



CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DE ESTUDIOS AVANZADOS  
DEL INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

UNIDAD ZACATENCO  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA  
SECCIÓN DE ELECTRÓNICA DE ESTADO SÓLIDO

“Caracterización de películas de silicio poroso como película  
antirreflejante en celdas solares obtenida por reacción química”

## **T E S I S**

Que presenta

**GIOVANNI MIGUEL ANGEL VILLEGAS TORAL**

Para obtener el grado de

**MAESTRO EN CIENCIAS  
EN LA ESPECIALIDAD DE  
INGENIERÍA ELÉCTRICA**

Director de tesis:

**Dr. Gabriel Romero Paredes Rubio**



## Dedicatoria

*A mi padre, por haberme forjado como el hombre que soy ahora, enseñarme a no conformarme y, buscar siempre ser alguien mejor.*

*A mi madre, con mucho amor, por acompañarme a lo largo de mi carrera profesional, transmitirme el esfuerzo y la tenacidad y, sobre todo, a nunca dejar de soñar.*

*A mi hermana, por estar incondicionalmente a mi lado y apoyarme siempre en cada decisión.*

*A mi novia Alejandra, por ayudarme a ser una mejor versión de mí mismo, y alentarme a concluir mis estudios.*

# Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por el apoyo económico brindado durante mis estudios.

Al Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN (Cinvestav), por la oportunidad otorgada al creer en mí.

A mi asesor, el Dr. Gabriel Romero, por su paciencia para conmigo, por transmitirme sus conocimientos y permitirme continuar sobre sus investigaciones, herramientas indispensables para la consecución de este trabajo.

A mis profesores, investigadores y trabajadores de la sección de electrónica de estado sólido, cada uno de ustedes siempre con la mejor disposición para resolver mis dudas e inquietudes.

A mis compañeros de generación, Fernanda, Vladimir y Jonathan por permitirme conocer y aprender de ustedes.

“Vivimos en un universo de posibilidades infinitas, y es solo nuestra pequeña mente la que pretende reducirlo a sus dimensiones cristalizando posibilidades a las que asciende a categoría de totalidad, eliminando así todo aquello que no conoce, que no comprende o simplemente no controla”.

-Matilde de Torres Villagrà-



## Resumen

En este trabajo se obtienen distintas películas de silicio poroso (Psi) formadas por reacción química (teñido químico) en soluciones libres de ácido fluorhídrico sobre superficies de silicio cristalino tipo n, con el fin de reducir la reflexión de la luz incidente y mejorar la absorción óptica.

Los recubrimientos se aplican en 6 celdas fotovoltaicas procesadas específicamente para este trabajo con el objetivo de evaluar sus capacidades. La evaluación se realiza mediante caracterización óptica (reflectancia especular); caracterización eléctrica, de donde se obtienen los parámetros que describen la operación de la celda ( $R_s$ ,  $R_{sh}$ ,  $I_{sc}$ ,  $V_{oc}$ ,  $P_m$ , F.F, etc.), mediante su caracterización eléctrica corriente contra voltaje; también, se caracteriza la eficiencia cuántica externa bajo condiciones estándar.

Se caracteriza la morfología de la superficie de Psi por medio de microscopía óptica y de fuerza atómica, obteniendo imágenes de los relieves en 2D y 3D.

Del estudio se desprende que el silicio poroso puede disminuir la reflexión en la superficie y aumentar significativamente la absorción de onda corta cercana al ultravioleta, reduciéndose en longitudes de onda larga cercanas al infrarrojo.

Por último, se confirma que los parámetros ópticos y eléctricos mejoran cuando se procesa el silicio poroso con soluciones que contienen oxidantes en menor proporción para conseguir una disolución controlada.

**Palabras clave:** recubrimiento antirreflejante, silicio poroso, teñido químico.

## **Abstract**

In this work, different porous silicon (Psi) films formed by chemical reaction (stain etching) in free solutions of hydrofluoric acid are obtained on n-type crystalline silicon surfaces, in order to reduce the reflection of incident light and improve optical absorption.

The coatings are applied to 6 photovoltaic cells processed specifically for this work in order to evaluate their capabilities. The evaluation is carried out by means of optical characterization (specular reflectance); electrical characterization, from where the parameters that describe the operation of the cell ( $R_s$ ,  $R_{sh}$ ,  $I_{sc}$ ,  $V_{oc}$ ,  $P_m$ , F.F, etc.) are obtained, by means of electrical characterization current vs. voltage; also, the external quantum efficiency is characterized under standard conditions.

The morphology of the Psi surface is characterized by means of optical and atomic force microscopy, obtaining images of the reliefs in 2D and 3D.

The study shows that porous silicon can decrease surface reflection and significantly increase near-ultraviolet shortwave absorption, reducing near-infrared longwavelengths.

Lastly, it is confirmed that the optical and electrical parameters improve when porous silicon is processed with solutions that contain oxidants in a lower proportion to achieve a controlled dissolution.

**Keywords: antireflective coating, porous silicon, stain etching.**



# ÍNDICE

RESUMEN .....	V
ABSTRACT.....	VI
ÍNDICE DE FIGURAS .....	IX
ÍNDICE DE TABLAS .....	XI
ABREVIATURAS .....	XII
<b>CAPÍTULO 1.....</b>	<b>1</b>
INTRODUCCIÓN.....	1
<b>1.1 DEL EFECTO FOTOVOLTAICO PARA LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA .....</b>	<b>2</b>
<b>1.2 SOBRE EL SILICIO EN CELDAS SOLARES .....</b>	<b>3</b>
<b>1.3 DE LOS RECUBRIMIENTOS ANTIRREFLEJANTES .....</b>	<b>4</b>
<b>1.4 HIPÓTESIS .....</b>	<b>5</b>
<b>1.5 MOTIVACIÓN.....</b>	<b>5</b>
<b>1.6 OBJETIVO GENERAL .....</b>	<b>5</b>
<i>1.6.1 Objetivos particulares.....</i>	<i>6</i>
<b>CAPÍTULO 2.....</b>	<b>7</b>
ANTECEDENTES .....	7
<b>CAPÍTULO 3.....</b>	<b>14</b>
MARCO TEÓRICO .....	14
<b>3.1 TEÑIDO QUÍMICO .....</b>	<b>14</b>
<b>3.2 MECANISMOS DE FORMACIÓN DEL SILICIO POROSO.....</b>	<b>15</b>
<i>3.2.1 Disolución por reacción química .....</i>	<i>17</i>
<b>3.3 ÓPTICA DEL RECUBRIMIENTO ANTIRREFLEJANTE.....</b>	<b>19</b>
<i>3.3.1 Reflexión y transmisión de ondas electromagnéticas .....</i>	<i>20</i>
<i>3.3.2 Aproximación de medio efectivo para monocapas de PSi.....</i>	<i>23</i>
<b>3.4 SOBRE LOS PARÁMETROS ELÉCTRICOS DE LA CELDA SOLAR CURVA I-V .....</b>	<b>25</b>
<b>3.5 EFICIENCIA CUÁNTICA .....</b>	<b>28</b>

3.6 RESPUESTA ESPECTRAL.....	30
<b>CAPÍTULO 4 .....</b>	<b>32</b>
DESARROLLO EXPERIMENTAL .....	32
4.1 SÍNTESIS DE LA CELDA SOLAR.....	32
4.1.2 <i>Proceso de corte, limpieza y depósito de aluminio de la muestra</i> .....	33
4.1.3 <i>Fotolitografía</i> .....	34
4.1.4 <i>Grabado de aluminio</i> .....	35
4.1.5 <i>Pasivación de los cantos</i> .....	35
4.1.6 <i>Texturización de PSi</i> .....	36
4.2 CARACTERIZACIÓN DE LAS CELDAS TERMINADAS .....	37
4.2.1 <i>Caracterización óptica: Espectroscopía UV-Vis</i> .....	37
4.2.2 <i>Caracterización eléctrica: Curvas I-V, Respuesta espectral</i> .....	38
4.2.3 <i>Caracterización morfológica: Microscopia de fuerza atómica</i> .....	39
<b>CAPÍTULO 5 .....</b>	<b>41</b>
ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....	41
5.1 ESPECTROS DE REFLECTANCIA .....	42
5.1.1 <i>Simulación de espectros de reflectancia</i> .....	44
5.2. CURVAS I-V .....	48
5.2.1 <i>Ajuste de curvas I-V</i> .....	54
5.3 EFICIENCIA CUÁNTICA EXTERNA.....	63
5.4 MICROSCOPIA DE FUERZA ATÓMICA .....	68
<b>CAPÍTULO 6 .....</b>	<b>71</b>
CONCLUSIÓN .....	71
TRABAJOS FUTUROS .....	72
<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>73</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>78</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>79</b>

## Índice de figuras

<i>Figura. 1. Global electricity generation mix, 2010-2020. ....</i>	<i>2</i>
<i>Figura. 2. Espectro de reflectancia de películas porosas en sustratos monocristalinos. ....</i>	<i>9</i>
<i>Figura. 3. Reflectancia integrada y curva corriente voltaje. ....</i>	<i>9</i>
<i>Figura. 4. Espectro de reflectancia por teñido químico. ....</i>	<i>10</i>
<i>Figura. 5. Espectro de reflectancia para distintos tiempos 5, 10, 20 y 40 segundos ....</i>	<i>11</i>
<i>Figura. 6. Espectro de reflectancia y características corriente voltaje. ....</i>	<i>12</i>
<i>Figura. 7. Mediciones de reflectancia y eficiencia cuántica interna. ....</i>	<i>13</i>
<i>Figura. 8. Componentes paralela y perpendicular del campo eléctrico. ....</i>	<i>21</i>
<i>Figura. 9. Circuito equivalente de una celda solar. ....</i>	<i>26</i>
<i>Figura. 10. Curva I-V celda solar. ....</i>	<i>27</i>
<i>Figura. 11. La eficiencia cuántica de una celda solar de silicio. ....</i>	<i>29</i>
<i>Figura. 12. Espectro electromagnético. ....</i>	<i>30</i>
<i>Figura. 13. Izquierda: Oblea de silicio tipo p. Derecha: Unidades cuadradas de 15 x 15 mm de silicio tipo p con contacto trasero de aluminio y plata. ....</i>	<i>33</i>
<i>Figura. 14.. Izquierda: Alineadora de mascarilla para fotolitografía marca Electroglass. Derecha: celdas foto enmascaradas. ....</i>	<i>34</i>
<i>Figura. 15. Celdas solares terminadas sin recubrimiento antirreflejante. ....</i>	<i>35</i>
<i>Figura. 16. Celda solar de silicio cristalino a) sin recubrimiento, b) con ARC de Psi. ....</i>	<i>36</i>
<i>Figura. 17. Espectrofotómetro JASCO V-670. ....</i>	<i>38</i>
<i>Figura. 18. Simulador solar y trazador de curvas marca Keithley Instruments. ....</i>	<i>39</i>
<i>Figura. 19. Microscopio automático de fuerza atómica. Vista frontal. ....</i>	<i>40</i>
<i>Figura. 20. Reflectancia especular antes y después del ataque con la solución 3. ....</i>	<i>42</i>
<i>Figura. 21. Reflectancia especular antes y después del ataque con la solución 1. ....</i>	<i>43</i>
<i>Figura. 22. Reflectancia especular antes y después del ataque con la solución 2. ....</i>	<i>44</i>
<i>Figura. 23. Simulación reflectancia de la muestra antes del ataque químico con sol. 3. ....</i>	<i>45</i>
<i>Figura. 24. Simulación reflectancia de la muestra después del ataque químico con sol. 3. ....</i>	<i>46</i>
<i>Figura. 25. Simulación reflectancia de la muestra antes del ataque químico con sol. 1. ....</i>	<i>46</i>
<i>Figura. 26. Simulación reflectancia de la muestra después del ataque químico con sol. 1. ....</i>	<i>47</i>
<i>Figura. 27. Simulación reflectancia de la muestra antes del ataque químico con sol. 2. ....</i>	<i>47</i>
<i>Figura. 28. Simulación reflectancia de la muestra después del ataque químico con sol. 2. ....</i>	<i>48</i>
<i>Figura. 29. Curva I-V antes y después del ataque químico muestra CS-G01PASI36 sol. 2. ....</i>	<i>49</i>
<i>Figura. 30. Curva I-V antes y después del ataque químico muestra CS-G11PASI36 sol. 3. ....</i>	<i>50</i>
<i>Figura. 31. Curva I-V antes y después del ataque químico muestra CS-G75PASI36 sol. 2. ....</i>	<i>51</i>
<i>Figura. 32. Curva IV antes y después del ataque químico muestra CS-G77PASI36 sol. 3. ....</i>	<i>51</i>
<i>Figura. 33. Curva IV antes y después del ataque químico muestra CS-G18PASI36 sol. 1. ....</i>	<i>52</i>
<i>Figura. 34. Curva IV antes y después del ataque químico muestra CS-G19PASI36 sol.1. ....</i>	<i>53</i>
<i>Figura. 35. Curva I-V medida y ajuste de curva antes del ataque químico muestra CS-G01PASI36. ....</i>	<i>54</i>
<i>Figura. 36. Curva I-V medida y ajuste de curva después del ataque químico muestra CS-G01PASI36. ....</i>	<i>55</i>
<i>Figura. 37. Curva I-V medida y ajuste de curvaa antes del ataque químico muestra CS-G11PASI36. ....</i>	<i>55</i>
<i>Figura. 38. Curva I-V medida y ajuste de curva después del ataque químico muestra CS-G11PASI36. ....</i>	<i>56</i>
<i>Figura. 39. Curva I-V medida y ajuste de curva antes del ataque químico muestra CS-G18PASI36. ....</i>	<i>57</i>
<i>Figura. 40. Curva I-V medida y ajuste de curva después del ataque químico muestra CS-G18PASI36. ....</i>	<i>57</i>
<i>Figura. 41. Curva I-V medida y ajuste de curva antes del ataque químico muestra CS-G19PASI36. ....</i>	<i>58</i>
<i>Figura. 42. Curva I-V medida y ajuste de curva después del ataque químico muestra CS-G19PASI36. ....</i>	<i>59</i>
<i>Figura. 43. Curva I-V medida y ajuste de curva antes del ataque químico muestra CS-G75PASI36. ....</i>	<i>59</i>

<i>Figura. 44. Curva I-V medida y simulada después del ataque químico muestra CS-G75PASI36. ....</i>	<i>60</i>
<i>Figura. 45. Curva I-V medida y simulada antes del ataque químico muestra CS-G77PASI36.....</i>	<i>61</i>
<i>Figura. 46. Curva I-V medida y simulada después del ataque químico muestra CS-G77PASI36. ....</i>	<i>61</i>
<i>Figura. 47. Factor de forma vs. factor de idealidad.....</i>	<i>62</i>
<i>Figura. 48. Corriente de cortocircuito vs. voltaje de circuito abierto.....</i>	<i>63</i>
<i>Figura. 49. QE muestra CS-G01PASI36 sol. 2. ....</i>	<i>64</i>
<i>Figura. 50. QE muestra CS-G011PASI36 sol. 3. ....</i>	<i>65</i>
<i>Figura. 51. QE muestra CS-G75PASI36 sol. 2. ....</i>	<i>65</i>
<i>Figura. 52. QE muestra CS-G77PASI36 sol. 3. ....</i>	<i>66</i>
<i>Figura. 53. QE muestra CS-G18PASI36 sol. 1. ....</i>	<i>67</i>
<i>Figura. 54. QE muestra CS-G19PASI36 sol. 1. ....</i>	<i>67</i>
<i>Figura. 55. Micrografía vista en planta. Izq. Superficie de silicio sin recubrimiento. Der. Superficie de silicio con recubrimiento PSi. ....</i>	<i>68</i>
<i>Figura. 56. Micrografía AFM 3D. Izq: 10 micras, Der: 30 micras. ....</i>	<i>69</i>
<i>Figura. 57. Micrografía AFM 3D. Izq: 10 micras, Der: 30 micras. ....</i>	<i>69</i>
<i>Figura. 58. Micrografía 3D relieve de la muestra después del ataque químico. Izq: 20 micras, Der: 10 micras. ....</i>	<i>70</i>

## Índice de Tablas

<i>Tabla 1. Soluciones utilizadas para el teñido químico.....</i>	<i>37</i>
<i>Tabla 2. Valores de los índices de refracción y espesor para las reflectancias simuladas de las muestras.....</i>	<i>45</i>
<i>Tabla 3. Datos de simulación <math>I_{sc}</math>, <math>V_{oc}</math>, <math>P_m</math>, <math>FF</math>, <math>R_{sh}</math>, <math>R_s</math>, <math>n</math>, <math>l_0</math> de las muestras seleccionadas antes del ataque químico, bajo simulación solar de <math>550 \text{ W/m}^2</math>. .....</i>	<i>79</i>
<i>Tabla 4. Datos de simulación <math>I_{sc}</math>, <math>V_{oc}</math>, <math>P_m</math>, <math>FF</math>, <math>R_{sh}</math>, <math>R_s</math>, <math>n</math>, <math>l_0</math> de las muestras seleccionadas después del ataque químico, bajo simulación solar de <math>550 \text{ W/m}^2</math>.....</i>	<i>81</i>
<i>Tabla 5. Datos <math>I_{sc}</math>, <math>V_{oc}</math>, <math>P_m</math>, <math>FF</math>, <math>R_{sh}</math>, <math>R_s</math>, <math>n</math>, <math>l_0</math> de las muestras seleccionadas antes del ataque químico, medidas bajo <math>1000 \text{ W/m}^2</math>. .....</i>	<i>81</i>
<i>Tabla 6. Datos <math>I_{sc}</math>, <math>V_{oc}</math>, <math>P_m</math>, <math>FF</math>, <math>R_{sh}</math>, <math>R_s</math>, <math>n</math>, <math>l_0</math> de las muestras seleccionadas después del ataque químico, medidas bajo <math>1000 \text{ W/m}^2</math>.....</i>	<i>81</i>

## Abreviaturas

<b>ARC</b>	<i>recubrimiento antirreflejante (antireflective coating)</i>
<b>PSi</b>	<i>silicio poroso (Porous silicon)</i>
<b>c-Si</b>	<i>silicio cristalino</i>
<b>p-Si</b>	<i>silicio tipo p</i>
<b>EQE</b>	<i>eficiencia cuántica externa (external quantum efficiency)</i>
<b>IQE</b>	<i>eficiencia cuántica interna (internal quantum efficiency)</i>
<b>SR</b>	<i>respuesta espectral (spectral response)</i>
<b>Isc</b>	<i>corriente de corto circuito (short circuit current)</i>
<b>Voc</b>	<i>voltaje de circuito abierto (open circuit voltage)</i>
<b>Rsh</b>	<i>resistencia paralelo (shunt resistance)</i>
<b>Rs</b>	<i>resistencia serie (serial resistance)</i>
<b>n</b>	<i>factor de idealidad</i>
<b>FF</b>	<i>factor de forma o factor de llenado (fill factor)</i>
<b>Pmax</b>	<i>potencia máxima</i>
<b>Vm</b>	<i>voltaje máximo</i>
<b>Im</b>	<i>corriente máxima</i>
<b>Io</b>	<i>corriente de saturación</i>
<b>IR</b>	<i>infrarrojo</i>
<b>Vis</b>	<i>visible</i>
<b>UV</b>	<i>ultravioleta</i>
<b>Pph</b>	<i>irradiancia incidente</i>
<b><math>\eta</math></b>	<i>eficiencia</i>
<b>HNO<sub>3</sub></b>	<i>ácido nítrico</i>
<b>NH<sub>4</sub>F</b>	<i>fluoruro de amonio</i>
<b>H<sub>2</sub>O<sub>2</sub></b>	<i>peróxido de hidrógeno</i>
<b>CH<sub>3</sub>COOH</b>	<i>ácido acético</i>
<b>H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub></b>	<i>ácido fosfórico</i>

**CH<sub>3</sub>OH** *metanol*

**KOH** *hidróxido de potasio*

**N<sub>2</sub>** *nitrógeno*

**E<sub>g</sub>** *banda prohibida (bandgap)*

**h<sup>+</sup>** *hueco*

**e<sup>-</sup>** *electrón*

**AFM** *espectroscopía de fuerza atómica*





# Capítulo 1

## Introducción

La energía está presente en nuestro entorno natural y en diversas formas como: el viento, la radiación solar, el movimiento de las aguas de los ríos o del mar, etc.

Por su parte, la energía eléctrica implica la transformación de otro tipo de energía primaria. Como ejemplo, podemos visualizar la quema de combustibles fósiles, donde al iniciarse el proceso químico de combustión, el carbono e hidrógeno presentes reaccionan con el oxígeno y, dan lugar a un proceso termodinámico que genera calor, el cual, es aprovechado para producir electricidad [1].

Las fuentes convencionales de energía generan bastante contaminación y devastación del medio; por lo que al pasar de los años se han buscado otras fuentes alternativas de generación de electricidad que sean sustentables.

Dentro de las fuentes alternativas de energía, podemos encontrar procesos geotérmicos, heliotérmicos, etc; sin embargo, también existen técnicas de generación como: la fotovoltaica; la cual facilita enormemente la operación debido a la escasa necesidad de mantenimiento.

Dentro de las tecnologías solares, la tecnología fotovoltaica es la que más se ha desarrollado. Esto ha traído consigo mayor abaratamiento en los costos de fabricación de los componentes de las celdas solares [2], lo que la ha vuelto cada vez más rentable, por ejemplo, frente a la energía nuclear o el

gas natural como se puede ver en informes de la Agencia Internacional de Energía sobre las emisiones de CO<sub>2</sub> a lo largo de la última década [3].

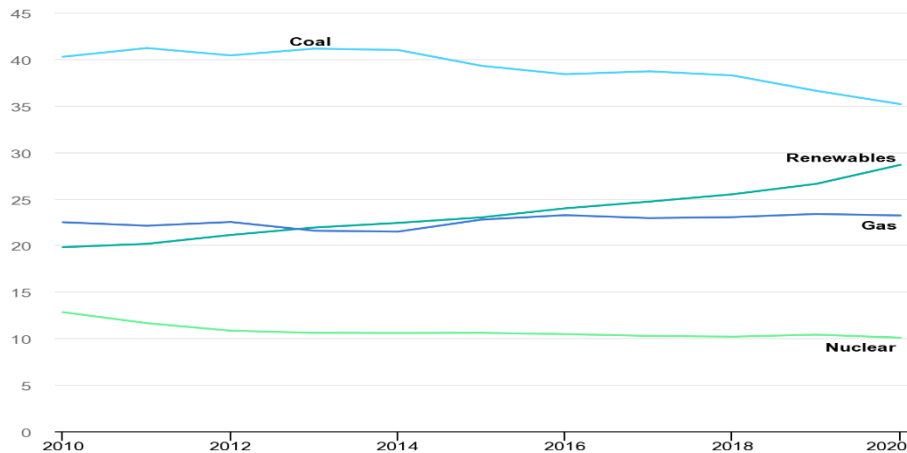


Figura. 1. Global electricity generation mix, 2010-2020.  
Fuente ver [3].

En la gráfica de la figura 1 se puede observar el incremento de la participación de las energías renovables a lo largo de la última década frente a fuentes tradicionales de generación de energía con excepción del carbón debido a su abundancia en la tierra, la potencia de salida que brinda al generarla y la demanda global de electricidad, y también al costo de reacondicionamiento de la redes eléctricas que implica la transición al uso de energías renovables. Sin embargo, al ser una fuente no renovable de energía y la contaminación generada por su uso, todo parece apuntar a que en los próximos años observaremos un cambio sustancial al uso de energías limpias.

### 1.1 Del efecto fotovoltaico para la producción de energía

El silicio, como ejemplo de material semiconductor, tiene la propiedad de que, al recibir radiación solar, los fotones incidentes hacen que los electrones de la banda de valencia venzan la energía que los mantiene en los enlaces

entre átomos, así, el electrón se libera del átomo, trasladándose por el material.

Resulta necesario que la energía de los fotones sea suficiente para superar la banda de energía prohibida del material. Al romper el enlace, los fotones forman pares electrón-hueco y, debido al campo eléctrico generado por la unión de materiales p-n se separan antes de su recombinación. La iteración del proceso genera una corriente eléctrica, la cual puede ser extraída de la celda solar.

Algunos factores conducen a que los fotones no sean aprovechados, ya sea que tengan energía inferior al ancho de banda prohibida del material semiconductor y traspasen el semiconductor sin ceder su energía para crear portadores. También puede ocurrir que, teniendo energía mayor al ancho de banda, esta puede no ser aprovechada completamente, perdiéndose en forma de calor [4]. Y, por último, se tienen las pérdidas por reflexión de la luz incidente.

## **1.2 Sobre el silicio en celdas solares**

El silicio es el segundo elemento más abundante en la naturaleza solo detrás del oxígeno. No se encuentra presente en estado nativo en el medio ambiente; sin embargo, es común encontrarlo en arena y rocas.

Muchos semiconductores exhiben propiedades diferentes bajo excitación electromagnética. El silicio, por ejemplo, en su forma cristalina y observado con luz visible presenta un brillo metálico [5]. Bajo radiación infrarroja, el silicio se vuelve transparente. A menor longitud de onda la muestra se vuelve opaca.

El silicio cristalino también llamado de primera generación (denominado así por las celdas basadas en este material) es usualmente el material más usado para aplicaciones fotovoltaicas, aunque las celdas de película delgada como:

CdTe, a-Si:H, CIGS (denominadas de segunda generación), entre otras, han cobrado gran relevancia por su menor costo y considerable eficiencia.

El silicio puede ser monocristalino (red cristalina continua sin frontera de grano), multicristalino (red cristalina discontinua o con frontera de grano) o amorfo (red aleatoria continua). El silicio cristalino que es el que nos ocupa en este trabajo, se obtiene a través de un proceso complejo que elimina las impurezas y permite obtener lingotes, a partir del cual se cortan las obleas.

Algunas ventajas que se conocen del silicio monocristalino son: su notable capacidad para absorber un amplio rango de la radiación electromagnética y su alta pureza.

### **1.3 De los recubrimientos antirreflejantes**

Aumentar la eficiencia de conversión de una celda solar fotovoltaica implica, de entre varios factores, reducir al mínimo las pérdidas por reflexión. De esta manera se puede esperar que la cantidad de energía incidente en forma de fotones sea absorbida por el semiconductor y convertida posteriormente en electrones que pueden ser aprovechados para producir energía eléctrica. Los recubrimientos antirreflejantes pueden ayudar a reducir la reflexión.

Los recubrimientos antirreflejantes como se menciona en [6] ... “Se componen de una capa delgada de material dieléctrico, con un espesor elegido especialmente de modo que los efectos de interferencia en el recubrimiento causan que la onda reflejada en la superficie superior de revestimiento antirreflejante esté fuera de fase con la onda reflejada por las superficies del semiconductor. Estas ondas reflejadas fuera de fase interfieren destructivamente entre sí, dando como resultado cero energía reflejada neta” ... Como la interferencia depende de la longitud de onda, resulta complicado conseguir interferencia destructiva en todo el espectro electromagnético.

Diversas clases de películas delgadas, y de entre ellas, las películas porosas, han despertado el interés debido a sus características ópticas.

Se ha investigado ya bastante sobre la formación del recubrimiento antirreflejante (ARC) de silicio poroso (PSi) en celdas solares de silicio cristalino para implementarse al final del proceso de fabricación; sin embargo, hasta hoy en día, los ARC basados en silicio poroso no se aplican en la manufactura de dispositivos optoelectrónicos en masa, debido a la rápida oxidación del PSi que degrada los contactos tanto anterior como posterior.

#### **1.4 Hipótesis**

La eficiencia de conversión de la celda solar aumentará por la texturización (porosificación) de la superficie de silicio cristalino al teñirla químicamente en soluciones libres de ácido fluorhídrico, evitando pérdidas por reflexión.

#### **1.5 Motivación**

La búsqueda de nuevos procesos que ayuden a mejorar la fabricación de tecnologías fotovoltaicas enfoca este trabajo en el estudio de celdas solares fabricadas con silicio poroso sobre silicio cristalino como capa antirreflejante, con enfoque en la aplicación de la técnica grabado por teñido químico utilizando electrolitos a base de  $\text{NH}_4\text{F}$  (fluoruro de amonio).

#### **1.6 Objetivo general**

Estudiar el potencial que ofrece el silicio poroso como película antirreflejante en celdas solares de silicio cristalino.

### 1.6.1 Objetivos particulares

- Estudiar la formación de silicio poroso en soluciones libres de ácido fluorhídrico, por ejemplo: fluoruro de amonio ( $\text{NH}_4\text{F}$ ) y peróxido de hidrogeno ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ).
- Caracterizar eléctricamente las celdas terminadas con películas de silicio poroso como película antirreflejante, obteniendo los valores de eficiencia ( $\eta$ ), corriente de corto circuito ( $I_{sc}$ ), voltaje de circuito abierto ( $V_{oc}$ ) y el factor de llenado (F.F).

## Capítulo 2

### Antecedentes

El silicio poroso, fue descubierto accidentalmente por Ulhir [7] hacia 1956 en los laboratorios Bell, esto cuando trabajaba en el maquinado de silicio y germanio para su aplicación en circuitos microelectrónicos. El experimento se realizó bajo ciertas condiciones que propiciaron que las obleas de silicio sufrieran ataque en una dirección particular y sin desbastar toda la superficie. El informe que se redactó al respecto se archivó, y no fue hasta que en la década de los 90, fue retomado por Canham [8], cuando se percató de que el material presentaba fotoluminiscencia en el espectro visible, lo que despertó el interés en él por sus posibles aplicaciones ópticas.

El silicio poroso, es un material que se puede obtener por diversas técnicas, entre ellas, el grabado electroquímico, deposición por plasma, implantación iónica, teñido químico, etc., sobre silicio monocristalino usando un electrolito (normalmente ácido fluorhídrico en combinación con otro agente) y diversas condiciones de preparación dependiendo de la técnica que se utilice [9].

En general, entre las particularidades que se pueden notar de este material, es que tiende a ser nanoestructurado con poros que dependen, como se mencionó anteriormente, de las condiciones de preparación, ya sean: la concentración del electrolito, factores como iluminación, tiempos de grabado, etc.

Las estructuras resultantes pueden tener poros que van desde algunos nanómetros hasta algunas micras. Así pues, una de las ventajas fundamentales de trabajar con silicio poroso es la posibilidad de obtener mediante un proceso

asequible y de control morfológico viable, distribuciones con índice de refracción en el rango de 1.1-3.5 [10].

En este trabajo, el principal interés radica en la posibilidad de utilizar este material como película antirreflejante en celdas solares de silicio cristalino y de esta manera aumentar la eficiencia de conversión, evitando la mayor cantidad de pérdidas por reflexión.

A continuación, se describen algunos de los trabajos más representativos para películas con un grado de porosidad sintetizadas por diversas técnicas y para distintas clases de superficie de silicio.

En principio, uno de los primeros trabajos sobre el procesamiento de recubrimientos antirreflejantes de silicio poroso lo proporcionan L. Schirone y colaboradores [11]. Ellos informaron sobre la formación de silicio poroso sobre sustratos de silicio monocristalino y multicristalino mediante la técnica de teñido químico en soluciones acuosas de  $\text{H}_2\text{O}$  /HF / $\text{HNO}_3$ .

Demostraron que las películas porosas de silicio monocristalino pueden reducir la reflectancia de la superficie a menos del 3% en un rango de longitud de onda superior a 400–800 nm controlando la composición de la solución y la razón de crecimiento. Además, mencionan que muchas de las propiedades dependen del perfil de dopaje del sustrato, y para la reflectancia, influye el espesor del recubrimiento como se observa en la figura 2.



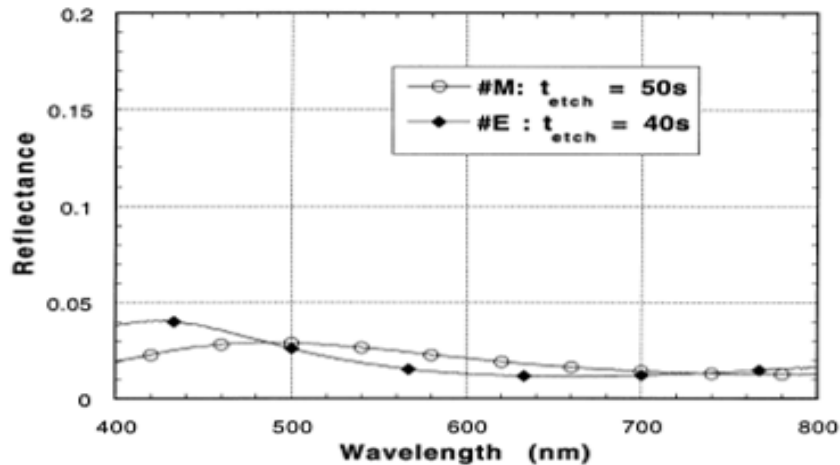


Figura. 2. Espectro de reflectancia de películas porosas en sustratos monocristalinos. Reflectancia integrada menor al 3% en el rango de 400-800 nm. Fuente: ver [11].

Dimova-Malinovska [12], presentó un informe acerca de la porosificación de superficies de silicio cristalino, la cual realizó también por la técnica de teñido químico.

En el experimento atacó la superficie entre los dedos de la red de contacto de aluminio, empleando silicio cristalino tipo p. La solución que empleó para teñir consistió en ácido fluorhídrico, ácido nítrico y agua.

Finalmente, encontró que se mejora de entre un 30 a 40 por ciento la corriente de cortocircuito de la celda debido al decremento en la reflectividad. También encuentra un incremento en un 30 por ciento máximo de la eficiencia de la celda con este recubrimiento.

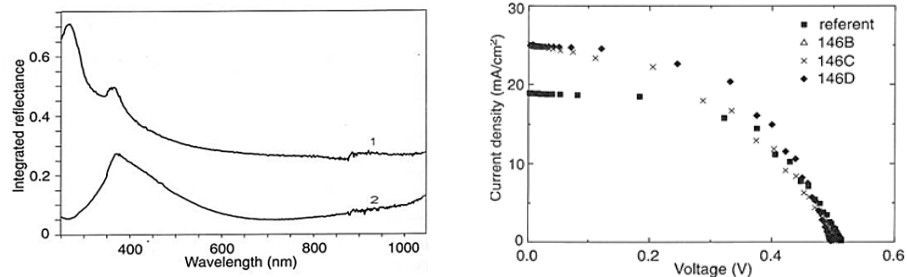


Figura. 3. Reflectancia integrada y curva corriente voltaje. Izquierda: reflectancia integrada de 1200 Å de espesor de silicio poroso por teñido químico (curva 2) y c-Si (curva 1). Derecha: curva corriente voltaje de c-Si (cuadros) vs Psi (rombos, equis y triángulos). Fuente: ver [12].

Como se menciona anteriormente, se pueden obtener recubrimientos antirreflejantes de silicio poroso mediante teñido químico haciendo uso de soluciones de HF/HNO<sub>3</sub> para diferentes tiempos de grabado [13]. Para tiempos de grabado cortos, las superficies porosas pueden alcanzar valores de reflectancia por debajo del 4 % como se muestra en la figura 4.

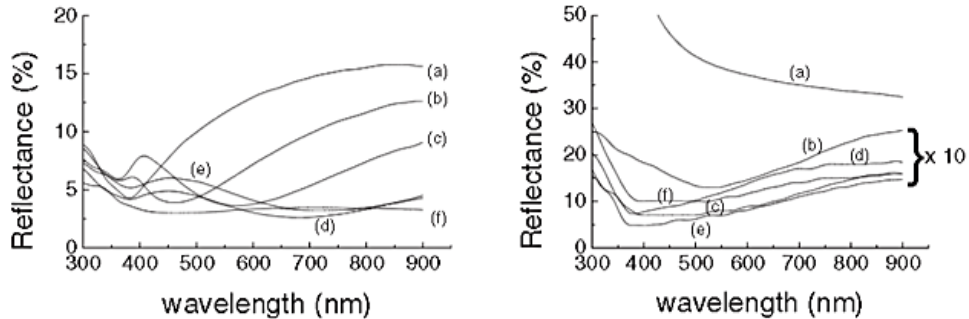


Figura. 4. Espectro de reflectancia por teñido químico.

Izquierda: Espectro de reflectancia de silicio poroso por teñido químico concentración del 0.7% HNO<sub>3</sub>: a) 1 seg, b)3 seg, c) 5 seg, d) 7 seg, e) 9 seg, f) 45 seg. Derecha: Espectro de reflectancia a) c-Si y muestras de PSI grabadas por teñido químico en 0.7% de HNO<sub>3</sub>: b) 2 min, c)4 min, d) 6 min, e) 8min, y f) 10 min. Fuente: ver [13].

Otra alternativa para formar una capa de silicio poroso como revestimiento antirreflejante en la parte superior de las celdas solares de silicio cristalino es la que reportan K. Tsujino y compañía [14], mediante el empleo de una solución mixta de peróxido de hidrogeno (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) y ácido fluorhídrico (HF) utilizando electrodos frontales de plata (Ag) serigrafados como catalizadores. Por efecto catalítico inducen la formación de las capas de silicio poroso. De esta manera se pueden obtener celdas solares de silicio multicristalino cubiertas con una capa de silicio poroso. Sin embargo, este tipo de recubrimiento presenta reflectancia superficial inferior al 15 % en una región de longitud de onda de 400 a 800 nm, ver figura 5.

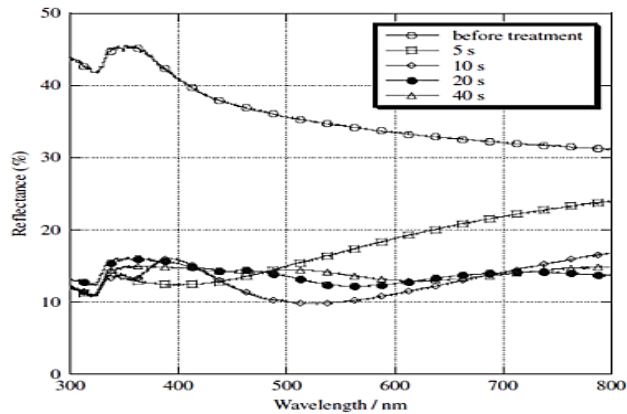


Figura 5. Espectro de reflectancia para distintos tiempos 5, 10, 20 y 40 segundos  
Fuente: ver [14].

En el informe de Ramizy y colaboradores [15], se reporta una celda solar basada en silicio poroso (PSi) sintetizada por grabado electroquímico. Nuevamente se investiga el efecto de la capa de porosidad en el rendimiento de la celda.

Las mediciones de corriente-voltaje las tomaron bajo condiciones de iluminación a  $80 \text{ mW/cm}^2$

Encontraron que el diámetro de los poros y la microestructura dependen de 4 factores principales para este tipo de grabado: la concentración de etanol, el tiempo de ataque, la temperatura y la densidad de corriente.

En cuanto a sus resultados, encontraron un aumento del 6% en el factor de forma. La eficiencia de conversión fotovoltaica aumento en más de tres veces la del volumen de silicio y la reflectancia se redujo cerca de la mitad como se observa en la figura 6.

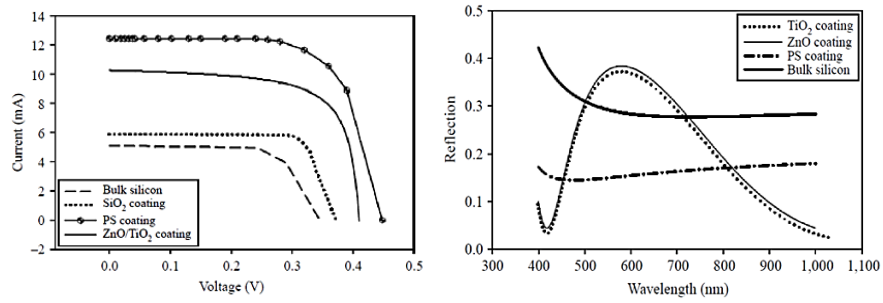


Figura. 6. Espectro de reflectancia y características corriente voltaje.  
 Derecha: Espectro de reflectancia de volumen de Si, y con recubrimientos de SiO<sub>2</sub>, ZnO/TiO<sub>2</sub> and PS.  
 Izquierda: Características corriente-voltaje del volumen de Si, y con recubrimientos de SiO<sub>2</sub>, ZnO/TiO<sub>2</sub> and PS. Fuente: ver [15].

Se han procesado también celdas de silicio por teñido químico en soluciones de HF-FeCl<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O como último paso en la secuencia de procesamiento [16]. El grabado se realiza sin proteger los contactos serigrafados.

La reflectancia ponderada (R<sub>w</sub>) obtenida de esta manera reduce del 38.23 % al 11.54 % entre los 400 y 1100 nm, no sin antes optimizar la solución y el uso de tiempos de grabado muy cortos. Ver figura 7.

Es importante mencionar que, en este trabajo, los ensayos los realizan sobre dos celdas de diferente tamaño, para relacionar la influencia del área de incidencia con la eficiencia. Para la celda de 20 cm<sup>2</sup>, la capa antirreflejante de PSi genera una mejora relativa del 62.74 % en la densidad de corriente de cortocircuito, el factor de forma aumenta en un 5.5 % absoluto, el voltaje de circuito abierto aumenta en 1.2 mV y la eficiencia de conversión aumenta del 5.4 % al 9.5 %.

Para la mejor celda de área grande (aprox.78 cm<sup>2</sup>) la mejora resulta en un 45.43% de la densidad de corriente de cortocircuito, una mejora en el FF del 7.4% absoluto, un aumento en el circuito abierto voltaje en 7.5 mV, y una mejora en la eficiencia de la celda en un 4.0% absoluto.

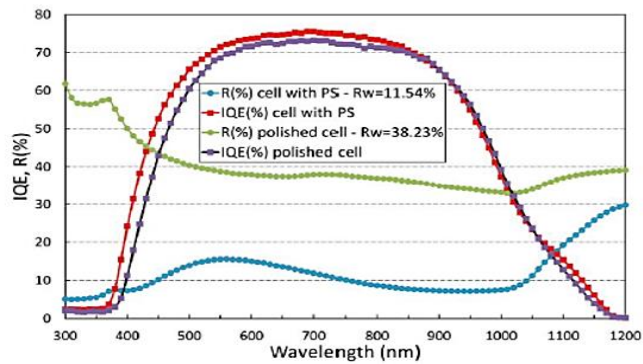


Figura. 7. Mediciones de reflectancia y eficiencia cuántica interna. Antes y después de la formación de la capa de PS en HF-FeCl<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O. Fuente: ver [16].

Con la información presentada anteriormente, es posible notar que la formación del recubrimiento antirreflejante de PSi implica una técnica de síntesis muy compleja. Para realizarla con éxito, es necesario conocer todos los procesos que tienen lugar en la superficie de silicio. En este trabajo de tesis se realiza un análisis de los parámetros ópticos para su posterior comparación y correlación con las propiedades morfológicas de la película antirreflejante. También se parametriza eléctricamente la celda antes y después del ataque químico.

## Capítulo 3

### Marco teórico

En este capítulo se describen brevemente los fundamentos teóricos en los que se sustenta este trabajo de tesis. Dado que la técnica de teñido químico es la empleada en este trabajo para la síntesis de las películas porosas, se inicia con esta definición. Posteriormente se abordan los mecanismos de formación de películas porosas. Después, se presenta el uso de las películas porosas como filtro óptico, particularmente como recubrimiento antirreflejante. Seguido de la obtención de los parámetros eléctricos de las celdas mediante caracterización.

#### 3.1 Teñido químico

El teñido químico de silicio es una técnica de síntesis de películas porosas en la que se tiene una solución de fluoruro y mediante la inyección de huecos por la adición de un oxidante, se inicia la formación de silicio poroso (PSi) [17,18]. Se le dice teñido porque para diferentes tiempos de grabado se pueden producir películas homogéneas de diferentes espesores, y por lo tanto de diferentes colores causados por la interferencia en la delgada capa de silicio poroso.

Debido a que algunos de los oxidantes más efectivos contienen un ion metálico, a veces también se ha denominado grabado metal-asistido; sin embargo, el término no es correctamente aplicado, ya que puede ser confundido con un proceso de grabado catalítico similar, que con una nanopartícula de metal que actúa para catalizar la inyección de un oxidante (inyección de huecos en la banda de valencia) que no lleva precisamente a la formación de silicio poroso.

El teñido químico hoy en día, es una técnica de formación de recubrimientos antirreflejantes sobre superficies mono y policristalinas. Esta técnica de formación de poros sobre la estructura es distinta a la que sufre la superficie por medio de la técnica de grabado electroquímico, ya que, una vez atacada la parte superior de la superficie, esta continúa grabándose durante la formación. El gradiente de porosidad se desarrolla en las capas porosas, ya que la técnica al ser de grabado químico húmedo ataca las paredes de los poros [19].

El proceso es algo complejo e implica que la capa porosa tendrá un espesor limitado que depende del tipo de dopaje y la concentración del sustrato.

Este método se basa únicamente en reacciones químicas y no es necesario aplicar corriente eléctrica alguna. Donde la velocidad de crecimiento de la capa de silicio poroso es proporcional a la concentración del agente oxidante que se emplea e independiente de la resistividad del sustrato. El teñido químico es espontáneo, pero lo que lo diferencia del grabado químico es que la transferencia de carga libre está involucrada en el teñido químico.

### **3.2 Mecanismos de formación del silicio poroso**

El teñido químico involucra un proceso complejo de transferencia de carga. Kolasinski describe de manera detallada la química del proceso como sigue:

... en principio, el grabado espontáneo sin electricidad es posible siempre que el nivel aceptor en el oxidante resida en una energía en o por debajo de la energía de Fermi  $E_F$  del silicio. La energía de Fermi depende de la densidad de dopaje y la temperatura, pero generalmente es unas décimas de eV por debajo del mínimo de la banda de conducción, cerca de 0 V en referencia al electrodo de hidrógeno estándar (SHE por sus siglas en inglés). Sin embargo, debido a la baja densidad de estado cerca de  $E_F$  y la necesidad de superar la energía de activación para la transferencia de electrones, la transferencia de carga sólo se produce a un ritmo apreciable si el oxidante tiene un potencial electroquímico positivo suficiente (aproximadamente

+0.7 V vs SHE<sup>1</sup>) tal que su nivel aceptor está cerca o por debajo de la energía del máximo de la banda de valencia [20,21].

En general, llevar a cabo un grabado bajo esta técnica, implica considerar ciertas variables de control morfológico como explica Kolasinski:

En primera instancia, es necesario comprender que el teñido extrae los electrones de valencia por la acción de un agente oxidante en fase de solución. El oxidante inyecta huecos en la banda de valencia y se reduce en el proceso. El oxidante más utilizado es el HNO<sub>3</sub> ya sea para grabar silicio uniformemente o en nuestro caso específico para la formación de silicio poroso. El oxidante debe poder inyectar huecos en la banda de valencia del silicio a una razón apreciable; el oxidante transfiere carga a un ritmo apreciable si tiene un potencial electroquímico positivo suficiente. (0.7 vs SHE), lo cual ocurre si su nivel aceptor es cercano o cae por abajo del máximo de energía de la banda de valencia. el mínimo de energía de la banda de conducción esta cercano a 0 V con respecto al electrodo de hidrogeno standard.

Para formar los poros en la superficie, es necesario controlar la velocidad de la reacción, es ahí donde la solución de fluoruro interviene para evitar el grabado catalizado. La solución debe ser lo suficientemente ácida para evitar la catálisis por OH y debe estar en concentración alta en comparación con el agente oxidante para evitar la formación de óxido, pues este afectaría el proceso causando electropulido.

El flúor en un teñido químico suele ser suministrado por ácido fluorhídrico, aunque también se han hecho informes de soluciones con ácidos fuertes que contienen flúor como HBF<sub>4</sub> y HSbF<sub>6</sub> [22].

Otros aspectos por tomar en cuenta para una solución óptima son, según Kolasinski [21,23,]:

- El oxidante debe ser soluble para incidir en la superficie para interactuar

---

<sup>1</sup> SHE (electrodo de hidrógeno estándar por sus siglas en inglés) es una medida de la energía por unidad de carga que está disponible a partir de las reacciones de oxidación/reducción para impulsar la reacción.



con la superficie e inyectar huecos. El oxidante, así como todos los productos resultantes de la reacción deben ser solubles para evitar ser depositados en la superficie. Los productos del grabado, así como las especies que se forman en el proceso dependen de la temperatura.

- Durante el ataque, la velocidad del teñido aumenta con los defectos en la superficie.
- La homogeneidad de la película mejora cuando la semirreacción de oxidación no genera gas. El etanol se usa comúnmente para reducir la formación de burbujas y mejorar la adherencia del sustrato, aunque su efectividad es limitada.
- Añadir tensoactivos (como ácido acético) permite sintetizar películas más delgadas.
- Por último, la reacción del ataque desde la inyección del hueco hasta la eliminación del átomo de silicio (incluyendo las reacciones de cualquier subproducto) debe ser anisótropa para permitir la nucleación y propagación del poro.

### **3.2.1 Disolución por reacción química**

Diversos autores y de entre ellos Turner [24] proponen que el teñido químico es similar al electroquímico. Considerando que el silicio se disuelve en los sitios anódicos mientras que el oxidante se reduce en los catódicos. Y si se toma en cuenta además un proceso de grabado uniforme y proporcional, cualquier región de la superficie alterna continuamente entre procesos anódicos y catódicos. Cuando un punto es mucho más anódico que catódico, se forma una cavidad en el grabado (poro). Por el contrario, las elevaciones se forman en las regiones de los procesos catódicos.

Se han propuesto varios modelos para explicar el proceso de reacción química como por ejemplo el de Kolasinski [20,21] mencionado anteriormente; sin

embargo, Memming y Schwandt [25] son quienes proponen el modelo más aproximado para describir el fenómeno (como se cita en Fonthal, 2006). Proponen una teoría sobre la disolución de silicio que consiste en dos regiones: electropulido y formación de Psi [24,25].

Diferencia el electropulido de la formación de silicio poroso como sigue: para el primero, la formación del óxido seguido de su disolución química mediante flúor se produce cuando se tienen 0.7 V con respecto al electrodo de hidrógeno normal, asociada a una reacción tetravalente donde no se forma Psi directamente. Para la formación de PSi se produce una reacción divalente donde se ataca directamente la superficie [26].

El proceso de disolución lo describe Fonthal [26] textualmente como sigue:

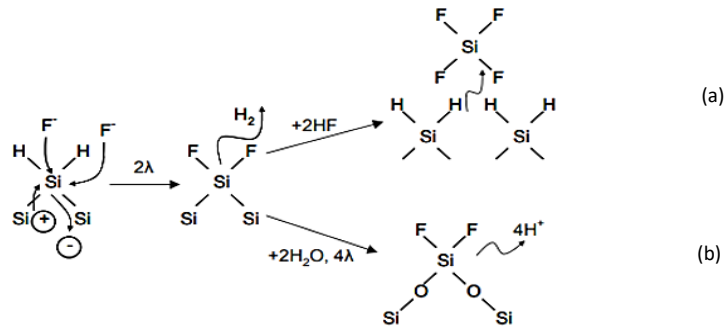
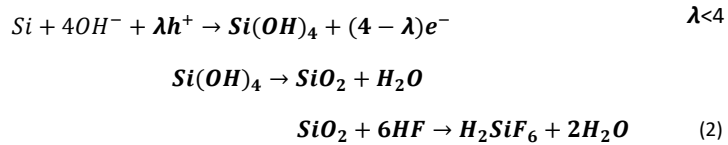
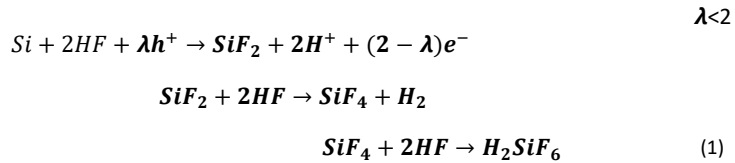


Fig. 2. Esquema propuesto para el proceso de los mecanismos de disolución de los electrodos de Si en una solución de HF. Las dos reacciones diferentes muestran las posibles disoluciones químicas: (a) divalente y (b) tetravalente asociadas con los dos estados: formación de PSi y electropulimiento [41].



*En los balances,  $h^+$  y  $e^-$  son remplazadas por huecos y electrones, respectivamente, y  $\lambda$  es el número de cargas necesarias durante el proceso de la disolución química.*

*La disolución de los átomos en la superficie del silicio afecta el enlace entre el silicio (Si) y el hidrógeno (H) debido a los enlaces sueltos del Si en la superficie, permitiendo que se formen los enlaces covalentes Si-H. Luego, se produce el reemplazo de un átomo superficial de H por un ion de flúor ( $F^-$ ) como se muestra en la Figura 2. Los enlaces Si-H se rompen debido al voltaje de anodización que hace que los electrones se muevan resultando en un enlace Si-F, el índice de disolución empieza con un potencial de circuito abierto sobre cero y una superficie cubierta de enlaces Si-H. Si el enlace Si-F es establecido debido al efecto de polarización, otro ion  $F^-$  puede atacar y unirse generando una molécula de  $H_2$  e inyectar un electrón dentro del electrodo. Los enlaces posteriores de Si entre átomos de Si son debilitados debido a la electronegatividad del fluoruro, esto hace que estos enlaces se rompan por la reacción con el HF (Figura 2(a)). En donde los átomos del Si son removidos de la superficie. El producto de la reacción es el tetrafluoruro de silicio ( $SiF_4$ ) que es inestable, el cual hace que reaccione con  $2HF$  y generen el ácido fluorsilícico ( $H_2SiF_6$ ) (ecuación (1)), el cual produce la formación de las paredes del poro y consecuentemente el crecimiento del poro. Los restantes átomos superficiales de Si son otra vez hidrogenados (Figura 2 (a)) ...*

*Los enlaces posteriores del Si-SiF pueden además ser rotos por la reacción con  $H_2O$ , resultando enlaces Si-O-Si, los cuales no son estables con el HF resultando una disolución indirecta a través de la formación anódica de óxido (Figura 2 (b)) [57]. Una propuesta para la electroquímica de los procesos de oxidación/disolución del óxido es la reacción que se muestra en la ecuación (2) [54]. En la ecuación (2), la primera reacción lidera la formación del óxido. El índice de formación del óxido compite con el índice de disolución, que es gobernada por la segunda reacción en la ecuación (2). Entonces, mientras que en la reacción de la Figura 2 (b) la formación del PS resulta en la disolución directa del silicio, en la reacción de la Figura 2 (b) resulta de la disolución indirecta...*

### **3.3 Óptica del recubrimiento antirreflejante**

Las propiedades intrínsecas del P<sub>Si</sub> lo vuelven un material ideal para aplicaciones optoelectrónicas. De entre estas aplicaciones, encontramos los recubrimientos antirreflejantes.

Las películas de silicio macroporoso (>50 nm de diámetro de poro) por su particularidad pueden ser usadas como recubrimientos simples o en multicapas para celdas solares o en diversas aplicaciones fotónicas. Las capas de silicio mesoporoso (2-50 nm de diámetro de poro) son utilizadas en aplicaciones de sensores. Las capas de silicio microporoso (<2nm de diámetro de poro) son

usualmente utilizadas como elementos activos en la fabricación de microfiltros, etc [27].

A la fecha, las texturizaciones han sido estudiadas como recubrimientos antirreflejantes para mejorar la eficiencia de las celdas solares. La idea principal es modificar la superficie del emisor de la celda para mejorar la absorción de la luz reduciendo al mínimo la cantidad de luz reflejada. Las características del Psi bajo iluminación dependen de los parámetros morfológicos y del espesor de recubrimiento.

### 3.3.1 Reflexión y transmisión de ondas electromagnéticas

Para describir la reflexión y la transmisión de las ondas electromagnéticas incidentes sobre una superficie, se hace uso de las llamadas ecuaciones de Fresnel; estas dan los coeficientes de reflexión y transmisión de las ondas paralelas y perpendiculares al plano de incidencia.

Se pueden proponer las ecuaciones de Fresnel en términos de los ángulos de incidencia y de transmisión. Así, si el ángulo de incidencia  $\theta_i$  es igual al ángulo de reflexión  $\theta_r$  ( $\theta_i = \theta_r$ ), por la ley de Snell, se tiene que el ángulo de transmisión  $\theta_t$  debe cumplir  $n_i \sin \theta_i = n_r \sin \theta_r$ , por lo que el ángulo de transmisión dependerá de los índices de refracción del medio de incidencia  $n_i$ , del medio de transmisión  $n_t$  y del ángulo de incidencia [28].

Los coeficientes de Fresnel de reflexión y transmisión son definidos de la siguiente forma:

$$r = \frac{E_r}{E_i} \quad (1)$$

$$t = \frac{E_t}{E_i} \quad (2)$$

El campo eléctrico de una onda electromagnética se puede expresar a través de sus componentes perpendicular y paralela al plano de incidencia.

$$\vec{E}_i = \vec{E}_{is} + \vec{E}_{ip} \quad (3)$$

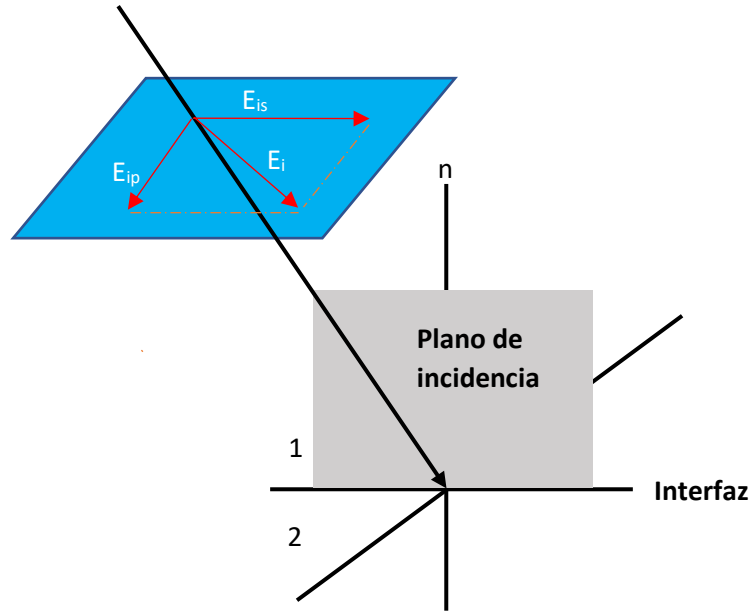


Figura. 8. Componentes paralela y perpendicular del campo eléctrico.  
Fuente ver (Wangsness, p. 502, 1986) [28].

La reflexión y la transmisión dependen de la polarización de la onda al pasar de un medio a otro, por lo que los coeficientes de Fresnel son paralelos y perpendiculares al plano de incidencia como se ve a continuación:

$$r_P = \frac{\frac{n_t}{\mu_t} \cos \theta_i - \frac{n_i}{\mu_i} \cos \theta_t}{\frac{n_i}{\mu_i} \cos \theta_t + \frac{n_t}{\mu_t} \cos \theta_i} \quad (4)$$

$$t_P = \frac{2 \frac{n_i}{\mu_i} \cos \theta_i}{\frac{n_i}{\mu_i} \cos \theta_t + \frac{n_t}{\mu_t} \cos \theta_i} \quad (5)$$

Las ecuaciones (4) y (5) corresponden a las componentes paralelas de los coeficientes de reflexión y transmisión respectivamente. Con  $n = \sqrt{\frac{\varepsilon\mu}{\varepsilon_0\mu_0}}$ .

$$r_s = \frac{\frac{n_i}{\mu_i} \cos \theta_i - \frac{n_t}{\mu_t} \cos \theta_t}{\frac{n_i}{\mu_i} \cos \theta_i + \frac{n_t}{\mu_t} \cos \theta_t} \quad (6)$$

$$t_s = \frac{2 \frac{n_i}{\mu_i} \cos \theta_i}{\frac{n_i}{\mu_i} \cos \theta_i + \frac{n_t}{\mu_t} \cos \theta_t} \quad (7)$$

Las ecuaciones (6) y (7) corresponden a las componentes perpendiculares de los coeficientes de reflexión y transmisión respectivamente.

Los subíndices indican a qué onda pertenecen (transmitida o incidente).

La reflectancia viene dada por la expresión:

$$R = \left| \frac{E_r}{E_i} \right|^2 \quad (8)$$

Los coeficientes de Fresnel de reflexión pueden ser expresados en términos de su matriz característica del medio estratificado como sigue:

$$R_s = \frac{(m_{11} + m_{12}p_2)p_0 - (m_{21} + m_{22}p_2)}{(m_{11} + m_{12}p_2)p_0 + (m_{21} + m_{22}p_2)} \quad (9)$$

$$R_p = \frac{(m_{11} + m_{12}q_2)q_0 - (m_{21} + m_{22}q_2)}{(m_{11} + m_{12}q_2)q_0 + (m_{21} + m_{22}q_2)} \quad (10)$$

Con los elementos de la matriz para una película como se ve en las ecuaciones (11) y (12).

$$M_s(d) = \begin{bmatrix} \cos \beta d & \frac{j}{p_1} \sin \beta d \\ jp_1 \sin \beta d & \cos \beta d \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$M_p(z) = \begin{bmatrix} \cos \beta z & \frac{j}{q_1} \sin \beta z \\ jq_1 \sin \beta z & \cos \beta z \end{bmatrix} \quad (12)$$

Con  $\beta = k_0 n_1 \cos \theta_1$ ,  $p_0 = n_0 \cos \theta_0$ ,  $p_1 = n_1 \cos \theta_1$ ,  $p_2 = n_2 \cos \theta_2$ ,  $q_0 = \cos \theta_0 / n_0$ ,  $q_1 = \cos \theta_1 / n_1$ ,  $q_2 = \cos \theta_2 / n_2$ , y  $k_0 = 2\pi / \lambda_0$ .

Cuando hay más de una película los elementos  $m_{ij}$  corresponden a los elementos de la matriz resultante del producto de las matrices características de cada película. Tomando en cuenta que la película en contacto con el medio ambiente es denotada con 1 y la última,  $n$ , en contacto con el sustrato.

$$M_v = \prod_{i=1}^n M_{vi} \quad (13)$$

### 3.3.2 Aproximación de medio efectivo para monocapas de PSi

Cuando el tamaño interno del nanocompuesto es mucho menor que la longitud de onda de la luz incidente, las dos fases mezcladas se pueden considerar como un simple medio o fase efectiva con una función dieléctrica efectiva promediando las funciones dieléctricas de cada material involucrado [29].

Al aumentar la porosidad, el volumen de silicio cristalino disminuye, por lo que el índice de refracción del Psi es más cercano al del aire ( $n=1$ ). En caso contrario, al tener un valor bajo de discontinuidades, el índice de refracción tiende al del silicio cristalino ( $n=3.5$ ) [30].

Varios modelos de aproximación ayudan a determinar el índice de refracción del PSi en función de la porosidad, siendo el modelo de Bruggeman el que presenta mejor ajuste del índice de refracción del Psi. Esta teoría supone que las discontinuidades del material en volumen experimentan un campo medio equivalente, y que estas discontinuidades son casi despreciables cuando la porosidad es inferior al 60% [30], de acuerdo con la ecuación (14).

$$\sum_i f_i \frac{\epsilon_i - \epsilon_{eff}}{\epsilon_i + 2\epsilon_{eff}} = 0 \quad (14)$$

Donde la fracción de volumen del material  $i$  dentro del medio poroso se define por  $f_i$ ,  $\epsilon_i$  es la función dieléctrica del material infiltrado y  $\epsilon_{eff}$  la función dieléctrica efectiva.

Para el caso del silicio poroso donde sus poros están llenos de aire, tenemos que la expresión está dada por la ecuación (15):

$$P \frac{\epsilon_{aire} - \epsilon_{eff}}{\epsilon_{aire} + 2\epsilon_{eff}} + (1 - P) \frac{\epsilon_{Si} - \epsilon_{eff}}{\epsilon_{Si} + 2\epsilon_{eff}} \quad (15)$$

donde  $P$  es la porosidad del material (fracción del volumen ocupado por el aire),  $\epsilon_{Si}$ ,  $\epsilon_{aire}$ , y  $\epsilon_{eff}$  son las funciones dieléctricas del silicio, material en la matriz, de los poros (aire/vacío) y del medio efectivo (PSi) respectivamente.

Para obtener las funciones dieléctricas de cada medio, Gutierrez [30] menciona: “La función dieléctrica del aire toma aproximadamente un valor de 1, aplicable también al índice de refracción. La función dieléctrica del silicio cristalino está en función de la longitud de onda de la radiación incidente mediante la ecuación de Cauchy y para el PSi mediante el espectro de reflectancia, el cual presenta máximos y mínimos como resultado de



interferencia por las reflexiones múltiples de la radiación incidente al propagarse a través de la película a diferentes longitudes de onda.”

### 3.4 Sobre los parámetros eléctricos de la celda solar curva I-V

La caracterización corriente voltaje de una celda solar ayuda a representar el funcionamiento de la celda fotovoltaica, relacionando valores de voltaje y corriente cuando la celda opera bajo iluminación.

En condiciones de oscuridad, la corriente es debida a los procesos de difusión de portadores en la celda que es igual a la corriente del diodo como se aprecia en la ecuación 16, con el factor de idealidad  $n$  igual a 1.

$$I_d = I_0 \left[ \exp \frac{eV}{nKT_c} - 1 \right] \quad (16)$$

La corriente bajo iluminación es la debida a la generación de portadores y es representada como un generador en paralelo con el diodo. La corriente total es entonces igual a la diferencia entre la corriente fotogenerada  $I_{ph}$  y la corriente de diodo  $I_d$ :

$$I_{ph} - I_d = I_{ph} - I_0 \left[ \exp \frac{eV}{nKT_c} - 1 \right] \quad (17)$$

Los factores que describen el comportamiento de una celda son:

El factor de idealidad,  $n$ , representa la calidad de la unión, cuyo valor en el caso de una celda solar ideal se toma igual a 1. En condiciones reales, se toman en cuenta los procesos de recombinación, y el factor de idealidad es aproximadamente igual a 2.

A partir del circuito equivalente de una celda solar (figura 10), la resistencia en paralelo,  $R_P$ , representa la calidad de la unión p-n y es responsable de la

existencia de fugas de corriente. La resistencia serie,  $R_s$ , representa la resistencia total de la celda y se debe a la resistencia de contacto e interconexión, y a la resistencia intrínseca del semiconductor [31].

Tomando en cuenta la resistencia  $R_s$  y  $R_p$  la ecuación característica de la celda solar queda como sigue:

$$I = I_L - I_0 \left[ \exp \frac{e(V - IR_s)}{nKT_C} - 1 \right] - \frac{V - IR_s}{R_p} \quad (18)$$

El circuito equivalente de una celda solar fotovoltaica se ilustra a continuación:

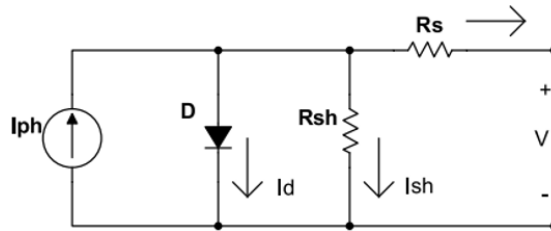


Figura. 9. Circuito equivalente de una celda solar.

La representación gráfica da lugar a la curva característica de una celda solar, como se ve la figura 10.

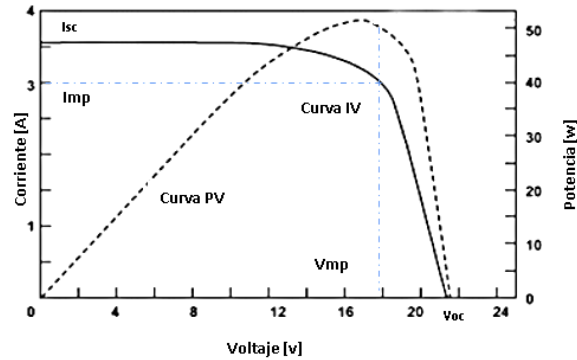


Figura. 10. Curva I-V celda solar.

Como se menciona en [32] los parámetros que evalúan el rendimiento de la celda son:

**Corriente de cortocircuito,  $I_{SC}$ :** Representa la corriente eléctrica máxima, que se obtiene de la celda cuando, el voltaje es cero entre la terminales y no existen cargas conectadas al sistema.

**Voltaje de circuito abierto,  $V_{OC}$ :** Es el voltaje máximo para la que los procesos de recombinación igualan a los de generación teniendo una corriente cero.

**Potencia máxima,  $P_{max}$ :** Es la potencia máxima que puede generar una celda fotovoltaica bajo unas condiciones estándar de radiación incidente, y se obtiene como el producto del voltaje pico y de la corriente pico.

**Eficiencia de conversión energética:** Es el cociente entre la máxima potencia eléctrica que se puede entregar a la carga ( $P_{max}$ ) y la irradiancia incidente ( $P_{ph}$ ) sobre la celda que es el producto de la irradiancia incidente por el área de la celda en condiciones estándar<sup>2</sup>:

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{ph}} \quad (19)$$

<sup>2</sup> Irradiancia de 1000 W/m<sup>2</sup>, distribución espectral de la radiación incidente o coeficiente de masa de aire (AM1.5), incidencia normal, temperatura de 25°C.

**Factor de forma (FF):** Se define como el cociente de potencia máxima que se puede entregar a una carga entre el producto del voltaje de circuito abierto y la corriente de cortocircuito, es decir:

$$FF = \frac{I_M V_M}{V_{OC} I_{SC}} \quad (20)$$

### 3.5 Eficiencia cuántica

La eficiencia cuántica QE (Quantum efficiency), es la relación entre el número de portadores recolectados y el número de fotones incidentes en una celda solar; o, en otras palabras, la capacidad en términos de eficiencia de convertir un fotón en electrón [33].

Si la relación entre portadores y fotones incidentes es la misma, entonces la eficiencia cuántica será del 100% como se ve en la figura 12.

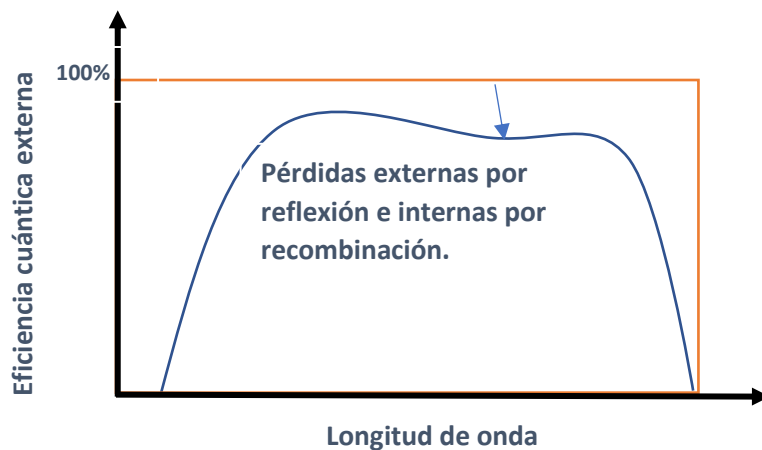


Figura. 11. La eficiencia cuántica de una celda solar de silicio.  
Fuente ver [33].

La reducción de la eficiencia cuántica se debe a la reflexión en la superficie y a pequeñas longitudes de difusión en el material que provoca una rápida recombinación de portadores.

La superficie afecta a los portadores fotogenerados cerca del azul por la alta recombinación superficial. La luz verde se absorbe en la mayor parte de una celda solar y una baja longitud de difusión afectará la probabilidad de recolección y por tanto la QE se reducirá en esa parte del espectro [33].

La eficiencia cuántica interna (IQE por sus siglas en inglés) es la relación entre el número de portadores (pares electrón- hueco) y el número de fotones absorbidos. Representa la pérdida por recombinación. Por su parte, la eficiencia cuántica externa es la relación entre portadores de carga fotogenerados y el número de fotones incidentes. La EQE (External Quantum Efficiency) incluye el efecto de las pérdidas ópticas, como la de Fresnel en la interfaz aire/ semiconductor, reflexión en los contactos metálicos; y también otros factores, como el hecho de que no todos los pares electrón-hueco logran salir como corriente [34].

### 3.6 Respuesta espectral

Los conceptos, respuesta espectral (SR) y eficiencia cuántica (QE) están estrechamente relacionados. Mientras la eficiencia cuántica en términos simples es la capacidad de convertir un fotón incidente en un electrón, la respuesta espectral es la porción de la energía fotogenerada que se convierte en corriente.

El espectro solar cubre un amplio rango de longitudes de onda, desde los 200 nm (ultravioleta) hasta los 3000 nm (infrarrojo). La capacidad de las celdas solares oscila en un rango de los 400 a 1200 nm (visible) como se puede apreciar en la figura 13.

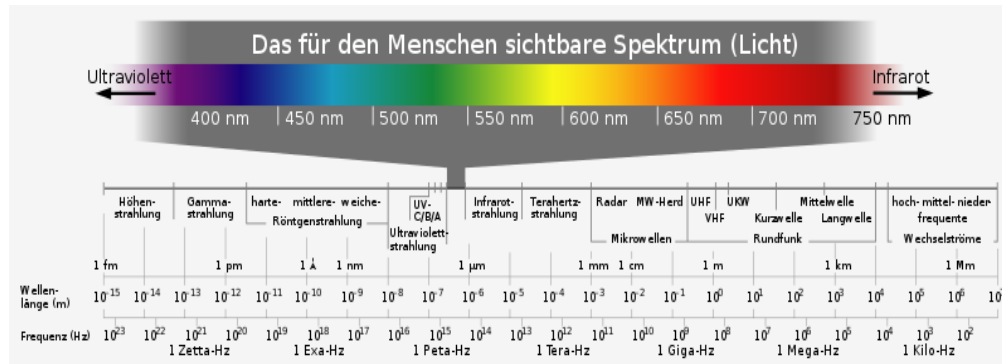


Figura. 12. Espectro electromagnético.  
Fuente ver [35].

El comportamiento de la respuesta espectral aumenta a longitudes de onda largas y disminuye en ondas cortas. No se absorben los fotones con energías por debajo de la banda prohibida y la energía por encima de ella se pierde en forma de calor [36].

La respuesta espectral es una función de la longitud de onda y está relacionada con la eficiencia cuántica como sigue:

$$SR (A/W) = \frac{q\lambda}{hc} QE \tag{21}$$

Donde  $h$  es la constante de Planck ( $6.626 \times 10^{-34}$  Js),  $q$  es la carga del electrón ( $1.602 \times 10^{-19}$  C) y  $c$ , la velocidad de la luz en el vacío ( $2.99 \times 10^8$  m/s).

## Capítulo 4

### Desarrollo experimental

En el capítulo anterior se presentaron las principales características y propiedades de los materiales y reactivos utilizados en el desarrollo esta tesis. Se mostraron los principales procesos de obtención y, su aplicación en dispositivos de interés tecnológico. A continuación, se describen las técnicas experimentales desarrolladas para la obtención del recubrimiento de silicio poroso (Psi). También se describen los equipos utilizados para la caracterización óptica y estructural del silicio poroso.

La metodología utilizada en este trabajo se basa en investigaciones previas para la obtención de películas antirreflejantes.

#### 4.1 Síntesis de la celda solar

Las celdas de partida son uniones p-n formadas por la difusión de fósforo en obleas de silicio tipo p con orientación [111] y resistividad de 10 Ohm-cm, con resistencia de cuadro de difusión de 35 Ohms en promedio.



#### 4.1.2 Proceso de corte, limpieza y depósito de aluminio de la muestra

El proceso de fabricación de la celda inicia con el corte, donde las obleas de silicio se dividen en pequeñas unidades cuadradas con un área total de  $1.5 \times 1.5 \text{ cm}^2$ .

Posteriormente, se realiza el procedimiento de limpieza para liberar a la muestra de contaminantes hidrofóbicos orgánicos, para lo cual, primero es necesario desengrasar los vasos de precipitados.

Una vez limpios los vasos, se procede a sumergir la muestra en acetona y, posteriormente, se lleva a baño ultrasónico durante 3 minutos.

Al término del proceso anterior, se cambia la muestra a un vaso de precipitados con etanol y se lleva a baño ultrasónico por otros 3 minutos. Por último, enjuagamos con agua en baño ultrasónico por tres veces. La muestra finalmente se seca con un flujo de  $\text{N}_2$ .

Posteriormente, se deposita aluminio sobre la superficie de la región tipo n; la cara posterior a la de difusión, sustrato tipo p, cuenta ya con un contacto de aluminio y plata y, en algunos casos, de ser necesario, se realiza un depósito de aluminio, ambas por evaporación térmica con filamento de tungsteno de un espesor aproximado de 800 nm.

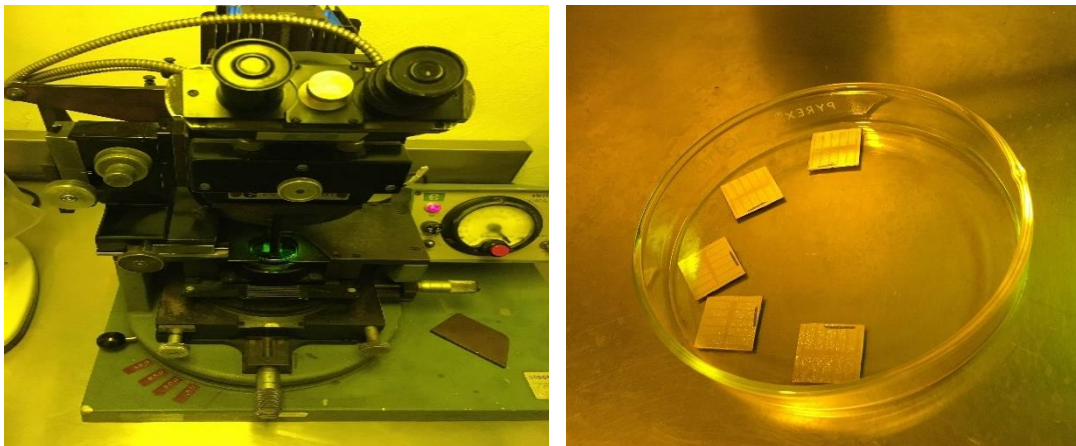


Figura. 13. Izquierda: Oblea de silicio tipo p. Derecha: Unidades cuadradas de  $15 \times 15 \text{ mm}$  de silicio tipo p con contacto trasero de aluminio y plata.

### 4.1.3 Fotolitografía

Mediante fotolitografía se define la región de metalización del contacto frontal de la celda, para lo cual, se aplica una fotoresina positiva (Microposit S1827 G2 Positive marca Dow) y se distribuye uniformemente haciendo uso de un spinner a una velocidad de 4000 rpm durante 20 segundos para cubrir la parte anterior de la celda y se lleva a un horno a 90°C por 20 minutos. Posteriormente, la muestra se coloca en una alineadora de mascarilla para fotolitografía y se expone a luz ultravioleta (400 nm) por 15 segundos haciendo uso de una fotomáscara con el diseño de la rejilla de contacto.

A continuación, se revela en una solución de hidróxido de potasio (KOH) en agua desionizada en proporción 11:1 sumergiendo la celda por un tiempo de 30 segundos. Se enjuaga en agua desionizada por 30 segundos y se seca con un flujo de N<sub>2</sub>. Posteriormente se aplica resina en la parte posterior de la celda. Se lleva a un horno a 90°C por 20 minutos y posteriormente se recoce a 120°C por un tiempo de 20 minutos.



*Figura. 14.. Izquierda: Alineadora de mascarilla para fotolitografía marca Electroglass. Derecha: celdas foto enmascaradas.*

#### 4.1.4 Grabado de aluminio

El siguiente paso es el grabado de aluminio, que se realiza para remover el aluminio de la celda con excepción de la parte protegida por la resina; el cual se lleva a cabo mediante una solución de ácido fosfórico ( $\text{H}_3\text{PO}_4$ ) y ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ) en proporción 20:1 sumergiendo la celda durante 30 segundos a una temperatura de  $70^\circ\text{C}$ . Posteriormente, se enjuaga rigurosamente en agua desionizada y se seca con flujo de nitrógeno. Al término se aplica nuevamente la resina en la cara frontal y se recoce a  $90^\circ\text{C}$  por 20 minutos.

#### 4.1.5 Pasivación de los cantos

Los cantos o periferia de las celdas solares formadas se pasivan con la intención de eliminar los defectos durante el procesamiento. Se lleva a cabo por un minuto mediante una solución con concentraciones de 25% de fluoruro de amonio ( $\text{NH}_4\text{F}$ ), 15% de peróxido de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ), 20% de metanol ( $\text{CH}_3\text{OH}$ ) y 40% de ácido acético ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ), lo que permite reducir la corriente de fuga de la unión p-n. Al término del proceso, se remueve con acetona la resina de ambas caras, se enjuaga y se seca con  $\text{N}_2$ .

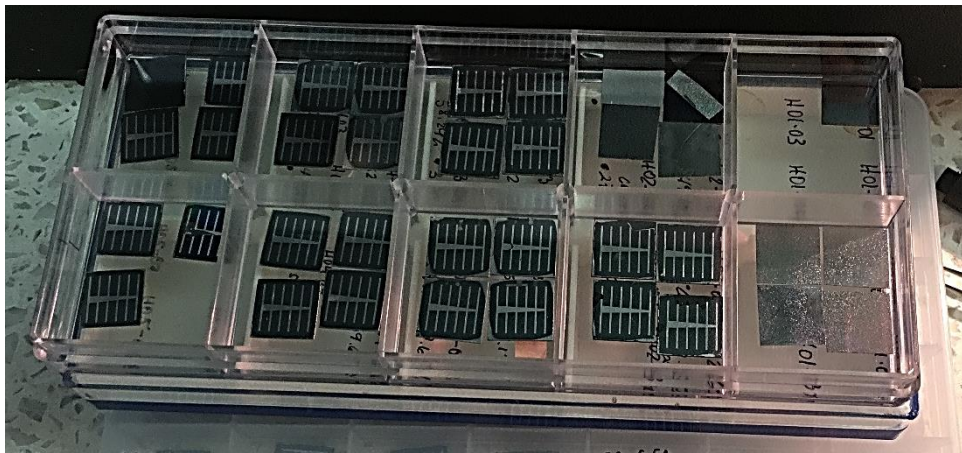


Figura. 15. Celdas solares terminadas sin recubrimiento antirreflejante.

Una vez obtenida la celda, se estudia la formación de silicio poroso en soluciones libres de ácido fluorhídrico.

#### 4.1.6 Texturización de PSi

La película antirreflejante de silicio poroso se forma en la cara incidente de la luz y con la rejilla de metalización expuesta a la solución de silicio poroso por inmersión; para lo cual, únicamente es necesario un recipiente para contener la solución, ya que la técnica se realiza en ausencia de corriente como se mencionó anteriormente. El tiempo de inmersión en la solución es de 30 segundos para cada ataque. Después del ataque, la muestra se enjuaga en agua desionizada y se seca con un flujo de  $N_2$ .

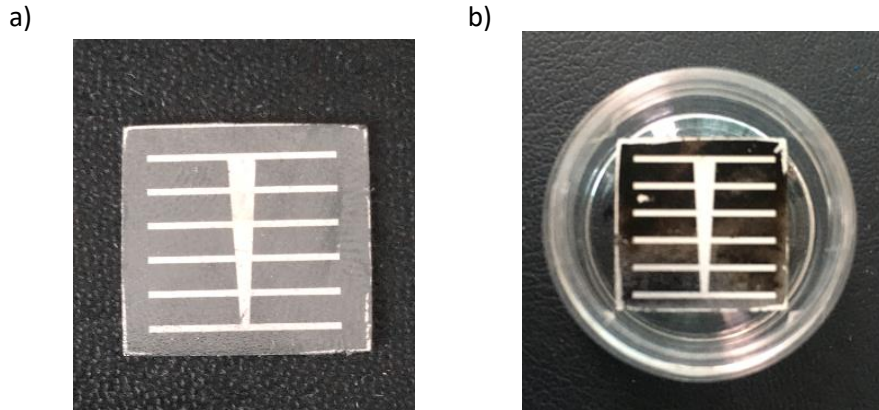


Figura. 16. Celda solar de silicio cristalino a) sin recubrimiento, b) con ARC de PSi.

Las soluciones utilizadas se componen de los siguientes reactivos: fluoruro de amonio ( $NH_4F$ ), peróxido de hidrógeno ( $H_2O_2$ ), metanol ( $CH_3OH$ ), ácido acético ( $CH_3COOH$ ), ácido nítrico ( $HNO_3$ ) y ácido fosfórico ( $H_3PO_4$ ), soluciones que no afectan apreciablemente a la metalización de la red de las celdas solares.

Para lo cual, después de varias pruebas, se propusieron 3 soluciones con los reactivos anteriormente mencionados. Las cuales presentaban mayores resultados.

Tabla 1. Soluciones utilizadas para el teñido químico.

	Proporción del compuesto					
100 ml	NH <sub>4</sub> F	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	CH <sub>3</sub> OH	CH <sub>3</sub> COOH	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	HNO <sub>3</sub>
Sol. 1	30%	20%	N/A	30%	N/A	20%
Sol. 2	20%	30%	10%	25%	15%	N/A
Sol. 3	20%	40%	10%	15%	15%	N/A

Se atacaron un total de 6 muestras, dejando una sin atacar como referencia<sup>3</sup>.

## 4.2 Caracterización de las celdas terminadas

Una vez obtenida la película de silicio poroso (Psi), primeramente, se investiga la influencia los diferentes parámetros controlables en el ataque químico para la formación de silicio poroso, tales como: tiempo, concentración, composición y temperatura, así como sus características ópticas y eléctricas.

### 4.2.1 Caracterización óptica: Espectroscopía UV-Vis

En esta etapa se estudia la contribución del recubrimiento antirreflejante en la disminución de la reflectividad y su aumento en la corriente de iluminación o corriente de cortocircuito de la celda; para lo cual, se hace uso de un espectrofotómetro de marca Jasco, modelo V-670 de doble haz (ver figura 20) que utiliza un solo Monocromador para cubrir un rango de medida desde 190 hasta 2,500 nm. El monocromador utiliza dos redes (cambio automático): 1,200 líneas/mm para la región UV/VIS; 300 líneas/mm para la región NIR (infrarrojo cercano). Utiliza un fotomultiplicador como detector en la región UV-Vis y un detector PbS (refrigeración Peltier) para el NIR.

La medida del factor de reflectancia requiere la utilización de una muestra ‘Blanco’, para lo cual utilizamos en nuestro caso un material pulido

---

<sup>3</sup> Debido a la limitante en el uso del simulador solar de 1000 W/m<sup>2</sup>, solamente se realizaron la medición de estas muestras aun cuando se tenían más celdas procesadas.

suministrado por el proveedor. Para la obtención de un registro ‘Cero’, tras disponer el accesorio en la ventana del porta muestras, se realiza un registro, obteniendo así un espectro con línea base de valor Cero de Absorbancia.

Se obtiene posteriormente el espectro de reflectancia especular antes y después del ataque en un rango de longitud de onda de 200-1200 nm a una velocidad de barrido de 400 nm/min, 5 grados de ángulo de incidencia, con intervalos de datos de 1 nm. La fuente de luz, la proporciona una lámpara compuesta de deuterio/tungsteno.

La monitorización de las medidas se realiza mediante PC a través del Software Spectra Manager (Versión CFR).



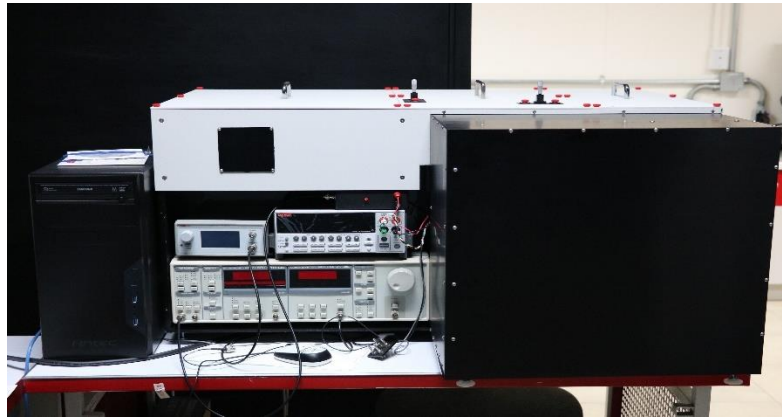
Figura. 17. Espectrofotómetro JASCO V-670.

#### **4.2.2 Caracterización eléctrica: Curvas I-V, Respuesta espectral**

La celda solar se caracteriza por los parámetros de corriente, voltaje, haciendo uso de las curvas IV, tanto en oscuridad como bajo iluminación y en diferentes densidades de potencia lumínica, en general con el uso de un simulador solar en el espectro AM1.5 con densidad de potencia de  $1000 \text{ W/m}^2$ , (ver figura 19).

Se determinan, con base en lo anterior, los parámetros fundamentales como: corriente de cortocircuito o corriente de iluminación, voltaje de circuito abierto, factor de idealidad del diodo, factor de forma, respuesta espectral, y la eficiencia cuántica interna por inferencia de la respuesta espectral. Todos los

valores anteriormente mencionados se obtuvieron antes y después de la formación de la película antirreflejante de silicio poroso.



*Figura. 18. Simulador solar y trazador de curvas marca Keithley Instruments.*

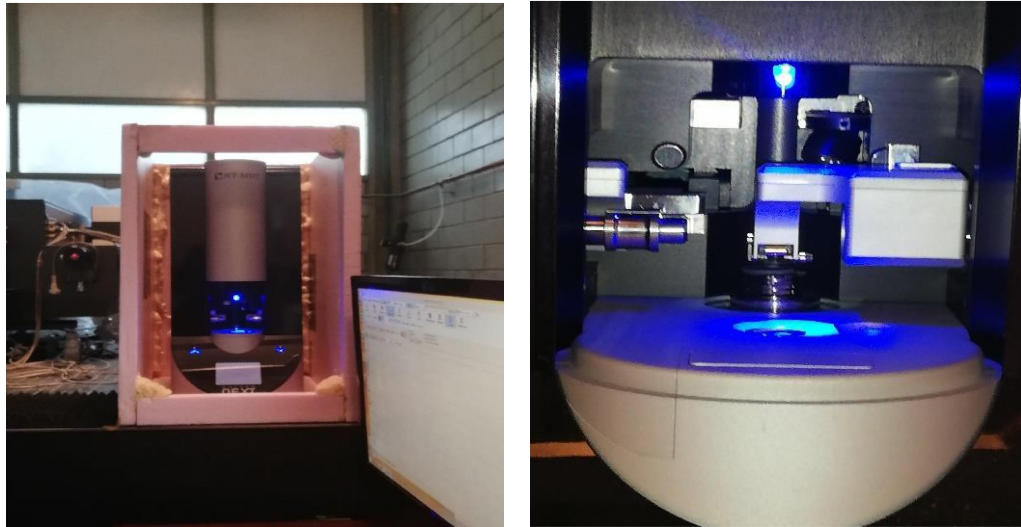
### **4.2.3 Caracterización morfológica: Microscopia de fuerza atómica**

Para la descripción morfológica de la estructura se hace uso de la microscopia de fuerza atómica (AFM), la cual nos ayudará a registrar la topografía de su superficie, obteniendo así una imagen 2D y 3D de la superficie con una resolución de nanómetros, así como datos de rugosidad.

El principio de funcionamiento consiste en medir las fuerzas de interacción entre una punta y la superficie de la muestra utilizando cantiléver con una punta afilada ubicada en uno de los extremos para crear una imagen del relieve superficial

El modo de semicontacto (utilizado para este trabajo) permite extraer las propiedades topográficas de la muestra mediante el deslizamiento intermitente de la punta del cantiléver sobre la superficie.

La micrografía se lleva a cabo colocando la muestra para posteriormente proceder con la obtención de una imagen con el microscopio automático de fuerza atómica (Figura 20), posteriormente se procesa la imagen para realizar un análisis de grano y la rugosidad de la muestra.



*Figura. 19. Microscopio automático de fuerza atómica. Vista frontal.*

Se procede con el escaneo en modo semicontacto con ayuda del cantilever con punta NSG10 con 100 Armstrongs de diámetro, sin recubrimiento de oro, localizada al final del brazo del cantiléver, que mide de 100 a 200 micras de largo.

Con la ayuda del software Nova, primero elegimos la opción de apuntar y luego la opción de resonancia. Después de esto, elegimos la opción de aterrizaje en aproximación. Elegimos las opciones de escaneo de magnitud y fase de la configuración y después de eso se selecciona el área a escanear, así como la cantidad de puntos que tendrá el área; Se puede medir de  $0.5\mu m$  a  $100\mu m$ . Aquí también podemos elegir la velocidad de escaneo. Después de ajustar todos los parámetros la muestra se escanea. Una vez que se obtiene la imagen, finalmente se separa la punta y sacamos la muestra. El software utilizado para procesar las imágenes es Image Analysis 3.5.0.2096 (IA\_P9).



## Capítulo 5

### Análisis y discusión de resultados

En este capítulo se presenta el análisis de los resultados de reflectancia obtenidos mediante espectrofotometría UV-Vis y, de las curvas corriente-voltaje obtenidas bajo simulación solar; también se comparan las celdas fabricadas con las diversas variables experimentales enumeradas en el capítulo anterior. Se describe también la morfología encontrada en las micrografías de fuerza atómica. Al final de este capítulo se podrá hacer una asociación de los resultados encontrados con la técnica de teñido químico.

Para la obtención de los espectros de reflectancia y la morfología de la superficie, se usaron fracciones de las obleas de partida, las cuales también fueron teñidas con las tres soluciones mencionadas en el capítulo anterior. También, se presenta la simulación en Mathcad de los espectros de reflectancia antes y después del ataque químico.

En particular, se realizaron un total de 100 muestras de celdas solares terminadas, y de cada una de ellas se obtuvieron sus parámetros eléctricos bajo iluminación de una lámpara de tungsteno con una densidad de potencia de  $550\text{W}/\text{m}^2$ . De estas mismas, se eligieron 7 debido a su factor de forma (cercano al 60%), se procesaron 6 por teñido químico, las cuales posteriormente se evaluaron antes y después del ataque químico bajo condiciones estándar a  $1000\text{W}/\text{m}^2$ ; se dejó una muestra como referencia.

Se presentan además los ajustes de las curvas características corriente-voltaje antes y después del ataque químico de las 6 muestras seleccionadas, las cuales,

en este caso, fueron medidas bajo  $550 \text{ W/m}^2$  para la obtención de parámetros como del factor de forma, corriente de fuga, etc.

## 5.1 Espectros de reflectancia

Con el fin de analizar la influencia del recubrimiento antirreflejante de silicio poroso (PSi), se obtienen los espectros de reflectancia especular.

Los espectros de reflectancia especular muestran para cada longitud de onda la relación entre la intensidad de la luz reflejada y la luz incidente, medida con respecto a una referencia blanca estándar.

La figura 20, nos indica que antes del ataque para la formación de PSi, la muestra presentaba una reflexión entre 5 y 15 % en el rango de 200 a 800 nm (ultravioleta-visible). Después del ataque, la reflexión baja de entre 3% a 7% en el mismo rango de longitud de onda, lo que implica una reducción del 80% de la reflectancia.

Para el caso de longitudes de onda mayores hasta los 1200 nm se observa una disminución del 34% en la reflectancia.

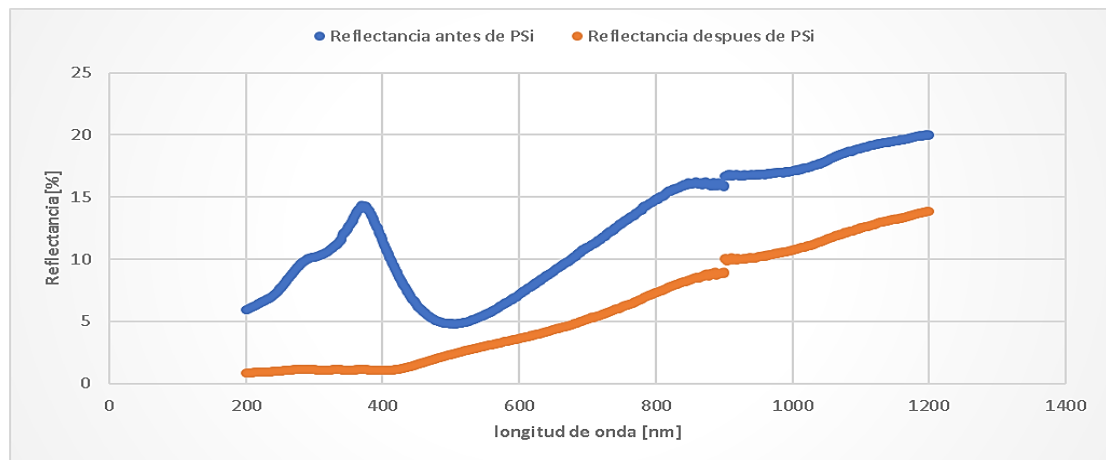


Figura. 20. Reflectancia especular antes y después del ataque con la solución 3.

Del espectro de la figura 21, se tiene que antes de la formación de silicio poroso, la muestra presentaba una reflexión entre 15 y 22 % en el rango de 200 a 500 nm. Después del ataque, la reflexión baja de entre 7 y 20% en el mismo rango de longitud de onda, lo que implica una reducción de más del 40% de la reflectividad.

Para el caso de longitudes de onda mayores hasta los 1200 nm no se observa una disminución considerable.

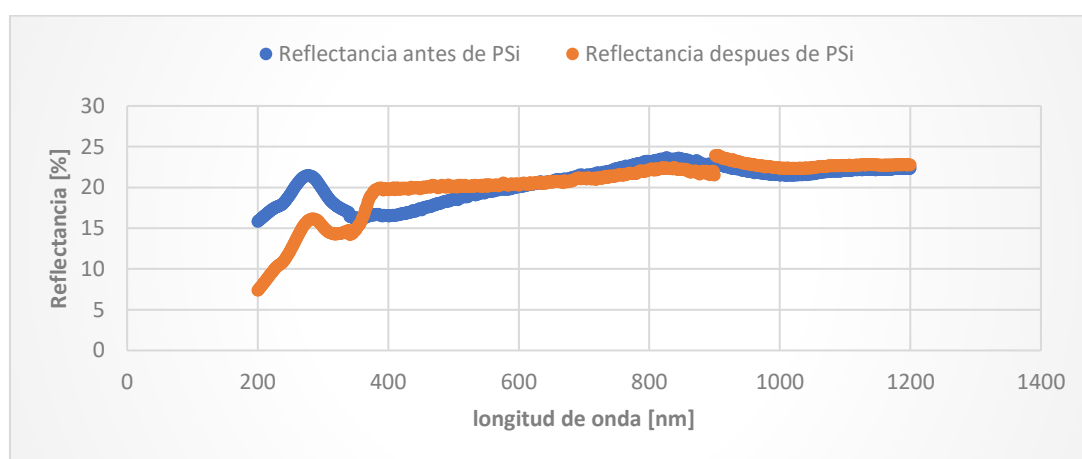


Figura. 21. Reflectancia especular antes y después del ataque con la solución 1.

Del espectro mostrado en la figura 22, tenemos que antes del ataque con PSI, la muestra presentaba una reflexión entre 5 y 20% en el rango de 200 a 500 nm. Después del ataque, la reflexión aumenta de entre 20 y 37%.

Para el caso de longitudes de onda mayores hasta los 1200 nm se observa una tendencia hacia un rango de entre 20 y 25 % de reflectancia.

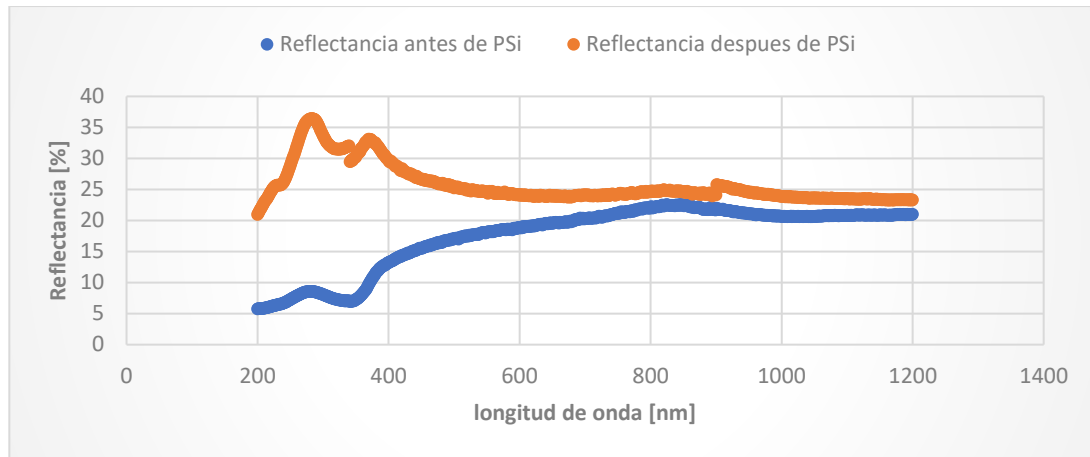


Figura. 22. Reflectancia especular antes y después del ataque con la solución 2.

### 5.1.1 Simulación de espectros de reflectancia

Se presentan las simulaciones en Mathcad de la reflectancia para las diferentes películas antirreflejantes basadas en las diferentes soluciones (sol. 1, sol. 2, sol. 3).

Para el cálculo y simulación, partimos del hecho de que cada capa de un recubrimiento multicapa tiene su propia matriz de transferencia como se extrae de la ecuación (13) (capítulo 3).

El desarrollo matemático según Pedrotti [37] toma en consideración una película isotrópica y homogénea.

Los datos de los índices de refracción y espesor para las reflectancias simuladas de las muestras se pueden ver en la tabla 2. Para todas la muestras, el índice de refracción del aire se toma de 1.

Tabla 2. Valores de los índices de refracción y espesor para las reflectancias simuladas de las muestras.

Antes del ataque químico				
	n0 (aire)	n1 (PSi)	nsubs (c-Si)	t (nm)
Muestra (a)	1	1.25	2.30-0.02i	125
Muestra (b)	1	1.2	2.9-0.02i	105
Muestra (c)	1	1.31	2.3-0.02i	59
Después del ataque químico				
Muestra (a) sol. 1	1	1.4	1.4-0.02i	23.5
Muestra (b) sol. 2	1	1.4	3.0-0.02i	30
Muestra (c) sol. 3	1	1.2	3.9-0.02i	109

En la figura 23, antes del ataque químico, la muestra presentaba un índice de refracción de 1.25 para la capa de silicio poroso y de 2.30-0.02i para el sustrato de silicio.

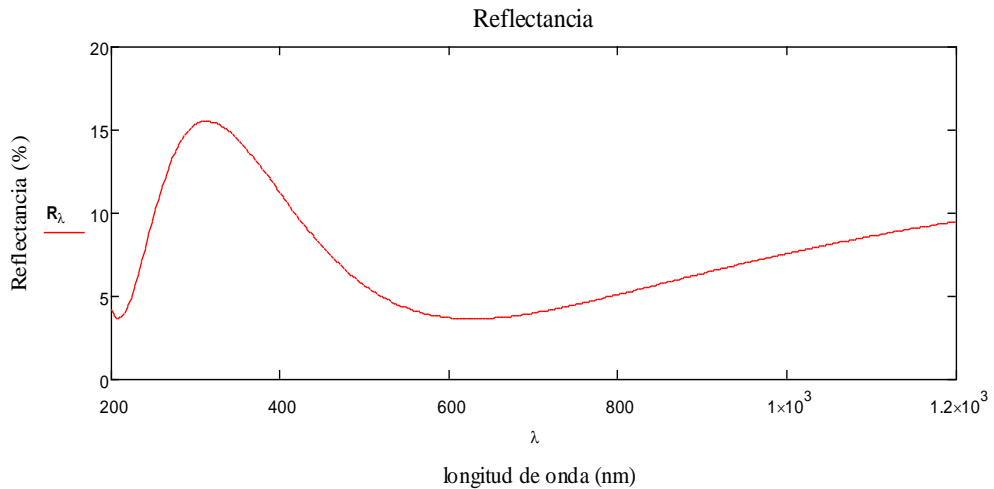


Figura. 23. Simulación reflectancia de la muestra antes del ataque químico con sol. 3.

La figura 24 indica que después del ataque químico con la solución 3, la muestra nos da un índice de refracción de 1.4 para la capa de silicio poroso y de 1.4-0.02i para el sustrato de silicio. Se reduce de 125 a 23.5 nm el espesor del recubrimiento antirreflejante.

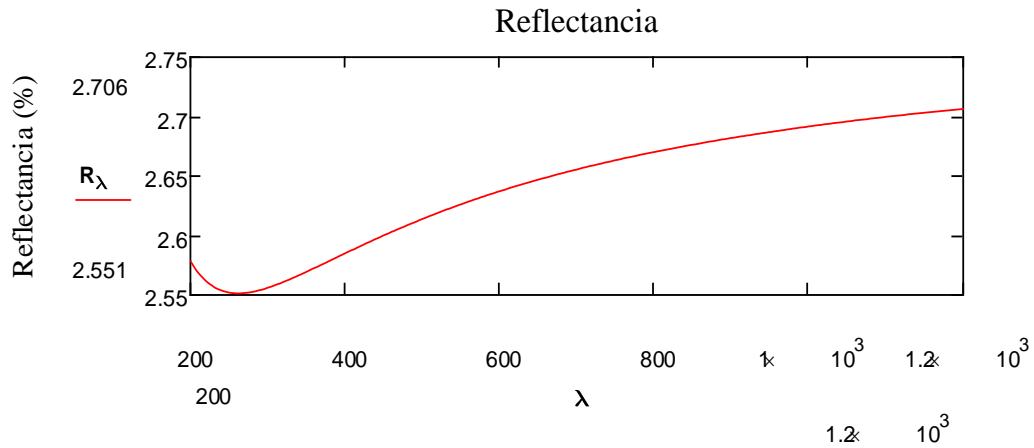


Figura. 24. Simulación reflectancia de la muestra después del ataque químico con sol. 3.

La figura 25 presenta la simulación del espectro de reflectancia antes del ataque químico con la solución 1, la muestra nos da un índice de refracción de 1.2 para la capa de silicio poroso y de  $2.9-0.02i$  para el sustrato de silicio.

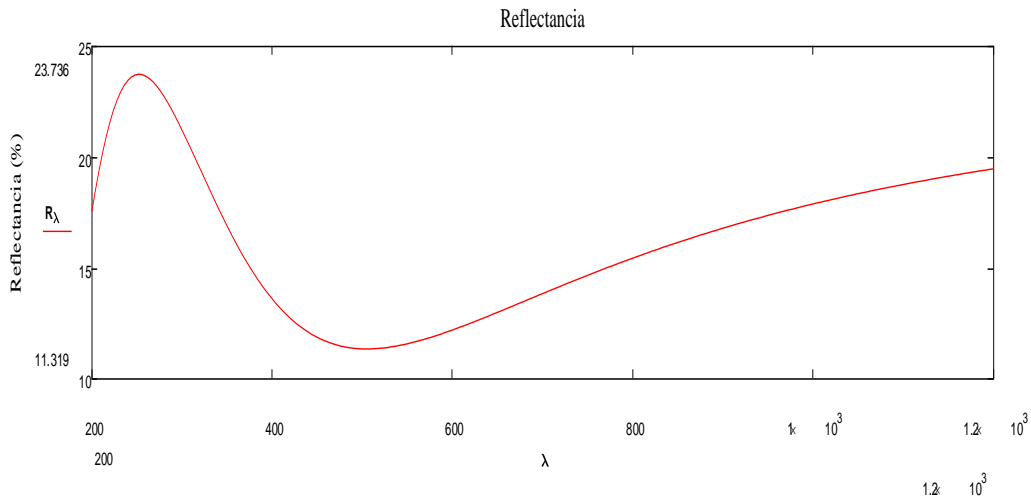


Figura. 25. Simulación reflectancia de la muestra antes del ataque químico con sol. 1

Después del ataque químico, el índice de refracción del P<sub>Si</sub> aumenta a 1.4. y de  $3.0-0.02i$  para el sustrato de silicio como se ve en la figura 26. El espesor del recubrimiento antirreflejante cambia de 105 a 30 nm.

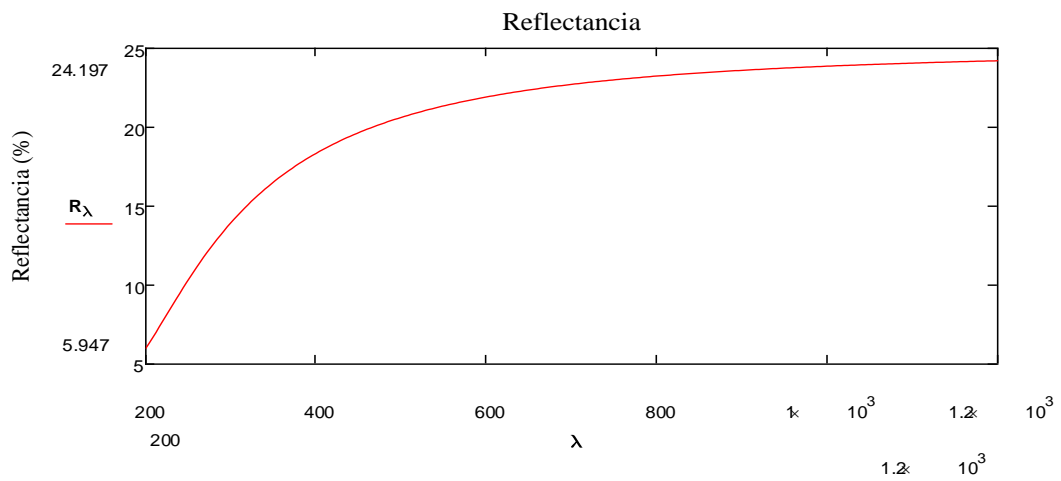


Figura. 26. Simulación reflectancia de la muestra después del ataque químico con sol. 1.

La figura 27 presenta el espectro de reflectancia antes del ataque químico con la solución 2, la muestra nos da un índice de refracción de 1.31 para la capa de silicio poroso y de 2.30-0.02i para el sustrato de silicio.

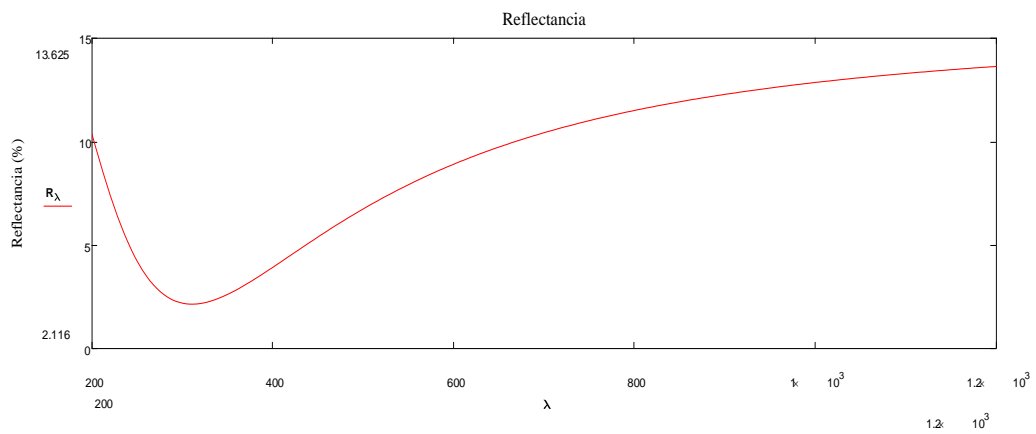


Figura. 27. Simulación reflectancia de la muestra antes del ataque químico con sol. 2.

Después del ataque químico con la solución 2, la muestra nos da un índice de refracción de 1.2 para la capa de silicio poroso y de  $3.9-0.02i$  para el sustrato de silicio como se ve en la figura 28. Aumenta de 59 a 109 nm el espesor del recubrimiento antirreflejante.

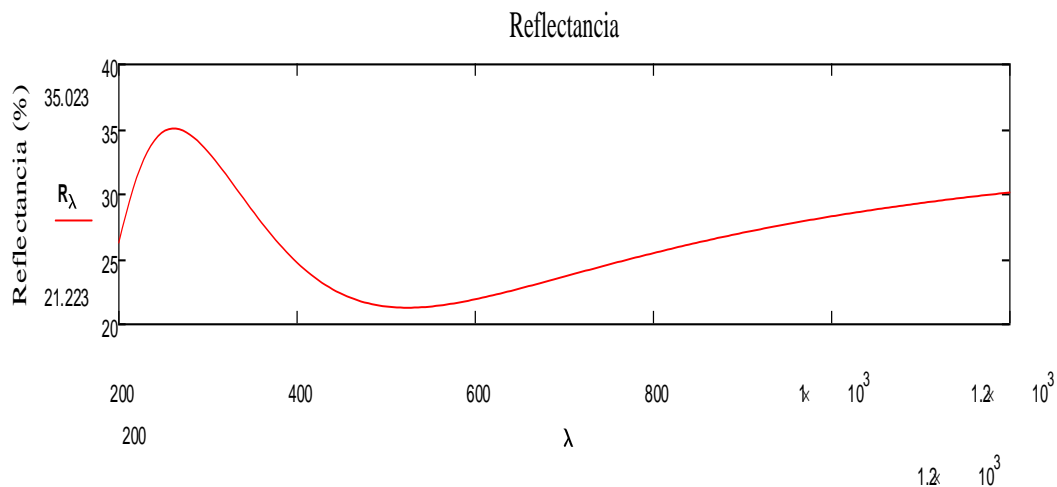


Figura. 28. Simulación reflectancia de la muestra después del ataque químico con sol. 2.

## 5.2. Curvas I-V

Para conocer el rendimiento de la celda solar debido al recubrimiento, es necesario trazar la curva I-V. En una celda que funciona correctamente, la forma de la curva debe seguir el perfil normal de un diodo de unión con un voltaje de codo adecuado y su reflejo en el  $V_{oc}$  como se muestra en el capítulo 3, y los valores medidos de  $I_{sc}$ ,  $V_{oc}$  y  $P_{max}$  deben ser los esperados para las condiciones ambientales en el momento de la medición.

La curva I-V mostrada en la figura 29 bajo intensidad de irradiación de  $1000 \text{ W/m}^2$  a  $25^\circ\text{C}$ , muestra con una línea punteada naranja, los datos de medición de la muestra CS-G01PASI36 después del ataque químico para la formación de la película de silicio poroso con la solución 2 (ver tabla 1); la línea punteada azul, muestra los datos arrojados antes de la formación de la película de silicio poroso.



Se puede ver que hay un incremento en la corriente de cortocircuito en un 50% debido a la optimización en la capacidad de absorción de la luz; mientras que el voltaje de circuito abierto aumenta ligeramente.

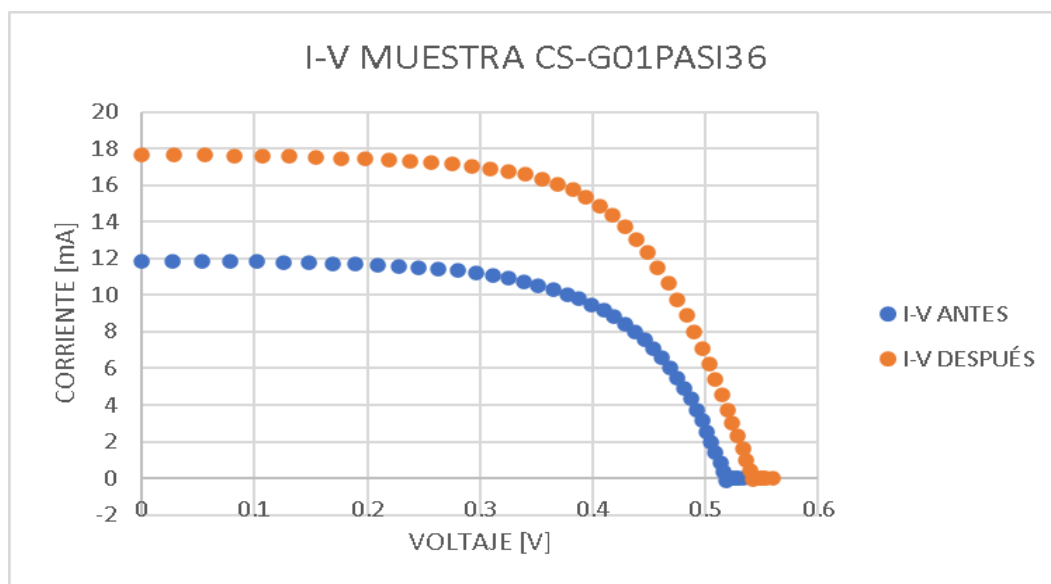


Figura. 29. Curva I-V antes y después del ataque químico muestra CS-G01PASI36 sol. 2.

La curva I-V de la figura 30 muestra un incremento en la corriente de cortocircuito en un 33% después de la formación de la película, mientras que el voltaje de circuito abierto disminuye en cerca de 40%.

Al observar la celda, se observa un deterioro en la adherencia de la metalización en la parte posterior, que implica a su vez un factor de forma muy bajo. Los parámetros de ajuste indicados en la sección 5.2.1 figura 38, muestran una caída en el factor de forma de 63% a 37% aprox.

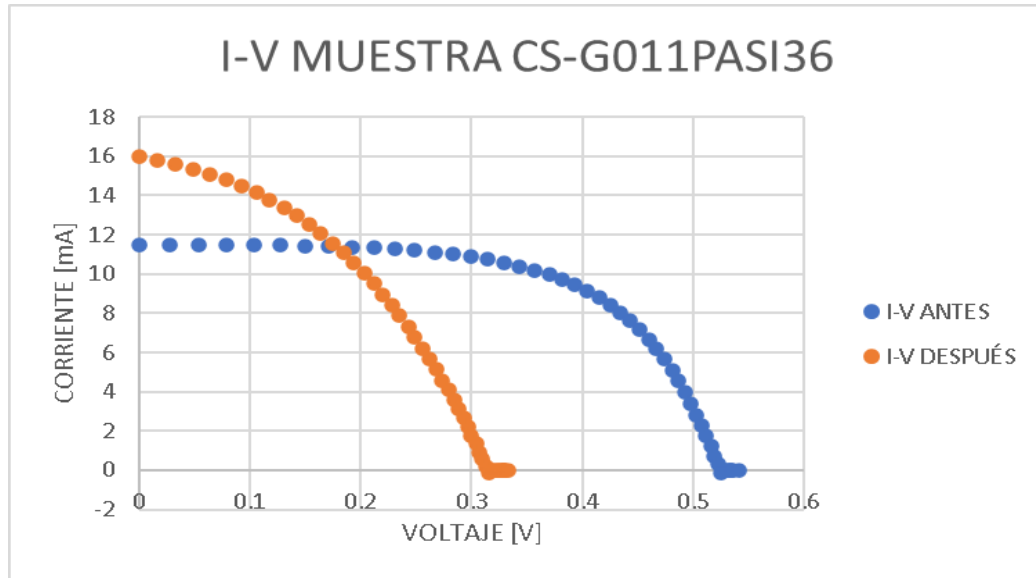


Figura. 30. Curva I-V antes y después del ataque químico muestra CS-G11PASI36 sol. 3.

Las curvas I-V mostradas en la figura 31 corresponden a la muestra CS-G75pasi36 antes y después de la formación de la película de silicio poroso con la solución 2 (ver tabla 1). Las curvas reflejan una disminución en la corriente de cortocircuito en un 31% y una ligera disminución en el voltaje de circuito abierto después de la formación de la película.

Esta disminución es probablemente debida a la degradación de la parte frontal de la celda cuando se sometió a ataque químico.

La curva I-V obtenida se corresponde bien con las curvas obtenidas a  $550 \text{ W/m}^2$  de iluminación (figuras 43 y 44). Baja el factor de forma de 60.82% a 59% aprox.

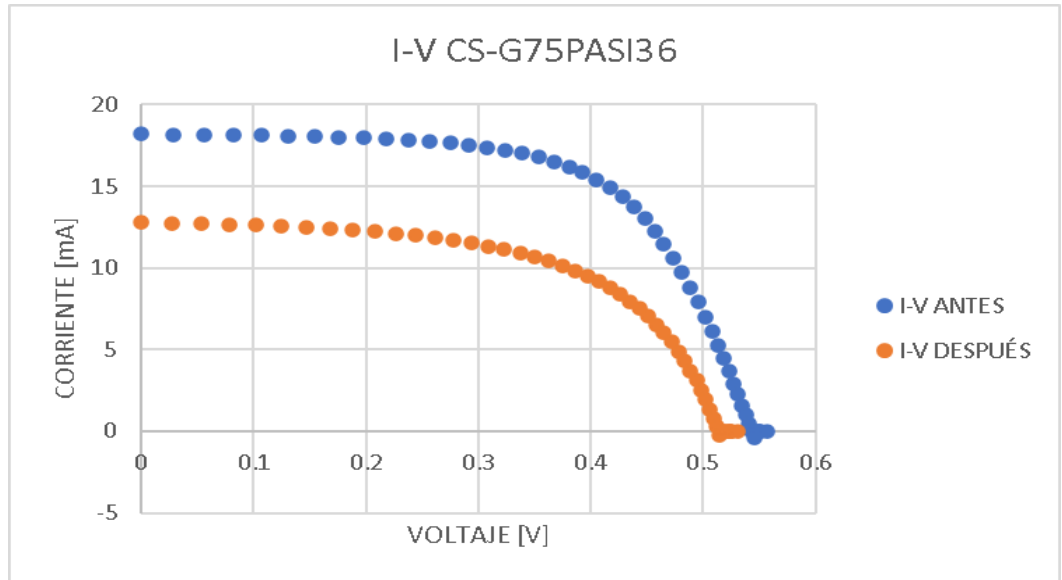


Figura. 31. Curva I-V antes y después del ataque químico muestra CS-G75PASI36 sol. 2

La muestra CS-G77PASI36 de la figura 32, presenta mejores valores de corriente- voltaje antes del ataque químico, teniendo un voltaje de circuito abierto un 10% mayor. Después del ataque, se observa degradación en la parte posterior de la celda, lo que aumenta su resistencia serie modificando el  $V_{oc}$  y su factor de forma (decremento de 62% a 39% de F.F aprox.)

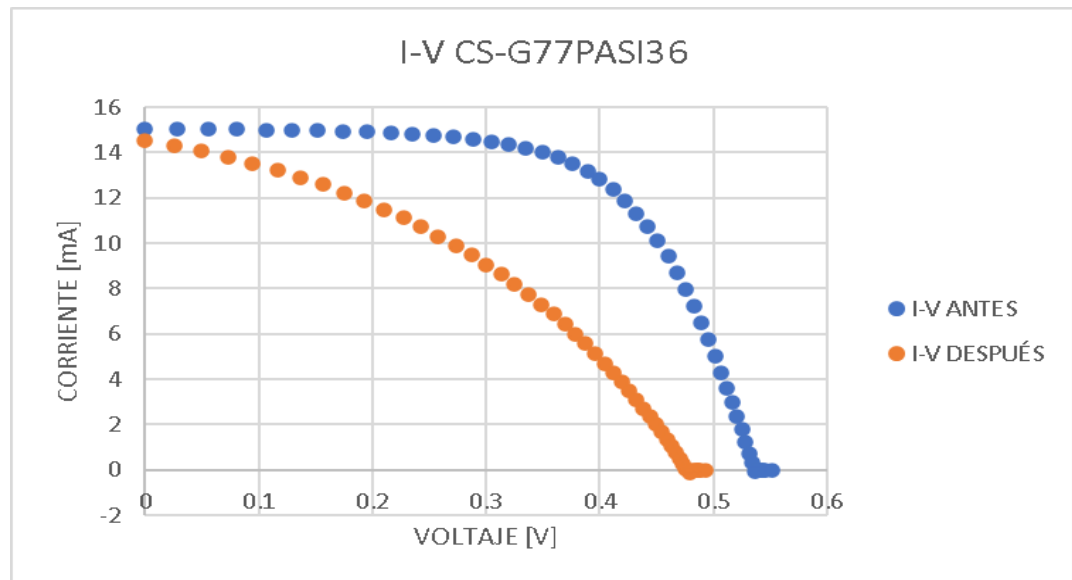


Figura. 32. Curva I-V antes y después del ataque químico muestra CS-G77PASI36 sol. 3.

En la figura 33, tenemos características I-V ligeramente mayores después del teñido químico.

Tras ser atacada con la solución 1 (ver tabla 1), la muestra CS-G018PASI36 no presenta degradación en ninguno de los contactos. Se observa un mejor factor de forma de 63% a 65% aprox.

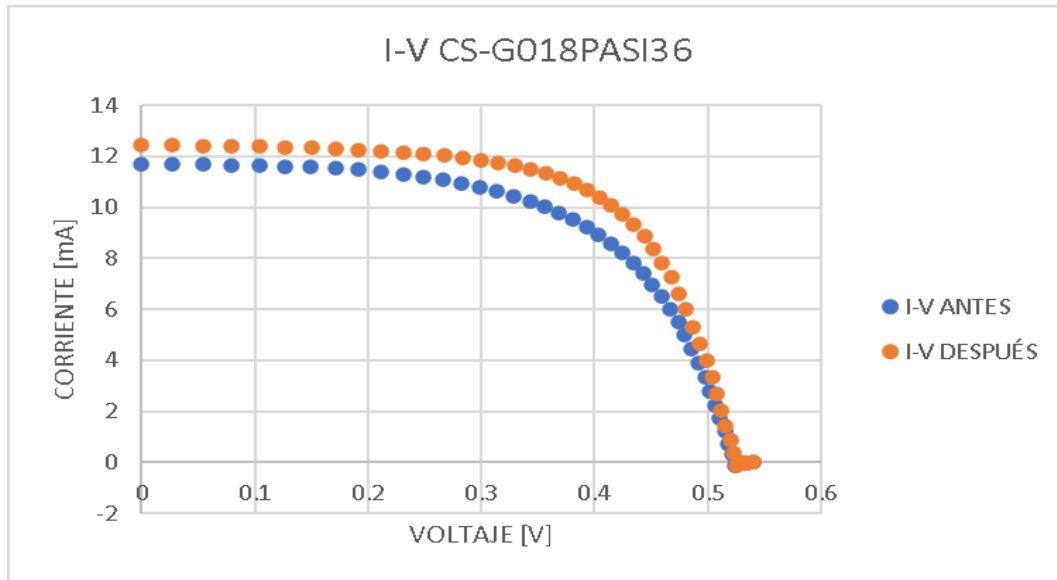


Figura. 33. Curva I-V antes y después del ataque químico muestra CS-G18PASI36 sol. 1.

Para las curvas I-V de la figura 34, se observa para la muestra CS-G019PASI36, que después del ataque hay un aumento tanto en corriente de corto circuito como en voltaje de circuito abierto, mostrando mejores características y por consiguiente una mayor eficiencia para una celda solar. Presenta un incremento de 65% a 68% de factor de forma.

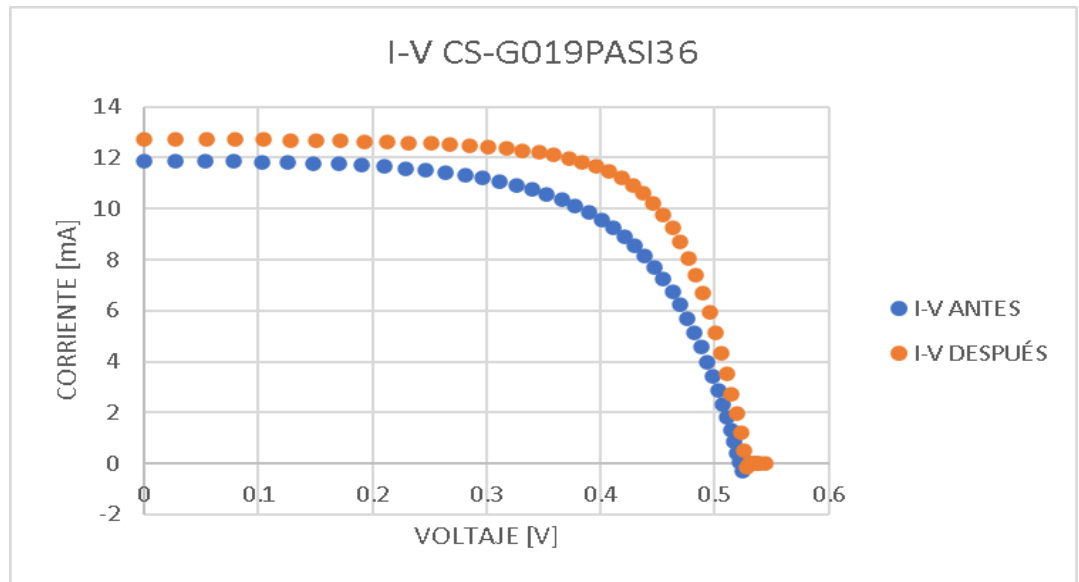


Figura. 34. Curva I-V antes y después del ataque químico muestra CS-G19PASI36 sol.1.

### 5.2.1 Ajuste de curvas I-V

En esta sección se presentan las gráficas con los valores de corriente y voltaje, correspondientes a las 6 muestras seleccionadas como se menciona al principio de este capítulo, medidas antes y después del ataque químico bajo simulación solar a  $550 \text{ W/m}^2$ ; también, se presentan los ajustes de las curvas I-V de las diferentes muestras con la intención de obtener otros parámetros que evalúan el funcionamiento de la celda solar, tales como: el factor de forma, la corriente de fuga, el factor de idealidad, etc.

La figura 35, correspondiente a la muestra CS-G01PASI36 antes del ataque químico, presenta un factor de forma de 64.96% con valores de 1.1 Ohms de  $R_s$ ,  $R_{sh}$  de 1500 Ohms, como se aprecia en la tabla 3 del anexo 1.

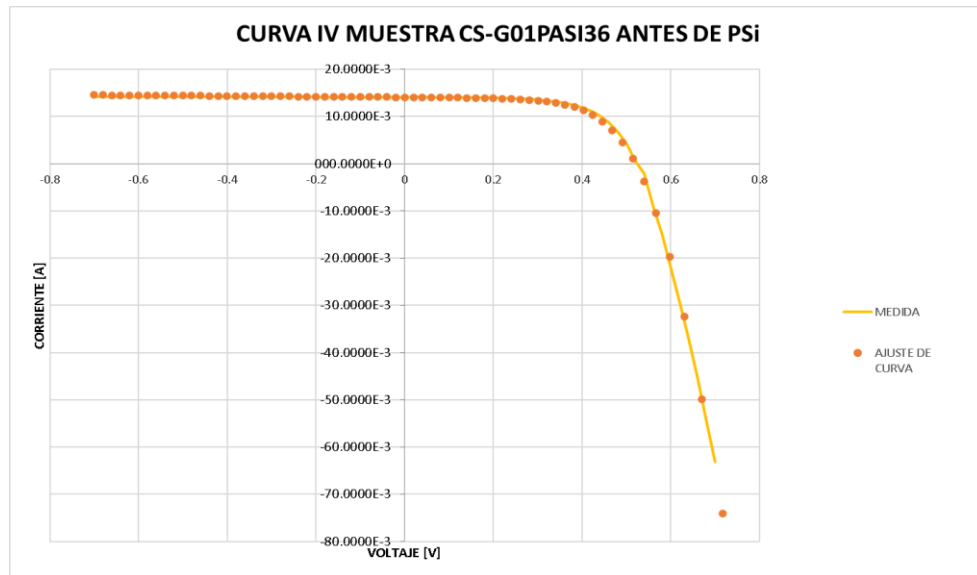


Figura. 35. Curva I-V medida y ajuste de curva antes del ataque químico muestra CS-G01PASI36.

La figura 36, correspondiente a la muestra CS-G01PASI36 después del ataque químico, presenta un factor de forma de 65% con valores de 2.40 Ohms de  $R_s$ ,  $R_{sh}$  de 3000 Ohms, como se aprecia en la tabla 3 del anexo 1.

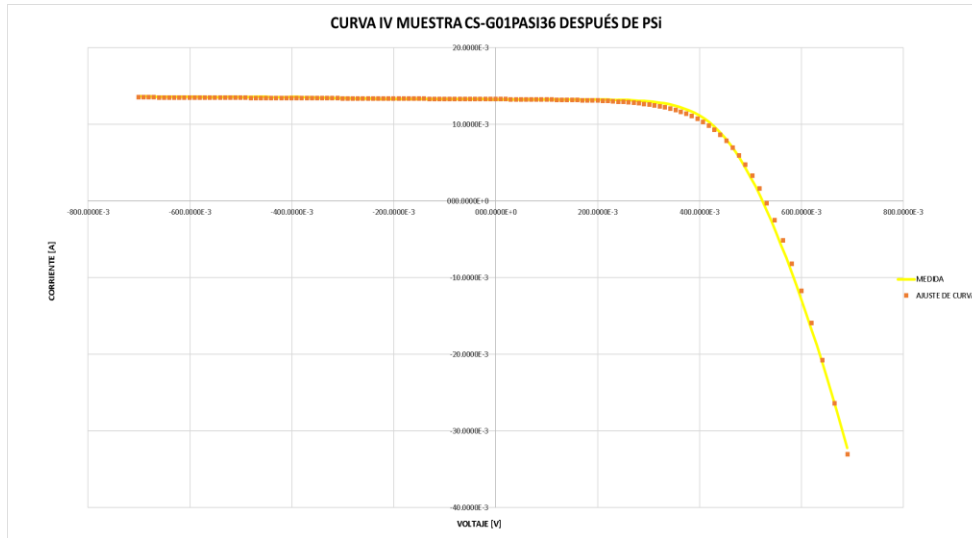


Figura. 36. Curva I-V medida y ajuste de curva después del ataque químico muestra CS-G01PASI36.

La figura 37, correspondiente a la muestra CS-G011PASI36 antes del ataque químico, presenta un factor de forma de 63.36% con valores de 1.1Ohms de  $R_s$ ,  $R_{sh}$  de 1500 Ohms como se aprecia en la tabla 3 del anexo1.

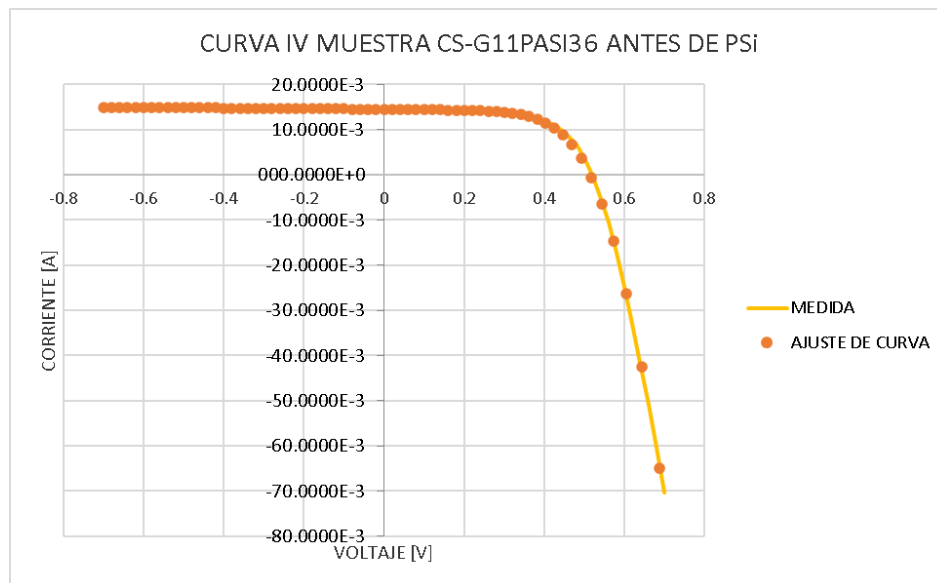


Figura. 37. Curva I-V medida y ajuste de curva antes del ataque químico muestra CS-G11PASI36.

La figura 38, correspondiente a la muestra CS-G011PASI36 después del ataque químico, presenta un factor de forma de 37% con valores de 7.40 Ohms de  $R_s$ ,  $R_{sh}$  de 150 Ohms como se aprecia en la tabla 3 del anexo1.

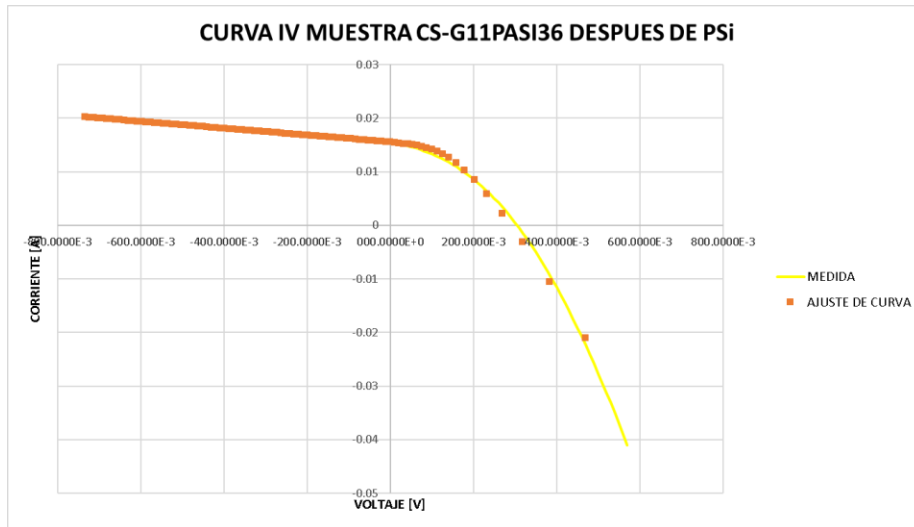


Figura. 38. Curva I-V medida y ajuste de curva después del ataque químico muestra CS-G11PASI36.

La figura 39, correspondiente a la muestra CS-G018PASI36 antes del ataque químico, presenta un factor de forma de 63.40% con valores de 2.2 Ohms de  $R_s$ ,  $R_{sh}$  de 1500 Ohms como se aprecia en la tabla 3 del anexo1.



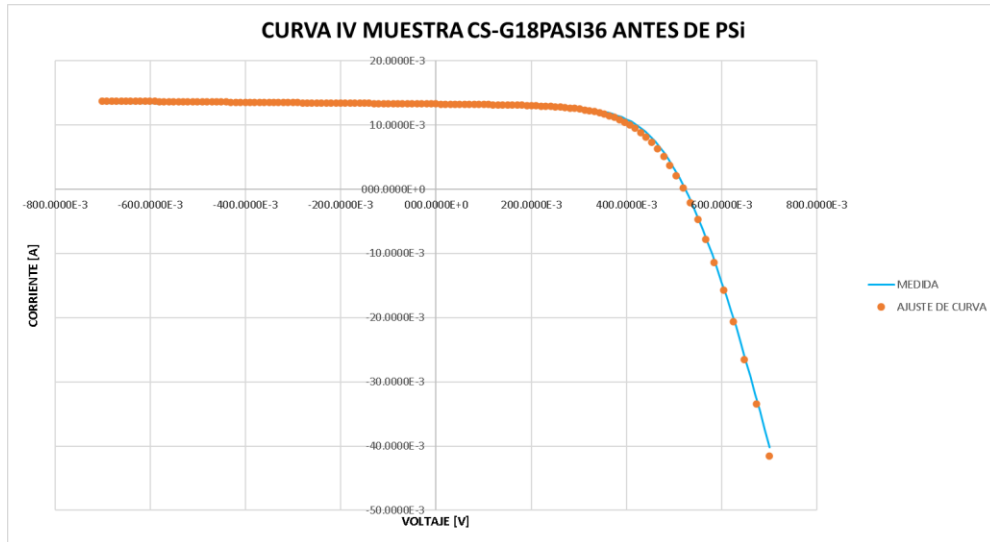


Figura. 39. Curva I-V medida y ajuste de curva antes del ataque químico muestra CS-G18PASI36.

La figura 40, correspondiente a la muestra CS-G018PASI36 después del ataque químico, presenta un factor de forma de 65% con valores de 3.60 Ohms de  $R_s$ ,  $R_{sh}$  de 5000 Ohms como se aprecia en la tabla 3 del anexo1.

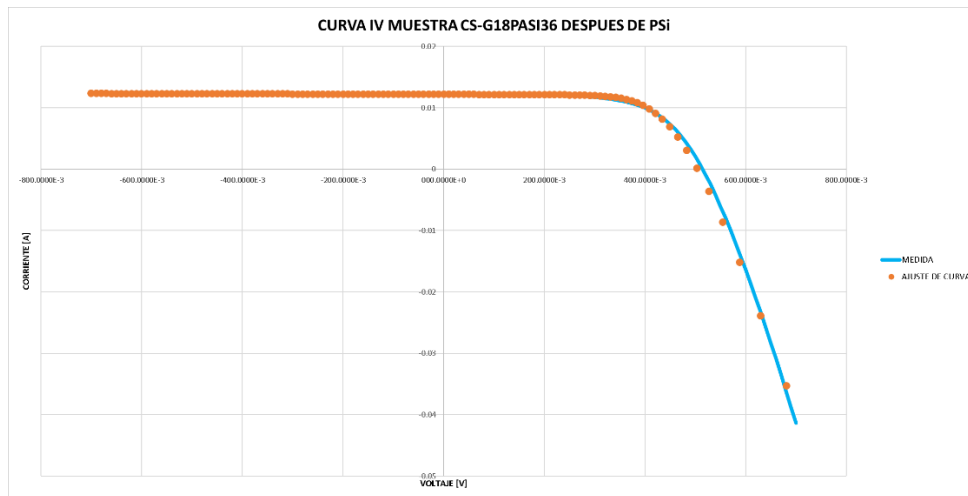


Figura. 40. Curva I-V medida y ajuste de curva después del ataque químico muestra CS-G18PASI36.

La figura 41, correspondiente a la muestra CS-G019PASI36 antes del ataque químico, presenta un factor de forma de 65.54% con valores de 0.63 Ohms de  $R_s$ ,  $R_{sh}$  de 1500 Ohms como se aprecia en la tabla 3 del anexo 1.

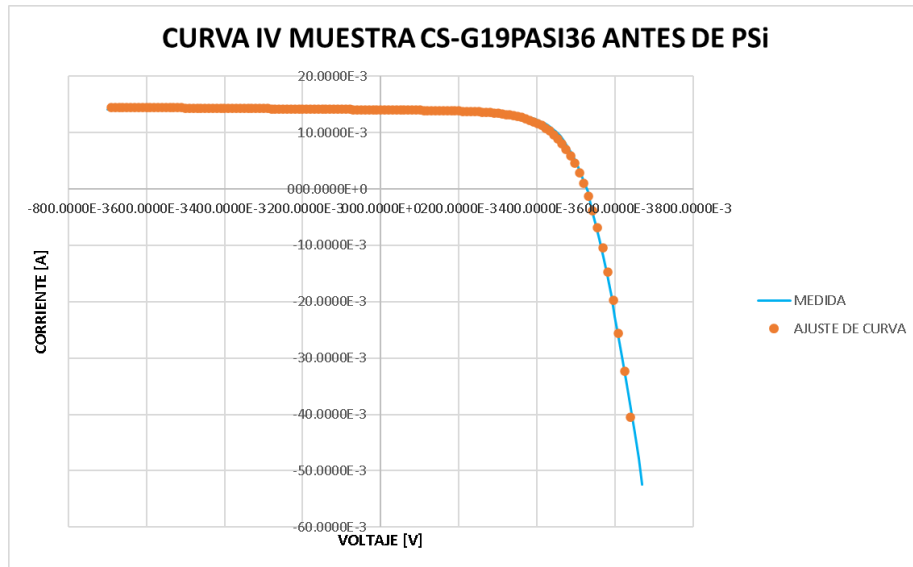


Figura. 41. Curva I-V medida y ajuste de curva antes del ataque químico muestra CS-G19PASI36.

La figura 42, correspondiente a la muestra CS-G019PASI36 después del ataque químico, presenta un factor de forma de 68% con valores de 1.2 Ohms de  $R_s$ ,  $R_{sh}$  de 2000 Ohms como se aprecia en la tabla 3 del anexo 1.

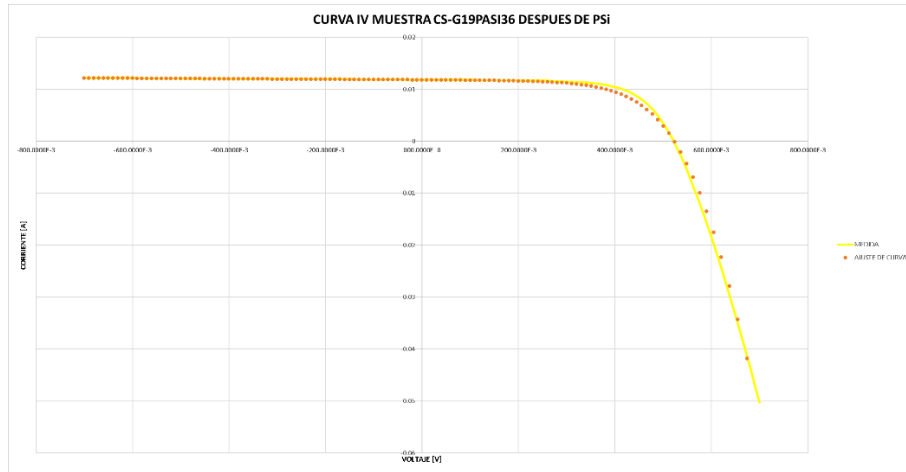


Figura. 42. Curva I-V medida y ajuste de curva después del ataque químico muestra CS-G19PASI36.

La figura 43, correspondiente a la muestra CS-G75PASI36 antes del ataque químico, presenta un factor de forma de 60.82% con valores de 2.9 Ohms de  $R_s$ ,  $R_{sh}$  de 3000 Ohms como se aprecia en la tabla 3 del anexo1.

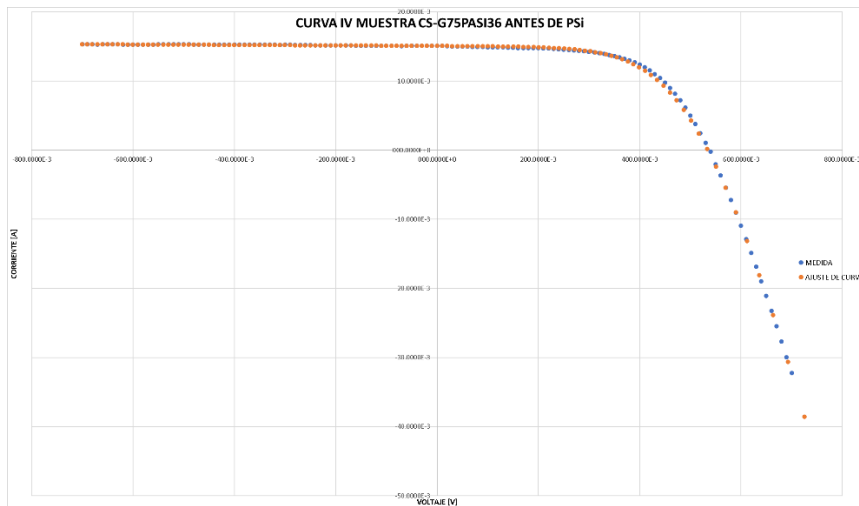


Figura. 43. Curva I-V medida y ajuste de curva antes del ataque químico muestra CS-G75PASI36

La figura 44, correspondiente a la muestra CS-G75PASI36 después del ataque químico, presenta un factor de forma de 59% con valores de 1.1 Ohms de  $R_s$ ,  $R_{sh}$  de 1500 Ohms como se aprecia en la tabla 3 del anexo 1.

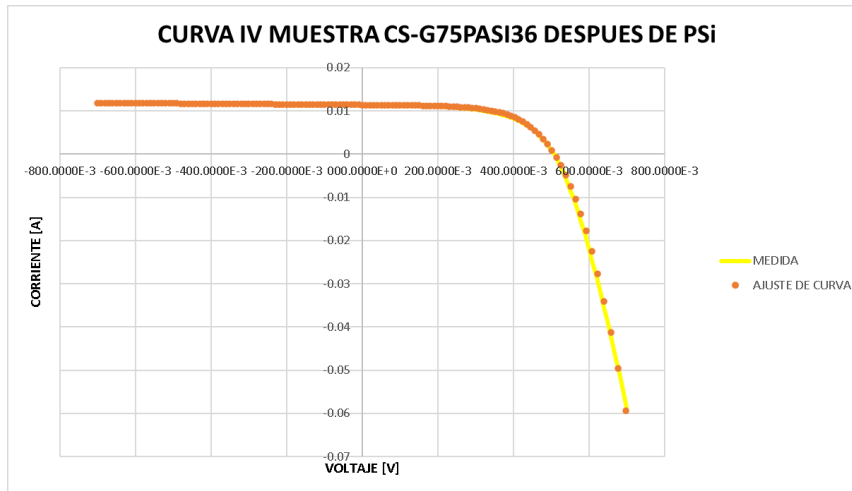


Figura. 44. Curva I-V medida y simulada después del ataque químico muestra CS-G75PASI36.

La figura 45, correspondiente a la muestra CS-G77PASI36 antes del ataque químico, presenta un factor de forma de 62.25% con valores de 1.1 Ohms de  $R_s$ ,  $R_{sh}$  de 1500 Ohms como se aprecia en la tabla 3 del anexo 1.

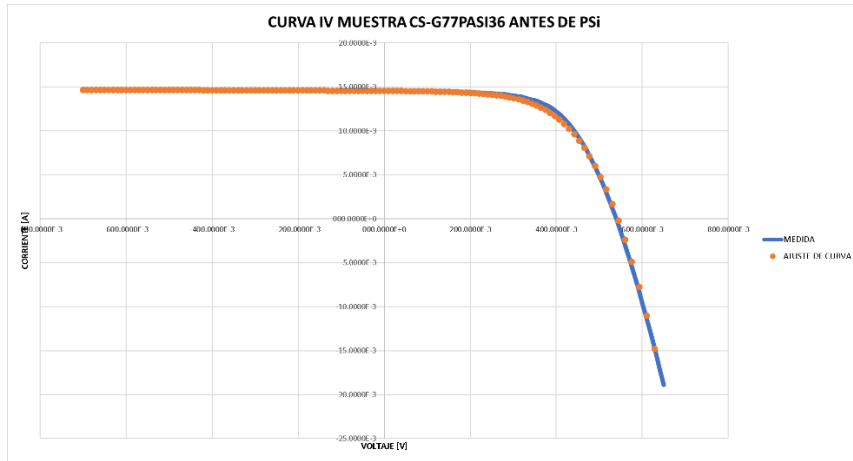


Figura. 45. Curva I-V medida y simulada antes del ataque químico muestra CS-G77PASI36.

La figura 46, correspondiente a la muestra CS-77PASI36 después del ataque químico, presenta un factor de forma de 39% con valores de 8 Ohms de  $R_s$ ,  $R_{sh}$  de 300 Ohms como se aprecia en la tabla 3 del anexo 1.

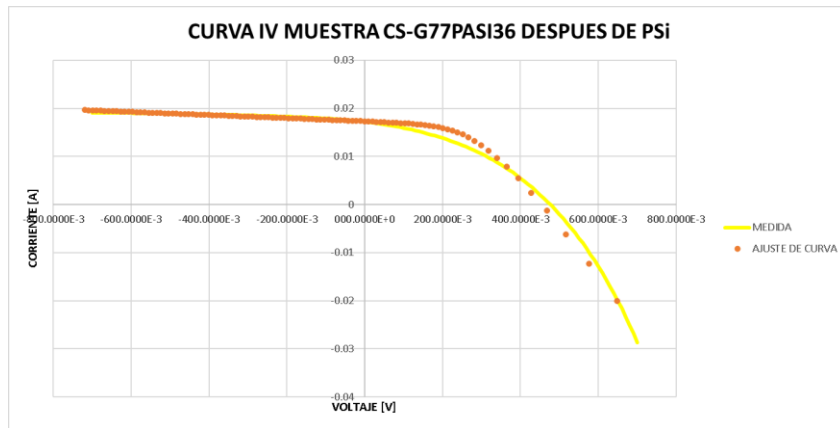


Figura. 46. Curva I-V medida y simulada después del ataque químico muestra CS-G77PASI36.

La figura 47, resume la relación entre el factor de forma y el factor de idealidad del total de las muestras procesadas (tabla 3 anexo1). La gráfica compara los valores del factor de idealidad (que representa la calidad de la unión y el tipo de recombinación de la celda solar) con el factor de forma (asociado a la potencia máxima de la celda solar). Los mecanismos de recombinación deberán

rondar a un factor de idealidad de 1. Un valor grande del factor de idealidad reduce el Voc y por consecuencia el factor de forma.

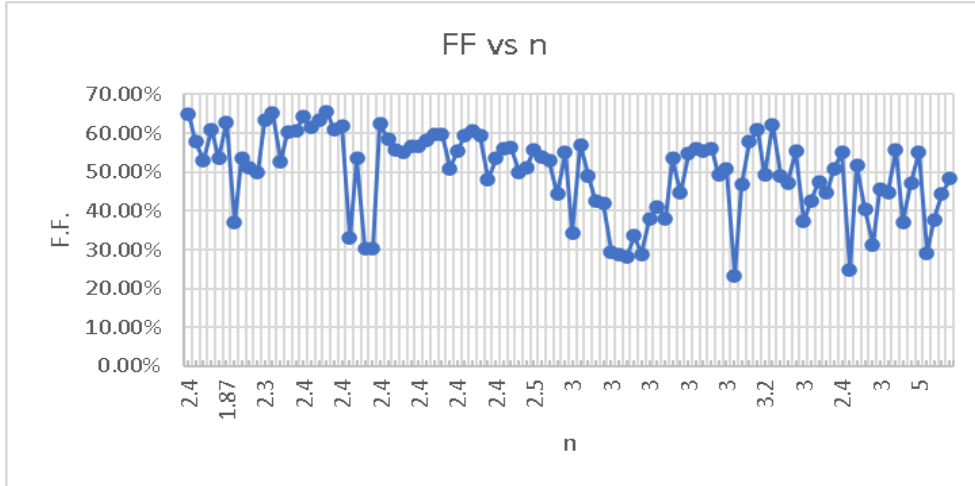


Figura. 47. Factor de forma vs. factor de idealidad.

La figura 48, resume la relación entre la corriente de cortocircuito y el voltaje de circuito abierto del total de las muestras procesadas (tabla 3 anexo1). La gráfica muestra los valores de la corriente de cortocircuito que se debe a la generación y recolección de portadores fotogenerados causados por la incidencia de luz sobre la superficie del semiconductor; es además, la corriente más grande en la celda solar cuando el voltaje es cero.

El voltaje de circuito abierto por su parte corresponde a la polarización de la unión con la corriente fotogenerada. Como se desprende de la ecuación (17), el voltaje de circuito abierto depende de la corriente de saturación del diodo  $I_d$  (relacionada con la recombinación superficial). Por lo que, realmente lo que se aprecia en la gráfica, es una comparativa entre la recolección y recombinación de portadores fotogenerados en la celda solar.

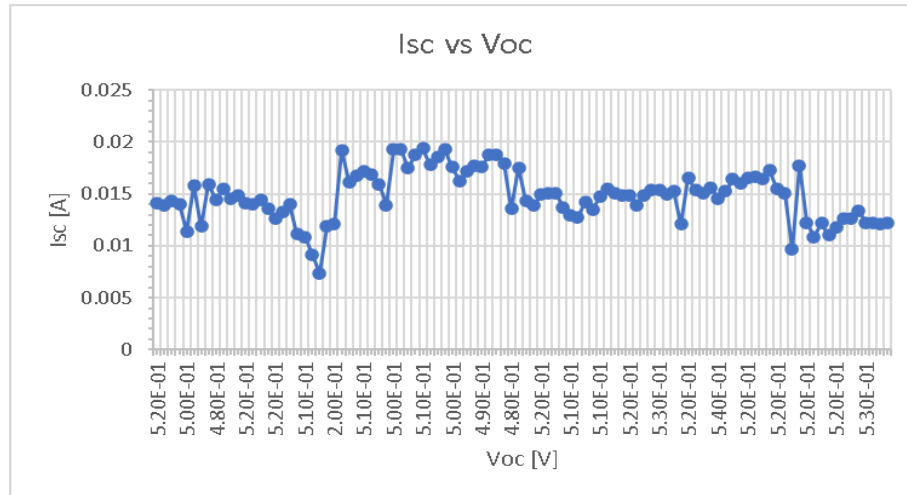


Figura. 48. Corriente de cortocircuito vs. voltaje de circuito abierto

### 5.3 Eficiencia cuántica externa

En este apartado se estudian los resultados arrojados de la relación entre la longitud de onda de la luz incidente y la eficiencia cuántica externa (E.Q.E v. s  $(\lambda)$ ) de las celdas solares sin y con recubrimiento de una película de silicio poroso.

De acuerdo con el resultado presentado en la figura 49, la eficiencia cuántica después de aplicado el recubrimiento aumenta ligeramente a lo largo de todo el espectro, ambas con un máximo alrededor de los 800 nm.

La reducción cerca del ultravioleta se debe a la recombinación de portadores en la superficie, y la reducción cerca del infrarrojo se debe a la poca absorción que se presenta a grandes longitudes de onda; sin embargo, en gran parte del espectro visible se aprecia una eficiencia constante.

El espectro de reflectancia de la muestra teñida con la solución 2, mostró un incremento en la reflectancia que se traduce en un ligero decaimiento de EQE.

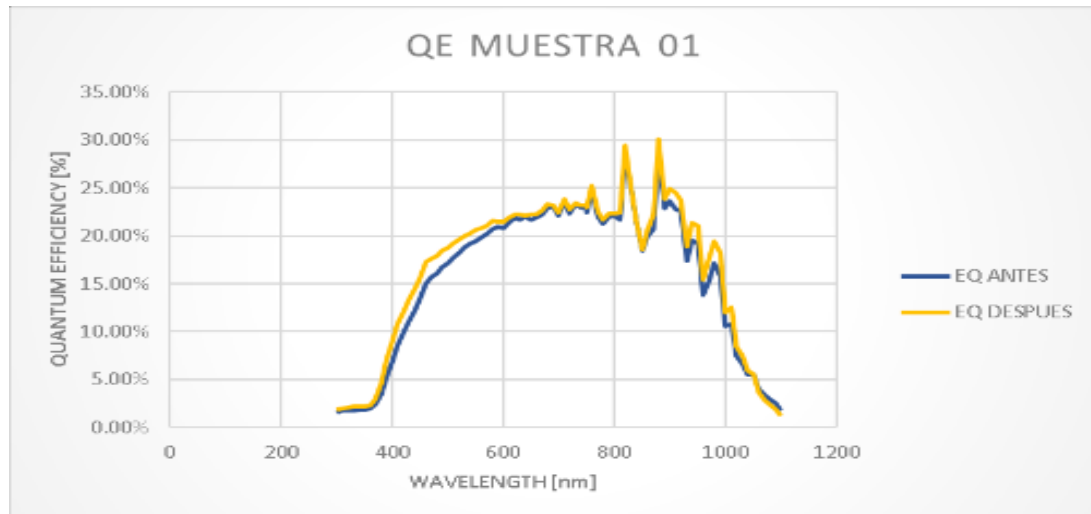


Figura. 49. QE muestra CS-G01PASI36 sol. 2.

La gráfica de la figura 50 (muestra CS-G011PASI36, solución 3, 30 segundos de ataque químico), indica un aumento en un 50% de la eficiencia cuántica en el rango de 400 a 850 nm.

El comportamiento de la eficiencia es similar al de la figura anterior, aunque se nota una pendiente más pronunciada cerca del ultravioleta respecto de la curva amarilla correspondiente a la eficiencia cuántica externa después del ataque químico, posiblemente debida a la pasivación de la superficie. Esto provoca alta recombinación de portadores a esa longitud de onda.

Cabe señalar que, aunque en este caso, la E.Q.E se caracteriza por tener una pendiente más pronunciada en la región cercana al ultravioleta, la región que comprende del azul al naranja tiene un incremento considerable debido a una disminución en la pérdida por reflexión como se puede observar en la figura 20 sección 5.1.



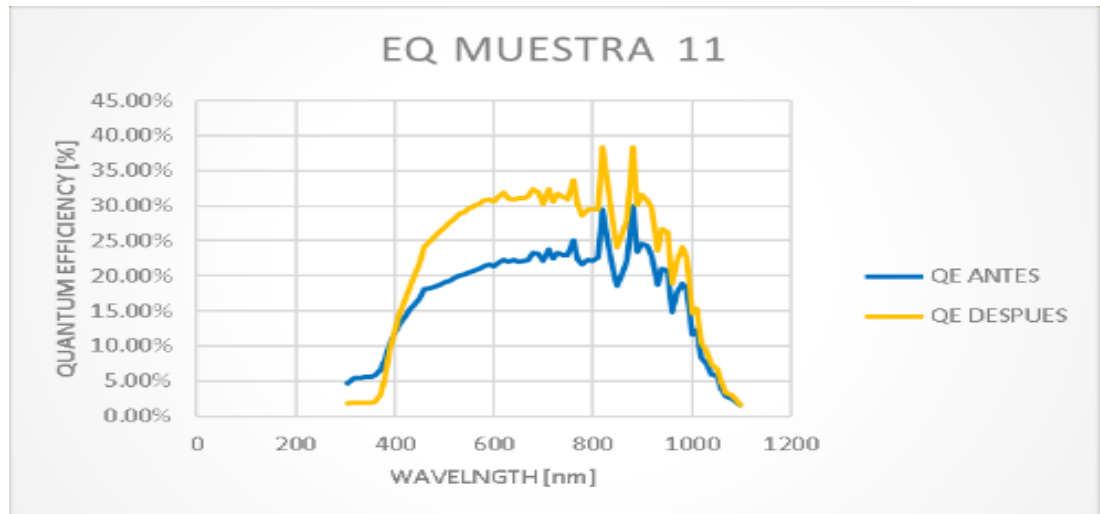


Figura. 50. QE muestra CS-G011PASI36 sol. 3.

Las gráficas de la figura 51, muestran un ligero decaimiento de la eficiencia a lo largo de todo el espectro después de aplicado el recubrimiento.

Este decremento puede atribuirse a una baja longitud de difusión del material; ya que el ataque ocurre en la superficie y en una parte del volumen, puede ocurrir una degradación de las características de la celda, si el silicio poroso se aproxima a la unión, como se puede observar en la gráfica 31 de la curva I-V. La corriente disminuye en un 31%.

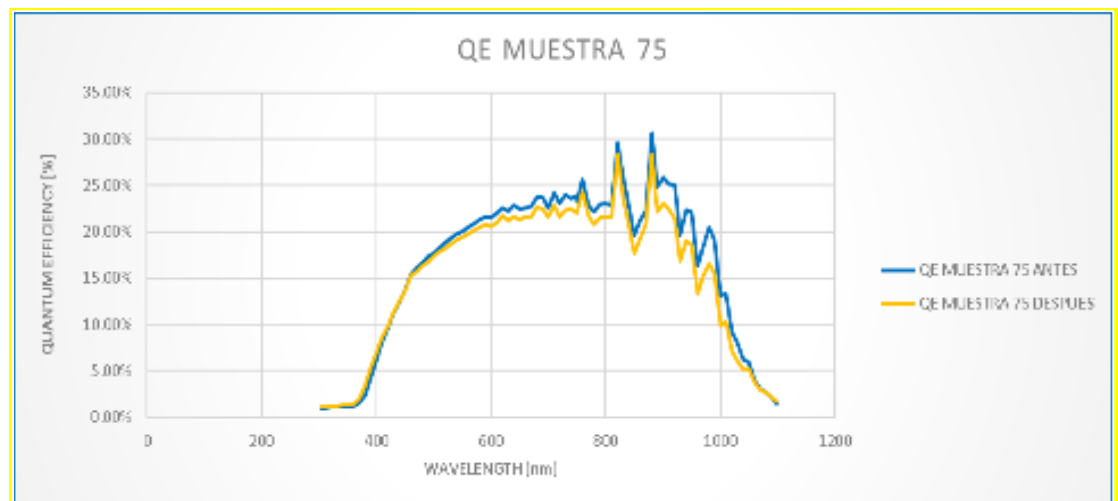


Figura. 51. QE muestra CS-G75PASI36 sol. 2.

La gráfica de la figura 52, muestra un aumento del 5% de la eficiencia de la celda CS-G77PASI36 después de aplicado el recubrimiento y hasta aproximadamente los 850 nm. El incremento en la parte visible del espectro puede atribuirse a una baja reflexión (ver figura 20). Sin embargo, el factor de forma se ve reducido considerablemente de 60% a 39% aprox., lo que se traduce en pérdida de potencia de la celda.

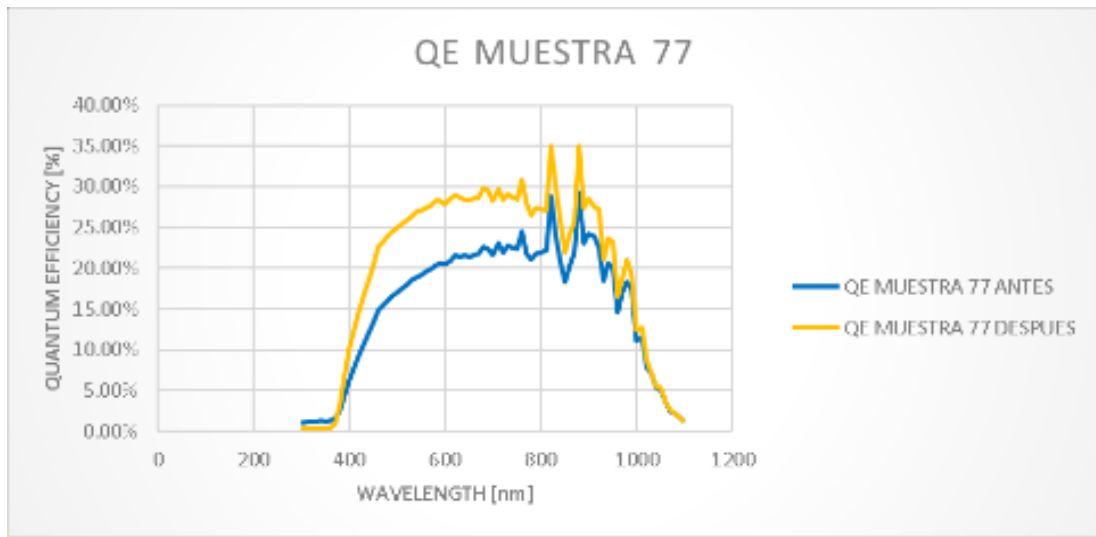


Figura. 52. QE muestra CS-G77PASI36 sol. 3.

La gráfica de la figura 53 (muestra CS-G018PASI36, solución de ataque no. 1, tiempo de ataque de 30 segundos), muestra un leve decremento de la eficiencia después del ataque en alrededor de un 2%.

Al analizar la curva de reflectancia (figura 21) se observa un pequeño decremento en la reflectancia en el rango de 200 a 350 nm aprox, sin embargo, es idéntica a la reflectancia obtenida antes del ataque para el resto del espectro.

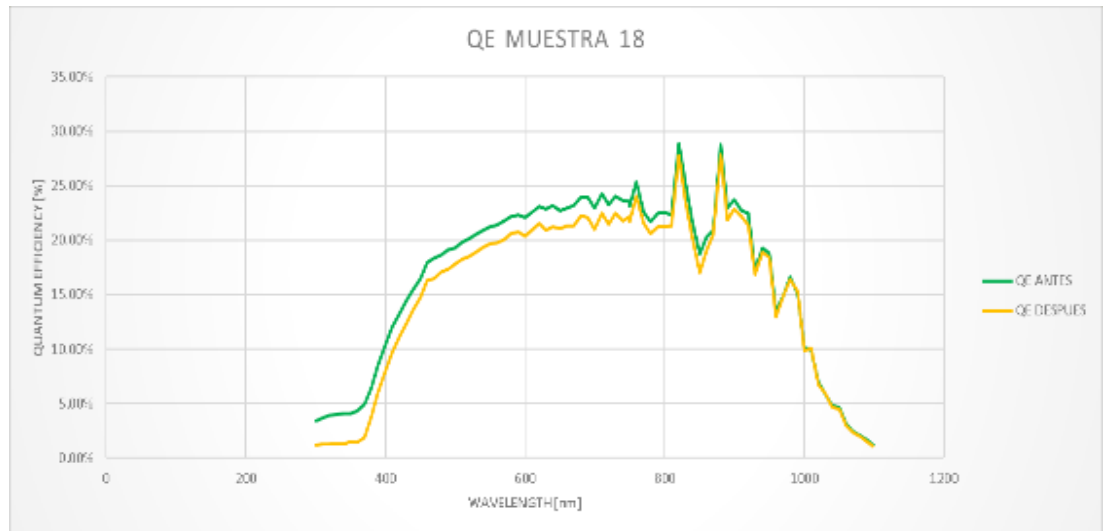


Figura. 53. QE muestra CS-G18PASI36 sol. 1.

La gráfica de la figura 54 (muestra CS-G019PASI36, solución de ataque no. 1, tiempo de ataque 30 segundos), muestra un leve decremento de la eficiencia E.Q.E después del ataque, en alrededor de un 1% a lo largo de todo el espectro.

Se observa una tendencia de reducción en el rango visible del espectro, posiblemente debido a una baja reflectancia.

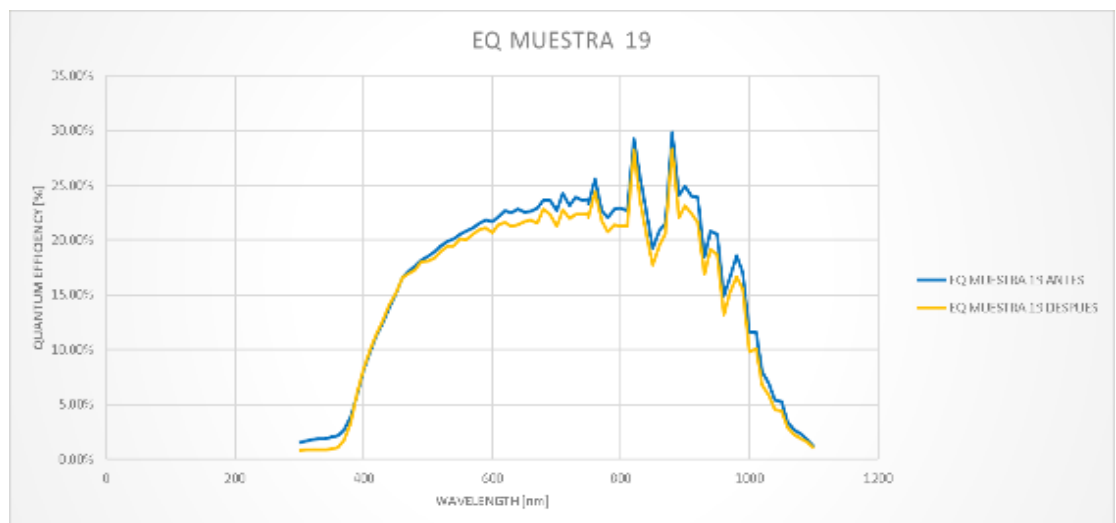
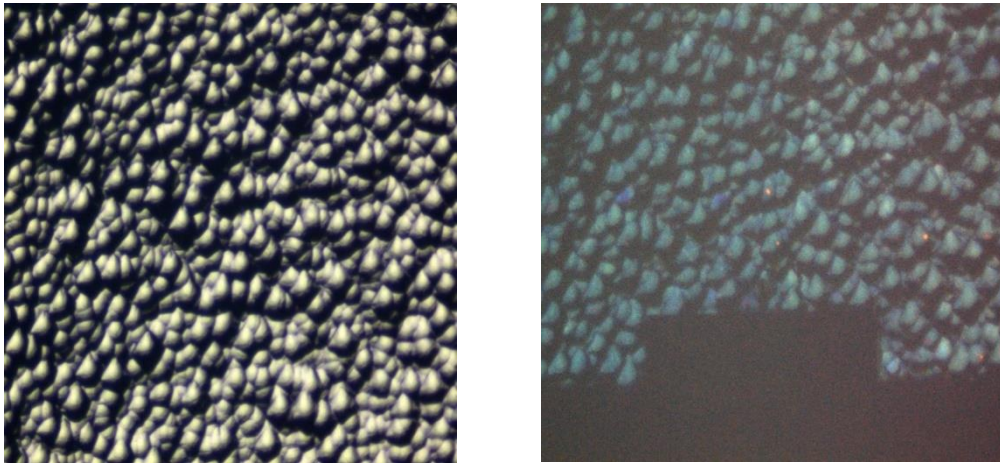


Figura. 54. QE muestra CS-G19PASI36 sol. 1.

## 5.4 Microscopia de Fuerza Atómica

La Fig. 55, corresponde a una micrografía en 2D de la superficie de dos muestras de silicio, con y sin ataque químico, las cuales fueron obtenidas por microscopia óptica. Si se observa con detalle, en la parte derecha de la figura, la micrografía muestra la superficie teñida, que se aprecia un poco más oscura en comparación con la figura de la izquierda, esto debido a la reducción de la reflexión. El color de la superficie cambia con el teñido, y se puede observar en la figura (derecha) con tonalidades azules.



*Figura. 55. Micrografía vista en planta. Izq. Superficie de silicio sin recubrimiento. Der. Superficie de silicio con recubrimiento PSi.*

La figura 56, muestra las micrografías 3D de 10 micras y 30 micras por lado respectivamente, obtenidas por AFM (modo semicontacto) antes del ataque químico. Las imágenes fueron procesadas mediante software (image analysis) para mejorar la calidad de la imagen. Se observa una superficie regular sin depresiones con ciertas irregularidades (al centro) propias del material.

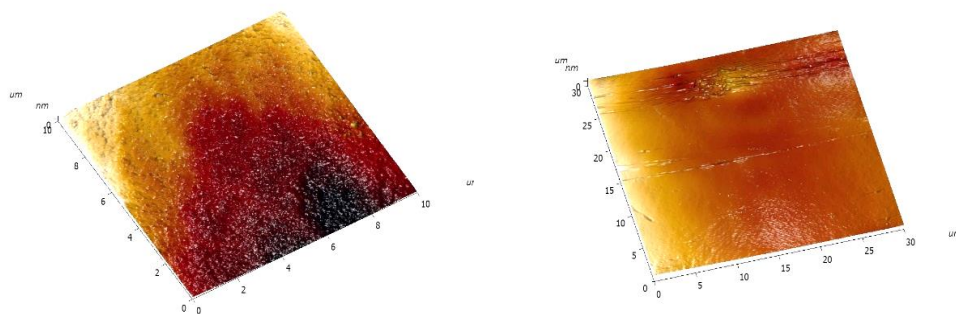


Figura. 56. Micrografía AFM 3D. Izq: 10 micras, Der: 30 micras.

La figura 57, muestra las micrografías 3D de 10 y 30 micras respectivamente, las cuales fueron obtenidas por AFM (modo semicontacto) después del ataque químico. Nuevamente, las imágenes fueron procesadas mediante software para mejorar la calidad. Se observa una superficie irregular con depresiones; sin embargo, no es posible apreciar los poros en la superficie a esta escala.

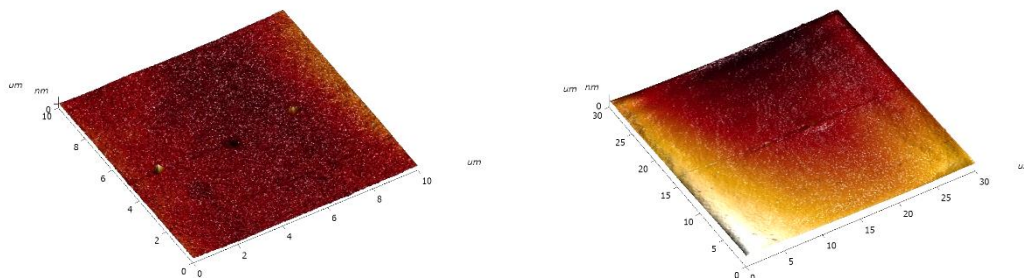


Figura. 57. Micrografía AFM 3D. Izq: 10 micras, Der: 30 micras.

La dispersión de las depresiones se puede observar en la figura 58. La imagen en 3D de 20 micras (figura 58 (izq)) indica una leve asimetría. La capa porosa formada por teñido químico parece muy homogénea a simple vista y aparentemente reproducible

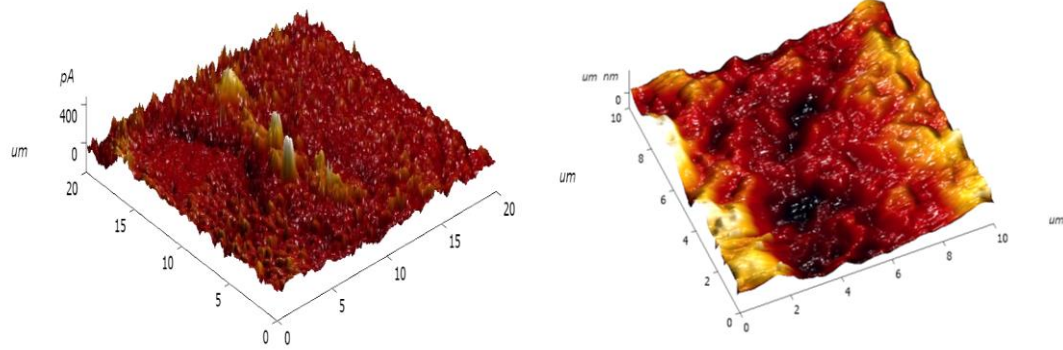


Figura. 58. Micrografía 3D relieve de la muestra después del ataque químico. Izq: 20 micras, Der: 10 micras.

## Capítulo 6

### Conclusión

El trabajo realizado refleja una metodología para optimizar la síntesis de recubrimientos antirreflejantes de PSi, principalmente en el rango visible del espectro electromagnético, mediante la técnica de teñido químico.

La identificación de las variables necesarias para reducir la reflectancia se realizó mediante espectroscopia de reflectancia especular. Se presenta un estudio de la reflexión de la superficie, en particular en el rango UV-Vis, y de ello se desprende que la reflectancia promedio se reduce sustancialmente y sin degradar los contactos al grabar el silicio cristalino y formar películas de Psi, considerando concentraciones mayores de fluoruro que las de oxidante. Por los resultados obtenidos de los espectros de reflectancia, podemos concluir que el silicio porosificado puede aumentar significativamente la absorción de energía cercana al ultravioleta.

Se infiere que los procesos de óxido reducción (formación de la capa de óxido y su disolución) en la superficie de c-Si forman poros, estos ayudan a la canalización de la luz al entrar en ellos, donde múltiples reflexiones internas hacen que la luz se absorba eficientemente.

Se analizó el comportamiento de las características corriente- voltaje, con respecto a la incidencia de luz bajo simulación solar en condiciones estándar. Al respecto se concluye, que para aumentar el tiempo de vida de los portadores fotogenerados es indispensable no exceder el tiempo de grabado de 30 segundos durante el teñido, pues excediendo ese tiempo, el silicio poroso puede

alcanzar la región de la unión P-N y afectar la barrera de potencial disminuyendo sustancialmente la eficiencia, lo que se refleja en una disminución en la corriente de cortocircuito.

Podemos estimar que la sensibilidad del recubrimiento de PSi es mejor que la del volumen de silicio en longitudes de onda de rango de (450 - 750 nm).

## **Trabajos futuros**

Como trabajo a futuro puede realizarse un estudio sobre el proceso de formación piramidal después del ataque químico, y la intervención de estas pirámides como filtros ópticos, para lo cual se puede hacer el estudio por SEM. También seguir experimentando con soluciones más eficientes que permitan una mejor óxido reducción de la capa superficial de silicio para la texturización con PSi.



## Referencias

- [1] “Combustibles fósiles”. [En línea]. Disponible en:  
<https://www.culturarecreacionydeporte.gov.co/es/bogotanitos/biodiverciudad/combustibles-fosiles> [Accedido: 23-feb-2023].
- [2] IRENA. “Costos de generación de energía renovable en 2019”. 2020 [En línea]. Disponible en:  
[https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Jun/IRENA\\_Costs\\_2019\\_ES.PDF?la=en&hash=A74F5A6BA01D86C175702B4F27C7086AF5D23F99#:~:text=Las%20subastas%20y%20los%20contratos,de%20combustibles%20f%C3%B3siles%20m%C3%A1s%20barato%2C](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Jun/IRENA_Costs_2019_ES.PDF?la=en&hash=A74F5A6BA01D86C175702B4F27C7086AF5D23F99#:~:text=Las%20subastas%20y%20los%20contratos,de%20combustibles%20f%C3%B3siles%20m%C3%A1s%20barato%2C) [Accedido: 23-feb-2023].
- [3] IEA. “Global Energy Review: CO2 Emissions in 2020”. 2021. [En línea]. Disponible en: <https://www.iea.org/articles/global-energy-review-co2-emissions-in-2020> [Accedido: 23-feb-2023].
- [4] Regalado, E., Mathews, N. y Mathew X. “Superando los límites de las celdas solares”. 2022. [En línea]. Disponible en:  
[https://www.ier.unam.mx/noticiasier/Superand\\_los\\_limites\\_de\\_las\\_celdas\\_solares.html](https://www.ier.unam.mx/noticiasier/Superand_los_limites_de_las_celdas_solares.html) [Accedido: 23-feb-2023].
- [5]” Silicio”. [En línea]. Disponible en:  
<https://www.quimica.es/enciclopedia/Silicio.html> [Accedido: 23-feb-2023].
- [6] Honsberg C., and Bowden, S. “Recubrimiento Antirreflectante” Disponible en:  
<https://www.pveducation.org/es/fotovoltaica/5-dise%C3%B1o-de-c%C3%A9lulas-de-silicio/recubrimiento-antirreflectante> [Accedido: 23-feb-2023].

- [7] Uhlir Jr, A., "Electrolytic shaping of germanium and silicon". *Bell System Technical Journal*, vol. 35(no.2), pp. 333-347, 1956.
- [8] Canham, L., "Silicon quantum wire array fabrication by electrochemical and chemical dissolution of wafers". *Applied physics letters*, vol.57(no.10), pp. 1046-1048, 1990.
- [9] Canham, L., ed. "Handbook of porous silicon". *Berlin, Germany: Springer International Publishing*, pp. 6-7, 2014.
- [10] Theiss, W., "Optical properties of porous silicon". *Surface Science Reports vol. 29*, pp. 91-192, 1997.
- [11] Schirone, L., Sotgiu G., and Califano F. P., "Chemically etched porous silicon as an anti-reflection coating for high efficiency solar cells". *Thin solid films vol. 297*, pp. 296-298, 1997.
- [12] Dimova-Malinovska, D. "Application of stain etched porous silicon in c-Si solar cells". *Opto-Electronics Review*, vol. 8, no.4, pp.353-355, 2000.
- [13] Guerrero-Lemus, R., Ben-Hander, F. A., Vázquez, L., Hernández-Rodríguez, C., & Martínez-Duart, J. M. "Photoluminescence and AFM characterisation of the initial stages of porous silicon stain etching". *physica status solidi vol. 197*(no.2), pp. 409-413, 2003.
- [14] Tsujino, K., & Matsumura, M.. "Formation of a low reflective surface on crystalline silicon solar cells by chemical treatment using Ag electrodes as the catalyst". *Solar energy materials and solar cells*, vol. 90(no.10), pp. 1527-1532, 2006.
- [15] Ramizy, A., et al. "The effect of porosity on the properties of silicon solar cell." *Microelectronics International*, (2010).
- [16] Chaoui, R., Bedra M., and Yasmine Si A., "Porous Silicon Antireflection Coating for Solar Cells Using Chemical Etching in HF-FeCl<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O." *International Journal of Engineering Research in Africa*. Vol. 22. Trans Tech Publications Ltd, 2016.

- [17] Archer, R. J. "Stain films on silicon." *Journal of Physics and Chemistry of Solids* vol. 14, pp.104-110, 1960.
- [18] Turner, D. R. "On the mechanism of chemically etching germanium and silicon." *Journal of the electrochemical Society* vol.107 no.10, p.810, 1960.
- [19] Vázquez, É., et al. "Porous silicon formation by stain etching." *Thin Solid Films* vol. 388, no.1-2, pp.295-302, 2001.
- [20] Kolasinski, W. "Charge transfer and nanostructure formation during electroless etching of silicon." *The Journal of Physical Chemistry C* vol.114, no.50, pp. 22098-22105, 2010.
- [21] Kolasinski, W., Gogola J., and Barclay W., "Test of Marcus Theory Predictions for Electroless Etching of Silicon." *The Journal of Physical Chemistry C* vol.116, no.40, pp.21472-21481, 2012.
- [22] Parbukov, A., et al. "The production of a novel stain-etched porous silicon, metallization of the porous surface and application in hydrocarbon sensors." *Materials Science and Engineering: C* vol. 15, no.1-2 , pp.121-123, 2001.
- [23] Kolasinski, W., Mills D., and Nahidi M. "Laser assisted and wet chemical etching of silicon nanostructures." *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films* vol. 24, no. 4, pp.1474-1479, 2006.
- [24] Turner, R. "Electropolishing silicon in hydrofluoric acid solutions." *Journal of the electrochemical Society* vol.105, no.7, p.402, 1958.
- [25] Memming, R., and Schwandt, G. "Anodic dissolution of silicon in hydrofluoric acid solutions." *Surface science* vol 4, no.2, pp.109-124, 1996.
- [26] Fonthal Rico, Faruk. "Fabricación y Caracterización de dispositivos

basados en Silicio Poroso sobre c-Si. Aplicaciones eléctricas, Ópticas y Térmicas.” Diss. Universitat Rovira i Virgili, 2006.

[27] Ramirez, F., García, Godofredo et al. “El Silicio Poroso”, 2023. [En línea]. <https://www.cyd.conacyt.gob.mx/?p=articulo&id=107> [Accedido: 23-feb-2023].

[28] Wangsness, R. "Electromagnetic Fields." *Electromagnetic Fields* .pp.495-521, 1986.

[29] Acquaroli, L. “Propiedades ópticas de silicio poroso nanoestructurado.” Diss. 2012.[En línea]. Disponible en: <https://bibliotecavirtual.unl.edu.ar:8443/bitstream/handle/11185/309/part2.pdf?sequence=2&isAllowed=y>. [Accedido: 23-feb-2023]

[30] Gutiérrez, S. “Estudio de ondas longitudinales en medios porosos.” MS thesis. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, pp.31-32, 2016. [En línea]. Disponible en: <http://www.ifuap.buap.mx/~omeza/assets/sandraop.pdf>. [Accedido: 23-feb-2023].

[31] Cruz, J. Rodríguez, et al. "Determinación de los parámetros de una celda solar y su análisis comparativo con el modelo de un solo diodo mediante simulación en Ltspice." [En línea]. Disponible en: <https://snes45.anes.org.mx/wp-content/uploads/2021/05/DETERMINACION-DE-LOS-PARAMETROS-DE-UNA-CELDA-SOLAR-79a55cf4.pdf> [Accedido: 23-feb-2023].

[32] “La célula solar.” [En línea]. Disponible en: [http://www.ujaen.es/investiga/solar/07cursosolar/home\\_main\\_frame/03\\_celula/01\\_basico/3\\_celula\\_04.htm#:~:text=Corriente%20de%20iluminaci%C3%B3n%20debidamente,entregar%20energ%C3%ADa%20a%20la%20carga](http://www.ujaen.es/investiga/solar/07cursosolar/home_main_frame/03_celula/01_basico/3_celula_04.htm#:~:text=Corriente%20de%20iluminaci%C3%B3n%20debidamente,entregar%20energ%C3%ADa%20a%20la%20carga). [Accedido: 23-feb-2023].

[33] Honsberg C., and Bowden, S. “Eficiencia cuántica”. Disponible en: [https://www.pveducation.org/es/fotovoltaica/4-operaci%C3%B3n-de-c%C3%A9lulasolar/eficienciacu%C3%A1ntica#:~:text=La%20%22eficiencia%20cu%C3%A1ntica%22%20\(QE,de%20onda%20o%20de%20energ%C3%ADa.](https://www.pveducation.org/es/fotovoltaica/4-operaci%C3%B3n-de-c%C3%A9lulasolar/eficienciacu%C3%A1ntica#:~:text=La%20%22eficiencia%20cu%C3%A1ntica%22%20(QE,de%20onda%20o%20de%20energ%C3%ADa.) [Accedido: 23-feb-2023].

[34] Pratiyush, A., et al. "Advances in Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> solar-blind UV photodetectors." *Gallium Oxide*. Elsevier, pp.369-399, 2019.

[35] Horst F., Jailbird. CC BY-SA 3.0. “Electromagnetic spectrum.” 2005. [En línea]. Disponible en: [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/07/Electromagnetic\\_spectrum\\_-de.svg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/07/Electromagnetic_spectrum_-de.svg). [Accedido: 25-feb-2023].

[36] Honsberg C., and Bowden, S. “Respuesta espectral”. Disponible en: <https://www.pveducation.org/es/fotovoltaica/4-operaci%C3%B3n-de-c%C3%A9lula-solar/respuesta-espectral> [Accedido: 23-feb-2023].

[37] Pedrotti, S.J. and Pedrotti, S., “Introduction to optics”, Prentice Hall, 2nd edition, 1993.

## Bibliografía

Canham, L. "Bioactive silicon structure fabrication through nanoetching techniques". *Advanced Materials*, vol.7, no. 12, pp.1033-1037, (1995).

Ressine, A., Marko-Varga, G., & Laurell, T. "Porous silicon protein microarray technology and ultra-/superhydrophobic states for improved bioanalytical readout". *Biotechnology annual review*, vol.13, pp.149-200, 2007.

Ouyang, H., & Fauchet, P. M. "Biosensing using porous silicon photonic bandgap structures". In *Photonic Crystals and Photonic Crystal Fibers for Sensing Applications* vol. 6005, p. 600508. International Society for Optics and Photonics, 2005.

Halimaoui A. "Porous silicon formation by anodization", in *Properties of Porous Silicon*. Canham, L. T., Institution of Engineering and Technology, London, pp. 12–22, 1997.

Anexo A

Datos obtenidos bajo simulación solar a  $550\text{W}/\text{cm}^2$  del total de las muestras procesadas antes del ataque químico con base en la ecuación característica presentada en el capítulo 3.

Tabla 3. Datos de simulación  $I_{sc}$ ,  $V_{oc}$ ,  $P_m$ ,  $FF$ ,  $R_{sh}$ ,  $R_s$ ,  $n$ ,  $I_0$  de las muestras seleccionadas antes del ataque químico, bajo simulación solar de  $550\text{ W}/\text{m}^2$ .

CELDA FV	$I_{sc}$ [A]	$V_{oc}$ [V]	$P_m$ [W]	FF	$R_{sh}$	$R_s$	$n$	$I_0$
CS-G01PASI36	1.4072E-02	5.2000E-01	4.7534E-03	64.96%	1.5000E+03	1.1000E+00	2.4000E+00	1.1000E-05
CS-G02PASI36	1.3865E-02	4.8000E-01	3.8511E-03	57.87%	1.4000E+03	1.3000E+00	2.9500E+00	9.0000E-05
CS-G03PASI36	1.4368E-02	4.8000E-01	3.6564E-03	53.02%	1.5000E+03	1.6500E+00	2.8900E+00	8.3000E-05
CS-G04PASI36	1.4054E-02	5.0000E-01	4.2867E-03	61.00%	1.8000E+03	1.3000E+00	2.4000E+00	1.5000E-05
CS-G05PASI36	1.1404E-02	5.0000E-01	3.0525E-03	53.53%	1.5000E+03	1.5000E+00	2.6000E+00	2.9900E-05
CS-G06PASI36	1.5799E-02	5.2000E-01	5.1656E-03	62.88%	1.2000E+03	1.8000E+00	1.8700E+00	2.0000E-06
CS-G07PASI36	1.1860E-02	4.6000E-01	2.0110E-03	37.00%	2.0000E+02	2.0000E+00	4.0000E+00	4.5000E-04
CS-G08PASI36	1.5963E-02	5.0000E-01	4.2831E-03	53.66%	1.5000E+03	1.8000E+00	2.8000E+00	9.0000E-05
CS-G09PASI36	1.4443E-02	4.8000E-01	3.5373E-03	51.02%	1.5000E+03	2.0000E+00	2.8000E+00	9.0000E-05
CS-G010PASI36	1.5530E-02	4.8000E-01	3.7163E-03	49.85%	1.5000E+03	2.0000E+00	2.8000E+00	9.0000E-05
CS-G011PASI36	1.4508E-02	5.2000E-01	4.7797E-03	63.36%	1.5000E+03	1.1000E+00	2.3000E+00	9.0000E-06
CS-G012bisPASI36	1.4870E-02	5.2000E-01	5.0406E-03	65.19%	1.5000E+03	1.0000E+00	2.4000E+00	1.0000E-05
CS-G013PASI36	1.4149E-02	5.2000E-01	3.8823E-03	52.77%	1.5900E+03	1.2100E+00	2.5700E+00	2.5000E-05
CS-G014PASI36	1.4065E-02	5.2000E-01	4.4228E-03	60.47%	1.5000E+03	1.0000E+01	3.7000E+00	1.8000E-04
CS-G015PASI36	1.4476E-02	5.2000E-01	4.5695E-03	60.70%	1.5000E+03	1.3000E+00	2.6000E+00	2.6000E-05
CS-G016PASI36	1.3610E-02	5.3000E-01	4.6346E-03	64.25%	1.5000E+03	1.9000E+00	2.4000E+00	1.1000E-05
CS-G017PASI36	1.2640E-02	5.2000E-01	4.0410E-03	61.48%	1.5000E+03	2.0500E+00	2.4000E+00	1.1000E-05
cs-g018PASI36	1.3272E-02	5.2000E-01	4.3754E-03	63.40%	1.5000E+03	2.2000E+00	2.4000E+00	1.3000E-05
CS-G019PASI36	1.4043E-02	5.3000E-01	4.8780E-03	65.54%	1.5000E+03	6.3000E-01	2.4000E+00	1.1000E-05
CS-G20PASI36	1.1132E-02	5.1000E-01	3.4645E-03	61.03%	1.5000E+03	2.0000E+00	2.4000E+00	9.9000E-06
CS-G21PASI36	1.0854E-02	5.1000E-01	3.4314E-03	61.99%	1.5000E+03	1.9300E+00	2.4000E+00	9.7000E-06
CS-G22PASI36	9.1121E-03	1.8000E-01	5.3985E-04	32.91%	1.5000E+03	6.0000E+00	8.0000E-01	3.6000E-05
CS-G23PASI36	7.3601E-03	4.8000E-01	1.8892E-03	53.48%	1.5000E+03	2.3000E+00	2.5000E+00	1.6000E-05
CS-G24PASI36	11.9390E-3	140.0000E-3	496.2833E-6	30.30%	2.000E+02	5.4000E+00	2.5000E+0	15.0000E-3
CS-G25PASI36	1.2104E-02	2.0000E-01	7.3356E-04	30.30%	1.5000E+03	4.0000E+00	2.4000E+00	1.1000E-05
CS-G26PASI36	1.9240E-02	5.3000E-01	6.3657E-03	62.43%	1.5000E+03	1.5000E+00	2.4000E+00	1.7500E-05
CS-G27PASI36	1.6135E-02	4.9000E-01	4.6283E-03	58.54%	1.5000E+03	1.5000E+00	2.4000E+00	2.3000E-05
CS-G28PASI36	1.6773E-02	5.0000E-01	4.6726E-03	55.72%	1.5000E+03	1.5000E+00	2.5000E+00	2.7000E-05
CS-G29PASI36	1.7217E-02	5.1000E-01	4.8503E-03	55.24%	1.5000E+03	2.0000E+00	2.4000E+00	1.6000E-05
CS-G30PASI36	1.6887E-02	5.2000E-01	4.9867E-03	56.79%	1.5000E+03	1.6000E+00	2.5000E+00	2.2500E-05
CS-G31PASI36	1.5941E-02	4.8000E-01	4.3383E-03	56.70%	1.5000E+03	1.6000E+00	2.4000E+00	2.9000E-05
CS-G32PASI36	1.3949E-02	4.8000E-01	3.8902E-03	58.10%	1.5000E+03	1.6000E+00	2.4000E+00	2.4000E-05
CS-G33PASI36	1.9299E-02	5.0000E-01	5.7648E-03	59.74%	1.5000E+03	1.6000E+00	2.4000E+00	2.5000E-05
CS-G34PASI36	1.9299E-02	5.0000E-01	5.7648E-03	59.74%	1.5000E+03	1.8000E+00	2.4000E+00	2.8000E-05
CS-G35PASI36	1.7481E-02	4.9000E-01	4.3588E-03	50.89%	1.5000E+03	2.6000E+00	2.7000E+00	9.4000E-05

CS-G36PASI36	1.8821E-02	5.1000E-01	5.3092E-03	55.31%	1.5000E+03	2.7000E+00	2.4000E+00	3.1000E-05
CS-G37PASI36	1.9411E-02	5.1000E-01	5.8818E-03	59.41%	1.5000E+03	1.7000E+00	2.4000E+00	2.5000E-05
CS-G38PASI36	1.7816E-02	5.3000E-01	5.7151E-03	60.53%	1.5000E+03	1.1000E+00	2.4000E+00	1.5000E-05
CS-G39PASI36	1.8568E-02	5.1000E-01	5.6245E-03	59.40%	1.5000E+03	1.3000E+00	2.4000E+00	1.8000E-05
CS-G40PASI36	1.9332E-02	4.8000E-01	4.4652E-03	48.12%	1.5000E+03	2.7000E+00	3.0000E+00	2.1000E-04
CS-G41PASI36	1.7563E-02	5.0000E-01	4.7013E-03	53.54%	1.5000E+03	2.0000E+00	2.4000E+00	3.0000E-05
CS-G42PASI36	1.6219E-02	4.9000E-01	4.4630E-03	56.16%	1.5000E+03	1.8000E+00	2.4000E+00	2.7000E-05
CS-G43PASI36	1.7200E-02	5.0000E-01	4.8350E-03	56.22%	1.5000E+03	1.6000E+00	2.4000E+00	2.1000E-05
CS-G44PASI36	1.7771E-02	4.7000E-01	4.1719E-03	49.95%	1.5000E+03	1.7000E+00	2.9500E+00	1.6000E-04
CS-G45PASI36	1.7643E-02	4.9000E-01	4.4198E-03	51.13%	1.5000E+03	1.3000E+00	3.0000E+00	1.3000E-04
CS-G46PASI36	1.8813E-02	5.2000E-01	5.4659E-03	55.87%	1.5000E+03	1.6000E+00	2.5000E+00	3.0000E-05
CS-G47PASI36	1.8815E-02	5.1000E-01	5.1671E-03	53.85%	1.5000E+03	1.8000E+00	2.4000E+00	2.5000E-05
CS-G48PASI36	1.7965E-02	5.1000E-01	4.8505E-03	52.94%	1.5000E+03	2.7000E+00	2.6000E+00	5.5000E-05
CS-G49PASI36	1.3550E-02	4.8000E-01	2.8791E-03	44.27%	1.5000E+03	7.0000E+00	3.5000E+00	5.2000E-04
CS-G50PASI36	1.7527E-02	5.4000E-01	5.2074E-03	55.02%	1.5000E+03	5.5000E+00	2.4000E+00	3.5000E-05
CS-G51PASI36	1.4307E-02	5.0000E-01	2.4595E-03	34.38%	1.0000E+03	1.4000E+01	3.0000E+00	9.0000E-04
CS-G52PASI36	1.3857E-02	5.3000E-01	4.1865E-03	57.00%	1.5000E+03	3.4000E+00	2.4000E+00	1.7000E-05
CS-G53PASI36	1.4944E-02	5.2000E-01	3.8083E-03	49.01%	2.5000E+03	7.0000E+00	2.6000E+00	8.4000E-05
CS-G54PASI36	1.5109E-02	5.1000E-01	3.2867E-03	42.65%	2.5000E+03	8.5000E+00	3.5000E+00	5.6000E-04
CS-G55PASI36	1.5115E-02	5.2000E-01	3.2916E-03	41.88%	1.5000E+03	1.0000E+01	3.2000E+00	4.6000E-04
CS-G56PASI36	1.3657E-02	5.3000E-01	2.1357E-03	29.51%	1.5000E+03	1.8000E+01	3.0000E+00	8.5000E-04
CS-G57PASI36	1.2984E-02	5.1000E-01	1.9120E-03	28.87%	1.5000E+03	1.1000E+00	4.0000E+00	1.1000E-05
CS-G58PASI36	1.2731E-02	4.9000E-01	1.7500E-03	28.05%	1.5000E+03	1.1000E+00	2.4000E+00	1.1000E-05
CS-G59PASI36	1.4260E-02	5.2000E-01	2.4911E-03	33.59%	1.5000E+03	1.7000E+01	2.4000E+00	5.5000E-04
CS-G60PASI36	1.3450E-02	5.1000E-01	1.9839E-03	28.92%	5.0000E+02	2.0000E+01	3.0000E+00	1.5000E-03
CS-G61PASI36	1.4744E-02	5.1000E-01	2.8513E-03	37.92%	1.5000E+03	1.2000E+01	3.0000E+00	5.5000E-04
CS-G62PASI36	1.5529E-02	5.2000E-01	3.3233E-03	41.15%	1.5000E+03	1.0000E+01	3.0000E+00	4.5000E-04
CS-G63PASI36	1.5027E-02	5.2000E-01	2.9700E-03	38.01%	1.0000E+03	1.3000E+01	3.0000E+00	6.5000E-04
CS-G64PASI36	1.4817E-02	5.4000E-01	4.2852E-03	53.56%	2.3000E+03	6.5000E+00	2.4000E+00	3.2000E-05
CS-G65PASI36	1.4839E-02	5.2000E-01	3.4394E-03	44.57%	4.0000E+03	3.0000E+00	9.0000E+00	1.9000E-03
CS-G66PASI36	1.3930E-02	5.4000E-01	4.1152E-03	54.71%	5.0000E+03	5.0000E+00	3.0000E+00	8.5150E-05
CS-G67PASI36	1.4863E-02	5.3000E-01	4.4131E-03	56.02%	4.0000E+03	4.7000E+00	2.8000E+00	6.5000E-05
CS-G68PASI36	1.5357E-02	5.3000E-01	4.5066E-03	55.37%	3.5000E+03	4.2000E+00	3.0000E+00	9.5000E-05
CS-G69PASI36	1.5405E-02	5.3000E-01	4.5842E-03	56.15%	5.0000E+03	3.5000E+00	3.0000E+00	8.8500E-05
CS-G70PASI36	1.4989E-02	5.3000E-01	3.9126E-03	49.25%	4.0000E+03	7.0000E+00	3.0000E+00	1.8000E-04
CS-G71PASI36	1.5317E-02	5.1000E-01	3.9665E-03	50.78%	4.0000E+03	5.0000E+00	3.0000E+00	1.5000E-04
CS-G72PASI36	1.2080E-02	5.4000E-01	1.5182E-03	23.27%	0.0000E+00	1.1000E+00	2.4000E+00	1.1000E-05
CS-G73PASI36	1.6596E-02	5.2000E-01	4.0380E-03	46.79%	2.0000E+03	7.2000E+00	2.8000E+00	1.9000E-04
CS-G74PASI36	1.5357E-02	5.5000E-01	4.8961E-03	57.97%	5.0000E+03	2.0000E+00	4.0000E+00	3.5000E-04
CS-G75PASI36	1.5099E-02	5.4000E-01	4.9587E-03	60.82%	3.0000E+03	2.9000E+00	2.4000E+00	1.5000E-05
CS-G76PASI36	1.5557E-02	5.3000E-01	4.0588E-03	49.23%	3.5000E+03	7.0000E+00	3.2000E+00	2.5000E-04
CS-G77PASI36	1.4559E-02	5.4000E-01	4.8944E-03	62.25%	1.5000E+03	1.1000E+00	3.0000E+00	8.5000E-04
CS-G78PASI36	1.5240E-02	5.3000E-01	3.9602E-03	49.03%	3.5000E+03	7.0000E+00	3.0000E+00	1.6000E-04
CS-G79PASI36	1.6442E-02	5.1000E-01	3.9639E-03	47.27%	1.5000E+03	6.0000E+00	3.0000E+00	2.2000E-04
CS-G80PASI36	1.5980E-02	5.3000E-01	4.6813E-03	55.27%	4.0000E+03	4.0000E+00	2.9500E+0	8.5000E-04
CS-G81PASI36	1.6546E-02	5.2000E-01	3.2039E-03	37.24%	5.0000E+02	1.1000E+01	3.0000E+00	6.3000E-04
CS-G82PASI36	1.6673E-02	4.7000E-01	3.3256E-03	42.44%	1.5000E+03	6.8000E+00	3.0000E+00	4.5000E-04
CS-G83PASI36	1.6428E-02	5.2000E-01	4.0651E-03	47.59%	1.6000E+02	4.0000E+00	3.4000E+00	2.2000E-04
CS-G84PASI36	1.7333E-02	5.2000E-01	4.0175E-03	44.57%	1.5000E+03	7.9000E+00	2.6000E+00	1.6000E-04
CS-G85PASI36	1.5520E-02	5.2000E-01	4.0977E-03	50.77%	4.5000E+03	5.4000E+00	3.0000E+00	1.5000E-04
CS-G86PASI36	1.5067E-02	5.2000E-01	4.3148E-03	55.07%	1.5000E+03	4.5000E+00	2.4000E+00	2.6000E-05
CS-G87PASI36	9.6461E-03	5.2000E-01	1.2414E-03	24.75%	1.0000E+02	1.1000E+00	3.0000E+00	1.1000E-05
CS-G88PASI36	1.7765E-02	4.9000E-01	4.5002E-03	51.70%	3.0000E+03	3.0000E+00	3.0000E+00	1.7000E-04
CS-G89PASI36	1.2247E-02	5.2000E-01	2.5793E-03	40.50%	1.5000E+03	1.3000E+01	3.0000E+00	3.3000E-04
CS-G90PASI36	1.0882E-02	5.3000E-01	1.8037E-03	31.27%	8.0000E+02	2.1000E+01	3.0000E+00	8.5000E-04



CS-G91PASI36	1.2195E-02	5.3000E-01	2.9434E-03	45.54%	3.0000E+03	9.8000E+00	3.0000E+00	1.8000E-04
CS-G92PASI36	1.1032E-02	5.1000E-01	2.5192E-03	44.77%	1.5000E+3	9.0000E+00	3.0000E+00	1.6000E-04
CS-G93PASI36	1.1824E-02	5.2000E-01	3.4238E-03	55.69%	4.0000E+03	3.0000E+00	3.0000E+00	6.2000E-05
CS-G94PASI36	1.2611E-02	5.4000E-01	2.5276E-03	37.12%	1.6000E+03	1.5700E+01	3.0000E+00	4.8000E-04
CS-G95PASI36	1.2645E-02	5.4000E-01	3.2208E-03	47.17%	2.5000E+03	8.0000E+00	3.0000E+00	1.3500E-04
CS-G96PASI36	1.3390E-02	5.5000E-01	4.0568E-03	55.09%	4.0000E+03	1.0000E+00	5.0000E+00	4.9000E-04
CS-G97PASI36	1.2209E-02	5.3000E-01	1.8907E-03	29.22%	5.0000E+02	2.0000E+01	3.0000E+00	7.5000E-04
CS-G98PASI36	1.2258E-02	5.2000E-01	2.4060E-03	37.75%	1.0000E+03	2.0000E+01	8.0000E-01	1.9900E-07
CS-G99PASI36	1.2067E-02	5.1000E-01	2.7328E-03	44.41%	8.0000E+02	1.3000E+01	1.0000E+00	1.0000E-07
CS-G100PASI36	1.2210E-02	5.0000E-01	2.9523E-03	48.36%	8.0000E+02	7.0000E+00	1.0000E+00	1.0000E-08

Tabla 4. Datos de simulación  $I_{sc}$ ,  $V_{oc}$ ,  $P_m$ ,  $FF$ ,  $R_{sh}$ ,  $R_s$ ,  $n$ ,  $I_0$  de las muestras seleccionadas después del ataque químico, bajo simulación solar de 550 W/m<sup>2</sup>.

CELDA FV	$I_{sc}$ [A]	$V_{oc}$ [V]	$P_m$ [W]	FF	$R_{sh}$	$R_s$	$n$	$I_0$ [A]
CS-G01PASI36	13.2629E-3	520.0000E-3	4.4886E-3	65%	3000.00	2.40	2.5000E+0	16.0000E-6
CS-G11PASI36	15.5353E-3	310.0000E-3	1.7673E-3	37%	150.00	7.40	1.1000E+0	85.0000E-6
CS-G18PASI36	12.1919E-3	510.0000E-3	4.0275E-3	65%	5000.00	3.60	1.4000E+0	99.0000E-9
CS-G19PASI36	11.7937E-3	520.0000E-3	4.1818E-3	68%	2000.00	1.20	2.5500E+0	14.0000E-6
CS-G75PASI36	11.4000E-3	500.0000E-3	3.3531E-3	59%	1500.00	1.10	2.6000E+0	19.0000E-6
CS-G77PASI36	17.2560E-3	470.0000E-3	3.1754E-3	39%	300.00	8.00	1.6000E+0	21.0000E-6

Tabla 5. Datos  $I_{sc}$ ,  $V_{oc}$ ,  $P_m$ ,  $FF$ ,  $R_{sh}$ ,  $R_s$ ,  $n$ ,  $I_0$  de las muestras seleccionadas antes del ataque químico, medidas bajo 1000W/m<sup>2</sup>.

	$V_{oc}$ [V]	$I_{sc}$ [mA]	$P_{max}$ [W]	FillFactor	OptLoadV [V]	OptLoadI [mA]	OptLoadR [V/mA]	$R_{series}$ [Ohms]	$R_{shunt}$ [Ohms]
CS-G01PASI36	0.534	11.87	0.0038	60.00%	0.388	9.79	39.7	9.012	2002
CS-G011PASI36	0.541	11.48	0.00371	59.70%	0.393	9.43	41.7	9.518	4293
CS-G018PASI36	0.54	11.71	0.00363	57.30%	0.381	9.51	40.1	10.3	1106
CS-G019PASI36	0.536	11.88	0.00384	60.30%	0.39	9.86	39.5	8.931	1684
CS-G75PASI36	0.557	18.19	0.00625	61.70%	0.405	15.42	26.3	5.814	1268
CS-G77PASI36	0.551	15.03	0.00513	62.00%	0.4	12.81	31.3	6.875	2713

Tabla 6. Datos  $I_{sc}$ ,  $V_{oc}$ ,  $P_m$ ,  $FF$ ,  $R_{sh}$ ,  $R_s$ ,  $n$ ,  $I_0$  de las muestras seleccionadas después del ataque químico, medidas bajo 1000W/m<sup>2</sup>.

	$V_{oc}$ [V]	$I_{sc}$ [mA]	$P_{max}$ [W]	FillFactor	OptLoadV [V]	OptLoadI [mA]	OptLoadR [V/mA]	$R_{series}$ [Ohms]	$R_{shunt}$ [Ohms]
CS-G01PASI36	0.559	17.66	0.00606	61.40%	0.394	15.36	25.7	6.148	1114
CS-G011PASI36	0.333	16.01	0.00205	38.40%	0.194	10.56	18.4	10	61
CS-G018PASI36	0.541	12.43	0.00421	62.50%	0.405	10.39	39	7.862	1513
CS-G019PASI36	0.544	12.75	0.00468	67.50%	0.418	11.21	37.2	6.428	2762
CS-G75PASI36	0.531	12.78	0.0038	56.00%	0.386	9.85	39.2	9.538	513
CS-G77PASI36	0.493	14.52	0.00272	38.00%	0.287	9.47	30.3	16.7	85