



INAOE

**Caracterización de dispositivos
capacitivos para aplicación en celdas
solares no convencionales**

por

Rubén Manuel López Guardado

Tesis sometida como requisito parcial para obtener el
grado de

**Maestro en Ciencias en la especialidad en
Electrónica**

en el

**INSTITUTO NACIONAL DE ASTROFÍSICA, ÓPTICA Y
ELECTRÓNICA.**

febrero de 2023

Santa María Tonantzintla, Puebla

Supervisado por

Dr. Mariano Aceves Mijares, INAOE

Dr. Ismael Cosme Bolaños, INAOE

©INAOE 2023

Derechos Reservados

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



Caracterización de dispositivos capacitivos para aplicación en celdas solares no convencionales

Por

Rubén Manuel López Guardado

Tesis sometida como requisito parcial para obtener el grado de

Maestro en Ciencias en la especialidad en Electrónica

en el

INSTITUTO NACIONAL DE ASTROFÍSICA, OPTICA Y ELECTRÓNICA.

febrero de 2023

Santa María Tonantzintla, Puebla

Supervisado por

Dr. Mariano Aceves Mijares, INAOE

Dr. Ismael Cosme Bolaños, INAOE

A mis padres,

***José Rubén López León e Irma Dora Guardado Salazar por siempre
estar para presentes y darme su cariño.***

Mis hermanas,

Rebeca Edith y Anette López Guardado por su apoyo incondicional.

AGRADECIMIENTOS

Primeramente, agradecer a CONACYT por permitirme realizar mis estudios de posgrado con su apoyo económico con el número de CVU 1080219. Gracias al Instituto Nacional de Astrofísica Óptica y Electrónica (INAOE) por su calidad de profesores e infraestructura que brindan las herramientas y conocimientos necesarios para impulsar la investigación de vanguardia en México, así como su personal técnico y administrativo que son un eje vital de la comunidad INAOENSE.

A mis asesores Dr. Mariano Aceves Mijares y Dr. Ismael Cosme Bolaños por su confianza y guía en esta aventura llamada investigación, así como las entrañables pláticas llenas de emoción en la búsqueda de nuevas fronteras de conocimiento.

A los integrantes del equipo de electrofotónica, Dr. Joaquín Hernández, Dr. Oscar Pérez Díaz, Dr. Felix Aguilar, Dra. Denise Estrada Wiese, M.C. Xochilt Luna Zempoalteca, M.C. Fausto Orozco Coy y M.C. Heber Hernández Flores, por haber compartido su experiencia en el rubro de la investigación, con intercambio de conocimiento que fueron gran apoyo durante esta etapa.

Finalmente, a todas las personas que tuve la oportunidad de conocer durante mi estancia en INAOE, con las que compartí momentos no solo conocimiento sino de camaradería.

Gracias a todos ellos.

RESUMEN

En este trabajo se presenta un tipo de celda solar diferente, que ha sido nombrada, en inglés, *Stimulated Inversion Layer Cell* o *SIL Cell*, para abreviar como celda *SIL*.

El objetivo principal de este trabajo es demostrar que este dispositivo es capaz de operar como celda solar. Además, está diseñado y fabricado con técnicas compatible con tecnología CMOS.

La estructura de la celda *SIL* está basada esencialmente en un capacitor *MIS*, a diferencia de las celdas solares convencionales que forman una unión P-N apilando diferentes materiales, como pueden ser materiales inorgánicos u orgánicos, o la combinación de éstos, con el fin de mejorar la conversión de energía. Las celdas solares que tienen más de una unión P-N en su estructura se llaman celdas multiunión o tándem, siendo las celdas con mayor eficiencia, pero costosas y difíciles de fabricar debido a su complejidad.

En particular, la idea de la celda *SIL* tienen como objetivo futuro un diseño para celdas tándem con materiales que sigan siendo compatibles con tecnología CMOS. Las celdas *SIL* incorporan una película de óxido rico en silicio (*SRO*) en su estructura, material que en múltiples estudios ha demostrado una gran variedad de propiedades eléctricas y ópticas, ideal para diversas aplicaciones como en dispositivos fotovoltaicos. Debido a la novedosa estructura de las celdas *SIL*, fueron caracterizadas por un esquema de medición diferente al estándar para celdas solares (simulador solar con condiciones AM1.5).

Este estudio se realiza con la finalidad de determinar el funcionamiento de las celdas *SIL* como dispositivos fotovoltaicos, que, aprovechando las características del *SRO* también permita ampliar el rango de respuesta de la celda al UV-Vis-IR, especialmente el UV donde las celdas solares basadas en silicio cristalino carecen de conversión de luz por la recombinación superficial.

ABSTRACT

In this work, a different type of solar cell is presented, named Stimulated Inversion Layer Cell or SIL Cell for short.

The main objective of this work is to demonstrate that this device is capable of operating as a solar cell. Furthermore, it is designed and manufactured with techniques compatible with CMOS technology.

The structure of the SIL cell is essentially based on a MIS capacitor, unlike conventional solar cells that form a P-N junction by stacking different materials, such as inorganic or organic materials, or combinations of these, in order to improve energy conversion. Solar cells with more than one P-N junction in their structure are called multi-junction or tandem cells, being the most efficient cells but costly and difficult to manufacture due to their complexity.

In particular, the idea of the SIL cell aims for a future design for tandem cells with materials that remain compatible with CMOS technology. The SIL cells incorporate a rich oxide silicon (SRO) film in their structure, a material that has been shown in multiple studies to have a variety of electrical and optical properties, ideal for various applications such as in photovoltaic devices. Due to the novel structure of the SIL cells, they were characterized by a different measurement scheme than the standard for solar cells (AM1.5 solar simulator).

This study is carried out with the aim of determining the operation of the SIL cells as photovoltaic devices, taking advantage of the characteristics of the SRO also to expand the response range of the cell to UV-Vis-IR, especially UV where crystalline silicon-based solar cells lack light conversion due to surface recombination.

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS	I
RESUMEN	II
ABSTRACT	III
ÍNDICE GENERAL	IV
ÍNDICE DE FIGURAS	VI
ÍNDICE DE TABLAS	IX
1. ANTECEDENTES	1
1.1. BREVE HISTORIA DE LA PRIMERA CELDA SOLAR	2
1.2. PANORAMA GENERAL DE LAS CELDAS SOLARES	4
1.3. MOTIVACIÓN DEL TRABAJO	7
1.4. OBJETIVO	9
1.4.1. <i>Metas</i>	9
1.5. ORGANIZACIÓN DEL TRABAJO	10
2. TEORÍA	11
2.1. FUNDAMENTOS DE CELDAS SOLARES.....	12
2.1.1. <i>Radiación solar</i>	13
2.1.2. <i>Características eléctricas de la celda solar</i>	15
2.2. FUNDAMENTOS DEL CAPACITOR MIS.....	19
2.3. ÓXIDO DE SILICIO RICO EN SILICIO (SRO).....	24
3. DISPOSITIVO FOTOVOLTAICO Y MÉTODO DE CARACTERIZACIÓN	25
3.1. ESPECTROFLUORÓMETRO: FLUOROMAX-3.....	26
3.2. SENSOR FDS1010.....	28
3.3. LÁMPARA AMSCOPE56S	29
3.4. INSTRUMENTO SMU SOURCEMETER SERIE 2600B KEITHLEY 2636B.....	30
3.5. MÉTODO DE MEDICIÓN DE 4 PUNTAS	31
3.6. DISPOSITIVO FOTOVOLTAICO: CELDA <i>SIL</i>	32

3.6.1. <i>Diseño y fabricación</i>	32
3.6.2. <i>Funcionamiento de la celda SIL</i>	35
3.7. CARACTERIZACIÓN DE EQUIPOS Y DISPOSITIVOS.....	38
3.7.1. <i>Fuentes de luz</i>	38
3.7.2. <i>Celdas</i>	41
4. DISCUSIÓN Y RESULTADOS	46
4.1. RESULTADOS	49
4.2. DISCUSIÓN GENERAL	54
4.2.1. <i>Efecto del tratamiento térmico (TT) en las celdas SIL</i>	58
5. CONCLUSIONES Y TRABAJO A FUTURO	60
5.1. CONCLUSIONES GENERALES.....	60
5.2. TRABAJO A FUTURO	63
REFERENCIAS.....	64

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1. Evolución de las eficiencias en celdas solares con diversas tecnologías [34].	5
Figura 1-2. Estructura de una celda solar HIT [33].	6
Figura 1-3. Estructura de la primera generación de celdas solares MIS [37], [38].	6
Figura 2-1. Estructura de una celda solar simple de unión P-N.	12
Figura 2-2. Representación del ángulo formado entre el cenit y la posición del Sol, atenuando la radiación solar incidente en la Tierra.	14
Figura 2-3. Espectros de radiación solar estandarizados: AM0 (línea negra), AM1.5G (línea roja) y AM1.5D (línea azul).	15
Figura 2-4. (a) Modelo ideal de un diodo y (b) modelo de un diodo con componentes resistivos, de una celda solar de unión P-N.	16
Figura 2-5. Curva I-V ideal para una celda solar: (a) en condiciones de oscuridad e iluminación y (b) parámetros eléctricos extraíbles de la curva.	17
Figura 2-6. Estructura del capacitor MIS ideal.	19
Figura 2-7. Diagrama de bandas de un capacitor MIS ideal: (a) tipo N y (b) tipo P, en equilibrio ($V=0V$).	21
Figura 2-8. Diagrama de bandas para los casos de acumulación, agotamiento e inversión de un capacitor MIS ideal tipo P y N.	21
Figura 2-9. Diagrama de bandas de la superficie de un semiconductor tipo P en un capacitor MIS.	23
Figura 3-1. Fotografía del espectrofluorómetro FluoroMax-3.	26
Figura 3-2. Diagrama de los componentes y su distribución dentro del equipo.	27
Figura 3-3. (a) Fotografía del fotodiodo FDS1010 y (b) curva de responsividad del sensor FDS1010.	28
Figura 3-4. (a) Fotografía de la lámpara AMSCOPE56S, y (b) espectro de emisión en unidades arbitrarias de la lámpara AMSCOPE56S.	29
Figura 3-5. (a) Fotografía frontal de la fuente medidora Keithley 2636B y, (b) gráfica de parámetros eléctricos.	30
Figura 3-6. Diagrama eléctrico del método kelvin o método de 4 puntas.	31

Figura 3-7. Diseño del chip de pruebas de: (a) celdas SIL, (b) celdas de unión P-N y, (c-f) capacitores de prueba, desarrollado en Mentor L-Edit 2018 ©.	33
Figura 3-8. Vista con corte transversal de los dispositivos del chip de la figura 3-7.	34
Figura 3-9. Esquema del funcionamiento de un capacitor MIS con carga atrapada en el SRO.....	36
Figura 3-10. Formación de la región de carga espacial completa en la celda SIL. 37	
Figura 3-11. Circuito externo para acoplar el sensor FDS1010, en la medición de potencia de las fuentes de luz. Diagrama extraído de la hoja de datos del sensor [1].	39
Figura 3-12. Curva de excitación de la lámpara antigua (línea roja) y lámpara nueva (línea negra) después de calibrarse debido al cambio de lámpara en el equipo FluoroMax-3.	39
Figura 3-13. Componentes externos para caracterizar la lámpara de xenón del FluoroMax-3.	40
Figura 3-14. Esquema simple del método de caracterización de las celdas solares.	41
Figura 3-15. Diagrama de conexión de los elementos involucrados en la caracterización de las celdas.	43
Figura 3-16. Ejemplo de captura y procesamiento de los valores de voltaje correspondientes a cada resistor conectado a la celda solar para formar la curva I-V. Este proceso se repite para cada longitud de onda con la que se estimula la celda solar.	44
Figura 3-17. Programas desarrollados para el procesamiento de los datos de las mediciones: (a) promediar puntos y formar curvas I-V y (b) calcular parámetros eléctricos.	45
Figura 4-1. Curvas I-V (escala semilogarítmica) típicas de cuatro chips de la oblea AR1-SR010-TT utilizando como estímulo la lámpara AMSCOPE56S (450nm).....	50
Figura 4-2. Curvas I-V (escala semilogarítmica) típicas de cuatro chips de la oblea AR1-SR010-TT utilizando como estímulo la lámpara de xenón para diferentes longitudes de onda.	51

Figura 4-3. Graficas de los valores promedio de los parámetros eléctricos (a) VOC , (b) JSC relativo, (c) FF y (d) PCE relativo, del conjunto de obleas, usando como fuente de luz incidente la lámpara AMSCOPE56S. El color de la barra indica la oblea: (■) AR1-SR010-TT, (■) AR3-SR010, (■) BR4-SR010, (■) AR5-SR020-TT, (■) BR6-SR020-TT, (■) AR7-SR020, (■) BR8-SR020, (■) AR9-SR030-TT, (■) AR11-SR030, (■) BR12-SR030, (■) AR13-SiO2, (■) BR14-SiO2, (■) AR15-SiO2-TT y (■) BR16-SiO2-TT. 52

Figura 4-4. Graficas de valores promedio de los parámetros eléctricos (a) VOC , (b) JSC relativo, (c) FF y (d) PCE relativo, de las obleas AR1-SR010-TT (■), AR3-SR010 (■), AR9-SR030-TT (■), AR11-SR030 (■) y AR13-SiO2 (■), usando como fuente de luz incidente la lámpara de xenón. 53

Figura 4-5. Promedio de los valores de las resistencias serie (barras en rojo) y shunt (barras en azul) de las celdas caracterizadas. 55

Figura 4-6. Curva I-V de la oblea AR1-SR010-TT en escala lineal..... 57

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1. Resumen de parámetros característicos de la celda solar.....	18
Tabla 3-1. Chips completos fabricados y condiciones del proceso. AR y BR se refieren a obleas de alta ($> 2000 \Omega \cdot cm$) y baja ($3 a 5 \Omega \cdot cm$) resistividad, respectivamente. Tipo de SRO se refiere a $R_o = 10, 20, 30$. TT se refiere al tratamiento térmico a $1100^{\circ}C$ durante 180 minutos. La última columna menciona a las obleas que terminaron exitosamente el proceso.	35
Tabla 3-2. Valores de los resistores usados como carga en la caracterización de celdas.....	42
Tabla 4-1. Resumen de los dispositivos fabricados, características de fabricación y valores eléctricos característicos promedio característicos de una celda solar, usando como fuente de luz la lámpara AMSCOPE56S ($450nm$). AR y BR se refieren a obleas de alta ($> 2000 \Omega \cdot cm$) y baja ($3 a 5 \Omega \cdot cm$) resistividad, respectivamente. TT se refiere al tratamiento térmico a $1100^{\circ}C$ durante 180 minutos. PCE se refiere a la eficiencia promedio de la oblea.	47
Tabla 4-2. Resumen de los dispositivos fabricados, características de fabricación y valores eléctricos promedio característicos de una celda solar, usando como fuente de luz la lámpara AMSCOPE56S ($450nm$) organizados en función de la eficiencia.	48
Tabla 4-3. Valores de irradiancia medidos de las fuentes de luz: AMSCOPE56S y lámpara de xenón para diferentes longitudes de onda.....	49

1. ANTECEDENTES

El material semiconductor más utilizado en el estudio y desarrollo de dispositivos semiconductores hasta hoy es silicio (*Si*). Tanto ha sido su impacto en la vida del ser humano desde su aplicación en la tecnología, que sin el esfuerzo de miles de personas que estudiaron este material, el ser humano probablemente no tendría el mismo avance tecnológico que tiene actualmente, todo esto gracias a las propiedades y características del silicio, que lo hicieron y sigue siendo el mejor material semiconductor de estudio en diversos campos de la ciencia.

Precisamente, debido a que el silicio es tan versátil, existen infinidad de trabajos y estudios realizados, qué, aunque en un principio muchos de estos trabajos no tengan una clara aplicación o enfoque, a futuro llegan a impactar tanto en la investigación, industria o milicia, así como en la calidad de vida de las personas.

Este trabajo, es uno más que pretende contribuir e impactar positivamente, con la propuesta de un dispositivo dentro del marco de las energías renovables, específicamente energías fotovoltaicas, es decir, una celda solar.

1.1. Breve historia de la primera celda solar

De acuerdo con un artículo de la revista *APS NEWS* publicado en abril de 2009, la primera celda solar basada en silicio practica fue demostrada por los laboratorios Bell el 25 de abril de 1954 [1].

La primer persona en observar el efecto fotovoltaico registrada fue el físico francés Alexandre-Edmond Becquerel en 1839. Mientras trabajaba con electrodos metálicos en una solución electrolítica, notó que se producían pequeñas corrientes eléctricas cuando los metales se exponían a la luz, pero era temprano para explicar este efecto. Después, en 1873, el ingeniero inglés Willoughby Smith, descubrió la fotoconductividad del selenio (Se) mientras realizaba pruebas para cables telegráficos submarinos. Luego, en 1883, el inventor Charles Fritts fabricó las primeras celdas solares de Se [2], con la intención de competir en ese entonces con las centrales eléctricas de carbón de Thomas Edison, pero sus celdas solares tenían eficiencias menores al 1%, por lo que no eran prácticas.

Fue hasta 1940 cuando se tuvo un gran avance en la tecnología de celdas solares, cuando el investigador de semiconductores de los laboratorios Bell, Russell Shoemaker Ohl, realizaba investigación con Si, donde en una de sus muestras notó que la corriente fluía a través de esta cuando se exponía a la luz. Esta muestra tenía una grieta que marcaba el límite entre las regiones con diferentes niveles de impurezas, es decir, tenía un lado dopado positivamente y otro negativamente, así y sin darse cuenta aún, había formado una unión P-N, la base de los diodos y, en consecuencia, de una celda solar. Ohl patentó su diseño de celda solar [3], que en ese momento tenía una eficiencia alrededor del 1%.

Trece años después, en 1953, Daryl Chapin, ingeniero de laboratorios Bell, se encontraba desarrollando una fuente de energía para sistemas telefónicos en lugares remotos y húmedos, donde las baterías de celda seca se degradan rápidamente. Chapin investigó fuentes de energía alternativa y eligió la energía solar como la más prometedora, probando celdas de Selenio, pero resultaron demasiado ineficientes. Mientras tanto, en los mismos laboratorios, el químico Calvin Fuller y el físico Gerald Pearson, trabajaban en el control de las propiedades de los

semiconductores mediante la introducción de impurezas. Usando un pedazo de silicio con impurezas de galio (*Ga*) que sumergieron en litio (*Li*), creando así una unión P-N, a la que después conectaron un amperímetro e iluminaron, esta acción produjo un cambio significativo en el amperímetro. Pearson quien era amigo de Chapin, concedor de su trabajo, le comenta los resultados de estudiar silicio con impurezas y Chapin decide cambiar las celdas de selenio por celdas de silicio. De esta manera, los tres comenzaron a trabajar durante meses para mejorar las propiedades de las celdas solares de silicio [4]. Un problema que encontraron era la dificultad de realizar buenos contactos eléctricos con las celdas de silicio. Otro problema fue la temperatura ambiente, el litio con el tiempo migraba hacia el silicio, alejando la unión P-N de la luz solar entrante. Para resolver este problema, continuaron probando diferentes impurezas y, finalmente, se decidieron por el arsénico (*As*) y el boro (*B*), creando una unión P-N que permanecía cerca de la superficie después de realizar otras mejoras en el diseño, unieron varias celdas solares para crear lo que llamaron “*batería solar*”.

Laboratorios Bell anunció la invención el 25 de abril de 1954 en Murray Hill, Nueva Jersey. Haciendo una demostración de su panel solar usándolo para alimentar un pequeño juguete de una rueda de la fortuna y un transmisor de radio. Esas primeras celdas solares tenían una eficiencia de alrededor del 6%, una mejora considerable respecto a sus predecesoras.

La noticia tuvo tal impacto, que *The New York Times* escribió que la celda solar de silicio “*puede marcar el comienzo de una nueva era, que finalmente conduciría a la realización de uno de los sueños más preciados de la humanidad: el aprovechamiento de la energía casi ilimitada del sol para los usos de la civilización*”.

Los primeros intentos de comercializar no fueron un éxito, debido a que las primeras celdas solares eran costosas de producir. Pero en unos años, las celdas solares se usaban comúnmente para alimentar satélites, y sirvieron para otro tipo de aplicaciones. Motivo por el cual Chapin simplificó el proceso de fabricación de celdas solares de Silicio e incluso desarrolló un experimento científico de celdas solares para estudiantes.

Chapin, Fuller y Pearson, fueron incluidos en el Salón de la Fama de los Inventores Nacionales en 2008.

1.2. Panorama general de las celdas solares

El constante estudio en celdas solares para aprovechar al máximo la energía del sol ha llevado a desarrollar una amplia variedad de celdas solares basadas en diversos materiales, con la intención de colocar a la industria fotovoltaica a un nivel competitivo respecto al mercado de energías, especialmente como un sustituto de la energía fósil. En la figura 1-1, se observa la evolución que ha tenido el estudio de las celdas solares y como han mejorado las eficiencias usando diferentes tecnologías fotovoltaicas.

Continuando con esta figura 1-1, fácilmente se aprecia que entre las celdas con menores eficiencias son las fotovoltaicas emergentes (*Emerging photovoltaic*), que incluyen a las celdas orgánicas [5]–[7] y celdas Perovskite [8]–[11], este tipo de celdas se encuentra en vías de desarrollo con eficiencias entre el 13% y 18%. Aun así, las celdas emergentes están acercándose a las celdas de película delgada con eficiencias alrededor del 23% [12]–[14] y las celdas de silicio cristalino (*c-Si*) con eficiencias entre el 20% y 27% [15]–[17]. Por último, las celdas solares multiunión o celdas tándem [18]–[25] presentan eficiencias mayores al 27% y llegan hasta el 46%, colocándose como las mejores respecto al resto. Sin embargo, entre sus principales desventajas está el uso de distintos materiales, haciéndolas costosas y complicadas de fabricar, ya que este tipo de celdas tienen estructuras complejas con múltiples uniones P-N formadas por los diferentes materiales que tienen distinto ancho de banda prohibida (E_g) [26]–[30]. Los diferentes E_g de los materiales permiten a este tipo de celda solar una mejor absorción de la luz solar incidente, dando como resultado altas eficiencias.

Acerca de celdas basadas en *c-Si*, actualmente destaca la celda solar *HIT* (del inglés, *Heterojunction Intrinsic Thin-Film*) [12], [14], [31]. Estas celdas fueron desarrolladas con la intención de disminuir los costos de producción reduciendo el

espesor de las capas/películas que forman el dispositivo [32]. La máxima eficiencia de acuerdo con la figura 1-1, es de 26.7%. Un tipo de estructura para una celdas HIT [33] está ilustrada en la figura 1-2.

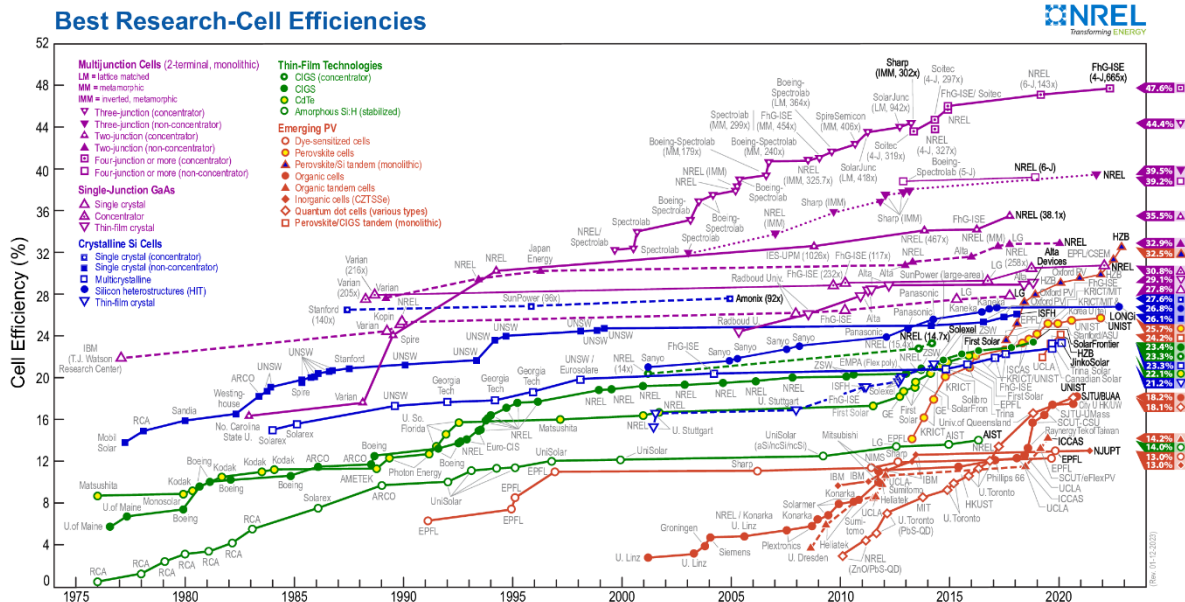


Figura 1-1. Evolución de las eficiencias en celdas solares con diversas tecnologías [34].

La estructura de la celda solar HIT de la figura 1-2, consiste en un sustrato de c-Si tipo N, encima y debajo del sustrato es depositada una película intrínseca de silicio amorfo (a-Si) con espesor $\approx 0.01\mu m$, después se deposita en la parte superior e inferior una película de silicio amorfo tipo P y N, respectivamente, ambas películas con un espesor $\approx 0.01\mu m$; en la parte superior e inferior de las anteriores películas se deposita un Óxido Conductor Transparente (TCO, por sus siglas en inglés) [35], [36], y finalmente los contactos metálicos en forma de rejilla o peine. Los espesores de las películas de este tipo de celdas son unas pocas micras o decenas nanómetros, de ahí que sean nombradas de celdas solares de película delgada.

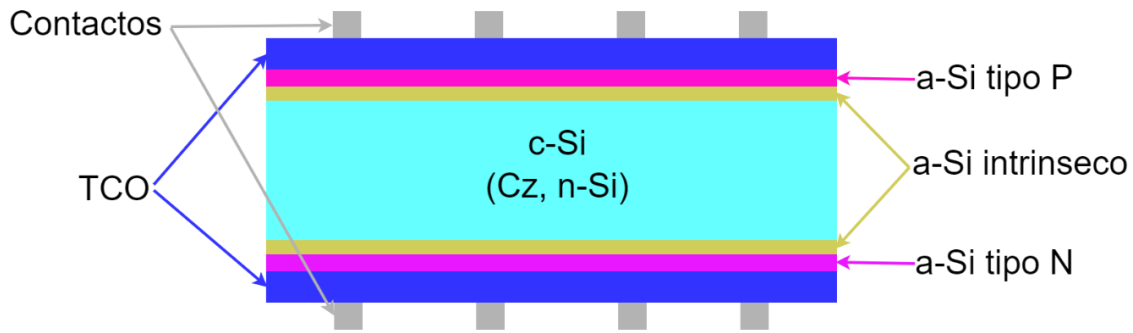


Figura 1-2. Estructura de una celda solar HIT [33].

Por otro lado, entre los 70's y finales de los 80's, se estudiaba un tipo de celda solar que no aparece en la línea evolutiva de la figura 1-1, las celdas solares *MIS* (del inglés *Metal-Insulator-Semiconductor*) [37], [38]. Lo interesante de este tipo de celda era su fabricación a bajas temperaturas ($< 500^{\circ}\text{C}$) y los pocos pasos necesarios para formar la estructura, que las hacían baratas de fabricar. La primera generación [38] consistía en semiconductor tipo *P*, película de óxido muy delgada ($< 60\text{\AA}$), aluminio (*Al*) o *TCO* [35], [39], y nitruro de silicio (Si_3N_4), véase figura 1-3.

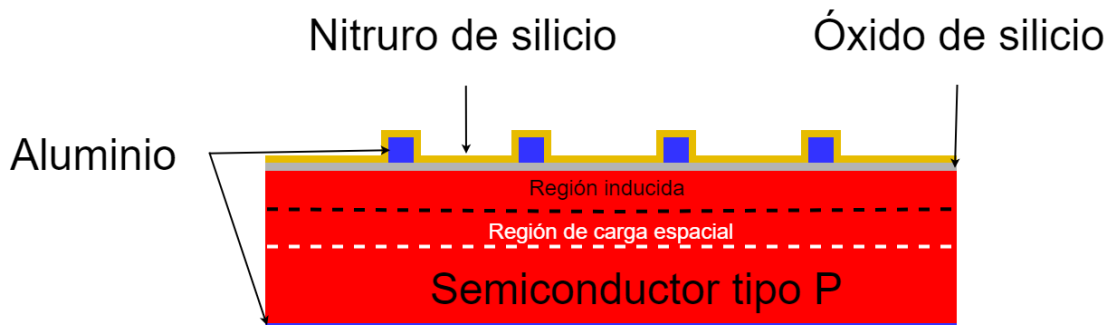


Figura 1-3. Estructura de la primera generación de celdas solares MIS [37], [38].

El nitruro de silicio en estas celdas tenía 4 propósitos:

1. Proteger el dispositivo del ambiente.
2. Funciona como una capa antirreflejante.
3. Reduce la velocidad de recombinación de la superficie
4. Crea una capa de inversión *N* en el semiconductor *P*.

Las celdas *MIS* reportaban eficiencias entre el 10% y 17% [39]–[42], para ese momento se consideraban como una solución a las celdas solares convencionales

de unión P-N con difusión, que eran costosas de fabricar. Pero debido a su dependencia con la carga atrapada en el nitruro de silicio, a largo plazo resultaban ineficientes y fueron desplazadas por otros tipos de celda de estructura más simple [43].

1.3. Motivación del trabajo

El estudio de nuevas tecnologías en dispositivos fotovoltaicos basados en diversos materiales, y ya no únicamente en semiconductores, sino en materiales orgánicos y polímeros, ha abierto un nuevo escenario de oportunidades para el desarrollo e investigación en este campo de las energías renovables fotovoltaicas. Razón por la cual, en este trabajo se presenta un dispositivo novedoso para una celda solar basada en *c-Si*, pero que funciona de manera diferente a las celdas solares convencionales de unión P-N.

De acuerdo con la teoría de Shockley-Queisser (SQ) [44], la cual estima el límite teórico de la máxima eficiencia de una celda solar de unión P-N es de aproximadamente de 33.7% para un material con una energía de banda prohibida de 1.34 eV, bajo condiciones estándar AM1.5G. El *Si* es en la actualidad el material más utilizado en la fabricación de monoceldas solares y cada vez se cierra más la brecha con el límite de SQ [45].

Por ello, la motivación de esta propuesta es estudiar la aplicación de una película de óxido de silicio rico en silicio (*SRO*) usando una nueva estructura de celda solar, y el efecto de los mecanismos de atrapamiento de carga y fotoluminiscencia en el funcionamiento de la estructura.

El dispositivo estudiado en este trabajo es una celda basada en *c-Si*, pero sin unión P-N metalúrgica, y en su lugar, aplicando conocimientos básico de otros dispositivos, como el capacitor *MIS* [46], la unión P-N se induce debido a cargas atrapadas en el óxido de silicio rico en silicio (*SRO*). El *SRO* [47], [48], ha demostrado características eléctricas y ópticas que pueden aprovecharse con diversos fines [47], [49]–[54].

Además del atrapamiento de carga en el *SRO*, también se aprovecha otra característica que es la fotoluminiscencia.

Existen estudios del *SRO* que prueban la capacidad de atrapar carga y además de retenerla por tiempos prolongados [55]–[58], teóricamente sin algo que altere la carga atrapada, esta podría permanecer indefinidamente. Por su parte, hay estudios comprobatorios, que al incidir luz UV al *SRO*, los nanocristales de *Si* (*nc-Si*) se excitan y emiten en IR, es decir, existe fotoluminiscencia [59]–[63], también hay más estudios que muestra otros tipos de luminiscencia de este material [52], [59], [61], [63]–[65]. De manera que en este primer estudio del *SRO* como parte de un dispositivo fotovoltaico solo se consideran las dos características antes mencionadas, atrapamiento de carga y fotoluminiscencia.

En principio una celda de unión P-N convencional, tiene una respuesta eficiente en el rango del espectro electromagnético correspondiente al visible y parte del IR cercano, el UV que se pierde en la superficie del *Si* debido al fenómeno de recombinación. Entonces, las celdas con *SRO* pueden demostrar una ventaja, ya que, al incidir UV en el *SRO* es absorbido y reemitido como IR para penetrar hasta el sustrato y contribuir a la generación de portadores. Así, se aprovecharía el rango UV-Vis-IR, lo que es un aporte directo a la eficiencia de una celda solar basada únicamente en *c-Si*, incluso con una adecuada respuesta en el UV es posible pensar en celdas de *c-Si* para fines no solo terrestres sino espaciales. Por supuesto, como en toda nueva idea, surgen desafíos conforme la investigación progresa.

Sin embargo, la intención a futuro es llevar este primer dispositivo a tal punto que sea factible proponer un diseño para una celda tándem con materiales compatibles con tecnología CMOS que permitan abaratar los costos de fabricación, dando un beneficio costo-eficiencia rentable para su producción en masa. El panorama es amplio y se espera que conforme los estudios progresen, se obtenga información que respalde firmemente esta idea de celda solar no convencional.

1.4. Objetivo

El objetivo de este trabajo es estudiar dispositivos capacitivos, que utilizan una película de óxido de silicio rico en silicio (*SRO*) como material cargable capaz de producir una región de inversión inducida en la superficie del sustrato, para su posible aplicación como celda solar no convencional.

1.4.1. Metas

Estudio, desarrollo e implementación de un método de caracterización para celdas solares no convencionales.

Estudio del efecto del tratamiento térmico en el *SRO* en los dispositivos fotovoltaicos.

Desarrollo de un programa para la extracción y procesamiento de parámetros de rendimiento de los dispositivos fotovoltaicos.

1.5. Organización del trabajo

A continuación, se describe brevemente el contenido de cada capítulo en esta tesis.

Capítulo 1. Habla brevemente de la historia y panorama actual de las celdas solares. Así como la motivación y objetivo de este trabajo.

Capítulo 2. Aborda conceptos básicos sobre celdas solares y capacitor *MIS*. Además, brevemente se habla del óxido de silicio rico en silicio (*SRO*).

Capítulo 3. Presenta y explica las características principales de los equipos que conforman el sistema de la caracterización eléctrica, así como el método de medición de 4 puntas, implementado en este trabajo. También, detalla la estructura y funcionamiento del dispositivo fotovoltaico (celda *SIL*) objeto de estudio de este trabajo. Por último, describe el funcionamiento del sistema de caracterización.

Capítulo 4. Muestra los resultados de la caracterización que posteriormente son discutidos.

Capítulo 5. Plasma las conclusiones del trabajo e ideas a futuro.

2. TEORÍA

Este capítulo aborda los conceptos teóricos relacionados con los dispositivos fotónicos, los cuales pueden ser divididos en tres categorías de manera general dependiendo de su estructura y modo de operación [66]–[69].

- 1) Diodos emisores de luz (*LED*, por sus siglas en inglés) o diodos láser, los cuales convierten la energía eléctrica en radiación óptica coherente o incoherente debido a la inyección eléctrica en la unión del diodo P-N.
- 2) Fotodetectores, los cuales detectan fotones o señales ópticas y las convierten en señales eléctricas a través de efectos fotoeléctricos internos.
- 3) Dispositivos fotovoltaicos que convierten la luz solar directamente en electricidad mediante la generación de pares electrón-hueco en una celda solar a través de efectos fotovoltaicos.

En específico para este trabajo, se enfoca en los fundamentos de las celdas solares, así como el efecto de la radiación solar y el comportamiento eléctrico. También se explican los fundamentos del capacitor *MIS*, dispositivos ampliamente utilizados en el estudio de las propiedades físicas y eléctricas en los materiales semiconductores para diversas aplicaciones.

Por último, una breve explicación del óxido de silicio rico en silicio (*SRO*), para propósitos de este trabajo se aprovechan algunas de las propiedades eléctricas y ópticas en la implementación de celdas solares con este material.

2.1. Fundamentos de celdas solares

La estructura más simple conocida de una celda solar de unión P-N [70]–[75], se muestra en la figura 2-1. Esta estructura se compone por un substrato tipo *P* que funciona como cuerpo y área activa de la celda, es decir, donde se generan los pares electrón-hueco (*PEH*). Después, una película de material tipo *N*, añadida por diversos métodos como difusión, depósito o implantación, con esta película se forma la unión P-N. La diferencia de las cargas entre la película tipo *P* y *N* crean un campo eléctrico (\vec{E}) en la unión, este \vec{E} separa los *PEH* dándoles una dirección lo que produce un flujo de corriente eléctrica. También cuenta con una capa antirreflejante que evita el escape de luz que ha entrado al dispositivo para absorber la máxima cantidad de luz. Finalmente, dos tipos de contactos metálicos, en la parte superior de la celda el contacto metálico se deposita en forma de peine o rejilla y en la parte inferior se deposita en toda el área de la celda, los contactos sirven para mover la energía eléctrica cuando se conecta un circuito externo.

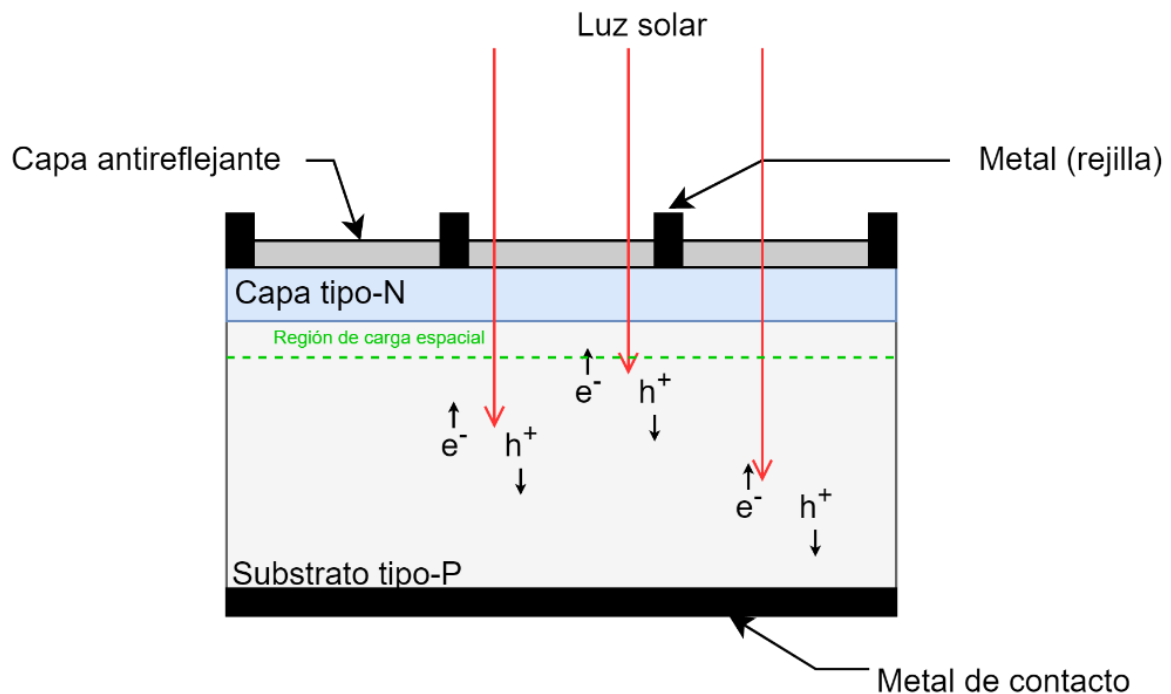


Figura 2-1. Estructura de una celda solar simple de unión P-N.

El funcionamiento general de la celda [76]–[78] se puede resumir en cuatro partes:

- 1) Absorción. La luz incidente debe ser absorbida por el material activo.
- 2) Generación. La luz incidente debe generar los *PEH* en el material.
- 3) Transporte. La carga generada debe transportarse antes que se recombinen los *PEH*, y se pierda.
- 4) Recolección. La carga debe ser recolectada por los contactos para usarse con circuitos externos.

2.1.1. Radiación solar

La radiación electromagnética, como la luz del sol, puede descomponerse en partículas conocidas como fotones, una manera de cuantizar la energía. El fotón se caracteriza por tener una longitud de onda o frecuencia, y se relaciona con su energía [79], como indica la ecuación (1).

$$E_{ph} = \frac{hc}{\lambda} = h\nu \quad \text{Ec. (1)}$$

Donde, E_{ph} , es la energía cuantizada del fotón a cierta longitud de onda o frecuencia; h , es la constante de Planck; c , es la velocidad de la luz en el vacío; λ , es la longitud de onda del fotón; ν , es la frecuencia.

Haciendo posible determinar cuáles longitudes de onda o frecuencias del espectro de radiación solar tienen energía suficiente para producir un *PEH* en la celda solar, es decir, aquellas con energía mayor a la energía de banda prohibida (E_g) del semiconductor que contribuyen al proceso de conversión de energía. A causa de esto, conocer la composición espectral de la luz es fundamental en el diseño de celdas solares. La radiación proveniente del sol es emitida en un rango que va desde el ultravioleta al infrarrojo, aproximadamente de $0.2\mu m$ a $3\mu m$. La intensidad de la radiación solar fuera de la atmósfera terrestre, a la distancia media de su órbita alrededor del sol, se define como la constante solar, y tiene un valor de $1367W/m^2$ [76], [80], [81]. Esta radiación al entrar en la Tierra es atenuada por la atmósfera

debido a la absorción del vapor de agua en el infrarrojo, ozono en el ultravioleta y, la dispersión causada por partículas como polvo y aerosoles que se encuentran en el aire. En otras palabras, la atenuación depende de la longitud del camino de la luz a través de la atmósfera, o de la masa de aire a través de la cual pasa.

El concepto de masa de aire (del inglés *air mass*, AM) [82], es una medida de cómo la absorción de la atmósfera afecta a la radiación solar que entra en la Tierra. Se define como el ángulo (θ) formado entre la línea vertical (cenit), y la posición del sol (figura 2-2), y matemáticamente se expresa en la ecuación (2).

$$AM = \frac{1}{\cos(\theta)} = \sec(\theta) \quad \text{Ec. (2)}$$

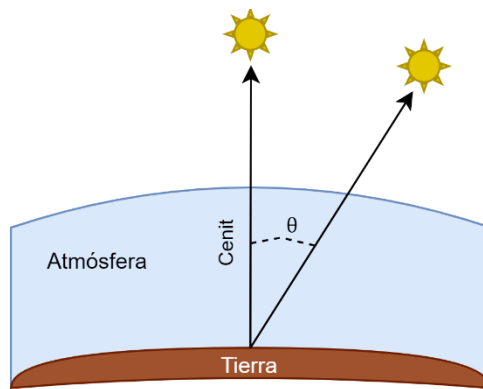


Figura 2-2. Representación del ángulo formado entre el cenit y la posición del Sol, atenuando la radiación solar incidente en la Tierra.

Este es un parámetro estandarizado para realizar pruebas a las celdas solares; el valor de AM siempre es mayor o igual a 1 cuando está en la superficie terrestre. Dentro de este estándar, los principales son: AM0 y AM1.5. El AM0 representa el espectro solar fuera de la atmósfera de la Tierra, y es relevante en aplicaciones espaciales como en satélites y vehículos espaciales. El AM1.5 ($\theta = 48.2^\circ$) es un espectro que representa la radiación dentro de la superficie terrestre, y tiene dos tipos: AM1.5G (global) que incluye los efectos de absorción y dispersión causados por la atmósfera y, AM1.5D (directo) que no incluye los efectos atmosféricos de absorción y dispersión. En la figura 2-3, se puede observar los espectros de radiación AM0, AM1.5G y AM1.5D tomados de las referencias [80], [83].

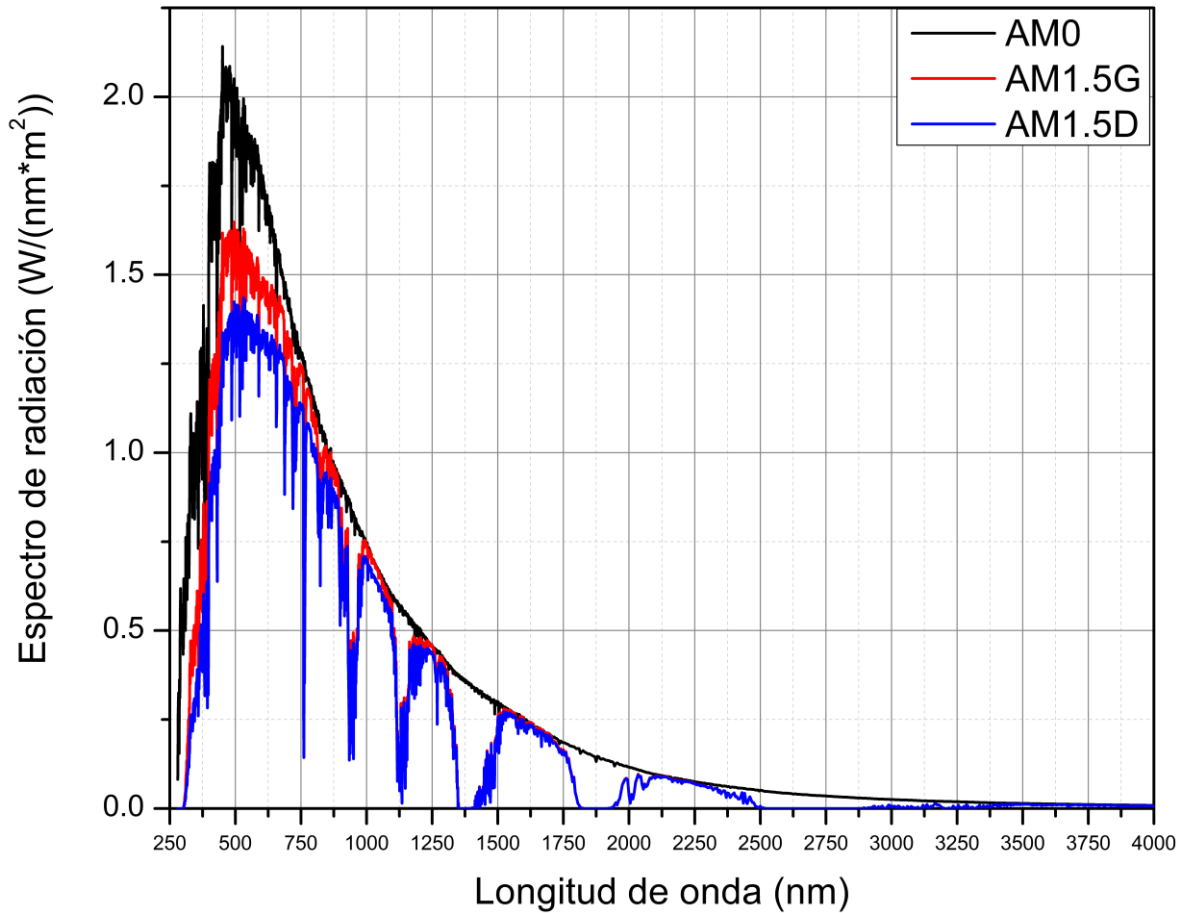


Figura 2-3. Espectros de radiación solar estandarizados: AM0 (línea negra), AM1.5G (línea roja) y AM1.5D (línea azul).

2.1.2. Características eléctricas de la celda solar

La celda solar ideal se modela como un diodo rectificador en paralelo con una fuente de corriente alusiva a la corriente fotogenerada, figura 2-4(a). Otro modelo se suele usar es en el cual se consideran efectos de las resistencias: resistencia *shunt* (R_{sh}) y resistencia serie (R_s), figura 2-4(b) [76], [78], [84]–[87].

A partir del modelo se asume que la celda tiene las mismas características que un diodo, de esta manera la corriente total de la celda solar se puede expresar con la ecuación (3) [76], [77], [88].

$$I_{total} = I_d - I_{ph} = I_{sat} \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] - I_{ph} \quad \text{Ec. (3)}$$

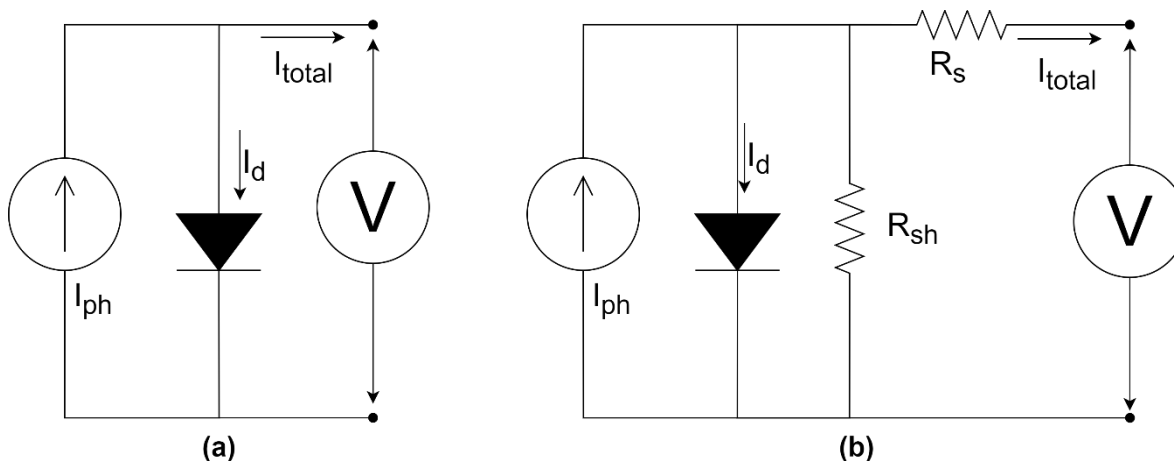


Figura 2-4. (a) Modelo ideal de un diodo y (b) modelo de un diodo con componentes resistivos, de una celda solar de unión P-N.

Y considerando los efectos resistivos en el modelo de un diodo de la figura 2-4(b), la ecuación (3) se reescribe como la ecuación (4), de la siguiente manera:

$$I_{total} = I_d - I_{ph} = I_{sat} \left[\exp \left(\frac{q(V + IR_s)}{kT} \right) - 1 \right] - I_{ph} - \frac{V}{R_{sh}} \quad \text{Ec. (4)}$$

Donde: q : la carga del electrón; k : la constante de Boltzmann; T : temperatura en Kelvin; I_d : es la corriente del diodo; I_{sat} : es la corriente de saturación del diodo; I_{ph} : es la corriente fotogenerada; V : es el voltaje aplicado; I_{total} : la corriente total generada. I_{total} y V , se ilustran en la figura 2-4.

El tipo de curvas que se obtiene para conocer las características eléctricas de la celda [88], [89], se conocen como curvas corriente-voltaje (I-V), como las que se muestran en la figura 2-5(a), la curva I-V en azul representa una medición en oscuridad como si fuera un diodo rectificador, mientras la curva I-V en rojo representa la corriente total de la celda cuando se incide luz.

El método para extraer los parámetros característicos de la celda solar es a través de las curvas I-V. La figura 2-5(b) ejemplifica algunos de estos parámetros, algunos

pueden aproximarse visualmente de la curva I-V como I_{SC} (punto amarillo) y V_{OC} (punto azul), otros deben ser calculados como FF (zona rayada bajo la curva), R_s (pendiente cuando $I = 0A$), R_{sh} (pendiente cuando $V = 0V$) y PCE . La tabla 2-1 resume de los parámetros de interés y las ecuaciones correspondientes a estos parámetros necesarios en el estudio de la celda solar.

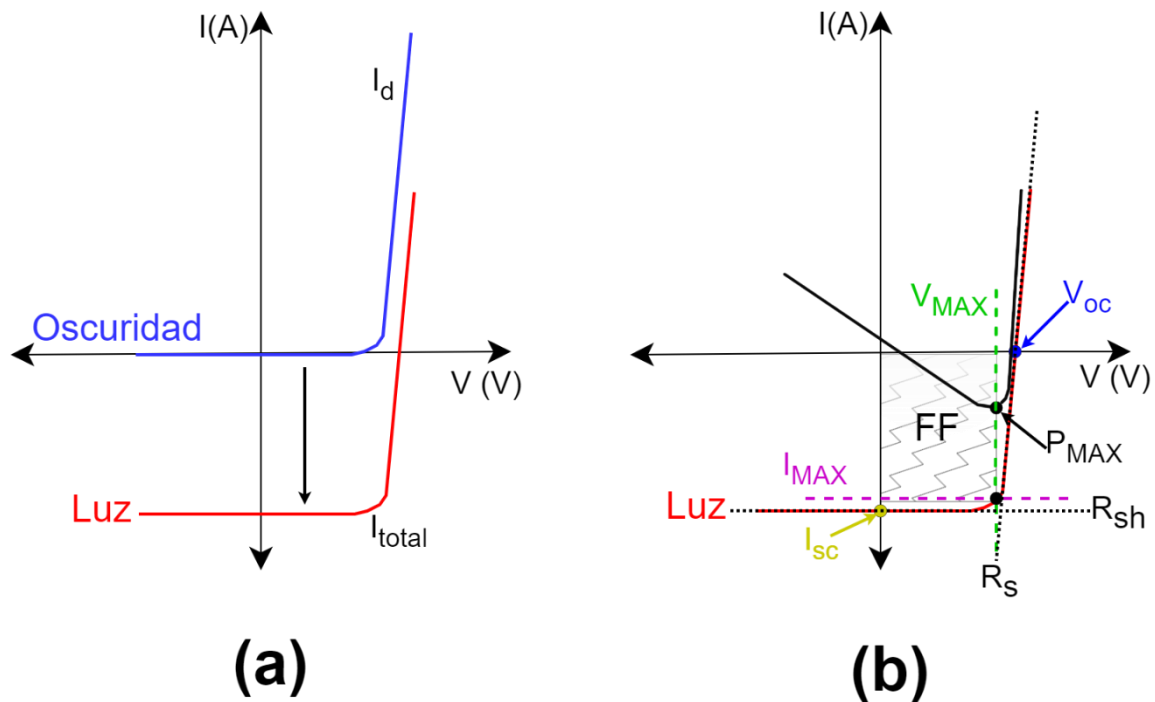


Figura 2-5. Curva I-V ideal para una celda solar: (a) en condiciones de oscuridad e iluminación y (b) parámetros eléctricos extraíbles de la curva.

Las corrientes I_{SC} e I_{sat} , dependen de la propiedades de los materiales, la estructura y condiciones de operación de la celda solar. El V_{OC} , es el voltaje interconstruido en la unión por la diferencia de cargas de los materiales. El FF , es un parámetro relacionado a qué tan bien está diseñada y fabricada la celda solar. La eficiencia (PCE) indica qué tanta energía incidente es convertida en energía eléctrica. La R_{sh} son las componentes resistivas relacionas con las propiedades y características del material como impurezas y defectos, idealmente debe ser grande $> 1000\Omega$, para

mejorar el factor de llenado y la eficiencia de la celda. Por otra parte, R_s está asociada con los contactos metal-semiconductor, la resistencia del metal y el semiconductor, por mencionar algunas, y debe ser lo más pequeña posible, idealmente $< 1\Omega$, para que los portadores fotogenerados fluyan sin problemas en la celda solar y mejore la eficiencia de la celda [68], [69], [76]–[78], [81], [84]–[95].

Nombre	Símbolo	Ecuación	Condición	# ecuación
Voltaje de circuito abierto	V_{OC}	$V_{OC} \approx \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_{sat}}\right)$	$I = 0 \text{ A}$	Ec. (5)
Corriente de corto circuito	I_{SC}	$I_{SC} \approx I_{ph}$	$V = 0 \text{ V}$	Ec. (6)
Densidad e corriente de corto circuito	J_{SC}	$J_{SC} = \frac{I_{SC}}{A}$		Ec. (7)
Potencia máxima	P_{MAX}	$P_{MAX} = V_{MAX} \cdot I_{MAX}$		Ec. (8)
Factor de llenado	FF	$FF = \frac{\left(\frac{P_{MAX}}{A}\right)}{V_{OC} \cdot J_{SC}}$		Ec. (9)
Eficiencia de conversión	η o PCE	$\eta = \frac{V_{OC} \cdot J_{SC} \cdot FF}{P_{in}}$		Ec. (10)
Resistencia serie	R_s	$R_s = \frac{V_f - V_i}{I_f - I_i}$	$I = 0 \text{ A}$	Ec. (11)
Resistencia shunt	R_{sh}	$R_{sh} = \frac{V_f - V_i}{I_f - I_i}$	$V = 0 \text{ V}$	Ec. (12)

Tabla 2-1. Resumen de parámetros característicos de la celda solar.

2.2. Fundamentos del capacitor MIS

El capacitor metal-aislante-semiconductor o capacitor *MIS* [46], desde su desarrollo hasta la actualidad, ha sido uno de los dispositivos más útiles en el estudio de dispositivos semiconductores. El sistema $Si - SiO_2$ sigue siendo la estructura *MIS* más cercana a lo ideal, además de práctica para la investigación. En la figura 2-6, se muestra la estructura básica de este capacitor *MIS* ideal.

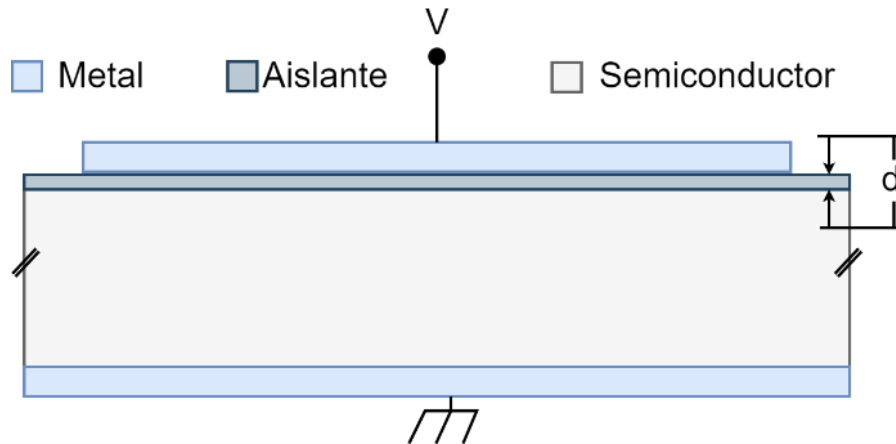


Figura 2-6. Estructura del capacitor *MIS* ideal.

Donde: d , es el espesor del aislante; V , es el voltaje aplicado. Para fines prácticos, se usará la convención siguiente, el voltaje aplicado (V) es positivo cuando el metal está polarizado positivamente respecto al sustrato.

El diagrama de bandas de un capacitor *MIS* ideal sin voltaje aplicado para sustratos tipo N y P [46], [96], [97], se muestra en la figura 2-7. Un capacitor ideal *MIS* puede describirse de la siguiente manera: las únicas cargas que pueden existir en la estructura bajo cualquier condición de polarización son las que están en el semiconductor y las que tienen signo igual pero opuesto en la superficie metálica adyacente al aislante. Además, no hay transporte de portadores a través del aislante en condiciones de polarización directa o la resistividad del aislante es infinita. Para simplificar el estudio, se asume que el metal elegido tiene una función de trabajo (Φ_m) que da cero al calcular la diferencia con la función de trabajo del semiconductor (Φ_n ó Φ_p), es decir, $\Phi_{ms} = 0$, como se describe en la ecuación (13) para sustrato tipo N y en la ecuación (14) para sustrato tipo P .

$$\Phi_{ms} = \Phi_m - \left(X + \frac{E_g}{2q} - \Psi_{Bn} \right) = \Phi_m - (X + \Phi_n) = 0 \quad \text{Ec. (13)}$$

$$\Phi_{ms} = \Phi_m - \left(X + \frac{E_g}{2q} + \Psi_{Bp} \right) = \Phi_m - \left(X + \frac{E_g}{2q} + \Phi_p \right) = 0 \quad \text{Ec. (14)}$$

Donde, X y X_i , son las afinidades electrónicas para el semiconductor y el aislante, respectivamente. Mientras Ψ_{Bp} , Ψ_{Bn} , Φ_p , y Φ_n , son los potenciales de Fermi respecto a la energía de banda prohibida media o nivel de Fermi intrínseco ($E_i = E_g/2$) y los bordes de las bandas de energías (E_F , E_C o E_V).

En otras palabras, las bandas están planas (condición de banda plana) cuando no hay un voltaje aplicado. Por el contrario, cuando es polarizado con voltajes positivos o negativos, existen tres casos que toman lugar en la superficie de semiconductor, véase la figura 2-8, se ejemplifica con substrato P . El primer caso, cuando un voltaje negativo ($V < 0$) es aplicado en el metal, el borde de la banda de valencia (E_V) se dobla hacia arriba cerca de la superficie, y está más cercana al nivel de Fermi, figura 2-8(a). Para un capacitor MIS ideal, no fluye corriente en la estructura, por lo que E_F permanece siempre plano en el semiconductor. Dado que la densidad de portadores depende exponencialmente de la diferencia de energía ($E_F - E_V$), este doblamiento de bandas produce una acumulación de portadores mayoritarios cerca de la superficie, situación que se conoce como *acumulación*. El segundo caso, ocurre cuando un voltaje positivo ($V > 0$) es aplicado, las bandas se doblan hacia abajo y los portadores mayoritarios están agotados, situación llamada *agotamiento*, véase figura 2-8(b). El tercer caso también sucede por aplicar un voltaje positivo, pero muy elevado ($V \gg 0$), las bandas se doblan aún más hacia abajo para que el nivel intrínseco (E_i) de la superficie cruce el nivel de Fermi (E_F), como se muestra en la figura 2-8(c). En este punto, el número de electrones es mayor que los huecos en la superficie substrato, invirtiendo la superficie, y este caso se le llama *inversión*. Para el caso del capacitor MIS ideal tipo N , se pueden obtener las mismas situaciones simplemente invirtiendo la polaridad del voltaje, ilustrado en las figuras 2-8(d), 2-8(e) y 2-8(f), respectivamente.

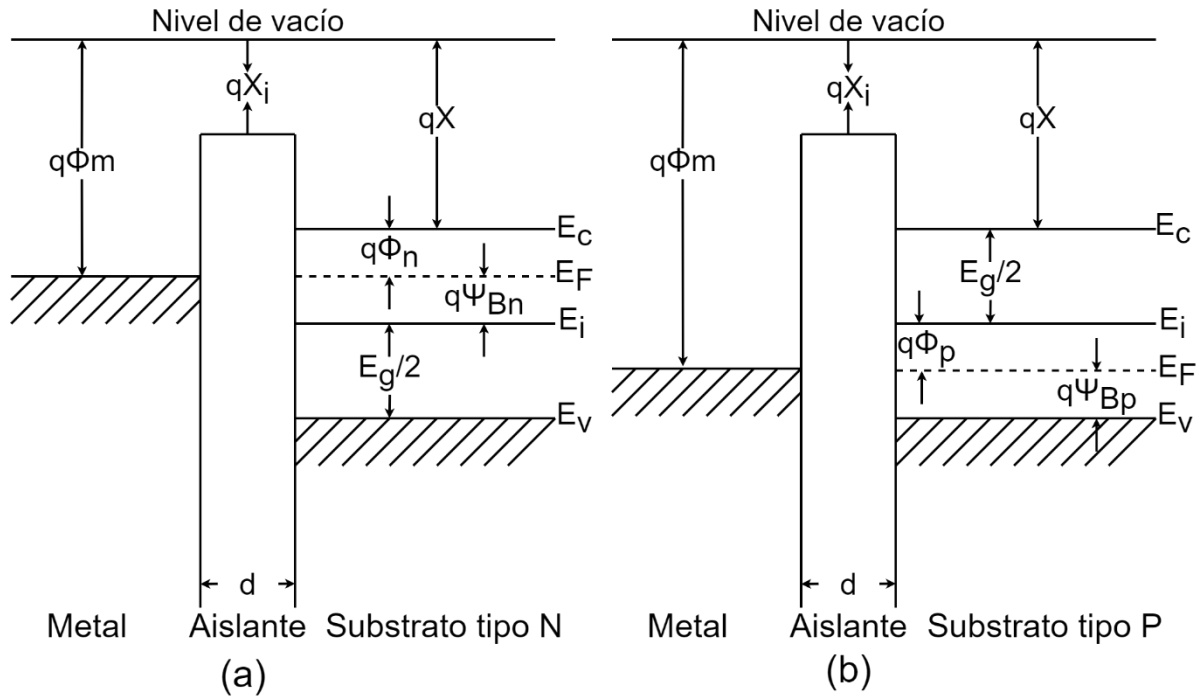


Figura 2-7. Diagrama de bandas de un capacitor MIS ideal: (a) tipo N y (b) tipo P, en equilibrio ($V=0V$).

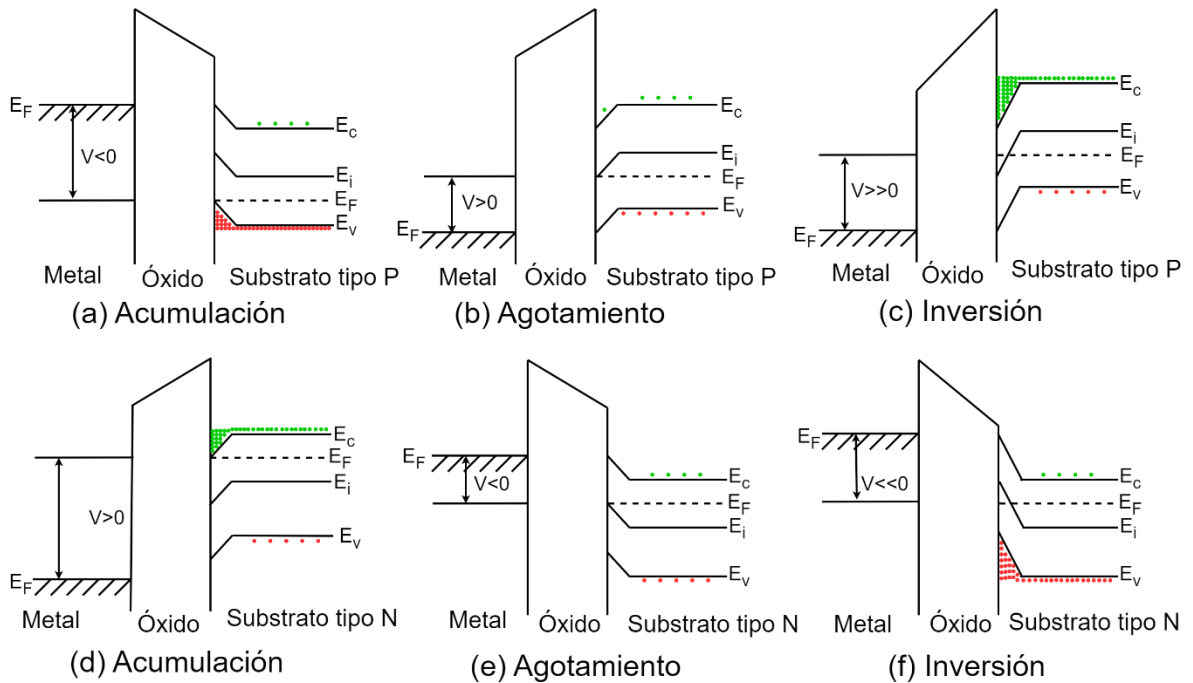


Figura 2-8. Diagrama de bandas para los casos de acumulación, agotamiento e inversión de un capacitor MIS ideal tipo P y N.

Como los efectos en el capacitor suceden en la superficie del semiconductor, es una región de interés. En la figura 2-9, se ilustra el diagrama de bandas en la superficie de un semiconductor tipo P . Para ello, se define el potencial electrostático, Ψ_p [46], [97], como el potencial $E_i(x)/q$ con respecto al bulk del semiconductor, ecuación (14).

$$\Psi_p(x) = -\frac{[E_i(x) - E_i(\infty)]}{q} \quad \text{Ec. (14)}$$

De esta manera, en la superficie del semiconductor, cuando $\Psi_p(x = 0) = \Psi_s$, a este potencial se conoce como potencial de superficie, Ψ_s . Ya que la concentración de electrones y huecos es una función del potencial [46], [96], [97], se describen como en la ecuación (15) para electrones y la ecuación (16) para huecos, en substrato tipo P .

$$n_p(x) = n_i \exp\left[\frac{q\Psi_p(x)}{kT}\right] \quad \text{Ec. (15)}$$

$$p_p(x) = n_i \exp\left[\frac{-q\Psi_p(x)}{kT}\right] \quad \text{Ec. (16)}$$

Donde, n_p , es la concentración de electrones en el semiconductor tipo P ; p_p , es la concentración de huecos en el semiconductor tipo P ; n_i , es la concentración de intrínseca en el semiconductor. Así, también es posible determinar la concentración en la superficie del semiconductor tipo P cuando $x = 0$ con las ecuaciones (17) y (18) para electrones y huecos, respectivamente.

$$n_p(0) = n_i \exp\left[\frac{q\Psi_s}{kT}\right] \quad \text{Ec. (17)}$$

$$p_p(0) = n_i \exp\left[\frac{-q\Psi_s}{kT}\right] \quad \text{Ec. (18)}$$

Así, conociendo el potencial de superficie. Por ende, con la concentración superficial del semiconductor es posible determinar en qué modo o región de operación se encuentra el capacitor [46], [97], de la siguiente manera:

- $\Psi_s < 0$ Acumulación de huecos (doblamiento de bandas hacia arriba).
- $\Psi_s = 0$ Condición de banda plana.
- $\Psi_{Bp} > \Psi_s > 0$ Región de agotamiento (doblamiento de bandas hacia abajo).
- $\Psi_s = \Psi_{Bp}$ Nivel de Fermi, $E_F = E_i(0), n_p(0) = p_p(0) = n_i$.
- $2\Psi_{Bp} > \Psi_s > \Psi_{Bp}$ Inversión débil, $n_p(0) > p_p(0)$.
- $\Psi_s > 2\Psi_{Bp}$ Inversión fuerte, $n_p(0) > n_i$.

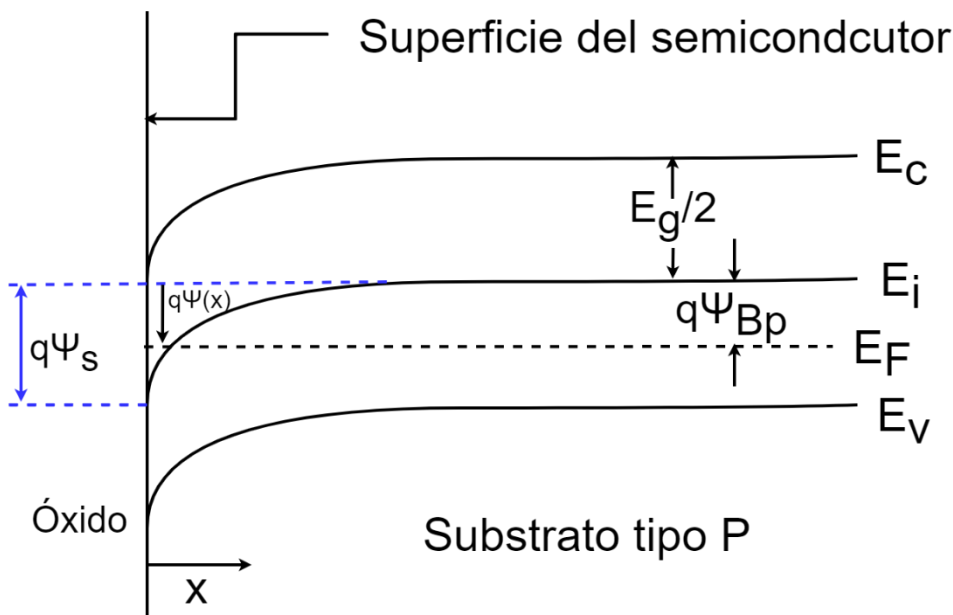


Figura 2-9. Diagrama de bandas de la superficie de un semiconductor tipo P en un capacitor MIS.

De igual manera, estos conceptos son similares para el capacitor MOS ideal (metal-óxido--semiconductor), la diferencia es que en lugar de utilizar cualquier material que funcione como aislante, se usan exclusivamente óxidos, el más común es óxido de silicio (SiO_2). Además, en algunos casos el metal de contacto que puede ser aluminio (Al), titanio (Ti) u otro metal, es sustituido por algún material altamente conductor, el más común es silicio policristalino de alta conductividad.

2.3. Óxido de Silicio Rico en Silicio (SRO)

El Óxido de Silicio Rico en Silicio o Óxido Rico en Silicio, por sus siglas en inglés, SRO [48]. Es un óxido de silicio compuesto por diferentes fases, como: óxido de silicio estequiométrico (SiO_2), óxido de silicio fuera de estequiometría (SiO_x , $0 < x < 2$) y silicio en su forma elemental (Si).

El SRO se puede obtener con diversos procesos, por ejemplo, Óxidos Térmicos Implantados con Silicio (SITO) [98], [99], Depósito Químico en Fase Vapor Asistido por Plasma (PECVD) [52], [98], [100], [101], y Depósito Químico en Fase Vapor a Baja Presión (LPCVD) [47], [65], [102], [103].

En INAOE se implementa la técnica LPCVD para depositar películas de SRO [47]. Esta técnica utiliza silano (SiH_4) y óxido nitroso (N_2O) como gases reactivos. El exceso de Si se controla con la relación de la presión de los gases reactivos, R_o :

$$R_o = \frac{P_{N_2O}}{P_{SiH_4}} \quad \text{Ec. (19)}$$

Existen diversos estudios con este material que demuestran sus diversas cualidades eléctricas y ópticas [55], [57], [59]–[64], [98], [104]–[114], haciéndolo un material versátil para su implementación en dispositivos tales como memorias no volátiles [50], sensores de radiación [115]–[119], dispositivos luminiscentes [108], [109], por mencionar algunas. En este trabajo se presenta su aplicación con celda solar [51], [120], [121], aprovechando las características del SRO.

3. DISPOSITIVO FOTOVOLTAICO Y MÉTODO DE CARACTERIZACIÓN

En este capítulo, se describe la estructura y funcionamiento del dispositivo llamado celda *SIL* (del inglés, *Stimulated Inversion Layer*). También la técnica implementada en la caracterización de las fuentes de luz ocupadas en las mediciones. Así como la caracterización de los dispositivos fotovoltaicos, ya que fue necesario implementar un método diferente al usual debido a la incompatibilidad de estas celdas con el sistema de caracterización estándar.

El capítulo se distribuye de la siguiente manera: primero, se presentan brevemente los equipos utilizados en la caracterización de fuentes de luz y dispositivos fotovoltaicos, y la técnica de medición de 4 puntas. Segundo, explica el diseño y funcionamiento de las celdas. Tercero, como se realizó el experimento de caracterización de las fuentes de luz y las celdas.

3.1. Espectrofluorómetro: FluoroMax-3

Es un instrumento analítico utilizado para medir y registrar la fluorescencia de un dispositivo o muestra. En la figura 3-1, se muestra una imagen del equipo.

La operación básica de este equipo consiste en una fuente continua de luz sobre un monocromador, que selecciona una banda de longitudes de onda. Esta luz de excitación monocromática se dirige a una muestra, que emite luminiscencia. La luminiscencia se dirige a un segundo monocromador, que selecciona una banda de longitudes de onda y las hace brillar en un detector. La señal del detector se transmite a un controlador del sistema y una computadora central, donde los datos se pueden manipular y presentar mediante un software. La fuente de luz continua es una lámpara de arco de xenón libre de ozono de 150W.



Figura 3-1. Fotografía del espectrofluorómetro FluoroMax-3.

En la figura 3-2, se observa un diagrama interno de los componentes del equipo.

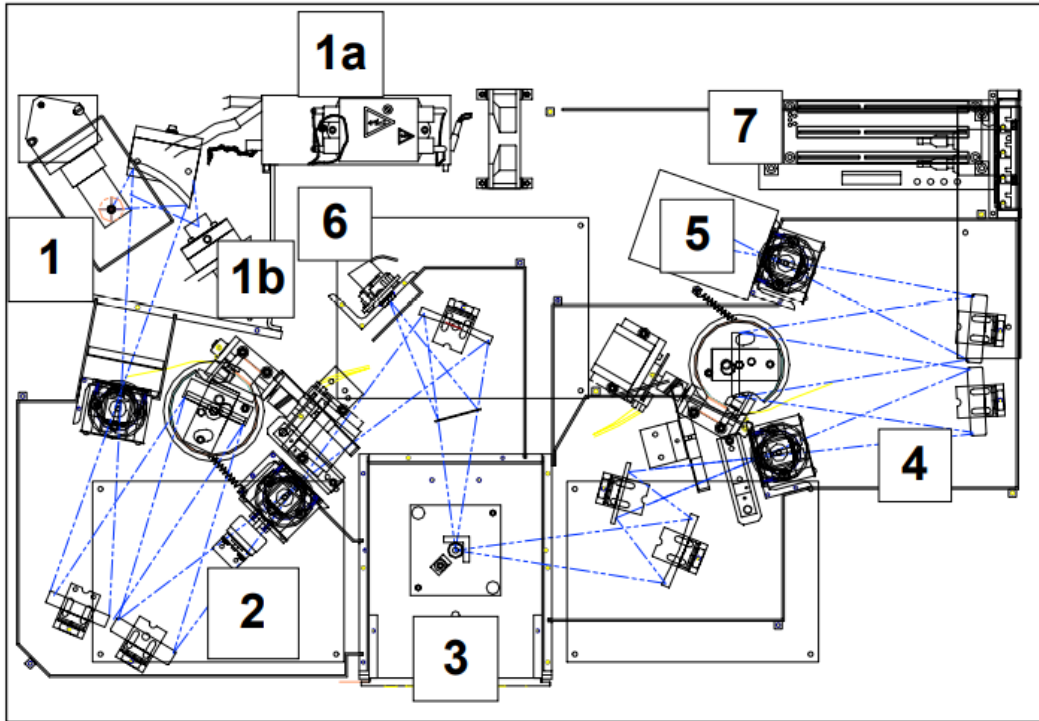


Figura 3-2. Diagrama de los componentes y su distribución dentro del equipo.

Elementos:

- 1** Lámpara de arco de xenón y carcasa de la lámpara.
- 1a** Fuente de alimentación de la lámpara de xenón.
- 1b** Lámpara de flash de xenón (solo en modelo FluoroMax-P).
- 2** Monocromador de excitación.
- 3** Compartimiento para muestras.
- 4** Monocromador de emisión.
- 5** Detector de señal (tubo fotomultiplicador y carcasa).
- 6** Detector de referencia.
- 7** Controlador de instrumentos.

Más información puede ser consultada en el manual de operación de la siguiente referencia [122].

3.2. Sensor FDS1010

El sensor FDS1010, es un fotodiodo de silicio, como se ilustra en la figura 3-3(a). El área activa del sensor es 1cm^2 . Permite medir fuentes de luz al convertir la potencia óptica en corriente eléctrica.

La corriente producida es una función de la potencia de luz incidente y la longitud de onda. La responsividad (\mathcal{R}) del sensor FDS1010, véase figura 3-3(b), es una medida de la sensibilidad a la luz, se define como la relación entre la fotocorriente y la potencia de la luz incidente a una longitud de onda dada, como indica la ecuación (2).

$$\mathcal{R}(\lambda) = \frac{I_{ph}}{P(\lambda)} \quad \text{Ec. (20)}$$

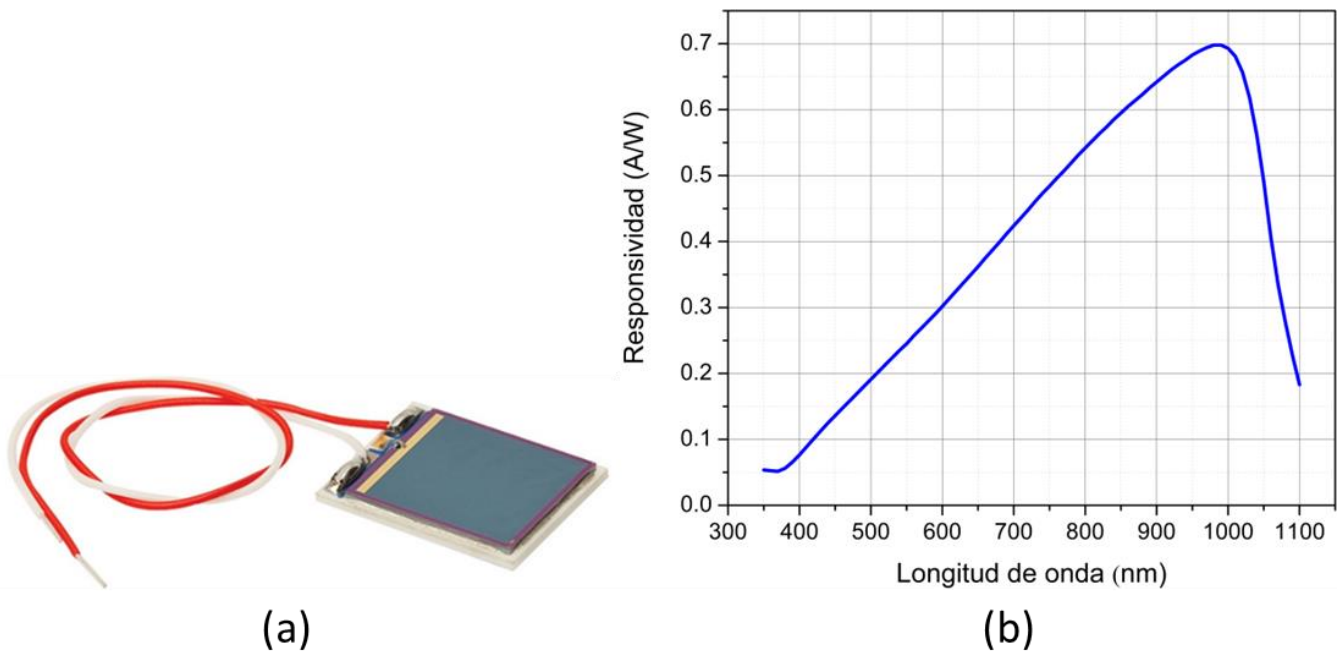


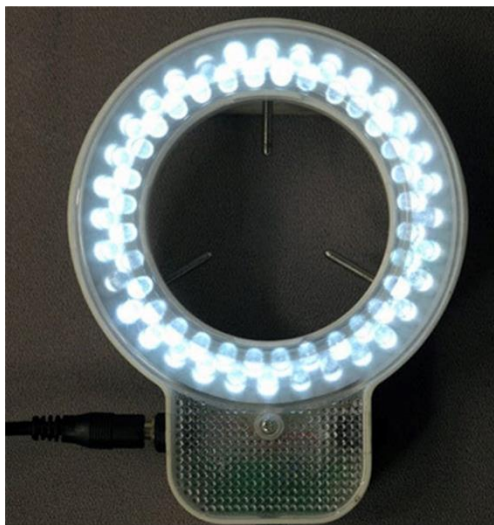
Figura 3-3. (a) Fotografía del fotodiodo FDS1010 y (b) curva de responsividad del sensor FDS1010.

Las características específicas pueden ser consultadas en su hoja de datos en la referencia [123].

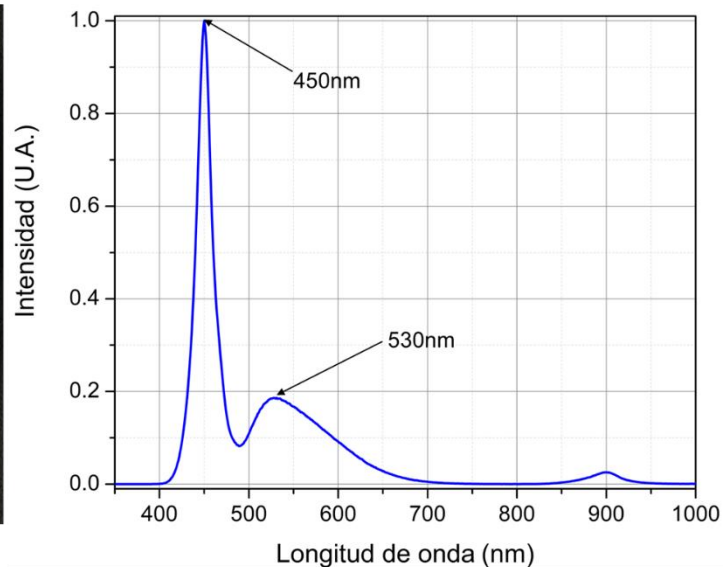
3.3. Lámpara AMSCOPE56S

Es una lámpara en forma de anillo formado por 56 led de luz blanca, figura 3-4(a). Tiene control de intensidad variable, proporciona una iluminación fría, uniforme, intensa y enfocada sin sombras.

Para obtener el espectro de emisión, se utilizó el sensor incorporado en el FluoroMax-3, el cual entrega la intensidad en unidades arbitrarias, como se muestra en la figura 3-4(b). Para la caracterización de los dispositivos de este trabajo, conocer el espectro de esta lámpara resulta importante, permitiendo saber cuáles componentes tienen mayor contribución y de esta manera, comprender qué efecto podrían tener sobre los dispositivos. En este caso, se observa que el máximo está localizado en 450nm, rango de componentes en azul. También, una contribución menor que la anterior en 530nm, componentes en verde. Para fines prácticos la irradiancia se calcula en función de la longitud de onda con mayor contribución del espectro de emisión, es decir, 450nm; mismo que se usa en el cálculo de eficiencia de los dispositivos.



(a)



(b)

Figura 3-4. (a) Fotografía de la lámpara AMSCOPE56S, y (b) espectro de emisión en unidades arbitrarias de la lámpara AMSCOPE56S.

3.4. Instrumento SMU SourseMeter Serie 2600B Keithley 2636B

El modelo 2636B, incorpora doble canal e integra una fuente voltaje y fuente de corriente de precisión, y un *DMM* (del inglés, *Digital Multimeter*). En la figura 3-5(a), se muestra una imagen de la parte frontal del equipo.

Algunas características de este equipo se colocan a continuación:

- Instrumentos de medida y fuente de voltaje/corriente de 4 cuadrantes, véase figura 3-7(b).
- Una pantalla con resolución de $6\frac{1}{2}$ dígitos.
- Interfaz de comunicación USB, GPIB, RS-232 y E/S digital.
- Corriente máxima/mínima: 1.5A DC, 10A pulso/0.1fA.
- Voltaje máximo/mínimo: 200V/100nV
- Modo de programación TSP, y soporte en LabVIEW.

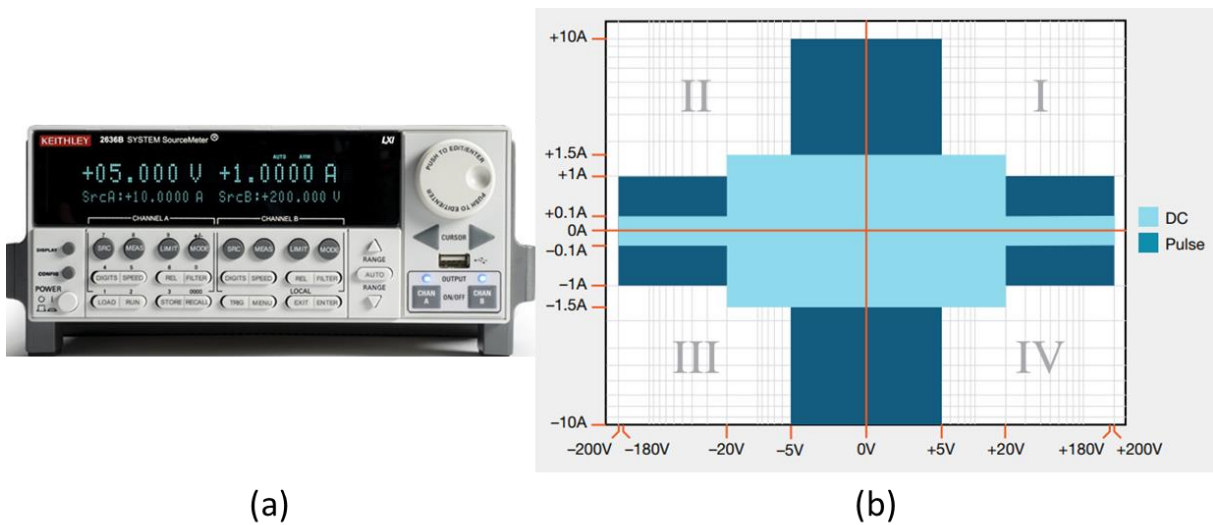


Figura 3-5. (a) Fotografía frontal de la fuente medidora Keithley 2636B y, (b) gráfica de parametros eléctricos.

Para información más específica, consultar las referencias [124], [125].

3.5. Método de medición de 4 puntas

El principio de operación de este método está basado en la ley de Ohm, y este método de medición normalmente se implementa para medir resistencias de valores muy bajos [126], donde un equipo de 2 puntas carece de la precisión adecuada debido a la intromisión de otras componentes resistivas de los mismos cables y del mismo equipo. En la figura 3-6, se muestra el esquema característico de conexión.

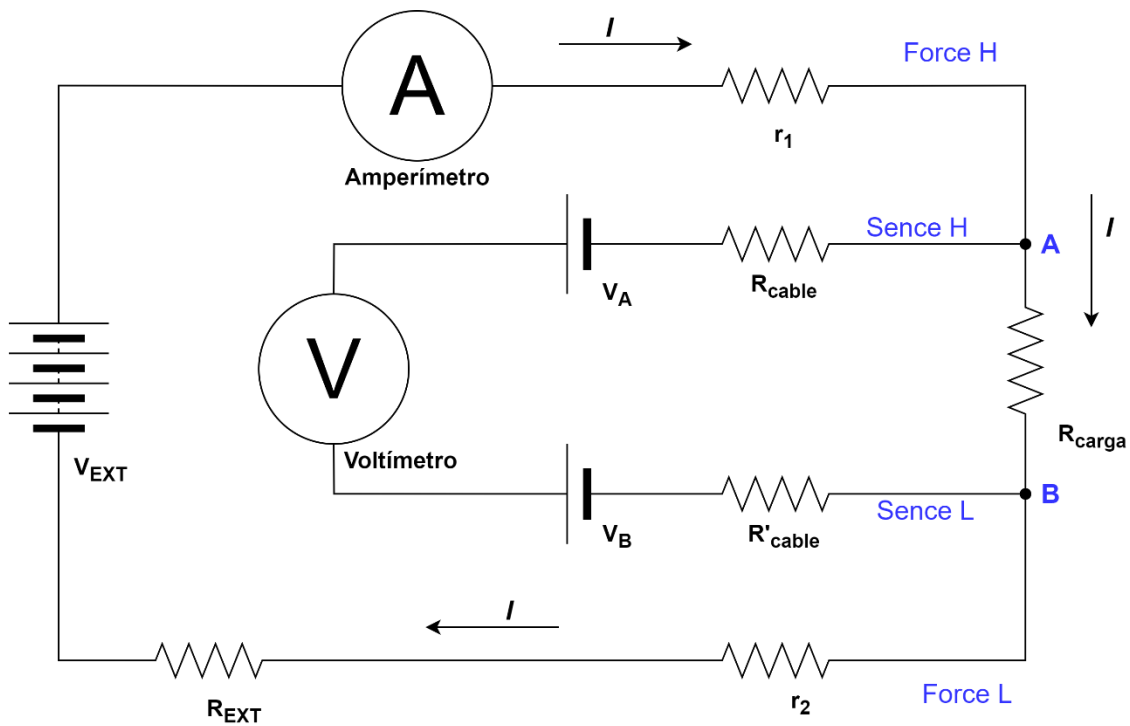


Figura 3-6. Diagrama eléctrico del método kelvin o método de 4 puntas.

La forma en que funciona el método es la siguiente: se conecta un amperímetro que mide la corriente que fluye a través del dispositivo, simultáneamente se coloca un voltímetro que mide la caída de voltaje en el dispositivo [127].

3.6. Dispositivo fotovoltaico: Celda *SIL*

La celda *SIL* es un dispositivo fotovoltaico que utiliza la región de inversión en una estructura tipo *MIS* para formar la zona activa de una celda solar, Las celdas *SIL* de prueba fueron diseñadas como parte de un chip ilustrado en la figura 3-7. *SIL* es un acrónimo del inglés *Stimulated Inversion Layer*, o capa de inversión estimulada. Esta capa de inversión estimulada es el principio por el cual funciona la celda *SIL*, explicado a detalle en una sección posterior.

3.6.1. *Diseño y fabricación*

El diseño completo es un chip con área de $\approx 0.2133\text{cm}^2$, compuesto de 6 dispositivos, en la figura 3-8 se aprecia una vista transversal de las capas de cada dispositivo del chip, enlistados a continuación:

- (a) Celda *SIL* (celda con *SRO* o celda no convencional). Área: 0.04cm^2 . Capas:
 - Zona de contacto: *Al/difusión P⁺/n – Si/Al*.
 - Zona activa: *AZO/SRO/n – Si/Al*. *AZO*, Óxido de Zinc dopado con Aluminio.
- (b) Celda de unión P-N (celda con óxido o celda convencional). Área: 0.0374cm^2 . Capas:
 - Zona de contacto: *Al/difusión P⁺/n – Si/Al*.
 - Zona activa: *SiO₂/difusión P⁺/n – Si/Al*.
- (c) Capacitor 1. Área: 0.0081cm^2 . Capas: *Al/SRO o SiO₂/difusión P⁺/n – Si/Al*.
- (d) Capacitor 2. Área: 0.0081cm^2 . Capas: *AZO/SRO o SiO₂/difusión P⁺/n – Si/Al*.
- (e) Capacitor 3. Área: 0.0081cm^2 . Capas: *AZO/SRO o SiO₂/n – Si/Al*.
- (f) Capacitor 4. Área: 0.0081cm^2 . Capas: *Al/SRO o SiO₂/n – Si/Al*.

El diseño de mascarillas de la figura 3-7 fue pensado para permitir tener las celdas convencional y no convencional en el mismo chip de pruebas. Sin embargo, durante la fabricación la incompatibilidad de los procesos obligó a realizar dos procesos independientes, para un chip con la celda *SIL* de la figura 3-7(a) y otro para un chip con la celda de unión P-N de la figura 3-7(b) y sus respectivos capacitores de prueba. Debido a lo novedoso y al gran número de variaciones de estas celdas *SIL*, el tiempo

que llevó fabricar los chips fue aproximadamente 3 años, en general el proceso fue extenso y por lo mismo accidentado. Particularmente, los capacitores de las figuras 3-7(c) y 3-7(d) presentan un error en su diseño, falta hacer contacto en la región *P* bajo el capacitor. La tabla 3-1 muestra las características de las variantes fabricadas con algunas características relevantes de cada oblea, como lo son: tipo de *SRO* o *SiO₂*, tipo de substrato, tratamiento térmico (*TT*) y su estado. Dañándose las obleas BR2 y BR10 en la fabricación.

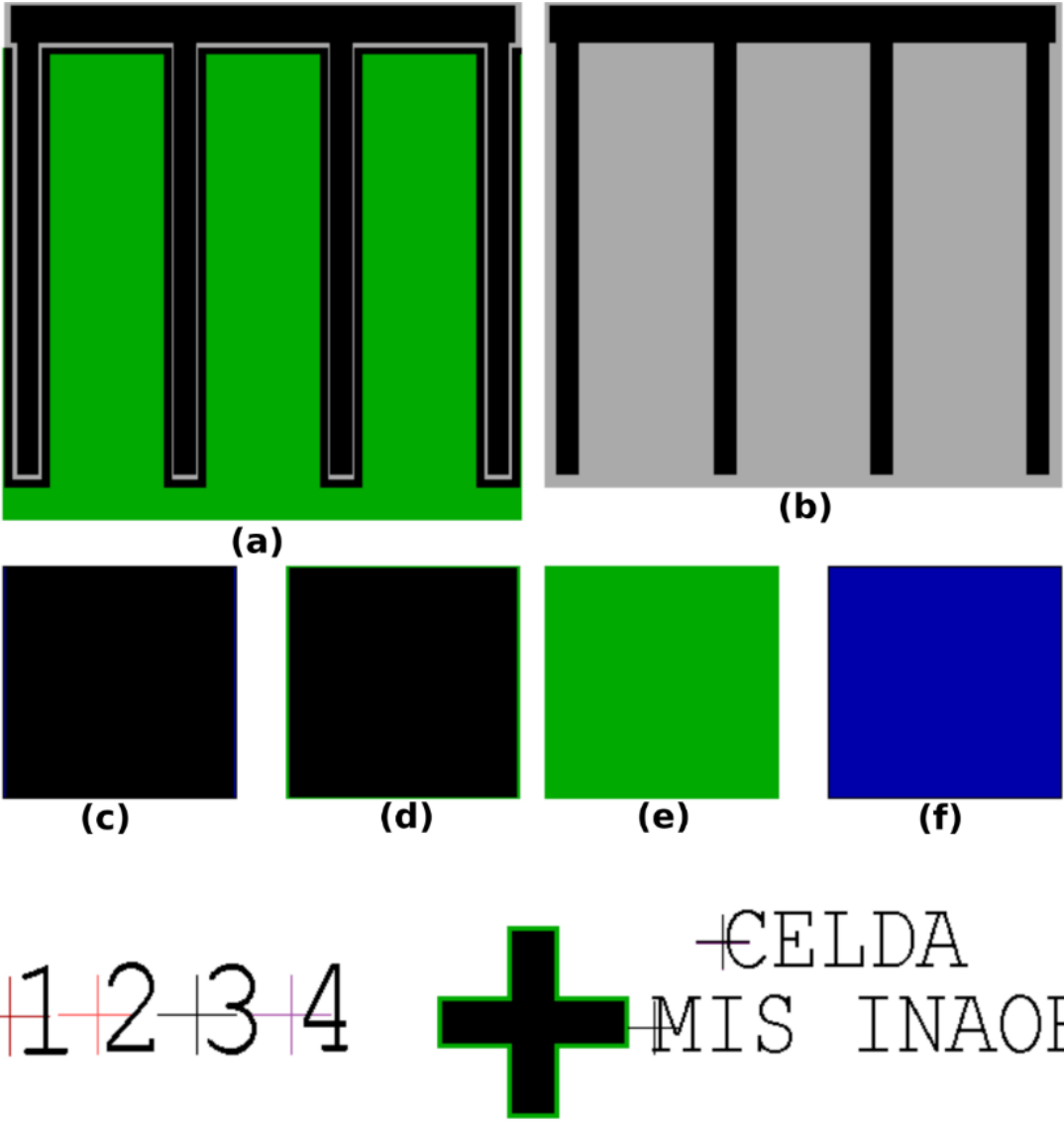


Figura 3-7. Diseño del chip de pruebas de: (a) celdas SIL, (b) celdas de unión P-N y, (c-f) capacitores de prueba, desarrollado en Mentor L-Edit 2018 ©.

Respecto a la celda de unión P-N de las figuras 3-7(b) y 3-8(b), es una celda convencional que usa SiO_2 como capa antirreflejante, su funcionamiento es bien conocido y por ello no se trata más en este capítulo. Por otro lado, de la celda *SIL* se explica su funcionamiento y estructura en una sección posterior. También, debido a las diminutas dimensiones de las celdas respecto a las que normalmente son usadas en investigación (áreas $\approx 1cm^2$), fue necesario desarrollar un método de caracterización para las celdas del chip de la figura 3-7, ya que no es posible utilizar el sistema de caracterización estándar (simulador solar con espectro AM1.5).

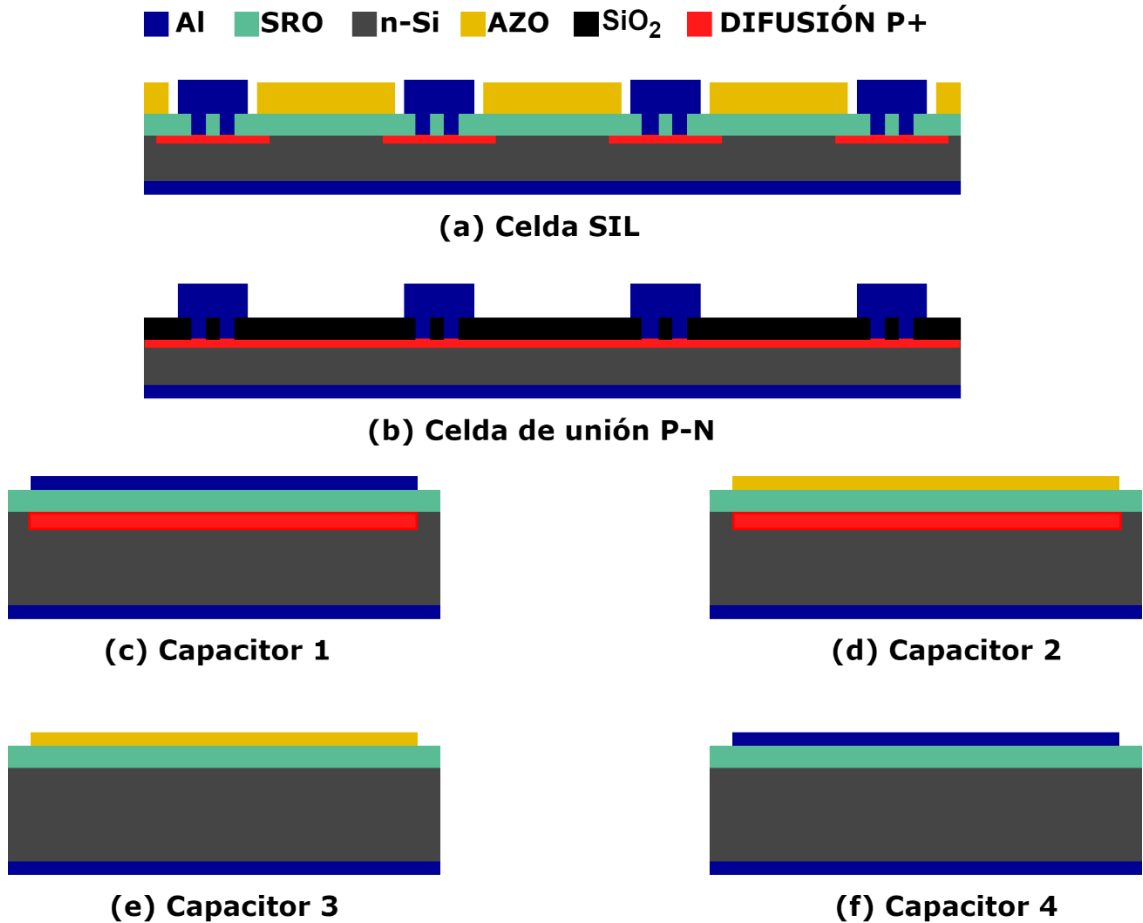


Figura 3-8. Vista con corte transversal de los dispositivos del chip de la figura 3-7.

Oblea	Resistividad	SRO	SiO ₂	Tipo SRO	TT	Estado
AR1	Alta	Si	No	10	Si	Completa
BR2	Baja	Si	No	10	Si	Perdida
AR3	Alta	Si	No	10	No	Completa
BR4	Baja	Si	No	10	No	Completa
AR5	Alta	Si	No	20	Si	Completa
BR6	Baja	Si	No	20	Si	Completa
AR7	Alta	Si	No	20	No	Completa
BR8	Baja	Si	No	20	No	Completa
AR9	Alta	Si	No	30	Si	Completa
BR10	Baja	Si	No	30	Si	Perdida
AR11	Alta	Si	No	30	No	Completa
BR12	Baja	Si	No	30	No	Completa
AR13	Alta	No	Si	-	No	Completa
BR14	Baja	No	Si	-	No	Completa
AR15	Alta	No	Si	-	Si	Completa
BR16	Baja	No	Si	-	Si	Completa

Tabla 3-1. Chips completos fabricados y condiciones del proceso. AR y BR se refieren a obleas de alta (> 2000 $\Omega \cdot \text{cm}$) y baja (3 a 5 $\Omega \cdot \text{cm}$) resistividad, respectivamente. Tipo de SRO se refiere a $R_o = 10, 20, 30$. TT se refiere al tratamiento térmico a 1100°C durante 180 minutos. La última columna menciona a las obleas que terminaron exitosamente el proceso.

3.6.2. Funcionamiento de la celda SIL

La figura 3-8(a) ilustra la estructura básica de la celda SIL en 2D. La estructura principal de este dispositivo es un capacitor MIS [46]. En la celda SIL, las difusiones

P^+ , localizadas, mostradas en la figura 3-8(a) funcionan como los colectores de los pares electrón-hueco generados en la región de carga espacial (*RCE*) inducida, por lo que en adelante le llamaremos colectores. Los colectores extraen la carga a través de los contactos metálicos superior (en forma de peine) e inferior, véase figura 3-8(a), de la estructura de la celda.

Por su parte, la estructura del capacitor *MIS*, en orden descendente, está formada por una película depositada de *AZO* [128]–[130], una película depositada de *SRO* (véase sección 2.3), sustrato de silicio tipo *N* (*n-Si*) y el contacto inferior de aluminio (*Al*), véase figura 3-8(a). El capacitor debe operar en inversión [46], [96], [97] para producir una región de carga espacial en la superficie del sustrato. Sin embargo, el capacitor no debe estar polarizado mientras el dispositivo opera como celda solar. Esto es factible con la propiedad de atrapamiento de carga permanente en el *SRO*. En otras palabras, el capacitor *MIS* se polariza únicamente una vez para que el *SRO* atrape cargas positivas o negativas, y posteriormente, sea capaz de funcionar como celda solar. De acuerdo con la referencia [131] aplicando un voltaje positivo a este tipo de capacitor con sustrato tipo *N*, se consigue atrapar cargas negativas en el *SRO* que generen un canal o región de inversión inducida en la interfaz *SRO/n-Si*, creando una región de empobrecimiento o región de carga espacial debajo de la región de inversión, similar a como sucede en una unión P-N. La figura 3-9 ejemplifica el funcionamiento de este capacitor.

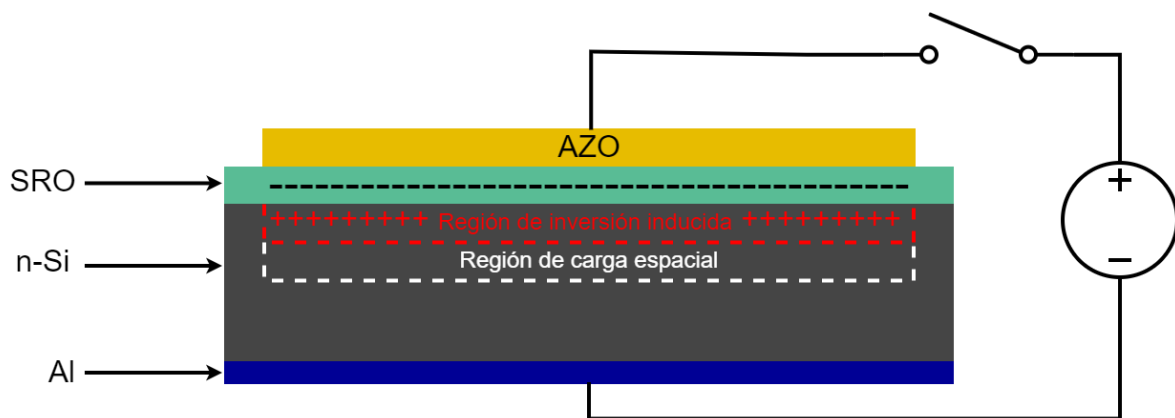


Figura 3-9. Esquema del funcionamiento de un capacitor *MIS* con carga atrapada en el *SRO*.

La formación de la región de carga espacial en el capacitor *MIS* se acopla con la región de carga espacial formada por los colectores $P^+/n\text{-Si}$, como en la figura 3-10 formando una *RCE* en el substrato de $n\text{-Si}$. Los *PEH* fotogenerados son separados por esta *RCE*. En este punto, el dispositivo opera como una celda solar. La luz incidente que es transparente al *AZO* y *SRO*, penetra hasta el substrato para crear *PEH* que son recolectados por los colectores P^+ y movidos hacía el contacto metálico para producir una corriente eléctrica cuando es conectada una carga externa.

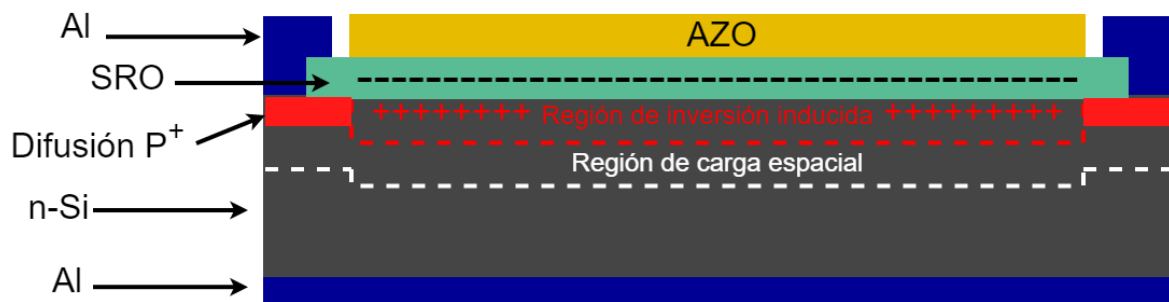


Figura 3-10. Formación de la región de carga espacial completa en la celda SIL.

3.7. Caracterización de equipos y dispositivos

3.7.1. Fuentes de luz

La caracterización de las potencias ópticas suministradas por la lámpara AMSCOPE56S y la lámpara de xenón del FluoroMax-3, fueron obtenidas con el sensor FDS1010. Este sensor requiere conectarse a un circuito externo similar al mostrado en la figura 3-11, que permite medir las potencias de las lámparas.

El circuito consta de los siguientes elementos: una fuente de voltaje de alimentación (24V), un filtro de ruido diseñado con un resistor (R_1) y un capacitor (C_1), el sensor FDS1010 en polarización inversa y un resistor de carga (R_L). De este circuito interesa la corriente que fluye por el lazo formado entre el sensor y el resistor R_L . El cambio en corriente generado en el lazo por el sensor al recibir luz produce una caída de voltaje (V_o) en R_L , este V_o es medido con un voltímetro y, posteriormente se calcula la potencia asociada a la longitud de onda incidente en el sensor aplicando la ecuación (21).

$$V_o(\lambda) = P(\lambda) \cdot R_L \cdot \mathcal{R}(\lambda) \quad \text{Ec. (21)}$$

Donde: $V_o(\lambda)$, voltaje medido en el resistor R_L ; $P(\lambda)$, potencia asociada a cierta longitud de onda; R_L , resistor de carga; $\mathcal{R}(\lambda)$, responsividad asociada a cierta longitud de onda. El parámetro $\mathcal{R}(\lambda)$ se extrae de la curva de responsividad, véase figura 3-3(b).

Antes de caracterizar la lámpara de xenón del FluoroMax-3, fue necesario cambiar por una nueva lámpara, ya que se había superado el tiempo de vida útil recomendado por el fabricante, así mismo fue necesario calibrarla, ambas acciones se realizaron siguiendo las indicaciones de la referencia [122]. De acuerdo con los datos de la calibración, hay un incremento importante en la intensidad de la nueva lámpara, como se muestra en la figura 3-12.

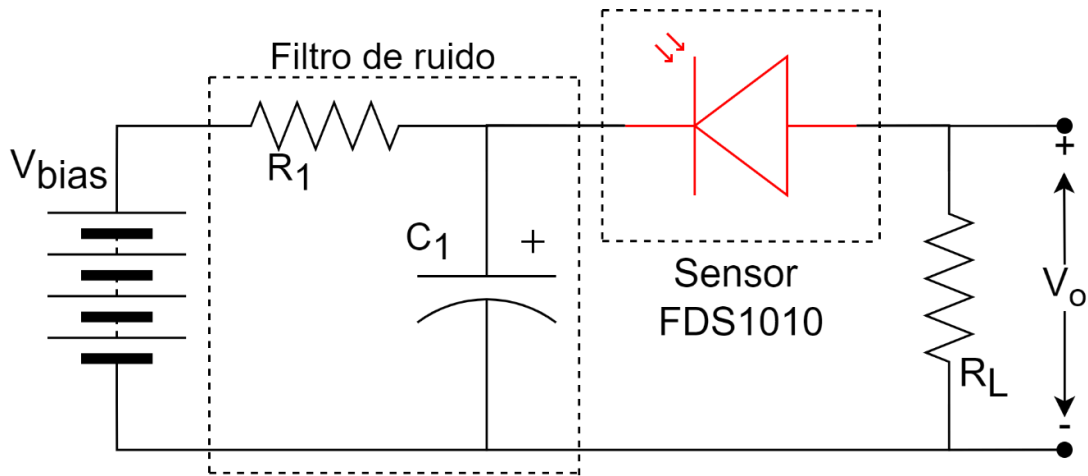


Figura 3-11. Circuito externo para acoplar el sensor FDS1010, en la medición de potencia de las fuentes de luz. Diagrama extraído de la hoja de datos del sensor [1].

Además, fue necesario utilizar un conjunto de elementos que permitieran extraer la luz, para ellos se usaron los siguientes elementos: una base especial colocada en el compartimiento de muestras (elemento 3 de la figura 3-2) para adaptar una fibra óptica, una fibra óptica como guía para la luz y, un soporte mecánico que permita sujetar y manipular la posición de la fibra óptica, véase figuras 3-13 (a), (b) y (c), respectivamente.

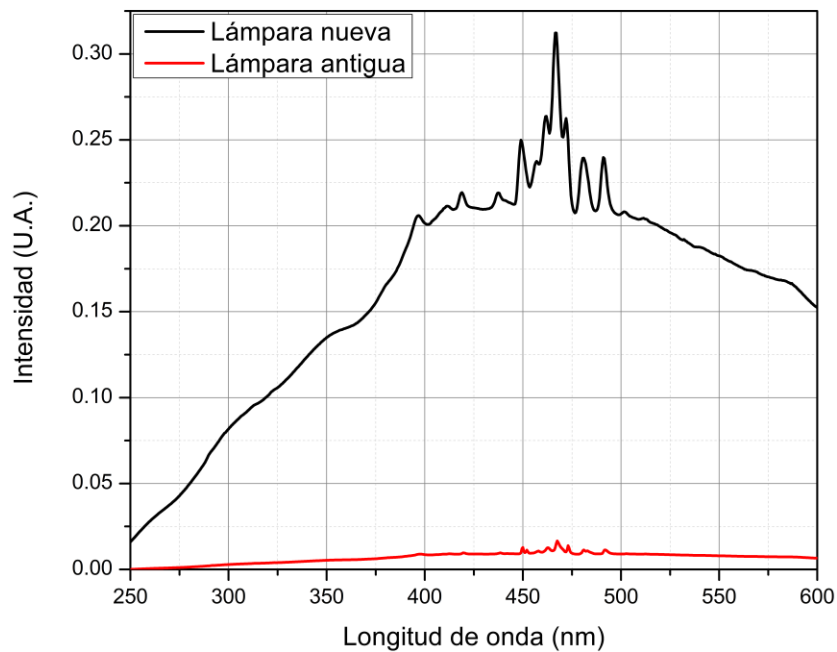


Figura 3-12. Curva de excitación de la lámpara antigua (línea roja) y lámpara nueva (línea negra) después de calibrarse debido al cambio de lámpara en el equipo FluoroMax-3.

Con estos elementos conectados, el extremo de la fibra óptica se acomoda encima del sensor a una distancia de $\approx 3cm$, y se procede a medir la potencia de la luz incidente, y después se calcula la irradiancia correspondiente con cada longitud de onda. La irradiancia es potencia por unidad de área (W/cm^2), para calcularla es necesario conocer el área del sensor que es $1cm^2$ y dividirla por la potencia medida. Estos son los valores de irradiancia necesarios para realizar los cálculos de eficiencia en los dispositivos caracterizados bajo estímulo óptico de la lámpara de xenón del FluoroMax-3.

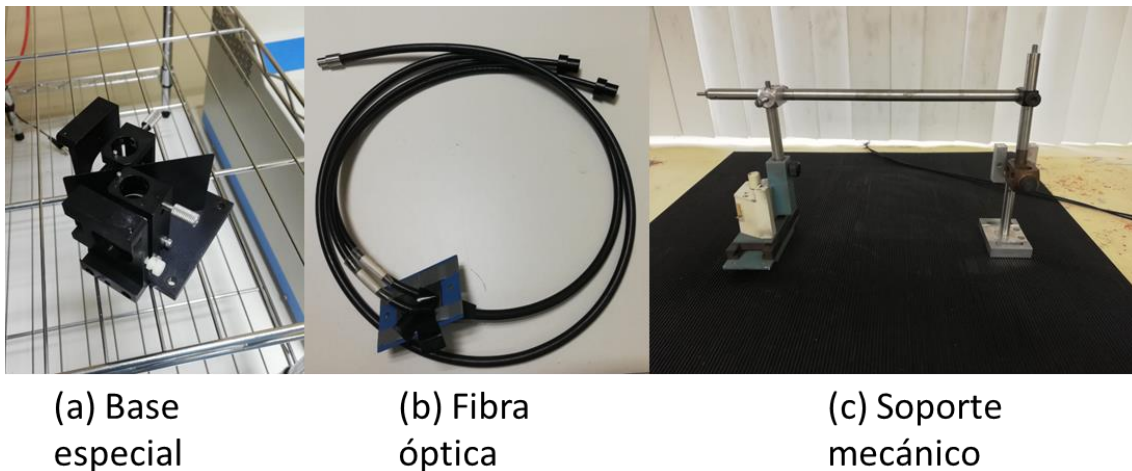


Figura 3-13. Componentes externos para caracterizar la lámpara de xenón del FluoroMax-3.

De igual manera se mide la potencia óptica de la lámpara AMSCOPE56S, como este equipo originalmente está diseñado para acoplarse en los microscopios, solo se necesita ajustar la altura del microscopio de tal manera que la lámpara quede a una distancia $\approx 7.5cm$ del sensor, misma distancia usada en la caracterización de las celdas. Además, como se observó en la figura 3-4(b) el espectro de emisión de esta lámpara presenta una pico muy alto y estrecho en $450nm$. También se observa un segundo pico en $530nm$, pero 5 veces menor al pico de $450nm$. Por esta razón la medición de la potencia se hace respecto a esta longitud de onda de $450nm$ con una responsividad del sensor FDS1010 de $0.136 A/W$.

3.7.2. Celdas

La medición de la celda consiste en conectar un voltímetro y un amperímetro en serie con una carga (resistor variable o potenciómetro) al dispositivo de prueba (celda solar), como se muestra en la figura 3-14. En este experimento se mide el voltaje producido en la celda y la corriente que fluye a través de la carga cuando se varía el valor de resistencia, como explican en la referencia [132]. Sin embargo, utilizar un resistor implica una pérdida de energía en forma de calor, con este particular experimento posiblemente la energía producida por el dispositivo sea menor a la esperada en una caracterización estandarizada. Fue implementado un arreglo de resistores discretos en lugar de un resistor variable, la tabla 3-3 enlista los valores de los resistores soldados a una placa perforada para mejorar la conexión con las terminales del amperímetro.

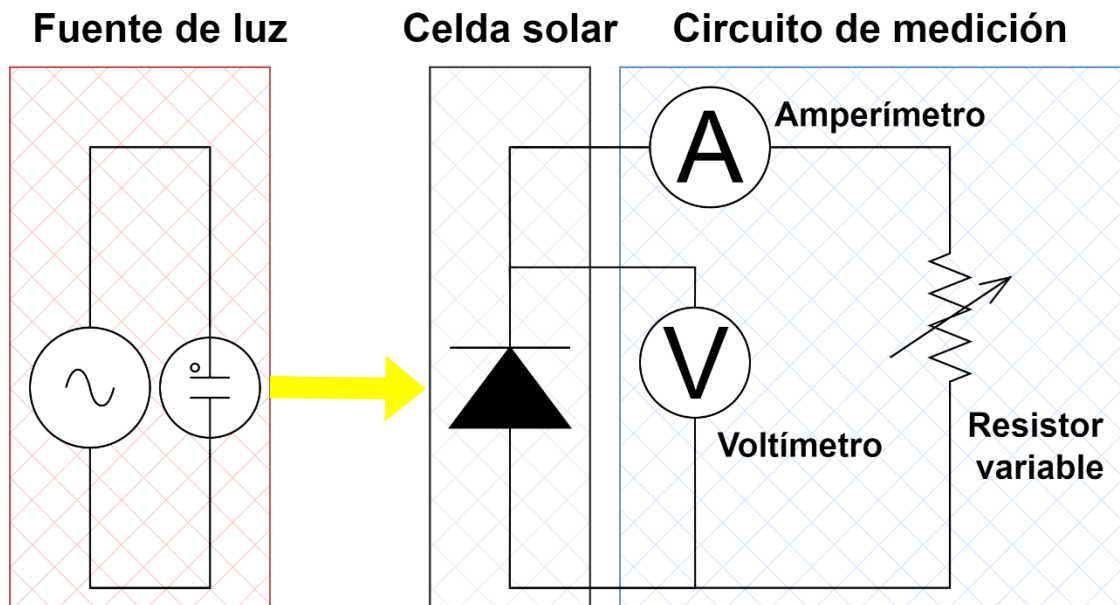


Figura 3-14. Esquema simple del método de caracterización de las celdas solares.

Los elementos que componen al sistema de caracterización de celdas son:

- Fuente medidora Keithley 2636B.
- Programa de control SICFK [2].
- Arreglo de resistores (véase tabla 3-3).
- FluoroMax-3: lámpara de xenón y su monocromador, véase sección 3.1.
- Lámpara AMSCOPE56S, véase sección 3.3.

Previo a la caracterización del dispositivo, específicamente para la celda *SIL*, debe aplicarse un voltaje positivo (30V) en el capacitor *MIS* por cierto tiempo (15 minutos) para que el *SRO* atrape cargas y produzca la región de inversión que dé lugar a la región de carga espacial, como se explicó en la sección 3.6.2.

A continuación, se describe el resto de los elementos del experimento. El programa SICFK [133] configura la Keithley 2636B sincronizando sus dos canales, A y B, para que operen como voltímetro y amperímetro, respectivamente, como se muestra en la figura 3-15. El programa también guarda la información de la medición en un archivo de texto para su posterior manipulación y análisis.

Nombre	Resistencia (Ω)	Nombre	Resistencia (Ω)	Nombre	Resistencia (Ω)
R1	1	R9	82	R17	680
R2	2.2	R10	100	R18	820
R3	5.6	R11	120	R19	1k
R4	7.5	R12	160	R20	1.5k
R5	10	R13	270	R21	2.2k
R6	27	R14	330	R22	3.9k
R7	39	R15	470	R23	5.6k
R8	56	R16	510	R24	10k

Tabla 3-2. Valores de los resistores usados como carga en la caracterización de celdas.

Respecto a las fuentes de luz, su montaje y posicionamiento es idéntico al explicado en la sección 3.7.1. Después de configurar la Keithley 2636B y acomodar la fuente de luz, empiezan las mediciones de voltaje y corriente en las celdas. Las mediciones son de la manera siguiente: se miden 30 valores (puntos) de voltaje y corriente para

cada resistor (24 resistores), creando 24 archivos con 30 mediciones de voltaje y corriente correspondiente a cada resistor. De los 24 archivos se promedian las 30 mediciones de voltaje y corriente obteniéndose un valor promedio de voltaje y corriente correspondiente a cada resistor. Con los 24 puntos promediados y organizados se genera un nuevo archivo correspondiente a la curva I-V del dispositivo medido. La figura 3-16 ejemplifica este proceso para el caso del voltaje y es idéntico para la corriente. El cambio entre cada resistor es manual, que torna a este método tedioso y tardado. Este mismo proceso debe repetirse para cada estimulación óptica que son 9 longitudes de onda.

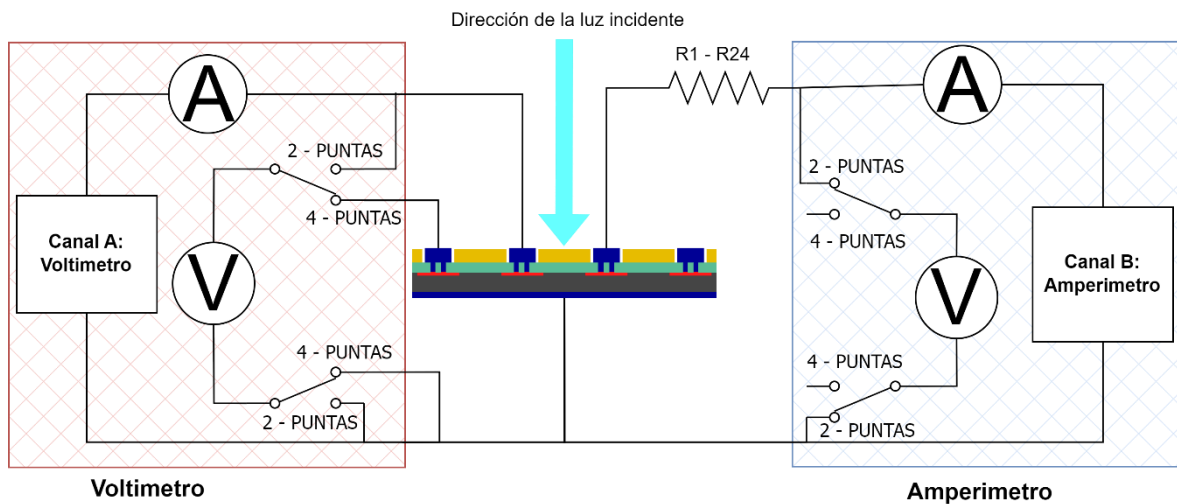


Figura 3-15. Diagrama de conexión de los elementos involucrados en la caracterización de las celdas.

En otras palabras, una sola celda solar caracterizada con este método genera 216 archivos de información, divididos en 9 curvas I-V correspondientes a cada estímulo óptico (350nm, 400nm, 450nm, 480nm, 530nm, 575nm, 600nm, 720nm y 800nm), cada curva está formada por los 24 valores promediados de voltaje y corriente provenientes de 30 puntos medidos en cada resistor (véase figura 3-16). Esto se repite por el número de celdas medidas (3 celdas) por cada oblea (10 obleas). De manera algebraica puede interpretarse con las ecuaciones (22) y (23).

$$\begin{aligned}
 & \text{Mediciones por celda } (M_C) \\
 & = (\# \text{ de resistores}) \cdot (\# \text{ de longitudes de onda}) \qquad \text{Ec. (22)}
 \end{aligned}$$

$$\text{Mediciones totales } (M_T) = M_C \cdot (\# \text{ de celdas}) \cdot (\# \text{ de obleas}) \qquad \text{Ec. (23)}$$

Resultando en:

$$M_C = (24) \cdot (9) = 216 \text{ mediciones}; \quad M_T = (216) \cdot (3) \cdot (10) = 6480 \text{ mediciones}$$

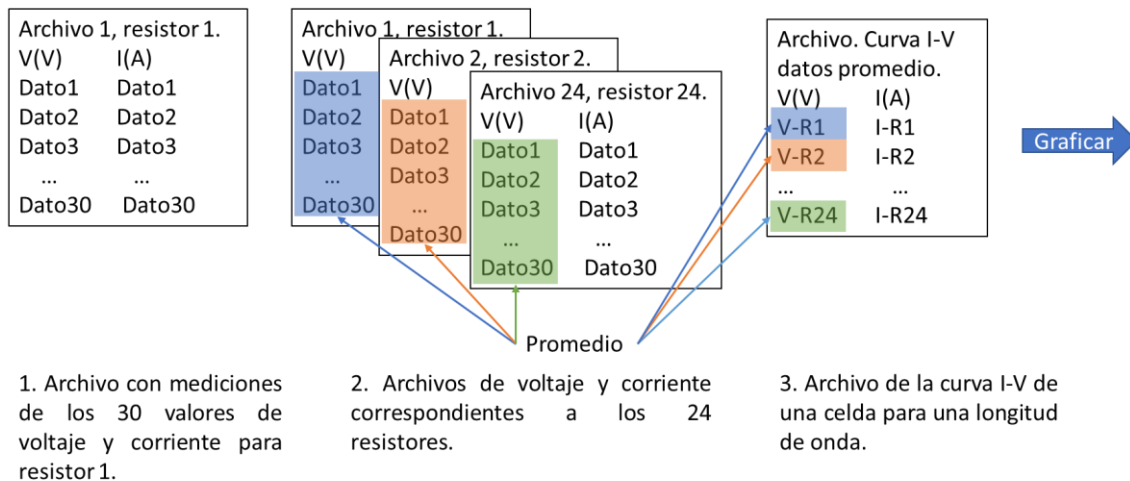


Figura 3-16. Ejemplo de captura y procesamiento de los valores de voltaje correspondientes a cada resistor conectado a la celda solar para formar la curva I-V. Este proceso se repite para cada longitud de onda con la que se estimula la celda solar.

Por sí mismo, formar el archivo de la curva I-V requiere de bastante tiempo, y para facilitar esta tarea se desarrollaron dos programas en *LabVIEW* que se encargan de procesar y organizar los datos de las mediciones. En el programa de la figura 3-17(a) se puede observar la curva I-V de una celda, que se forma con los 24 puntos promediados de cada resistor al ser estimulada con una longitud de onda. El programa de la figura 3-17(b) importa los archivos generados por el programa de la figura 3-17(a), de cada longitud de onda y calcula los parámetros: voltaje de circuito abierto (V_{OC}), corriente de corto circuito (I_{SC}), densidad de corriente de corto circuito (J_{SC}), potencia máxima (P_{MAX}), factor de llenado (FF) y eficiencia de conversión de

energía (PCE), creando un nuevo archivo que contiene esta información organizada para su posterior análisis.

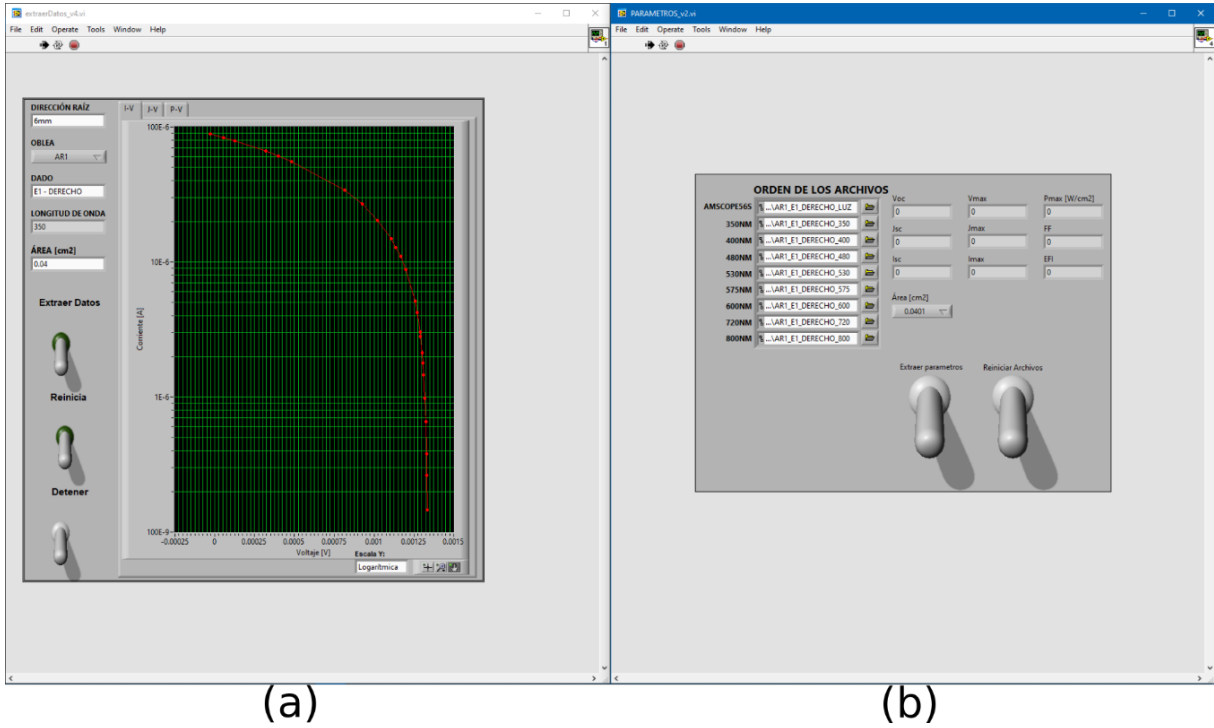


Figura 3-17. Programas desarrollados para el procesamiento de los datos de las mediciones: (a) promediar puntos y formar curvas I-V y (b) calcular parámetros eléctricos.

4. DISCUSIÓN Y RESULTADOS

En este capítulo se plasman y discuten los resultados de este trabajo. El método comúnmente implementado en la caracterización de celdas solares es utilizar un simulador solar con un espectro de emisión estandarizado conocido como AM1.5, en el particular caso de este trabajo, la caracterización se realizó con métodos diferentes a este estándar. En lugar de un simulador solar, se implementaron dos tipos de fuentes de luz: lámpara AMSCOPE56S y lámpara de xenón incorporada en el sistema FluoroMax-3. Así mismo, fue necesario caracterizar ambas fuentes con el fin de conocer la irradiancia suministrada a los dispositivos fotovoltaicos. Aplicando las mismas condiciones experimentales en los dispositivos fotovoltaicos con ambas fuentes de luz, se midieron corrientes y voltajes para obtener los parámetros eléctricos de interés en celdas solares, como: voltaje de circuito abierto (V_{OC}), corriente de corto circuito (I_{SC}), densidad de corriente de corto circuito (J_{SC}), factor de llenado (FF), eficiencia de conversión de energía (PCE), resistencia serie (R_s) y resistencia shunt (R_{sh}).

La tabla 4-1 es un resumen de algunas características de fabricación y los parámetros eléctricos obtenidos con la fuente de luz AMSCOPE56S. De esta tabla, se pueden apreciar: dispositivos fabricados con 3 tipos de SRO (10, 20 y 30) o SiO_2 , correspondiente a la película del material aislante; dos tipos de substratos, alta (AR) y baja resistividad (BR); y, si fueron expuestos (o no) a un tratamiento térmico (TT) de 1100°C durante 180 minutos.

Oblea	Aislante	$V_{OC}(mV)$	$J_{SC}(mA)$	$PCE (%)$
AR1-TT	SRO_{10}	139.23	294.1	6.238
AR3	SRO_{10}	186.36	346.63	10.015
BR4	SRO_{10}	90.49	200	3.046
AR5-TT	SRO_{20}	85.08	162.41	2.557
BR6-TT	SRO_{20}	58.54	155.78	1.52

AR7	$SR0_{20}$	70.57	153.78	1.825
BR8	$SR0_{20}$	74.34	125.85	2.174
AR9-TT	$SR0_{30}$	105.15	210.72	4.246
AR11	$SR0_{30}$	130.25	235	5.525
BR12	$SR0_{30}$	49.94	98.42	4.994
AR13	SiO_2	195.39	278.89	8.211
BR14	SiO_2	99.03	231.75	3.791
AR15-TT	SiO_2	61.48	66.59	0.783
BR16-TT	SiO_2	59.76	107.81	1.113

Tabla 4-1. Resumen de los dispositivos fabricados, características de fabricación y valores eléctricos característicos promedio característicos de una celda solar, usando como fuente de luz la lámpara AMSCOPE56S (450nm). AR y BR se refieren a obleas de alta ($> 2000 \Omega \cdot cm$) y baja ($3 a 5 \Omega \cdot cm$) resistividad, respectivamente. TT se refiere al tratamiento térmico a $1100^{\circ}C$ durante 180 minutos. PCE se refiere a la eficiencia promedio de la oblea.

La tabla 4-2 es la misma que la tabla 4-1 pero ordenada en función de la eficiencia. Debido, y como ya se ha mencionado, a lo accidentado del proceso algunas obleas se rompieron; así mismo, el proceso requiere optimizarse. Aun así, es seguro que todas las celdas fabricadas funcionan como dispositivos fotovoltaicos.

El experimento fue diseñado para comparar dispositivos con las mismas características, pero con algún parámetro diferente. Por ejemplo, las obleas AR1-TT y AR3 difieren en el tratamiento térmico, y se observa que el tratamiento térmico reduce la eficiencia de las celdas. Las obleas AR1 y BR4 difieren en el tipo de sustrato, claramente es mejor utilizar obleas de alta resistividad. Sin embargo, la BR2-TT se perdió en la fabricación y no es posible comparar con la BR4. También se perdió la oblea BR10-TT para comparar con la AR9-TT, AR11 y BR12.

La oblea AR13 parece atípica comparada con su pareja AR15-TT, aunque el TT disminuye la eficiencia la diferencia es aproximadamente 10 veces más grande. Entonces, posiblemente durante el proceso se depositó $SR0_{10}$ en lugar de SiO_2 en esta oblea. Comparando los valores de eficiencia, voltaje y corriente de la tabla 4-1 con las obleas AR3 y AR1-TT, la oblea AR13 muestra similitudes con las obleas con

SR_{10} . Esta conjetura no está comprobada, por lo que la oblea AR13 será tratada como una celda de unión P-N con depósito de SiO_2 para propósitos de comparación.

Oblea	Aislante	$V_{oc}(mV)$	$J_{sc}(mA)$	PCE (%)
AR3	SR_{10}	186.36	346.63	10.015
AR13	SiO_2	195.39	278.89	8.211
AR1-TT	SR_{10}	139.23	294.1	6.238
AR11	SR_{30}	130.25	235	5.525
BR12	SR_{30}	49.94	98.42	4.994
AR9-TT	SR_{30}	105.15	210.72	4.246
BR14	SiO_2	99.03	231.75	3.791
BR4	SR_{10}	90.49	200	3.046
AR5-TT	SR_{20}	85.08	162.41	2.557
BR8	SR_{20}	74.34	125.85	2.174
AR7	SR_{20}	70.57	153.78	1.825
BR6-TT	SR_{20}	58.54	155.78	1.52
BR16-TT	SiO_2	59.76	107.81	1.113
AR15-TT	SiO_2	61.48	66.59	0.783

Tabla 4-2. Resumen de los dispositivos fabricados, características de fabricación y valores eléctricos promedio característicos de una celda solar, usando como fuente de luz la lámpara AMSCOPE56S (450nm) organizados en función de la eficiencia.

4.1. Resultados

Las fuentes de luz implicadas en la caracterización de los dispositivos también requirieron caracterizarse. En la tabla 4-2 se muestran las irradiancias de ambas fuentes de luz, medidas experimentalmente. Estos valores son necesarios para calcular las características de las celdas, tales como V_{OC} , J_{SC} , FF y PCE . El método de medición de irradiancia es explicado en la sección 3.7.1.

Fuente de luz	Longitud de onda (nm)	Responsividad (A/W)	Irradiancia (mW/cm ²)
Lámpara de xenón	350	0.0537	18.75
	400	0.0767	27.73
	480	0.169	26.05
	530	0.224	19.01
	575	0.273	15.36
	600	0.302	13.2
	720	0.448	9.13
	800	0.542	5.17
Lámpara AMSCOPE56S	450	0.136	178.26

Tabla 4-3. Valores de irradiancia medidos de las fuentes de luz: AMSCOPE56S y lámpara de xenón para diferentes longitudes de onda.

En la figura 4-1 y figura 4-2 se presentan las curvas I-V medidas correspondientes a la oblea AR1 con $SR0_{10}$ y tratamiento térmico, para las fuentes de luz AMSCOPE56S y lámpara de xenón, respectivamente. Estas son curvas típicas en estos dispositivos, ya que las curvas de todas las obleas presentan las mismas características.

A partir de este tipo de curvas I-V se calculan los valores característicos de las celdas, tales como V_{OC} , J_{SC} , FF , PCE , R_s y R_{sh} .

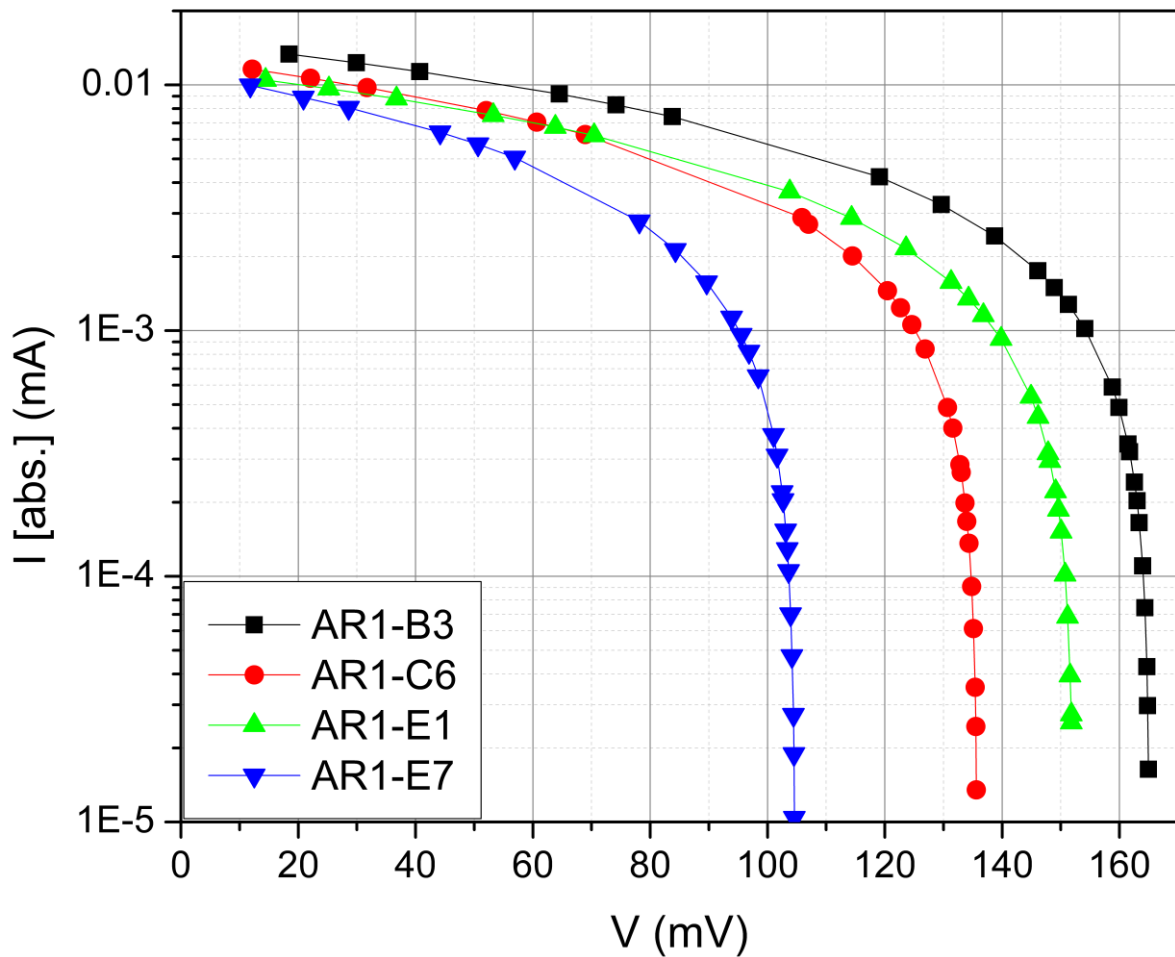


Figura 4-1. Curvas I-V (escala semilogarítmica) típicas de cuatro chips de la oblea AR1-SR0₁₀-TT utilizando como estímulo la lámpara AMSCOPE56S (450nm).

La figura 4-3 plasma los valores promedio de los parámetros eléctricos del conjunto de obleas caracterizadas usando la lámpara AMSCOPE56S. La figura 4-3(a) muestra los voltajes de circuito abierto (V_{OC}); la figura 4-3(b) muestra las densidades de corriente de cortocircuito (J_{SC}) relativas; la figura 4-3(c) muestra los factores de llenado (FF); la figura 4-3(d) muestra las eficiencias (PCE) relativas, datos obtenidos para todas las obleas.

Similar en la figura 4-4 que muestra: (a) V_{OC} , (b) J_{SC} relativo, (c) FF y (d) PCE relativo, de valores promedio de 3 chips medidos para las obleas AR1, AR3, AR9, AR11 y

AR13, estimuladas con diferentes longitudes de onda usando como fuente de luz la lámpara de xenón.

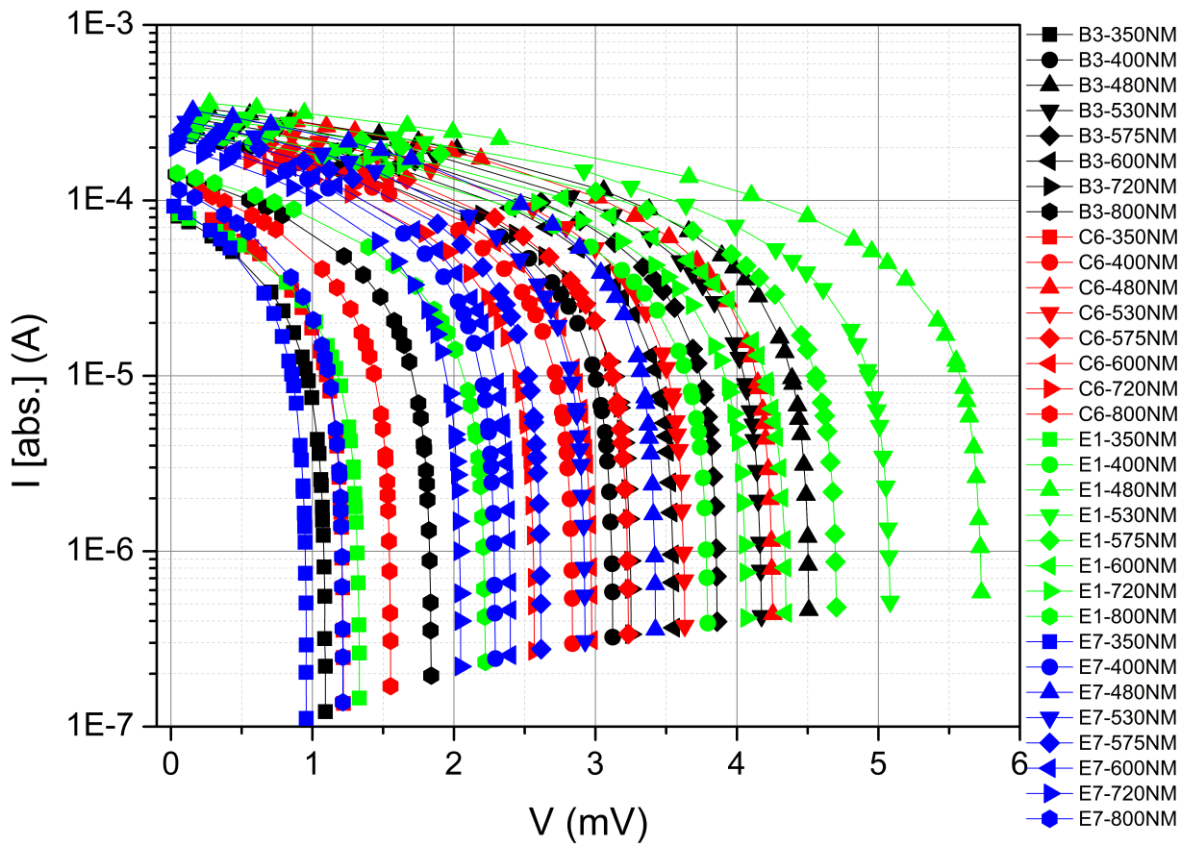


Figura 4-2. Curvas I-V (escala semilogarítmica) típicas de cuatro chips de la oblea AR1-SR0₁₀-TT utilizando como estímulo la lámpara de xenón para diferentes longitudes de onda.

Considerando las diferentes obleas, la información obtenida de las curvas I-V usando las dos fuentes de luz, presenta claras diferencias en los valores de voltaje de circuito abierto, densidad de corriente de corto circuito y eficiencia de conversión de energía, mientras que el factor de llenado de los dispositivos permanece en el mismo rango o aparentemente constante si se comparan los datos de las figura 4-3(c) y 4-4(c).

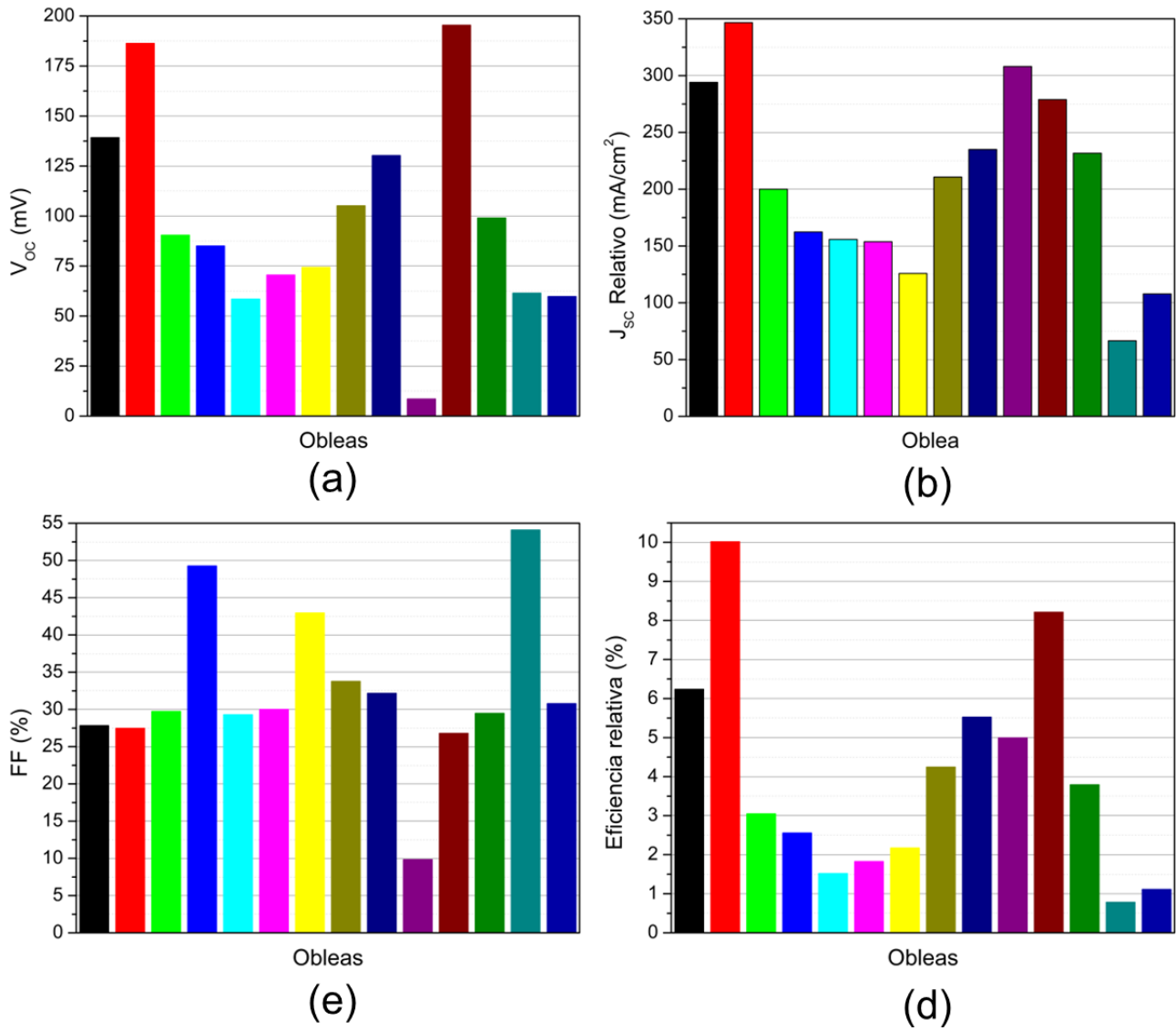
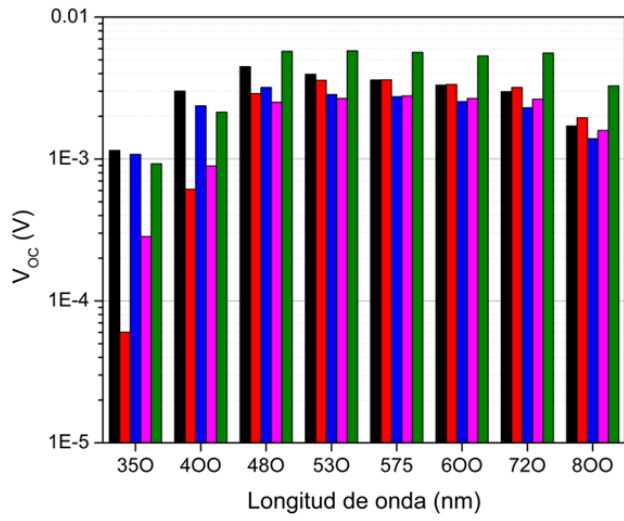
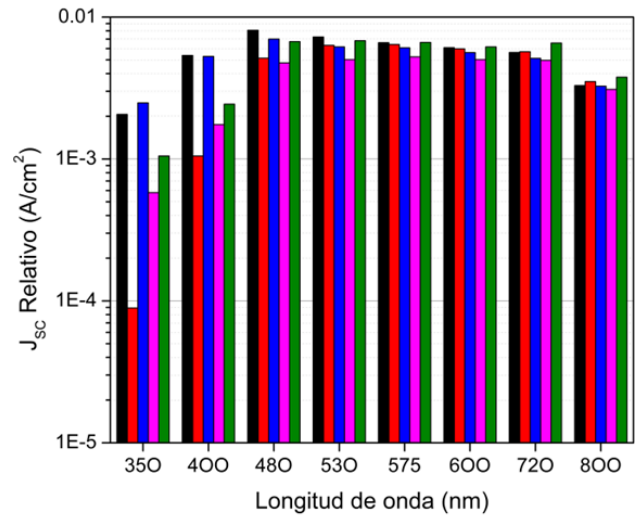


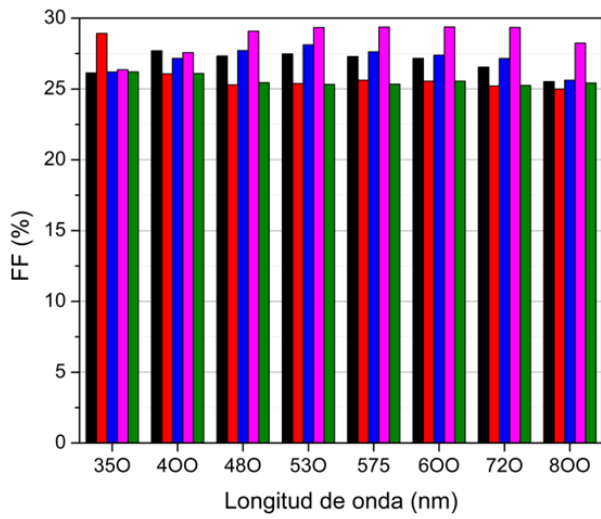
Figura 4-3. Graficas de los valores promedio de los parámetros eléctricos (a) V_{OC} , (b) J_{SC} relativo, (c) FF y (d) PCE relativo, del conjunto de obleas, usando como fuente de luz incidente la lámpara AMSCOPE56S. El color de la barra indica la oblea: (■) AR1-SR0₁₀-TT, (■) AR3-SR0₁₀, (■) BR4-SR0₁₀, (■) AR5-SR0₂₀-TT, (■) BR6-SR0₂₀-TT, (■) AR7-SR0₂₀, (■) BR8-SR0₂₀, (■) AR9-SR0₃₀-TT, (■) AR11-SR0₃₀, (■) BR12-SR0₃₀, (■) AR13-SiO₂, (■) BR14-SiO₂, (■) AR15-SiO₂-TT y (■) BR16-SiO₂-TT.



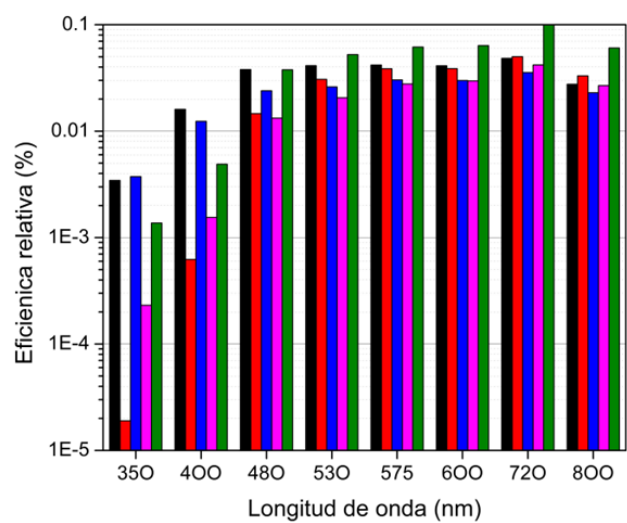
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4-4. Graficas de valores promedio de los parámetros eléctricos (a) V_{oc} , (b) J_{sc} relativo, (c) FF y (d) PCE relativo, de las obleas AR1-SR0₁₀-TT (■), AR3-SR0₁₀ (■), AR9-SR0₃₀-TT (■), AR11-SR0₃₀ (■) y AR13-SiO₂ (■), usando como fuente de luz incidente la lámpara de xenón.

4.2. Discusión general

Los resultados demuestran que las celdas fabricadas sobre substratos *AR* tienen mejores valores de V_{OC} , J_{SC} y PCE , en comparación con las celdas de substrato *BR*. Las mejores celdas con *SRO* estimuladas con la lámpara AMSCOPE56S son AR1, AR3, AR9 y AR11, en orden descendente, obsérvese la figura 4-3. Repitiéndose este comportamiento al estimular las celdas con la lámpara de xenón, es decir, con longitudes de onda discretas, las obleas AR1, AR3, AR9 y AR11 continúan con los mejores valores de V_{OC} , J_{SC} y PCE . Por este motivo en la figura 4-4 solo se muestran los datos correspondientes a las obleas AR1, AR3, AR9 y AR11, además son comparadas respecto con la mejor celda de unión P-N, la oblea AR13.

Comparando la densidad de corriente de corto circuito producida con la fuente AMSCOPE56S (450nm) y aquellas obtenidas en diferentes longitudes de onda (lámpara de xenón), figuras 4-3(b) y 4-4(c), se observa que en el rango entre 400nm y 600nm, las corrientes más altas se producen en las obleas con SRO_{10} que contienen más nanocristales de silicio (*nc-Si*), esto corrobora los resultados obtenidos con la fuente AMSCOPE56S. Además, podría indicar que los *nc-Si* en el *SRO* contribuyen a la corriente de la celda.

La figura 4-3(a) claramente indica que las obleas con SRO_{10} tienen los voltajes de circuito abierto mayores, a excepción de la oblea AR13 de SiO_2 que se comporta atípica. Esto también se corrobora con la figura 4-4(a) en el rango de 530nm a 600nm.

El factor de llenado permite una primera interpretación del funcionamiento del dispositivo. En las figuras 4-3(c) y 4-4(c) los valores del FF están en el rango del 25% – 35% (pruebas con ambas fuentes de luz), con algunas excepciones encima del 40% (pruebas con lámpara AMSCOPE56S). Demostrando que los dispositivos de manera indistinta al tipo de estimulación óptica mantienen un FF en su mayoría estable. Sin embargo, para dispositivos fotovoltaicos se esperan valores encima del 70% como en la referencia [34]. Las causas más probables son efectos resistivos parásitos, en el modelo de un diodo de la celda solar se representan como la resistencia serie (R_s) y resistencia shunt (R_{sh}), véase figura 2-4(b) del capítulo 2. En

la figura 4-5 se grafican los valores promedio de las resistencias R_s y R_{sh} calculados para todas las celdas.

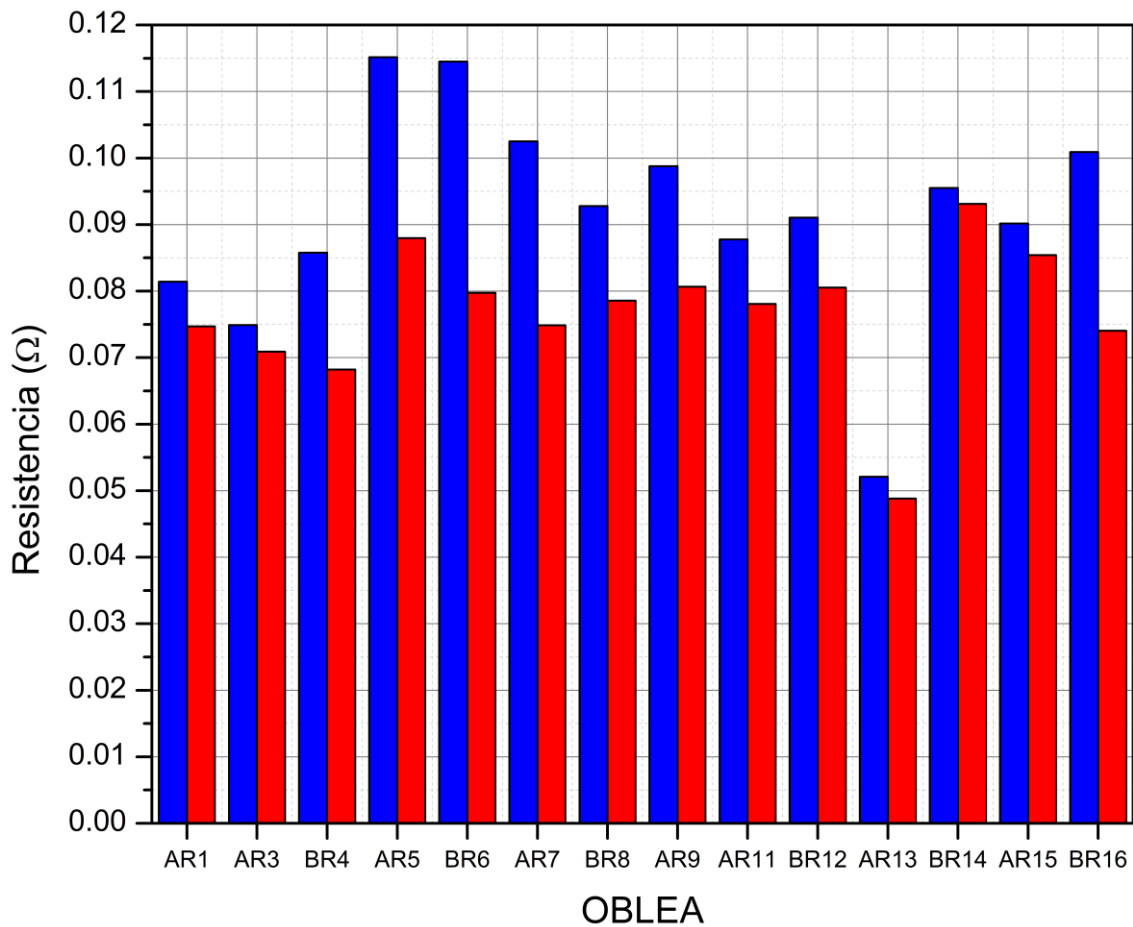


Figura 4-5. Promedio de los valores de las resistencias serie (barras en rojo) y shunt (barras en azul) de las celdas caracterizadas.

Los valores de R_{sh} y R_s de la figura 4-5 indican que son casi iguales, con valores $< 1.2\Omega$. Si $R_s < 1\Omega$, se considera como un buen valor [95], lo cual prueba que existe poca resistencia entre el contacto superior e inferior, colector y sustrato, por mencionar las principales componentes que conforman la resistencia serie, por donde fluyen los portadores fotogenerados hacia la carga externa. Por el contrario, $R_{sh} > 1000\Omega$ es considerado un buen valor de resistencia shunt [94]. Para $R_{sh} < 1.2\Omega$, como en este caso, indica baja calidad del proceso de fabricación. En la sección 3.6.1 fueron comentadas algunas de las complicaciones ocurridas en el proceso de fabricación de los dispositivos y clara evidencia de dichos problemas son reflejados en FF , R_{sh} y R_s . Posiblemente, el principal problema que afecta a R_{sh}

en estas celdas, es la inexistencia de la difusión P^+ en el sustrato tipo N . El SRO ciertamente es un óxido con alta corriente de fuga lo cual produce una disminución de la barrera que podrían enfrentar los electrones al moverse del silicio hacia la carga, esto también podría contribuir a una disminución de la resistencia *shunt*. Sin embargo, es necesario estudiar si esto pudiese contribuir a mejorar la eficiencia con mecanismos similares a los que presentan las celdas *HIT* [13], [14], [32]

Todos los parámetros de una celda solar son afectados por la irradiancia de la fuente de luz [134], y en la caracterización de los dispositivos de este trabajo no fue posible utilizar una irradiancia de $100mW/cm^2$ con un espectro AM1.5. En la tabla 4-3 se colocan las irradiancias utilizadas en el experimento de medición. Utilizar menores irradiancias a la estandarizada, además de disminuir la fotocorriente, afecta a la resistencia *shunt* como explican en las referencias [94], [135], así mismo valores pequeños en R_{sh} disminuyen el voltaje de circuito abierto de las celdas.

También, el área del dispositivo impacta en los parámetros de las celdas solares, en la referencia [136] comentan que en áreas pequeñas ($< 1cm^2$) existe un dominio de la resistencia *shunt*. Sin embargo, analizando las curvas I-V en la figura 4-6 similar a la figura 4-1, la resistencia *shunt* es muy pequeña lo que produce un corto circuito entre las terminales de la celda haciendo que R_s domine. Prueba de estos efectos son los valores de las resistencias graficados en la figura 4-5. De igual manera, estos efectos están presentes en las celdas de unión P-N fabricadas en paralelo a las celdas *SIL*.

En una celda de unión P-N, V_{OC} está determinado por el potencial interconstruido (V_{Bin}), el cual es estable para este tipo de celdas. Sin embargo, en el caso de las celdas *SIL*, V_{Bin} depende de la inversión de la superficie, que a su vez depende de la carga atrapada en el SRO [57], [58]. En este trabajo no se realizaron mediciones de atrapamiento de carga en el SRO . Por ello, de momento, no es posible determinar con certeza si el SRO cuenta con suficiente carga atrapada para llevar a inversión (débil o fuerte) o agotamiento la superficie del sustrato. Aun así, puede demostrarse teóricamente que se necesita solo el 13% de la carga atrapada para alcanzar el estado de empobrecimiento de la superficie [137]. Entonces, la superficie

de silicio en las celdas está en empobrecimiento. Asegurando que existe campo eléctrico suficiente para lograr la separación de las cargas.

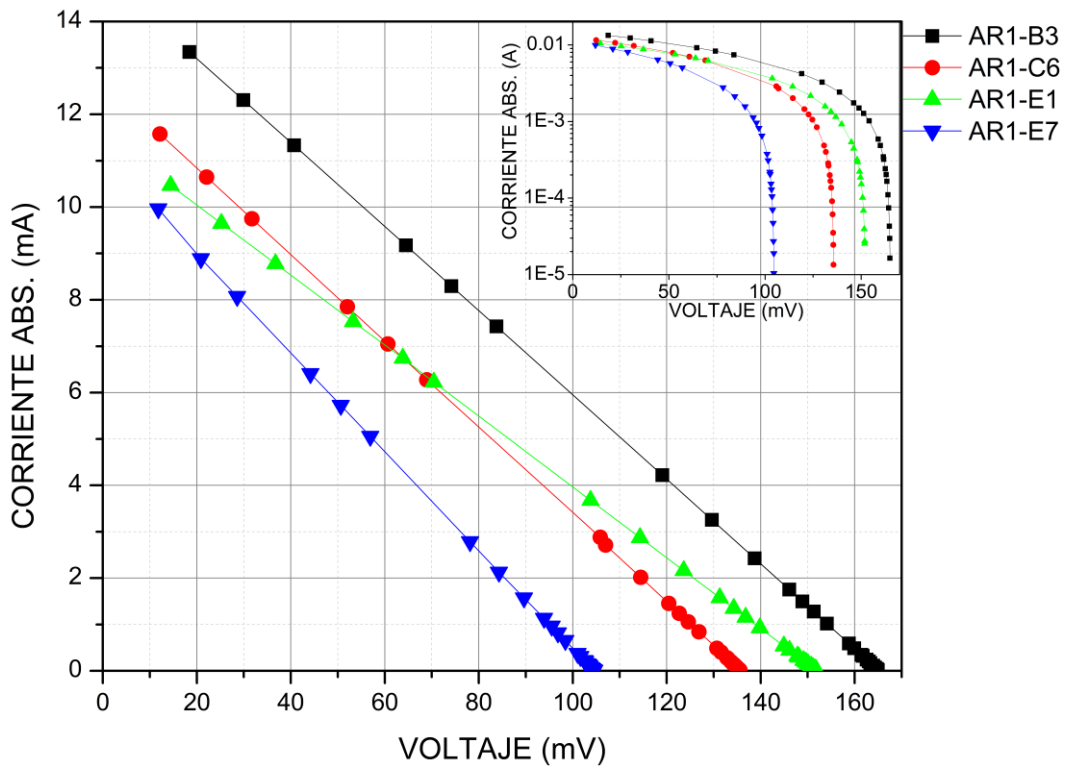


Figura 4-6. Curva I-V de la oblea AR1-SRO₁₀-TT en escala lineal.

De acuerdo con la referencia [34] los voltajes de circuito abierto de las actuales celdas solares, dentro de los lineamientos estandarizados, están entre los 500mV y 800mV. Por su parte, con las celdas SIL se han obtenido V_{OC} de hasta 186mV (oblea AR3-SRO₃₀), el cual puede considerarse bastante bueno/elevado, tomando en cuenta las dimensiones y condiciones de medición de estas celdas. Además, comparando el V_{OC} de una celda SIL (AR3) y una celda de unión P-N (AR13) mostradas en la figura 4-3(a), por ejemplo, el voltaje en AR3 (186mV) y en AR13 (196mV) difiere en 10mV, un valor relativamente pequeño, pero demuestra la viabilidad de las celdas SIL en este primer estudio. En adicción, el V_{OC} de las celdas SIL en orden descendente es el siguiente: AR3, AR1, AR11, AR9, BR4, AR5, BR8, AR7 y BR6.

Por otra parte, en las figura 4-3(b) y figura 4-4(b) pueden apreciarse valores elevados de densidad de corriente de corto circuito, que, dadas las dimensiones de

los dispositivos y condiciones experimentales, causando incertidumbre en los datos medidos. La principal razón de estas magnitudes probablemente sea consecuencia de las pequeñas dimensiones de los dispositivos, ya que tiene un perímetro (0.801cm) mayor al área activa (0.0401cm^2). Es decir, existe una sobreestimación por área pequeña que son contribuciones parásitas alrededor del dispositivo que probablemente aumentan este parámetro. Por ende, es necesario continuar investigando y mejorando las celdas *SIL*. Aun así, teniendo en cuenta solo la tendencia de los valores en las obleas en la figura 4-3(b), notase que las celdas *SIL* con $SR0_{10}$ tienen J_{SC} superiores a las celdas de unión P-N. Por el momento es difícil predecir el comportamiento de las celdas *SIL* en condiciones estándar, y lo único evidente es que los nanocristales de silicio que tienen respuesta a la luz [54], [138]–[140] también tienen efecto en la respuesta de las celdas *SIL*.

En cuanto a las eficiencias mostradas en la figura 4-3(d) donde se utilizó la lámpara AMSCOPE56S como fuente de luz, las celdas *SIL* que parecen más viables para futuros estudios son las que tienen substratos de alta resistividad y, película de $SR0_{10}$ o $SR0_{30}$. Es decir, las obleas AR1 y AR3 con $SR0_{10}$, y las obleas AR9 y AR11 con $SR0_{30}$.

4.2.1. Efecto del tratamiento térmico (TT) en las celdas SIL

En general, las celdas *SIL* con tratamiento térmico demuestran mejorar la respuesta a la luz UV respecto a las celdas *SIL* que no tiene *TT*, véase figura 4-4.

A partir de la figura 4-4 es posible determinar a qué longitudes de onda responden mejor estas celdas solares. Obsérvense las longitudes de onda 480nm , 530nm , 575nm , 600nm , 720nm y 800nm , los valores de V_{OC} , J_{SC} y PCE varían relativamente poco en estas celdas *SIL*. Como el silicio absorbe adecuadamente estas longitudes de onda, considérense estos como datos esperados. Por otra parte, en las longitudes de onda de 350nm y 400nm puede apreciarse una diferencia entre las celdas *SIL* con tratamiento térmico (AR1 y AR9) y sin *TT* (AR3 y AR11),

diferencia más evidente en 350nm donde el silicio no aprovecha la energía de la luz UV debido a los efectos de recombinación superficial.

El *TT* mejora la respuesta de las celdas *SIL* en 350nm , y posiblemente en longitudes de onda $< 350\text{nm}$, lo cual puede apreciarse en la figura 4-4. Aplicar altas temperatura en el *SRO* aumenta la aglomeración de átomos de silicio [110], [141] formándose nanocristales de silicio (*nc-Si*) de mayor tamaño que mejoran algunas características del material [57], [60], [111], [142].

Del *SRO*₁₀ se sabe que sus *nc-Si* son más grandes y es más conductivo en comparación con *SRO*₂₀ y *SRO*₃₀ [104], [109], [143]. Entonces, es posible que un porcentaje de luz UV liberen electrones de los *nc-Si* que puedan desplazarse entre los mismos *nc-Si* hasta llegar a los contactos metálicos, agregando corriente a la celda, que normalmente se pierde en la superficie del silicio por efectos de recombinación. Por otra parte, el *SRO*₃₀ tiene menos y más pequeños *nc-Si*, pero mayor cantidad de defectos en el óxido, los cuales aumentan la fotoluminiscencia en el material, características que mejora con la aplicación del tratamiento térmico [104], [109], [143]. De esta manera, una porción de la luz que recibe el *SRO* en la celda, es absorbida y reemitida en rojo o IR cercano hacia el sustrato para contribuir con la generación de más *PEH*. Es decir, similar al *SRO*₁₀, la luz UV es aprovechada en la generación de portadores, pero con un mecanismo distinto.

En otras palabras, ambos *SRO*₁₀ y *SRO*₃₀, tiene la peculiaridad de aprovechar las longitud de onda $\leq 350\text{nm}$. En adición, el *TCO* depositado en las celdas *SIL* tiene una transmitancia $\approx 40\%$ en 350nm , mientras que en longitudes arriba de 400nm la transmitancia es mayor al 80% [36]. Posiblemente, cambiando el *TCO* por uno más transparente en el UV, aumenten los valores de V_{OC} , J_{SC} y *PCE* en las celdas *SIL*.

5. CONCLUSIONES Y TRABAJO A FUTURO

5.1. Conclusiones generales

Este trabajo tiene como finalidad demostrar que los dispositivos capacitivos, con una película de óxido de silicio rico en silicio (*SRO*) utilizada como material cargable, son capaces de operar como celdas solares. Así mismo, el *SRO*, previo a este trabajo, ha sido objeto de estudios que demostraron interesantes propiedades eléctricas y ópticas, convirtiéndolo en un material con amplio campo de aplicaciones en dispositivos, con la ventaja de seguir siendo un material basado en silicio y compatible con procesos de fabricación CMOS. Motivo por el cual, aprovechando propiedades del *SRO* como atrapamiento de carga y fotoluminiscencia, se ha estudiado eléctricamente un dispositivo fotovoltaico novedoso y diferente a las celdas propuestas a la fecha. Hasta este momento los datos han demostrado que las celdas *S/L* son capaces de funcionar como una celda solar, similar a las celdas de unión P-N. Objetivo principal de este trabajo.

En general, los resultados de las curvas I-V, de todas las celdas, presentan la misma tendencia en forma y comportamiento al estimularse con diferentes irradiancias. Es decir, entre cada celda medida de la misma oblea para cada fuente de luz o irradiancia, las curvas tienen comportamiento parecido, de igual manera sucede entre cada oblea. A primera vista de las curvas, como en la figura 4-3(a), se observan dos cosas: J_{SC} grande y V_{OC} pequeño. Con la fuente de luz de mayor intensidad (AMSCOPE56S), los máximos valores de J_{SC} y V_{OC} , en las celdas *S/L*, se encontraron en la oblea AR3 (*SRO*₁₀ y tratamiento térmico), siendo de $\approx 350 \text{ mA}$ y $\approx 186 \text{ mV}$, respectivamente. Seguido de las celdas AR1, AR11, AR9, BR4, AR5, AR7, BR8, BR6 y BR12, en ese orden. Sin embargo, estos elevados valores de densidad de corriente son posiblemente un efecto parásito debido a las dimensiones del dispositivo, consecuencia de la relación perímetro y área, 0.801 cm y 0.0401 cm^2 , respectivamente. Por ello, es necesario diseñar una celda *S/L* de mayor área para disminuir estos efectos parásitos mismos que requieren estudio.

El comportamiento observado en las curvas I-V de todas las celdas solares son similares a la figura 4-6. Este comportamiento es casi completamente lineal, el cual se debe a las resistencias serie y *shunt*. Como en toda celda solar para un óptimo funcionamiento del dispositivo debe existir un compromiso entre R_s y R_{sh} , así como entre otros factores. Este tipo de efectos no deseados son causados por un diseño y proceso de fabricación que inicialmente se encuentra pensado para otras aplicaciones del dispositivo, y por eso mismo, se necesita un estudio profundo tanto del diseño como de los materiales y la fabricación para mejorar sus características y desempeño como celda solar.

Analizando estos primeros resultados de las curvas I-V como en la figura 4-2 considerando que se utilizó como fuente de luz la lámpara de xenón, obsérvese que las celdas *SIL* con tratamiento térmico a 1100°C por 180 minutos, mejoraron su respuesta a longitudes de onda del UV y azul del visible, 350nm y 400nm, respectivamente. Mientras en el resto de las longitudes de onda (480nm, 530nm, 575nm, 600nm, 720nm y 800nm) la respuesta de las celdas no sufre grandes cambios entre obleas, véase figura 4-4. Esta mejora del UV se atañe a las características del *SRO* relacionadas con los nanocristales de silicio (*nc-Si*) y fotoluminiscencia. De acuerdo con estudios anteriores de este material, los nanocristales de silicio (*nc-Si*) formados en el SiO_2 aumentan de tamaño al aplicarse alta temperatura, como 1100°C y mejoran propiedades como conducción, como en el SRO_{10} . Por otra parte, el tratamiento térmico para $R_o > 10$ mejora la fotoluminiscencia causada por los defectos en óxido, como es el caso de SRO_{30} . Entonces, cuando la luz penetra en el *SRO* hacia el sustrato, una porción de la luz es captada por los nanocristales de silicio y otra por los defectos en el óxido.

Primero, los *nc-Si* pudieran recibir energía suficiente para liberar electrones capaces de desplazarse entre los mismos nanocristales, entonces algunos electrones pueden ser colectados y aumentar la corriente de la celda, como posiblemente sucede en las celdas con SRO_{10} . Segundo, los abundantes defectos en el óxido, como en el SRO_{30} , al incidir luz UV la absorben, convierten y reemiten en diferente longitud de onda, es decir, el *SRO* luminesce. Esta reemisión omnidireccional se da

entre rojo e infrarrojo cercano, haciendo posible que una porción de esa nueva emisión llegue hasta el substrato creando más pares electrón-hueco y, en consecuencia, más corriente en las celdas, como probablemente ocurre en las celdas con SRO_{30} . Sin embargo, no confundir que los fenómenos anteriores son exclusivos para cada SRO , en todos los tipos de SRO pueden ocurrir los mismos fenómenos, pero suceden en menor escala. Por ejemplo, el SRO_{10} tiene fotoluminiscencia, pero comparada a un SRO_{30} es bastante menor.

En otras palabras, las propiedades del SRO puede aprovechar parte de la luz incidente que el silicio elemental no es capaz de utilizar, y de esta manera aumentar la corriente en el dispositivos como las celdas SIL . Sin embargo, por sí mismos, los efectos físicos del SRO aplicados en celdas solares necesitan bastante estudio para determinar que efectivamente fenómenos como la formación de los $nc-Si$ y defectos operan de tal manera que contribuyen a la fotocorriente del dispositivo.

Además, la figura 4-3(d) muestra que es posible que las celdas SIL tengan eficiencias mayores a las celdas convencionales. Para ello es necesario continuar estudiando las celdas SIL para demostrar que pueden ser incluso mejores que una celda solar de unión P-N.

Este estudio utiliza el modelo eléctrico de un diodo (figura 2-4) para describir el comportamiento de la celda SIL , ya que hasta el momento no existe un modelo eléctrico adecuado para representar su funcionamiento. Por este motivo, es complicado describir con seguridad los fenómenos o mecánicos que aportan a la fotocorriente y funcionamiento general del dispositivo.

Concluyendo, los datos obtenidos han demostrado, hasta el momento, que estos dispositivos efectivamente son capaces de funcionar como una celda solar similar a una celda de unión P-N, además con la potencial ventaja de mejorar la eficiencia en el rango del UV-Vis-IR, como consecuencia de las propiedades del SRO implicadas en la generación de pares electrón-hueco que contribuyen a la fotocorriente.

5.2. Trabajo a futuro

Como primera punto, pensando que las celdas *SIL* puedan probarse en condiciones estandarizadas, el diseño actual requiere un ajuste en dimensiones, es decir, pasar de un área de 0.04 cm^2 a 1 cm^2 . Así, será posible caracterizar las celdas y conocer la eficiencia por métodos estándar, que dará un panorama realista respecto a las celdas solares que actualmente son estudiadas. Además, dentro del diseño deben considerarse los efectos resistivos parasitarios que producen los materiales, con la intención de reducir dichos efectos de manera tal que la eficiencia mejore. En consecuencia, el proceso de fabricación también requiere modificaciones, así como un debido seguimiento de cada etapa.

Otro punto importante es estudiar los efectos del *SRO* como parte del dispositivo y como material fotovoltaico. Como se ha comentado, los efectos pueden estar contribuyendo a la generación de *PEH* que aumentan la corriente en los dispositivos. Sin embargo, faltan más experimentos para determinar la veracidad de esta información.

Además, la búsqueda de *TCO*'s con mayor transmitancia desde el UV hasta el IR, ya que de estudios realizados con *AZO*, se ha demostrado que, dependiendo de las condiciones de depósito, comienza a transmitir entre $300 - 350 \text{ nm}$ máximo el 40% de la luz, mientras que arriba de los 400 nm trasmite $\geq 80\%$ de la luz [36]. De tal forma que es necesario encontrar alternativas que permitan aprovechar la región UV del espectro electromagnético.

Finalmente, el objetivo es continuar el estudio de las celdas *SIL*, y diseñar y fabricar una celda tipo tándem, que en este caso se llamará celda *T-SIL*; un análisis teórico ha probado que es posible aprovechar el *SRO* depositado para producir una segunda región de inversión en el *TCO* superior que permita la formación de una segunda región de carga espacial, formando una segunda celda solar encima de la celda *SIL*. De igual manera, es primordial estudiar el comportamiento de los materiales para este propósito.

REFERENCIAS

- [1] "This Month in Physics History," *American Physical Society*, 2009. Accessed: Oct. 30, 2022. [Online]. Available: <https://www.aps.org/publications/apsnews/200904/physicshistory.cfm>
- [2] C. E. Fritts, "On a new form of selenium cell, and some electrical discoveries made by its use," *Am J Sci*, vol. s3-26, no. 156, pp. 465–472, Dec. 1883, doi: 10.2475/ajs.s3-26.156.465.
- [3] R. S. Ohl, "Light-sensitive electric device," 395,410, Jun. 25, 1947
- [4] D. M. Chapin, C. S. Fuller, and G. L. Pearson, "A New Silicon p-n Junction Photocell for Converting Solar Radiation into Electrical Power," *J Appl Phys*, vol. 25, no. 5, pp. 676–677, May 1954, doi: 10.1063/1.1721711.
- [5] G. A. Chamberlain, "Organic solar cells: A review," *Solar Cells*, vol. 8, no. 1, pp. 47–83, Feb. 1983, doi: 10.1016/0379-6787(83)90039-X.
- [6] H. Hoppe and N. S. Sariciftci, "Organic solar cells: An overview," *J Mater Res*, vol. 19, no. 7, pp. 1924–1945, Jul. 2004, doi: 10.1557/JMR.2004.0252.
- [7] A. Uddin, "Organic solar cells," in *Comprehensive Guide on Organic and Inorganic Solar Cells*, Elsevier, 2022, pp. 25–55. doi: 10.1016/B978-0-323-85529-7.00006-2.
- [8] N.-G. Park and H. Segawa, "Research Direction toward Theoretical Efficiency in Perovskite Solar Cells," *ACS Photonics*, vol. 5, no. 8, pp. 2970–2977, Aug. 2018, doi: 10.1021/acsp Photonics.8b00124.
- [9] N.-G. Park, "Perovskite solar cells: an emerging photovoltaic technology," *Materials Today*, vol. 18, no. 2, pp. 65–72, Mar. 2015, doi: 10.1016/j.mattod.2014.07.007.
- [10] F. Liu *et al.*, "Numerical simulation: Toward the design of high-efficiency planar perovskite solar cells," *Appl Phys Lett*, vol. 104, no. 25, p. 253508, Jun. 2014, doi: 10.1063/1.4885367.
- [11] H. S. Jung and N.-G. Park, "Perovskite Solar Cells: From Materials to Devices," *Small*, vol. 11, no. 1, pp. 10–25, Jan. 2015, doi: 10.1002/smll.201402767.
- [12] T. Sawada *et al.*, "High-efficiency a-Si/c-Si heterojunction solar cell," in *Proceedings of 1994 IEEE 1st World Conference on Photovoltaic Energy Conversion - WCPEC (A Joint Conference of PVSC, PVSEC and PSEC)*, pp. 1219–1226. doi: 10.1109/WCPEC.1994.519952.
- [13] M. Taguchi *et al.*, "24.7% Record Efficiency HIT Solar Cell on Thin Silicon Wafer," *IEEE J Photovolt*, vol. 4, no. 1, pp. 96–99, Jan. 2014, doi: 10.1109/JPHOTOV.2013.2282737.

- [14] S. Tohoda *et al.*, "Future directions for higher-efficiency HIT solar cells using a Thin Silicon Wafer," *J Non Cryst Solids*, vol. 358, no. 17, pp. 2219–2222, Sep. 2012, doi: 10.1016/j.jnoncrysol.2012.03.025.
- [15] M. A. Green, "High Efficiency Silicon Solar Cells," in *Seventh E.C. Photovoltaic Solar Energy Conference*, Dordrecht: Springer Netherlands, 1987, pp. 681–687. doi: 10.1007/978-94-009-3817-5_121.
- [16] A. Blakers, N. Zin, K. R. McIntosh, and K. Fong, "High Efficiency Silicon Solar Cells," *Energy Procedia*, vol. 33, pp. 1–10, 2013, doi: 10.1016/j.egypro.2013.05.033.
- [17] P. Saint-Cast *et al.*, "High-Efficiency c-Si Solar Cells Passivated With ALD and PECVD Aluminum Oxide," *IEEE Electron Device Letters*, vol. 31, no. 7, pp. 695–697, Jul. 2010, doi: 10.1109/LED.2010.2049190.
- [18] D. Shi, Y. Zeng, and W. Shen, "Perovskite/c-Si tandem solar cell with inverted nanopramids: realizing high efficiency by controllable light trapping," *Sci Rep*, vol. 5, no. 1, p. 16504, Dec. 2015, doi: 10.1038/srep16504.
- [19] D. Zhang *et al.*, "High efficiency 4-terminal perovskite/c-Si tandem cells," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 188, pp. 1–5, Dec. 2018, doi: 10.1016/j.solmat.2018.07.032.
- [20] M. Yamaguchi, "Physics and technologies of superhigh-efficiency tandem solar cells," *Semiconductors*, vol. 33, no. 9, pp. 961–964, Sep. 1999, doi: 10.1134/1.1187812.
- [21] J. You, L. Dou, Z. Hong, G. Li, and Y. Yang, "Recent trends in polymer tandem solar cells research," *Prog Polym Sci*, vol. 38, no. 12, pp. 1909–1928, Dec. 2013, doi: 10.1016/j.progpolymsci.2013.04.005.
- [22] Y. Liu *et al.*, "High Efficiency Tandem Thin-Perovskite/Polymer Solar Cells with a Graded Recombination Layer," *ACS Appl Mater Interfaces*, vol. 8, no. 11, pp. 7070–7076, Mar. 2016, doi: 10.1021/acsami.5b12740.
- [23] C. D. Bailie and M. D. McGehee, "High-efficiency tandem perovskite solar cells," *MRS Bull*, vol. 40, no. 8, pp. 681–686, Aug. 2015, doi: 10.1557/mrs.2015.167.
- [24] T. P. White, N. N. Lal, and K. R. Catchpole, "Tandem Solar Cells Based on High-Efficiency c-Si Bottom Cells: Top Cell Requirements for >30% Efficiency," *IEEE J Photovolt*, vol. 4, no. 1, pp. 208–214, Jan. 2014, doi: 10.1109/JPHOTOV.2013.2283342.

- [25] G. Liu *et al.*, “15% Efficiency Tandem Organic Solar Cell Based on a Novel Highly Efficient Wide-Bandgap Nonfullerene Acceptor with Low Energy Loss,” *Adv Energy Mater*, vol. 9, no. 11, p. 1803657, Mar. 2019, doi: 10.1002/aenm.201803657.
- [26] Z. Song, C. Chen, C. Li, R. A. Awni, D. Zhao, and Y. Yan, “Wide-bandgap, low-bandgap, and tandem perovskite solar cells,” *Semicond Sci Technol*, vol. 34, no. 9, p. 093001, 2019, doi: 10.1088/1361-6641/ab27f7.
- [27] T. C.-J. Yang, P. Fiala, Q. Jeangros, and C. Ballif, “High-Bandgap Perovskite Materials for Multijunction Solar Cells,” *Joule*, vol. 2, no. 8, pp. 1421–1436, Aug. 2018, doi: 10.1016/j.joule.2018.05.008.
- [28] Z. Yang, A. Rajagopal, and A. K. -Y. Jen, “Ideal Bandgap Organic–Inorganic Hybrid Perovskite Solar Cells,” *Advanced Materials*, vol. 29, no. 47, p. 1704418, Dec. 2017, doi: 10.1002/adma.201704418.
- [29] F. E. Cherif and H. Sammouda, “Strategies for high performance perovskite/c-Si tandem solar cells: Effects of bandgap engineering, solar concentration and device temperature,” *Opt Mater (Amst)*, vol. 106, p. 109935, Aug. 2020, doi: 10.1016/j.optmat.2020.109935.
- [30] S. S. Li, “Energy Band Theory,” in *Semiconductor Physical Electronics*, I. Brodie and J. J. Muray, Eds. New York: Plenum Press, 1993, pp. 55–85.
- [31] M. Zeman and D. Zhang, “Heterojunction Silicon Based Solar Cells,” in *Physics and Technology of Amorphous-Crystalline Heterostructure Silicon Solar Cells*, W. G. J. H. M. van Sark, L. Korte, and F. Roca, Eds. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012, pp. 13–43. doi: 10.1007/978-3-642-22275-7_2.
- [32] E. Maruyama *et al.*, “Sanyo’s Challenges to the Development of High-efficiency HIT Solar Cells and the Expansion of HIT Business,” in *2006 IEEE 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conference*, 2006, pp. 1455–1460. doi: 10.1109/WCPEC.2006.279743.
- [33] T. Mishima, M. Taguchi, H. Sakata, and E. Maruyama, “Development status of high-efficiency HIT solar cells,” *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 95, no. 1, pp. 18–21, Jan. 2011, doi: 10.1016/j.solmat.2010.04.030.
- [34] “Best Research-Cell Efficiency Chart,” *National Renewable Energy Laboratory*, 2022. <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html> (accessed Oct. 30, 2022).

- [35] A. Luque and S. Hegedus, "Transparent Conducting Oxides for Photovoltaics," in *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*, 2nd ed., A. E. Delahoy and S. Guo, Eds. Chichester: John Wiley & Sons, 2011, pp. 716–796.
- [36] M. P. González Arroyo, "Fabricación de heterouniones con un Óxido Conductor Transparente (TCO) y Óxido de Silicio fuera de estequiometría (SRO)," Tesis, INAOE, Tonantzintla, 2015.
- [37] D. L. Pulfrey, "MIS solar cells: A review," *IEEE Trans Electron Devices*, vol. 25, no. 11, pp. 1308–1317, Nov. 1978, doi: 10.1109/T-ED.1978.19271.
- [38] A. Goetzberger, J. Knobloch, and B. Voss, "Selected Solar Cell Types," in *Crystalline Silicon Solar Cells*, 1998, pp. 163–200.
- [39] P. Petrou, R. Singh, and D. E. Brodie, "The use of ZnO in transparent type MIS solar cells," *Appl Phys Lett*, vol. 35, no. 12, pp. 930–931, Dec. 1979, doi: 10.1063/1.91009.
- [40] R. B. Godfrey and M. A. Green, "655 mV open-circuit voltage, 17.6% efficient silicon MIS solar cells," *Appl Phys Lett*, vol. 34, no. 11, pp. 790–793, Jun. 1979, doi: 10.1063/1.90646.
- [41] J. Shewchun, D. Burk, and M. B. Spitzer, "MIS and SIS solar cells," *IEEE Trans Electron Devices*, vol. 27, no. 4, pp. 705–716, Apr. 1980, doi: 10.1109/T-ED.1980.19926.
- [42] Ş. Altındal, A. Tataroğlu, and İ. Dökme, "Density of interface states, excess capacitance and series resistance in the metal–insulator–semiconductor (MIS) solar cells," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 85, no. 3, pp. 345–358, Jan. 2005, doi: 10.1016/j.solmat.2004.05.004.
- [43] S. R. Wenham and M. A. Green, "Silicon solar cells," *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 4, no. 1, pp. 3–33, Jan. 1996, doi: 10.1002/(SICI)1099-159X(199601/02)4:1<3::AID-PIP117>3.0.CO;2-S.
- [44] W. Shockley and H. J. Queisser, "Detailed Balance Limit of Efficiency of p - n Junction Solar Cells," *J Appl Phys*, vol. 32, no. 3, pp. 510–519, Mar. 1961, doi: 10.1063/1.1736034.
- [45] S. Rühle, "Tabulated values of the Shockley–Queisser limit for single junction solar cells," *Solar Energy*, vol. 130, pp. 139–147, Jun. 2016, doi: 10.1016/j.solener.2016.02.015.
- [46] S. M. Sze and K. K. Ng, "Metal-Insulator-Semiconductor Capacitors," in *Physics of Semiconductor Devices*, 3rd ed., New Jersey: John Wiley & Sons, 2007, pp. 197–241.

- [47] J. Alarcón-Salazar *et al.*, "Silicon-Rich Oxide Obtained by Low-Pressure Chemical Vapor Deposition to Develop Silicon Light Sources," in *Chemical Vapor Deposition - Recent Advances and Applications in Optical, Solar Cells and Solid State Devices*, InTech, 2016. doi: 10.5772/63012.
- [48] M. Aceves-Mijares *et al.*, "On the Origin of Light Emission in Silicon Rich Oxide Obtained by Low-Pressure Chemical Vapor Deposition," *J Nanomater*, vol. 2012, pp. 1–11, 2012, doi: 10.1155/2012/890701.
- [49] A. A. Gonzalez-Fernandez, J. Juvert, M. Aceves-Mijares, A. Llobera, and C. Dominguez, "Influence by Layer Structure on the Output EL of CMOS Compatible Silicon-Based Light Emitters," *IEEE Trans Electron Devices*, vol. 60, no. 6, pp. 1971–1974, Jun. 2013, doi: 10.1109/TED.2013.2258158.
- [50] L. Dori, A. Acovic, D. J. DiMaria, and C.-H. Hsu, "Optimized silicon-rich oxide (SRO) deposition process for 5 V only flash EEPROM applications," *IEEE Electron Device Letters*, vol. 14, no. 6, pp. 283–285, Jun. 1993, doi: 10.1109/55.215199.
- [51] I. Vivaldo *et al.*, "Study of the photon down-conversion effect produced by thin silicon-rich oxide films on silicon solar cells," *Int J Energy Res*, vol. 41, no. 3, pp. 410–416, Mar. 2017, doi: 10.1002/er.3622.
- [52] G. Franzò *et al.*, "Electroluminescence of silicon nanocrystals in MOS structures," *Applied Physics A*, vol. 74, no. 1, pp. 1–5, Jan. 2002, doi: 10.1007/s003390101019.
- [53] J. A. Luna-López, M. Aceves-Mijares, J. Carrillo-López, A. Morales-Sánchez, F. Flores-Gracia, and D. E. V. Valerdi, "UV-Vis Photodetector with Silicon Nanoparticles," in *Photodetectors*, S. Gateva, Ed. Rijeka: IntechOpen, 2012, p. Ch. 2. doi: 10.5772/35984.
- [54] J. A. Luna López *et al.*, "A simple Al/SRO/Si Structure with Silicon Nanoparticles as a UV and Vis Photodetector," *Procedia Chem*, vol. 1, no. 1, pp. 1171–1174, Sep. 2009, doi: 10.1016/j.proche.2009.07.292.
- [55] J. A. Luna López, "Investigación de las características estructurales, ópticas y eléctricas del SRO para su posible aplicación a dispositivos," Tesis, INAOE, Tonantzintla, 2007.
- [56] M. Aceves, C. Falcony, A. Reynoso-Hernandez, W. Calleja, and A. Torres, "The conduction properties of the silicon/off-stoichiometry-SiO₂ diode," *Solid State Electron*, vol. 39, no. 5, pp. 637–644, May 1996, doi: 10.1016/0038-1101(95)00174-3.

- [57] A. Morales-Sánchez, J. Barreto, C. Domínguez, M. Aceves, and J. A. Luna-López, "The mechanism of electrical annihilation of conductive paths and charge trapping in silicon-rich oxides," *Nanotechnology*, vol. 20, no. 4, p. 045201, Jan. 2009, doi: 10.1088/0957-4484/20/4/045201.
- [58] A. Morales-Sánchez, J. Barreto, C. Domínguez, M. Aceves, Z. Yu, and J. A. Luna, "Charge trapping and de-trapping in Si-nanoparticles embedded in silicon oxide films," *physica status solidi c*, vol. 5, no. 12, pp. 3651–3654, Dec. 2008, doi: 10.1002/pssc.200780106.
- [59] A. Morales-Sánchez *et al.*, "Photoluminescence enhancement through silicon implantation on SRO-LPCVD films," *Materials Science and Engineering: B*, vol. 174, no. 1–3, pp. 119–122, Oct. 2010, doi: 10.1016/j.mseb.2010.03.031.
- [60] J. López, J. Carrillo-López, M. Aceves, A. Morales, and C. Falcony, "FTIR and Photoluminescence of Annealed Silicon Rich Oxide Films," *Superficies y vacío*, vol. 22, pp. 11–14, Mar. 2009.
- [61] E. Quiroga-González, W. Bensch, M. Aceves-Mijares, Z. Yu, R. López-Estopier, and K. Monfil-Leyva, "On the photoluminescence of multilayer arrays of silicon rich oxide with high silicon content prepared by low pressure chemical vapor deposition," *Thin Solid Films*, vol. 519, no. 22, pp. 8030–8036, Sep. 2011, doi: 10.1016/j.tsf.2011.06.020.
- [62] A. Morales *et al.*, "Spectroscopical analysis of luminescent silicon rich oxide films," *Revista Mexicana de Física*, vol. 53, p. 249, Dec. 2007.
- [63] A. Morales-Sánchez, J. Barreto, C. Domínguez-Horna, M. Aceves-Mijares, and J. A. Luna-López, "Optical characterization of silicon rich oxide films," *Sens Actuators A Phys*, vol. 142, no. 1, pp. 12–18, Mar. 2008, doi: 10.1016/j.sna.2007.03.008.
- [64] I. Vivaldo, J. López, J. López, G. Salgado, F. Flores Gracia, and M. Aceves, "Optical properties of solar cells with SiO₂ and silicon rich oxide with silicon nanoparticles," *Superficies y vacío*, vol. 23, pp. 40–44, Aug. 2010.
- [65] R. Lpez-Estopier, M. Aceves-Mijares, and C. Falcony, "Cathodo- and Photo- Luminescence of Silicon Rich Oxide Films Obtained by LPCVD," in *Cathodoluminescence*, InTech, 2012. doi: 10.5772/34888.
- [66] S. S. Li, "Photonic Devices," in *Semiconductor Physical Electronics*, I. Brodie and J. J. Muray, Eds. New York: Plenum Press, 1993, pp. 327–390.
- [67] M. Shur, "Photonic Devices," in *Introduction to Electronic Devices*, New York: John Wiley & Sons, 1996, pp. 448–504.

- [68] S. M. Sze and M. K. Lee, "Photodetectors and Solar Cells," in *Semiconductor Devices Physics and Technology*, 3rd ed., New York: John Wiley & Sons, 2012, pp. 323–355.
- [69] S. M. Sze and K. K. Ng, "Photodetectors and Solar Cells," in *Physics of Semiconductor Devices*, 3rd ed., New Jersey: John Wiley & Sons, 2007, pp. 663–742.
- [70] P. Würfel and U. Würfel, "Basic Structure of Solar Cells," in *Physics of Solar Cells From Basic Principles to Advanced Concepts*, 3rd ed., Weinheim: Wiley-VCH, 2017, pp. 123–170.
- [71] B. G. Streetman and S. Banerjee Kumar, "Junctions," in *Solid State Electronic Devices*, 7th ed., Pearson, 2015, pp. 179–276.
- [72] S. M. Sze and K. K. Ng, "p-n Junctions," in *Physics of Semiconductor Devices*, 3rd ed., New Jersey: John Wiley & Sons, 2007, pp. 79–133.
- [73] A. Goetzberger, J. Knobloch, and B. Voss, "The p-n Junction," in *Crystalline Silicon Solar Cells*, R. Waddington, Ed. Chichester: John Wiley & Sons, 1998, pp. 49–66.
- [74] D. A. Neamen, "The pn Junction," in *Semiconductor Physics and Devices Basic Principles*, 4th ed., New York: McGraw-Hill, 2012, pp. 241–275.
- [75] S. M. Sze and M. K. Lee, "p-n Junction," in *Semiconductor Devices Physics and Technology*, 3rd ed., New York: John Wiley & Sons, 2012, pp. 82–122.
- [76] A. Luque and S. Hegedus, "The Physics of the Solar Cell," in *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*, 2nd ed., J. L. Gray, Ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2011, pp. 82–129.
- [77] T. Markvart and L. Castañer, "Chapter IA-1 - Principles of Solar Cell Operation," in *Practical Handbook of Photovoltaics (Second Edition)*, A. McEvoy, T. Markvart, and L. Castañer, Eds. Boston: Academic Press, 2012, pp. 7–31. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385934-1.00001-5>.
- [78] T. Kirchartz and U. Rau, "Introduction to Thin-Film Photovoltaics," in *Advanced Characterization Techniques for Thin Film Solar Cells*, 2011, pp. 1–32. doi: <https://doi.org/10.1002/9783527636280.ch1>.
- [79] P. Würfel and U. Würfel, "Photons," in *Physics of Solar Cells From Basic Principles to Advanced Concepts*, 3rd ed., Weinheim: Wiley-VCH, 2017, pp. 11–40.

- [80] P. Würfel and U. Würfel, "Concepts for Improving the efficiency of Solar Cells," in *Physics of Solar Cells From Basic Principles to Advanced Concepts*, 3rd ed., Weinheim: Wiley-VCH, 2017, pp. 189–212.
- [81] A. Goetzberger, J. Knobloch, and B. Voss, "The Physics of Solar Cells," in *Crystalline Silicon Solar Cells*, Waddington. Rachel, Ed. Chichester: John Wiley & Sons, 1998, pp. 67–86.
- [82] A. Goetzberger, J. Knobloch, and B. Voss, "Solar Power," in *Crystalline Silicon Solar Cells*, R. Waddington, Ed. Chichester: John Wiley & Sons, 1998, pp. 5–8.
- [83] "Reference Air Mass 1.5 Spectra," *National Renewable Energy Laboratory*. National Renewable Energy Laboratory, 2022. Accessed: Oct. 30, 2022. [Online]. Available: <https://www.nrel.gov/grid/solar-resource/spectra-am1.5.html>
- [84] A. Goetzberger, J. Knobloch, and B. Voss, "Photovoltaics," in *Crystalline Silicon Solar Cells*, R. Waddington, Ed. Chichester: John Wiley & Sons, 1998, pp. 1–4.
- [85] A. Goetzberger, J. Knobloch, and B. Voss, "The principles of Photovoltaics," in *Crystalline Silicon Solar Cells*, R. Waddington, Ed. Chichester: John Wiley & Sons, 1998, pp. 9–48.
- [86] M. P. Paranthaman, W. Wong-Ng, and R. N. Bhattacharya, Eds., *Semiconductor Materials for Solar Photovoltaic Cells*, vol. 218. Cham: Springer International Publishing, 2016. doi: 10.1007/978-3-319-20331-7.
- [87] A. Luque and S. Hegedus, "Achievements and Challenges of Solar Electricity from Photovoltaics," in *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*, 2nd ed., A. Luque and S. Hegedus, Eds. Chichester: John Wiley & Sons, 2011, pp. 1–38.
- [88] A. Luque and S. Hegedus, "Measurement and Characterization of Solar Cells and Modules," in *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*, 2nd ed., K. Emery, Ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2011, pp. 797–840.
- [89] B. H. Hamadani and B. Dougherty, "Solar Cell Characterization," in *Semiconductor Materials for Solar Photovoltaic Cells*, M. P. Paranthaman, W. Wong-Ng, and R. N. Bhattacharya, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2016, pp. 229–245. doi: 10.1007/978-3-319-20331-7_8.
- [90] T. Markvart and L. Castañer, "Chapter IA-2 - Semiconductor Materials and Modelling," in *Practical Handbook of Photovoltaics (Second Edition)*, A. McEvoy, T. Markvart, and L. Castañer, Eds. Boston: Academic Press, 2012, pp. 33–62. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385934-1.00002-7>.

- [91] P. T. Landsberg and T. Markvart, "Chapter IA-3 - Ideal Efficiencies," in *Practical Handbook of Photovoltaics (Second Edition)*, A. McEvoy, T. Markvart, and L. Castañer, Eds. Boston: Academic Press, 2012, pp. 63–75. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385934-1.00003-9>.
- [92] K. Ranabhat, L. Patrikeev, A. A. evna Revina, K. Andrianov, V. Lapshinsky, and E. Sofronova, "An introduction to solar cell technology," *Journal of Applied Engineering Science*, vol. 14, no. 4, pp. 481–491, 2016, doi: 10.5937/jaes14-10879.
- [93] P. Würfel and U. Würfel, "Characterization of Solar Cell," in *Physics of Solar Cells From Basic Principles to Advanced Concepts*, 3rd ed., Weinheim: Wiley-VCH, 2017, pp. 213–243.
- [94] pveducation, "Resistencia Shunt," www.pveducation.org, 2022, Accessed: Dec. 16, 2022. [Online]. Available: <https://www.pveducation.org/es/fotovoltaica/4-operaci%C3%B3n-de-c%C3%A9lula-solar/resistencia-shunt>
- [95] pveducation, "Resistencia en Serie," www.pveducation.org, 2022. <https://www.pveducation.org/es/fotovoltaica/4-operaci%C3%B3n-de-c%C3%A9lula-solar/resistencia-en-serie> (accessed Dec. 16, 2022).
- [96] D. A. Neamen, "Fundamentals of the Metal–Oxide–Semiconductor Field-Effect Transistor," in *Semiconductor Physics and Devices Basic Principles*, 4th ed., New York: McGraw-Hill, 2012, pp. 371–433.
- [97] S. M. Sze and M. K. Lee, "MOS Capacitor and MOSFET," in *Semiconductor Devices Physics and Technology*, 3rd ed., New York: John Wiley & Sons, 2012, pp. 160–194.
- [98] F. Flores Gracia, M. Aceves, J. Carrillo, C. Domínguez, and C. Falcony, "Photoluminescence and cathodoluminescence characteristics of SiO₂ and SRO films implanted with Si," *Superficies y Vacío*, vol. 18, pp. 7–13, Jan. 2005.
- [99] S. A. Cabanas-Tay, A. Morales-Sanchez, and C. Dominguez-Horna, "Effect of the active layer thickness on the electrical and electroluminescent properties in silicon rich oxide based light emitting capacitors," in *2016 13th International Conference on Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control (CCE)*, Sep. 2016, pp. 1–3. doi: 10.1109/ICEEE.2016.7751231.
- [100] P. G. Pai, S. S. Chao, Y. Takagi, and G. Lucovsky, "Infrared spectroscopic study of SiO_x films produced by plasma enhanced chemical vapor deposition," *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, vol. 4, no. 3, pp. 689–694, May 1986, doi: 10.1116/1.573833.

- [101] X. Xu *et al.*, "A comparison of structures and properties of SiN_x and SiO_x films prepared by PECVD," *J Non Cryst Solids*, vol. 358, no. 1, pp. 99–106, Jan. 2012, doi: 10.1016/j.jnoncrsol.2011.08.029.
- [102] D. Dong, E. A. Irene, and D. R. Young, "Preparation and Some Properties of Chemically Vapor-Deposited Si-Rich SiO₂ and Si₃N₄ Films," *J Electrochem Soc*, vol. 125, no. 5, p. 819, 1978, doi: 10.1149/1.2131555.
- [103] N. Buffet, P. Mur, B. de Salvo, and M. N. Semeria, "Silicon nanocrystals precipitation in a SiO₂/matrix elaborated from the decomposition of LPCVD SiO₂," in *Proceedings of the 2nd IEEE Conference on Nanotechnology*, pp. 269–272. doi: 10.1109/NANO.2002.1032244.
- [104] A. A. González Fernández, "Estudio de electroluminiscencia en SRO," Tesis, INAOE, Tonantzintla, 2009.
- [105] K. Monfil Leyva, "Study of luminescence on multiple SRO structures with the possibility to obtain electroluminescence," Tesis, INAOE, Tonantzintla, 2009.
- [106] C. F. Ruiz Valdez, "Estudio de termoluminiscencia estimulada eléctricamente y con radiación β de películas de SRO fabricadas por el método de LPCVD," Tesis, UNISON, 2013.
- [107] C. S. Castro, "Estudio de termoluminiscencia ópticamente estimulada con radiación UV en películas de SRO fabricadas por el método LPCVD para el desarrollo de dosímetros," Tesis, UNISON, Hermosillo, 2012.
- [108] J. A. Luna-López, A. Morales-Sánchez, M. Aceves-Mijares, Z. Yu, and C. Domínguez, "Analysis of surface roughness and its relationship with photoluminescence properties of silicon-rich oxide films," *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, vol. 27, no. 1, pp. 57–62, Jan. 2009, doi: 10.1116/1.3032915.
- [109] A. Morales-Sánchez *et al.*, "DC and AC electroluminescence in silicon nanoparticles embedded in silicon-rich oxide films," *Nanotechnology*, vol. 21, no. 8, p. 085710, Feb. 2010, doi: 10.1088/0957-4484/21/8/085710.
- [110] J. López *et al.*, "Compositional and structural characterization of silicon nanoparticles embedded in silicon rich oxide," *Revista Mexicana de Física*, vol. 53, p. 293, Dec. 2007.
- [111] M. Aceves-Mijares *et al.*, "Composition and emission characterization and computational simulation of silicon rich oxide films obtained by LPCVD," *Surface and Interface Analysis*, vol. 46, no. 4, pp. 216–223, Apr. 2014, doi: 10.1002/sia.5212.

- [112] E. Quiroga *et al.*, “Structural characteristics of a multilayer of silicon rich oxide (SRO) with high Si content prepared by LPCVD,” *physica status solidi (a)*, vol. 206, no. 2, pp. 263–269, Feb. 2009, doi: 10.1002/pssa.200824365.
- [113] R. López-Estopier, M. Aceves-Mijares, Z. Yu, and C. Falcony, “Determination of the energy states of the donor acceptor decay emission in silicon rich oxide prepared by low-pressure chemical vapor deposition,” *Journal of Vacuum Science & Technology B, Nanotechnology and Microelectronics: Materials, Processing, Measurement, and Phenomena*, vol. 29, no. 2, p. 021017, Mar. 2011, doi: 10.1116/1.3554735.
- [114] J. López, “Characterization of Silicon Rich Oxides with Tunable Optical Band Gap on Sapphire Substrates by Photoluminescence, UV/Vis and Raman Spectroscopy Ragnar Kiebach, Jose Alberto Luna-López, Guilherme Osvaldo Dias, Mariano Aceves-Mijares, Jacobus Willibrordus Swart,” *J Mex Chem Soc*, vol. 52, p. 212, Nov. 2008.
- [115] J. R. Martínez Castelo, “Optimización de un sensor de radiación ultravioleta a base de SRO,” Tesis, UNISON, Hermosillo, 2010.
- [116] R. C. Ramos Montes, “Caracterización Eléctrica de Sensores de UV a base de SRO,” Tesis, BUAP, Puebla, 2009.
- [117] M. Aceves-Mijares, J. M. Ramírez, J. Pedraza, S. Román-López, and C. Chávez, “Determination of heavy metals contamination using a silicon sensor with extended responsive to the UV,” *J Phys Conf Ser*, vol. 421, p. 012016, Mar. 2013, doi: 10.1088/1742-6596/421/1/012016.
- [118] J. Hernández Betanzos, “Investigación y desarrollo teórico de un nuevo sensor electrofotónico,” Tesis, INAOE, Tonantzintla, 2022.
- [119] R. Leal-Romero, J. E. Zuniga-Juarez, I. E. Zaldivar-Huerta, M. del Carmen Maya-Sanchez, M. Aceves-Mijares, and J. A. Reynoso-Hernandez, “Fabrication and Characterization of Coplanar Waveguides on Silicon Using a Combination of SiO₂ and SRO₂₀,” *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, vol. 31, no. 3, pp. 678–682, Sep. 2008, doi: 10.1109/TCAPT.2008.922005.
- [120] T. C.-J. Yang *et al.*, “High Si content SRO/SiO₂ bilayer superlattices with boron and phosphorus doping for next generation Si quantum dot photovoltaics,” in *2015 IEEE 42nd Photovoltaic Specialist Conference (PVSC)*, Jun. 2015, pp. 1–6. doi: 10.1109/PVSC.2015.7355967.

- [121] J. Carrillo-López, J. A. Luna-López, I. Vivaldo-De la Cruz, M. Aceves-Mijares, A. Morales-Sánchez, and G. García-Salgado, "UV enhancement of silicon solar cells using thin SRO films," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 100, pp. 39–42, May 2012, doi: 10.1016/j.solmat.2011.04.029.
- [122] Jobin Yvon Horiba Group, "FluoroMax-3 & FluoroMax-P Operation Manual." 2001.
- [123] ThorLabs, "FDS1010 Datasheet," <https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=FDS1010>. 2022.
- [124] Tektronix, "SMU 2600B Series SourceMeter Manual," <https://www.tek.com/en/keithley-source-measure-units/smu-2600b-series-sourcemeter-manual-8>, 2021.
- [125] Tektronix, "Series 2600B System SourceMeter Instrument-User's Manual," <https://www.tek.com/en/manual/source-measure-units/series-2600b-system-sourcemeter-instrument-user-s-manual-2600b-series-sourcemeter>, 2021.
- [126] EETech Media LLC., "All About Circuits," <https://www.allaboutcircuits.com/textbook/direct-current/chpt-8/kelvin-resistance-measurement/>.
- [127] I. Miccoli, F. Edler, H. Pfnür, and C. Tegenkamp, "The 100th anniversary of the four-point probe technique: the role of probe geometries in isotropic and anisotropic systems," *Journal of Physics: Condensed Matter*, vol. 27, no. 22, p. 223201, Jun. 2015, doi: 10.1088/0953-8984/27/22/223201.
- [128] Q. Jiang *et al.*, "Passivation and antireflection AZO:H layer in AZO:H/p-Si heterojunction solar cells," *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, vol. 25, no. 12, pp. 5356–5361, Dec. 2014, doi: 10.1007/s10854-014-2313-4.
- [129] D.-J. Lee, H.-M. Kim, J.-Y. Kwon, H. Choi, S.-H. Kim, and K.-B. Kim, "Structural and Electrical Properties of Atomic Layer Deposited Al-Doped ZnO Films," *Adv Funct Mater*, vol. 21, no. 3, pp. 448–455, Feb. 2011, doi: 10.1002/adfm.201001342.
- [130] K. H. Kong, R. Kek, T. Y. Tou, and S. S. Yap, "Effects of the resistivity of AZO film on the IV and CV characteristics of AZO/p-Si heterojunction," *Microelectron Eng*, vol. 213, pp. 24–30, May 2019, doi: 10.1016/j.mee.2019.04.011.
- [131] M. Aceves Mijares, "Estudio de las propiedades de conducción del dispositivo Al-Óxido de Silicio Rico en Silicio-Si, y su posible aplicación a celdas de entrada-salida de circuitos integrados," Tesis, CICESE, Ensenada, 1996.

- [132] E. Huerta Mascotte, R. I. Mata Chávez, J. M. Estudillo Ayala, J. M. Sierra Hernández, I. Guryev, and R. A. Lizárraga Morales, "Solar cell characteristics study for solar energy efficient use," *Acta Univ*, vol. 26, no. NE-1, pp. 30–34, Mar. 2016, doi: 10.15174/au.2016.868.
- [133] R. M. López Guardado, "Desarrollo de un sistema de caracterización de chips electrofotónicos," Tesis, Universidad Autónoma de Sinaloa, Culiacán, 2019.
- [134] M. Chegaar, A. Hamzaoui, A. Namoda, P. Petit, M. Aillerie, and A. Herguth, "Effect of Illumination Intensity on Solar Cells Parameters," *Energy Procedia*, vol. 36, pp. 722–729, 2013, doi: 10.1016/j.egypro.2013.07.084.
- [135] A. D. Dhass, E. Natarajan, and L. Ponnusamy, "Influence of shunt resistance on the performance of solar photovoltaic cell," in *2012 International Conference on Emerging Trends in Electrical Engineering and Energy Management (ICETEEEM)*, Dec. 2012, pp. 382–386. doi: 10.1109/ICETEEEM.2012.6494522.
- [136] K. Rajkanan and J. Shewchun, "A better approach to the evaluation of the series resistance of solar cells," *Solid State Electron*, vol. 22, no. 2, pp. 193–197, Feb. 1979, doi: 10.1016/0038-1101(79)90112-6.
- [137] M. Aceves Mijares, "Conversaciones personales con asesor."
- [138] M. Schnabel, C. Weiss, P. Löper, P. R. Wilshaw, and S. Janz, "Self-assembled silicon nanocrystal arrays for photovoltaics," *physica status solidi (a)*, vol. 212, no. 8, pp. 1649–1661, Aug. 2015, doi: 10.1002/pssa.201431764.
- [139] L. Canham, "Introductory lecture: origins and applications of efficient visible photoluminescence from silicon-based nanostructures," *Faraday Discuss*, vol. 222, pp. 10–81, 2020, doi: 10.1039/D0FD00018C.
- [140] K. Ding *et al.*, "Silicon quantum dot formation in SiC/SiO_x hetero-superlattice," *Energy Procedia*, vol. 10, pp. 249–254, 2011, doi: 10.1016/j.egypro.2011.10.186.
- [141] Ragnarkiebach, Zhenruiyu, M. Aceves, Dongcaibian, and Jinhuidu, "THE DEPOSITION AND CONTROL OF SELF ASSEMBLED SILICON NANO ISLANDS ON CRYSTALLINE SILICON," *International Journal of High Speed Electronics and Systems*, vol. 18, Nov. 2011, doi: 10.1142/S0129156408005862.

- [142] J. A. Luna-López, M. Aceves-Mijares, J. Carrillo-López, A. Morales-Sanchez, F. J. Flores-Gracia, and G. Garcia-Salgado, "Photoconduction in silicon rich oxide films," *J Phys Conf Ser*, vol. 167, p. 012017, May 2009, doi: 10.1088/1742-6596/167/1/012017.
- [143] A. Morales-Sánchez *et al.*, "Topographic analysis of silicon nanoparticles-based electroluminescent devices," *Materials Science and Engineering: B*, vol. 174, no. 1, pp. 123–126, 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2010.03.030>.