4	0.58	0.046	0.012	43.42	11.59
3B-5	0.59	0.046	0.012	42.94	11.87
3B-6	0.59	0.046	0.012	39.67	10.79
3B-7	0.59	0.045	0.012	44.53	11.98

Tabla 25. Proceso 3 – Muestra 3B: a-Si:H tipo p superior de 7 nm.

<b>Proceso 3 - Conjunto 3C: a-Si:H tipo p superior de 16 nm</b>					
<b>Celda</b>	<b>Voc [V]</b>	<b>Jsc [A/cm<sup>2</sup>]</b>	<b>Pmpp [W]</b>	<b>FF [%]</b>	<b>Eff [%]</b>
3C-1	0.60	0.04	0.01	41.35	10.39
3C-2	0.62	0.04	0.01	46.70	12.62
3C-3	0.60	0.04	0.01	44.35	11.74
3C-4	0.62	0.04	0.01	38.51	10.26
3C-5	0.60	0.04	0.01	43.86	11.47
3C-6	0.60	0.04	0.01	44.36	11.21
3C-7	0.61	0.04	0.01	45.87	12.25

Tabla 26. Proceso 3 - Muestra 3C:a-Si:H tipo p superior de 16 nm.

<b>Proceso 3 - Muestra 3D: a-Si:H tipo p superior de 7 nm</b>					
<b>Celda</b>	<b>Voc [V]</b>	<b>Jsc [A/cm<sup>2</sup>]</b>	<b>Pmpp [W]</b>	<b>FF [%]</b>	<b>Eff [%]</b>
3D-1	0.60	0.04	0.015	53.54	14.90
3D-2	0.58	0.05	0.014	52.17	13.87
3D-3	0.58	0.05	0.013	50.40	13.39
3D-4	0.59	0.04	0.015	53.66	14.56
3D-5	0.59	0.05	0.013	46.68	12.73
3D-6	0.59	0.05	0.014	50.23	13.73
3D-7	0.57	0.04	0.013	50.50	13.23
3D-8	0.58	0.04	0.013	47.87	12.71

Tabla 27. Proceso 3 - Muestra 3D: a-Si:H tipo p superior de 7 nm.



<b>Proceso 3 - Muestra 3E: Celda de 2" con fotolitografía</b>					
<b>Celda</b>	<b>Voc [V]</b>	<b>Jsc [A/cm<sup>2</sup>]</b>	<b>Pmpp [W]</b>	<b>FF [%]</b>	<b>Eff [%]</b>
<b>3E</b>	0.55	0.02	0.04	26.41	3.12

Tabla 28. Proceso 3 - Muestra 3E: Celda de 2" con fotolitografía.

<b>Proceso 3 - Muestra 3F: Celda de 2" con mascarilla metálica</b>					
<b>Celda</b>	<b>Voc [V]</b>	<b>Jsc [A/cm<sup>2</sup>]</b>	<b>Pmpp [W]</b>	<b>FF [%]</b>	<b>Eff [%]</b>
<b>3F</b>	0.51	0.01	0.02	25.59	1.70

Tabla 29. Proceso 3 - Muestra 3F: Celda de 2" con mascarilla metálica.

## 5.4 Referencias capítulo 5

[5.1] O. Velandia Caballero, "Estudio y desarrollo de celdas solares basadas en estructuras de silicio cristalino / silicio amorfo dopado.", Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, Tonantzintla, Puebla, 2018.

[5.2] J. Ramirez Rios, "Optimización del proceso de fabricación de celdas solares de heterounión de silicio cristalino / silicio amorfo", Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, Santa María de Tonantzintla, Puebla, 2019.

[5.3] Á. Caballero Lorenzo, Optimization of hydrogenated amorphous silicon for its use in different photovoltaic technologies, 1st ed. Barcelona: Universitat de Barcelona, 2016, pp. 88,89.

[5.4] Z. Min, S. Zhi-Tang, L. Bo, F. Song-Lin and C. Bomy, "Reactive Ion Etching as Cleaning Method Post Chemical Mechanical Polishing for Phase Change Memory Device", Chinese Physics Letters, vol. 25, no. 2, pp. 762-764, 2008. Available: 10.1088/0256-307x/25/2/111

[5.5] M. A. Green, "Solar cell fill factors: General graph and empirical expression", Solid-State Electronics, vol. 24, pp. 788 - 789, 1981.

# CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

---

## 6.1 Conclusiones

En este trabajo de investigación se optimizaron los procesos relacionados a las condiciones ideales de depósito del sistema PECVD y pulverización catódica, el dopado de la película *a-Si:H tipo n*, la cual ayuda a la formación del BSF, y el espesor de la película *a-Si:H tipo p*, la cual es el emisor de la celda solar. Todo con el objetivo de aumentar los valores previamente obtenidos de  $V_{oc}$ ,  $I_{sc}$ ,  $FF$  y  $Eff$ .

Con el fin de obtener capas uniformes y libres de impurezas, las condiciones ideales de depósito del sistema de pulverización catódica y el sistema PECVD deben ser las siguientes: en primer lugar, la cámara del equipo de pulverización catódica debe alcanzar niveles mayores o iguales a  $1mTorr$ , antes del depósito de las capas de ITO; en segundo lugar, las cámaras del sistema PECVD deben ser limpiadas de manera minuciosa antes de realizar el primer depósito después de ser encendido; finalmente, se debe hacer un pre-depósito en el equipo de pulverización catódica para evitar contaminación cruzada por materiales diferentes al blanco de ITO utilizado.

En cuanto a la variación del nivel de dopado de la película *a-Si:H tipo n*, su incremento mejora notablemente el factor de llenado y disminuye el valor de la resistencia en serie. De esta manera, tomando como referencia las celdas HIT de  $1cm^2$  previamente estudiadas en el INAOE, se logró incrementar el factor de llenado de  $55\%$  a  $65.43\%$ .

Finalmente, el aumento del nivel de dopado y espesor de la película *a-Si:H tipo p* (emisor de la celda solar) incrementa el valor de la corriente de corto circuito a  $45.9 mA$ . La eficiencia más alta alcanzada para estas celdas fue de  $14.91\%$ .

## 6.2 Trabajo a futuro

### 6.2.1 Estudio del aumento de la temperatura de depósito de las películas de ITO

En el proceso de pulverización catódica por el cual se depositan las capas de ITO, la superficie del sustrato que se sumerge en el plasma puede verse afectada por diversas partículas energéticas, como especies de ITO

pulverizadas, iones neutralizados reflejados desde el blanco y iones positivos acelerados en la cámara [\[6.10\]](#). Partículas de alta energía golpeando las capas *a-Si:H* intrínsecas, y dopadas tipo *p* y tipo *n*, pueden modificar las propiedades de las capas, y, así mismo, la calidad de la pasivación, disminuyendo el tiempo de vida de los portadores minoritarios. Esto se puede controlar de dos maneras: disminuyendo la densidad de potencia del depósito de la pulverización catódica, o aumentando la temperatura de depósito de las capas de ITO. Sin embargo, el disminuir mucho la potencia puede llevar a un plasma inestable y a una reducción dramática de la tasa de depósito de las capas del ITO; la tasa de depósito baja también significa que la muestra es expuesta a altas temperaturas durante largos periodos de tiempo.

La celda solar HIT con una capa de ITO depositada a una temperatura de  $150^{\circ}\text{C}$  tiene un  $V_{oc}$  muy bajo, de  $640\text{ mV}$ , debido a la degradación de la pasivación probablemente como resultado del bombardeo de partículas del equipo de pulverización catódica a la oblea de *c-Si* pasivada. Se ha demostrado que cuando las temperaturas de depósito aumentan, el valor del  $V_{oc}$  se incrementa, lo que sugiere una recuperación debido al recocido simultáneo durante el depósito de las capas de ITO. Es decir, usando temperaturas más altas por debajo del umbral ( para este trabajo son menores o iguales a  $200^{\circ}\text{C}$ ), durante el depósito de las capas de ITO se puede recuperar parte de la degradación inducida por el proceso de pulverización catódica. Las temperaturas de depósito de las capas de ITO más altas también aumentan el  $FF$  y  $J_{sc}$  como resultado de una mayor conductividad y transparencia de las capas de ITO [\[6.9\]](#).

Actualmente, el depósito de las capas de ITO se realiza a una temperatura de  $160^{\circ}\text{C}$ . Se plantea utilizar una temperatura de  $180$  a  $200^{\circ}\text{C}$  con el fin de mejorar la conductividad eléctrica de las capas de ITO, y por lo tanto reducir la resistencia en serie.

### **6.2.2 Estudio del uso de obleas de *c-Si* más delgadas**

Los sustratos utilizados para todos los dispositivos fabricados han sido de *c-Si* tipo *n FZ* 4" de orientación  $\langle 100 \rangle$  dopados con fósforo, de resistividad  $1$  a  $5\ \Omega\text{cm}$  y espesor de  $260$  a  $300\ \mu\text{m}$  de la marca *Topsil*; y sustratos de *c-Si* tipo *n CZ* de orientación  $\langle 100 \rangle$  dopados con fosforo, de resistividad  $3$  a  $10\ \Omega\text{cm}$  y espesor de  $260$  a  $300\ \mu\text{m}$  de la marca *Addison*. Sin embargo, algunos trabajos proponen utilizar sustratos más delgados [\[6.8, 6.9, 6.10\]](#).

Si bien el enfoque principal de disminuir el espesor de la oblea de *c-Si* es reducir costos de fabricación, se ha demostrado por diferentes trabajos que el espesor también afecta el comportamiento de la celda HIT (*Figura 47*), y así la

eficiencia con la que esta convierte energía solar en electricidad. El parámetro afectado directamente es el  $V_{oc}$ .

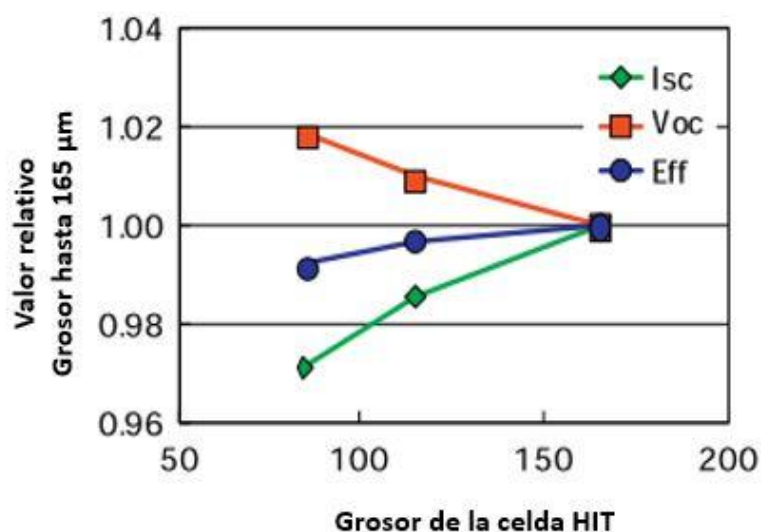


Figura 47. Valor de  $I_{sc}$ ,  $V_{oc}$  y  $Eff$  dependiendo del espesor del  $c\text{-Si}$  [6.5].

Se han utilizado obleas de 96 a 58  $\mu\text{m}$ , siendo el valor del  $V_{oc}$  alcanzado de 0.745 V para el sustrato de 58  $\mu\text{m}$  [6.6]. Esto indica que la velocidad de recombinación superficial de la estructura HIT es extremadamente baja debido a la excelente pasivación de la superficie del  $c\text{-Si}$ . El alto  $V_{oc}$  en una celda solar HIT no solo permite una alta eficiencia de conversión, sino también un coeficiente de temperatura excelente. Aunque, una desventaja de utilizar obleas más delgadas es la posible deformación de la celda HIT.

Algunos laboratorios [6.8] han demostrado que se puede obtener una eficiencia de alrededor del 23% con una oblea de 100  $\mu\text{m}$ , lo que permite disminuir los costos de producción.

### 6.2.3 Estudio de texturizado selectivo por medio del plasma producido por el sistema RIE (textura piramidal usando $\text{SF}_6/\text{O}_2$ para crear Black Silicon (b-Si))

El silicio plano refleja aproximadamente del 30 al 40% de la luz incidente a través de un amplio espectro, lo que limita severamente la eficiencia y la fotosensibilidad de los dispositivos fotoelectrónicos [6.4]. Para disminuir los costos, una reducción en el espesor del sustrato de silicio exige mejoras en la captura de la luz. El grabado húmedo es una forma común para que las celdas solares de silicio monocristalino creen superficies piramidales, reduciendo la reflectancia del  $c\text{-Si}$  a aproximadamente 13-15% (Tabla 30); sin embargo,

estudios [6.11] han informado que el silicio negro, que es creado por medio de grabado seco en el plasma producido por el RIE, tiene pérdidas por reflexión mucho menores que el *c-Si* convencionalmente plano, texturizado con soluciones húmedas o con recubrimientos antirreflejantes simples.

Tipo de texturizado	Reflectancia alcanzada
Sin textura (silicio plano)	36%
Texturizado por grabado húmedo	13%
Texturizado por grabado seco	6%

Tabla 30. Comparativo de los diferentes valores de reflectancia dependiendo del tipo de grabado [6.1].

El silicio negro (*b-Si*), como su nombre lo implica, absorbe la luz de una manera muy eficiente para un gran rango de longitudes de onda y, como resultado, parece negro a simple vista [6.2]. En adición al hecho de que el *b-Si* puede ser usado para incrementar la eficiencia de una celda, este puede proveer ahorros significativos en costos de manufactura debido a que no se necesita agregar una capa antirreflejante adicional, o utilizar un proceso húmedo. Además, otra ventaja que se tiene al utilizar el plasma producido por RIE para crear el texturizado, es que se pueden producir diferentes formas y tamaños de pirámides (dependiendo principalmente de los parámetros utilizados). [6.3]

#### 6.2.4 Estudio de la influencia del cambio de temperatura de depósito de las capas *a-Si:H intrínseca*, *a-Si:H tipo p* y *a-Si:H tipo n*

El objetivo de aumentar la temperatura de depósito es obtener películas con menos densidad de defectos, lo que favorece una mejor eficiencia (por medio de una menor recombinación superficial). La temperatura de depósito se cambia como indica la *Tabla 31*.

Cámara	Tipo de película	SiH <sub>4</sub> al 10 % en H <sub>2</sub>	B <sub>2</sub> H <sub>6</sub> al 1 % en H <sub>2</sub>	PH <sub>3</sub> al 1 % en H <sub>2</sub>	Presión	Potencia RF display/ plasma	Temp calentador/ sustrato
		SCCM					mTorr
PL4	(i) a-Si:H	10	~~	~~	0.55	4/3	265/160
							290/180
							320/200
PL2	p a-Si:H	30	1.5	~~	0.69	4/3	265/160
							290/180
							320/200
PL7	n a-Si:H	30	~~	0.3	0.69	4/3	265/160
							290/180
							320/200

Tabla 31. Parámetros del depósito de películas dopadas tipo p y tipo n a diferentes temperaturas.

El tiempo de depósito, la concentración de los gases de B<sub>2</sub>H<sub>6</sub> y PH<sub>3</sub>, y la temperatura de depósito cambian el valor del espesor *D* y el espesor *d*, por lo tanto, se realizaron estudios para conocer estos valores y los resultados se presentan en el [Apéndice A](#).

### 6.2.5 Estudio del efecto de depositar los contactos superiores e inferiores por medio de Screen printing o Serigrafía

Según Peter Brenner [6.12], la serigrafía de celdas fotovoltaicas es el método más fiable y también el proceso de impresión más común y convencional en la fabricación de celdas solares fotovoltaicas. De hecho, más del 90% de todos los módulos de silicio cristalino se fabrican mediante serigrafía, y aproximadamente el 60% de los módulos de película delgada flexible utilizan la serigrafía en el proceso de fabricación.

Otros estudios [6.13] han demostrado también que el uso de serigrafía para los contactos superiores y posteriores favorece las propiedades eléctricas de la celda terminada: aumenta el *FF* y disminuye la resistencia en serie.

### 6.2.6 Estudio del depósito de contactos superiores y posteriores de plata

En el Laboratorio de Microelectrónica del INAOE se utiliza Al como metal conductor para los contactos superiores y posteriores de la celda solar HIT. Sin embargo, se plantea el utilizar plata en lugar de aluminio.

La plata representa aproximadamente el 48% del costo de metalización de una celda solar, y alrededor del 11% del costo total de los materiales que se utilizan para construir el panel solar. La conductividad térmica y eléctrica de la plata hace de este material ideal para la fabricación de la celda HIT, dado que, a mayor conductividad, mayor eficiencia de conversión.

Los costos de fabricación de la celda solar HIT pueden aumentar al utilizar plata en lugar de aluminio, sin embargo, esto se puede compensar con el uso de [sustratos de c-Si más delgados](#).

### 6.2.7 Mejora de celdas de 2" – Gran escala

El último paso deseado, una vez se tengan las celdas solares con una alta eficiencia, es escalar (aumentar el tamaño de las celdas HIT). Las celdas fabricadas en el Laboratorio de Microelectrónica actualmente tienen un tamaño de 1 cm<sup>2</sup> debido a facilidades de comparación de los parámetros eléctricos obtenidos en otros laboratorios. Sin embargo, se desea fabricar celdas solares HIT más grandes e igual de eficientes, como se presenta en la *Figura 49*. Esta corresponde a una celda de 2".

La escala de las celdas solares es esencial para las aplicaciones fotovoltaicas, ya que se necesita una gran área para generar energía que satisfaga el suministro de energía global sostenible. [\[6.7\]](#)

## 6.3 Referencias capítulo 6

[6.1] M. Moreno et al., "A comparative study of wet and dry texturing processes of c-Si wafers for the fabrication of solar cells", 214

[6.2] H. Savin et al., "Black silicon solar cells with interdigitated back-contacts achieve 22.1% efficiency", *Nature Nanotechnology*, vol. 10, no. 7, p. 624, 2015. Available: 10.1038/nnano.2015.89 [Accessed 26 March 2020].

[6.3] D. Payne, T. Fung, M. Khan, J. Cruz-Campa, K. McIntosh and M. Abbott, "Understanding the optics of industrial black silicon", p. 1, 2018. Available: 10.1063/1.5049297 [Accessed 26 March 2020].

[6.4] C. Hsu et al., "Nanostructured pyramidal black silicon with ultra-low reflectance and high passivation", *Arabian Journal of Chemistry*, 2020. Available: 10.1016/j.arabjc.2020.01.004 [Accessed 14 April 2020].

[6.5] T. Mishima, M. Taguchi, H. Sakata and E. Maruyama, "Development status of high-efficiency HIT solar cells", *Solar Energy Materials and Solar Cells*,

vol. 95, no. 1, pp. 18-21, 2011. Available: 10.1016/j.solmat.2010.04.030 [Accessed 27 September 2020].

[6.6] H. Inoue et al., "Improving the Conversion Efficiency and Decreasing the Thickness of the HIT Solar Cell", *Materials Research Society*, vol. 1210, 2010. [Accessed 27 September 2020].

[6.7] C. Hsu et al., "Nanostructured pyramidal black silicon with ultra-low reflectance and high passivation", *Arabian Journal of Chemistry*, 2020. Available: 10.1016/j.arabjc.2020.01.004 [Accessed 14 April 2020].]

[6.8] M. Taguchi, Y. Tsunomura, H. Inoue, S. Taira, T. Nakashima, T. Baba, H. Sakata and E. Maruyama, (24th EUPVSC Proc., 2009) (in press)

[6.9] D. Zhang, A. Tavakoliyaraki, Y. Wu, R. van Swaaij and M. Zeman, "Influence of ITO deposition and post annealing on HIT solar cell structures", *Energy Procedia*, vol. 8, pp. 207-213, 2011. Available: 10.1016/j.egypro.2011.06.125 [Accessed 28 September 2020].

[6.10] Ohring M. *Materials science of thin films: deposition and structure*. 2nd ed. San Diego: Academic Press; 2002.

[6.11] Kroll, M., Otto, M., Ka" sebier, T., Fu" chsel, K., Wehrspohn, R., Kley, E.-B., Pertsch, T., 2012. Black silicon for solar cell applications. *Photon. Sol. Energy Syst. IV* 8438, 843817. <https://doi.org/10.1117/12.922380>.

[6.12] Brenner, P. (2010). *Printing photovoltaics*. *Industrial + Specialty Printing*, 1(01), 26-33.

[6.13] V. Shanmugam, J. Cunnusamy, A. Khanna, M. Boreland and T. Mueller, "Optimisation of Screen-Printed Metallization for Industrial High-Efficiency Silicon Wafer Solar Cells", *Energy Procedia*, vol. 33, pp. 64-69, 2013. Available: 10.1016/j.egypro.2013.05.040 [Accessed 18 October 2020].



## APÉNDICE A

---

### A.1 Caracterización de la razón de depósito de películas *a-Si:H* intrínseca, *a-Si:H* tipo *p* y *a-Si:H* tipo *n*, variando la temperatura del sustrato de *c-Si*.

Para esta sección se realizó la caracterización en temperatura de la razón de depósito de las capas *a-Si:H* intrínseca, *a-Si:H* tipo *p* y *a-Si:H* tipo *n*, con el objetivo de ser usada en procesos futuros. Hasta el momento todos los procesos realizados en el Laboratorio de Microelectrónica para celdas solares HIT habían sido a una temperatura de  $160^{\circ}\text{C}$ . Sin embargo, se plantea aumentar la temperatura de depósito de las capas de silicio amorfo intrínseco y dopado a  $180^{\circ}\text{C}$  y  $200^{\circ}\text{C}$ . Esto se hará con el propósito de obtener películas con menos densidad de defectos, y así aumentar el *Voc*, *Isc*, *FF* y *Eff*

Las Figuras 48, 49 y 50, presentan los resultados obtenidos. La caracterización se realizó por medio del depósito de capas de silicio amorfo dopado e intrínseco a diferentes temperaturas, sobre vidrios *Corning 1737*, con el posterior estudio de la morfología de la muestra por medio de la técnica de perfilometría. Este escalón se realizó por medio de la alineadora de 2" del Laboratorio de Microelectrónica, con la ayuda de la resina negativa *AZ1512*.

La razón de depósito de las películas *a-Si:H* intrínsecas se presenta en la Figura 48; la temperatura de depósito se varió de  $160$  a  $200^{\circ}\text{C}$ . Se observa que la razón de depósito disminuye de los  $160$  a los  $180^{\circ}\text{C}$ , de  $0.24$  a  $0.04$  *nm/s*. Cuando se llega a la temperatura de  $180^{\circ}\text{C}$ , la razón de depósito comienza a aumentar hasta llegar a  $0.11$  *nm/s*, y sigue aumentando después de llegar a la temperatura de  $200^{\circ}\text{C}$ .

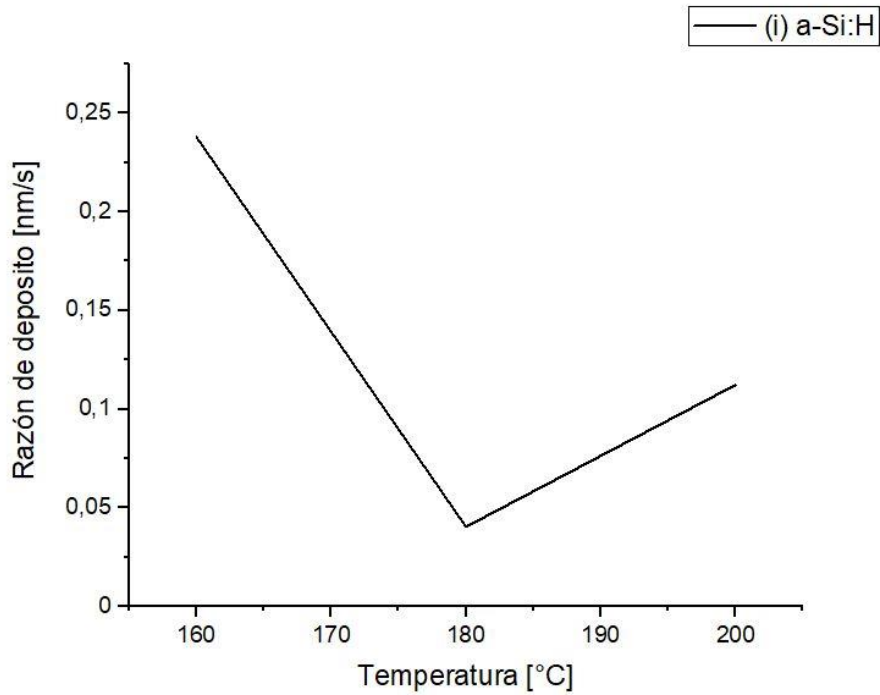


Figura 48. Razón de depósito de la película *a-Si:H* intrínseca en un rango de 160 a 200°C.

La razón de depósito de las películas *a-Si:H* tipo *n* se presentan en la Figura 49; la temperatura de depósito se varió de 160 a 200°C. Se observa que la razón de depósito aumenta de los 160 a los 180°C, desde 0.04 hasta 0.09 nm/s. Cuando se llega a la temperatura de 180°C, la razón de depósito comienza a disminuir hasta llegar a 0.03 nm/s, y sigue disminuyendo después de llegar a la temperatura de 200°C.

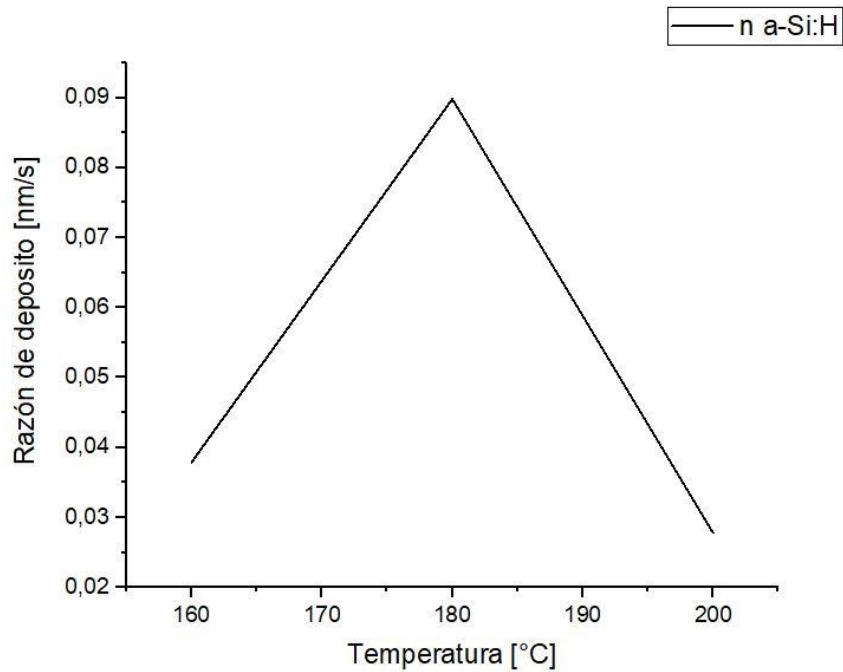


Figura 49. Razón de depósito de la película *a-Si:H* tipo *n* en un rango de 160 a 200°C.

La razón de depósito de las películas *a-Si:H* tipo *p* en el rango de temperaturas de 160 a 200°C se presenta en la Figura 50. Se observa que la razón de depósito de las películas disminuye conforme la temperatura aumenta; pasa de 0.24 nm/s en 160°C a 0.16 nm/s en 200°C.

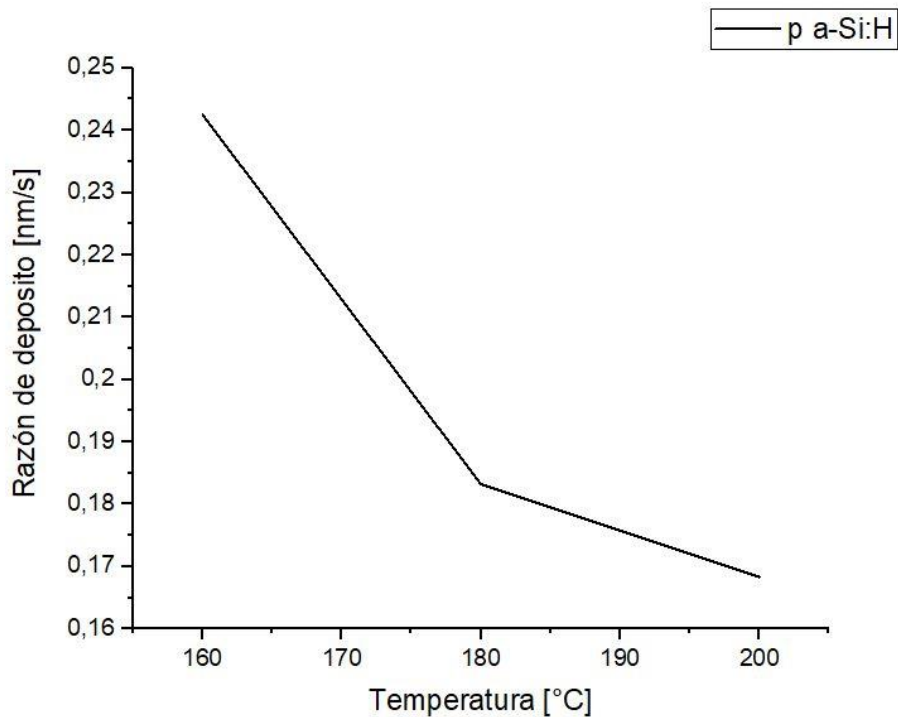


Figura 50. Razón de depósito de la película *a-Si:H* tipo *p* en un rango de 160 a 200°C.

Con los resultados obtenidos de esta caracterización se puede realizar el proceso de fabricación de las celdas HIT a temperaturas de 180 y 200°C.