



*"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"*

UNIVERSIDAD DE SONORA

**DIVISION DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES
MAESTRÍA EN CIENCIAS EN ELECTRÓNICA**

**Recubrimientos de
Celdas Solares Basados
en Nanoencapsulados
de NPs de Si en Al₂O₃**

TESIS PRESENTADA POR: **ING. JESÚS ROBERTO
RAMÍREZ ESPINOZA**

PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS
EN ELECTRÓNICA

**DIRECTOR DE TESIS: Dr. Dainet Berman Mendoza
CODIRECTOR DE TESIS: Dr. Antonio Ramos Carrazco**

Hermosillo, Sonora

21 de septiembre del 2022

Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



**"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"**



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess

Agradecimientos

A mis amigos y compañeros: Juan, Víctor, Ángel y Gerardo, por todo el apoyo, bromas, consejos e icónicos momentos adentro y fuera del laboratorio. Se recordará a Excalibur, el sensor de gas que no sensaba, las simulaciones que no convergían, los cuarzos rotos, las veces que decidíamos contar nuestra vida, y como olvidar al metalorgánico que se fue.

A mi mejor amiga, Lulú, que, a pesar de la distancia, siempre podía contar con ella y ser un lugar en donde apoyarme emocionalmente.

A mis tíos, María y Antonio, por permitirme entrar a su casa y dar asilo desde inicios de la universidad y hacerme sentir como si fuera otro de sus hijos.

A los doctores: Antonio Ramos Carrazco y Dainet Berman Mendoza, por su apoyo en todo momento, por sus consejos, opiniones y lecciones, no solo como profesores, si no como amigos.

A la Universidad de Sonora (Unison) y al Laboratorio Nacional de Nanofabricación (NanoFab), por permitirme utilizar su establecimiento y equipos que se necesitaron para este trabajo.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por su apoyo económico, el cual me permitió realizar este posgrado.

Dedicatoria

Dedico esta tesis a toda mi familia que me ha apoyado, principalmente a: mi madre Marcela y padre Roberto, a pesar de no siempre estar, gracias por todo su apoyo desde que tengo memoria, por creer en mí y por los consejos de vida que me han dado. Sin ustedes no sería esto posible. A mis hermanas, Alondra y Marce, que, a pesar de no demostrárselo, las quiero mucho y me apoyan. A mis sobrinos, Marcelo y Victoria, son uno mis motores para seguir adelante y seguirme superando, ser un ejemplo para ustedes.

Índice

Agradecimientos	II
Dedicatoria	III
Índice de figuras	IV
Índice de tablas	IX
Capítulo 1 Introducción.....	1
1.1 Antecedentes.....	1
1.2 Hipótesis.....	2
1.3 Justificación	2
1.4 Objetivos.....	3
1.5 Contenido de la tesis	3
Capítulo 2 Marco Teórico	5
2.1 Semiconductores en bulto y nanoescala.....	5
2.2 Puntos cuánticos.....	7
2.3 Nanopartículas de silicio	8
2.3.1 Métodos de síntesis	8
2.3.2 Propiedades ópticas de las SiNP's.....	10
2.3.3 Aplicaciones de las SiNP's	11
2.4 Óxido de aluminio (Al_2O_3)	11
2.4.1 Métodos de síntesis y depósito	15
2.4.2 Nanolaminados de Al_2O_3	16
2.4.3 Aplicaciones de nanolaminados de Al_2O_3	18
2.5 Celdas solares	19
2.5.1 Recubrimientos de conversión descendente en celdas solares.....	20
2.5.2 Recubrimientos antirreflejantes en celdas solares	22
2.5.3 Parámetros de las celdas solares y eficiencia	24
Capítulo 3 Desarrollo Experimental.....	27
3.1 Síntesis de nanopartículas de silicio y depósito sobre CS.....	27
3.2 Depósito de Al_2O_3 por depósito por capa atómica (ALD).....	29
3.3 Depósito de nanoencapsulado de SiNP's en Al_2O_3	31
Capítulo 4 Técnicas de Caracterización.....	33
4.1 Dispersión Dinámica de la Luz (DLS).....	33

4.2	Espectroscopía Ultravioleta-Visible (UV-VIS).....	34
4.3	Fotoluminiscencia (FL).....	36
4.4	Espectroscopía de fotoelectrones de rayos X (XPS).....	37
4.5	Elipsometría Espectroscópica	37
4.6	Termoluminiscencia (TL).....	41
4.7	Caracterización eléctrica de las celdas solares.....	41
Capítulo 5 Análisis y Discusión de Resultados		43
5.1	Nanopartículas de Silicio.....	43
5.1.1	Distribución de tamaño de nanopartículas de silicio.....	43
5.1.2	Espectroscopía UV-Visible	46
5.1.3	Estimación del ancho de banda prohibida utilizando el método de Tauc	48
5.1.4	Fotoluminiscencia	51
5.1.5	Caracterización eléctrica de CS con recubrimiento de SiNP's	52
5.2	Caracterización de Óxido de Aluminio (Al ₂ O ₃)	55
5.2.1	Reflectancia	55
5.2.2	Elipsometría espectroscópica	56
5.2.3	Espectroscopía de fotoelectrones de rayos X (XPS)	65
5.2.4	Termoluminiscencia	67
5.3	Caracterización eléctrica de CS con nanoencapsulado de SiNP's en Al ₂ O ₃ ...	70
Capítulo 6 Conclusiones.....		75
Capítulo 7 Trabajo Futuro		76
Bibliografía.....		77

Índice de figuras

Fig. 2.1 Estructura de un semiconductor	5
Fig. 2.2 Bandas de energía de un semiconductor	6
Fig. 2.3 Densidad de estados de un semiconductor en bulto y de un QD	7
Fig. 2.4 Diagrama de transformación de la estructura de Al_2O_3	12
Fig. 2.5 Estructura del $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$	13
Fig. 2.6 Funcionamiento de una CS	20
Fig. 2.7 Diagrama del funcionamiento de una película LDS sobre una CS	21
Fig. 2.8 Diagrama de funcionamiento de un CAR sobre una CS.....	23
Fig. 2.9 Circuito equivalente de una CS ideal	25
Fig. 2.10 Curvas I-V de una CS.....	25
Fig. 3.1 Diagrama del proceso de síntesis de SiNP's	28
Fig. 3.2 Diagrama esquemático de depósito por Spin-Coating	28
Fig. 3.3 Diagrama de un ciclo ALD.....	30
Fig. 3.4 Esquemático de CS con recubrimiento de nanoencapsulado de SiNP's en Al_2O_3	32
Fig. 4.1 Procedimiento y funcionamiento de la caracterización por DLS	34
Fig. 4.2 Espectro electromagnético	35
Fig. 4.3 Esquema de un espectrómetro UV-Vis	36
Fig. 4.4 Esquema de un espectrofotómetro de fotoluminiscencia	36
Fig. 4.5 Esquema del principio de medición en un elipsómetro	38
Fig. 4.6 Esquema óptico de 3 medios, aire/película delgada/sustrato.	40
Fig. 4.7 Esquema de medición de curvas IV de CS	42
Fig. 5.1 Distribución de tamaños de M1	44
Fig. 5.2 Distribución de tamaños de M2	44
Fig. 5.3 Distribución de tamaños de M3	45
Fig. 5.4 Distribución de tamaños de M4	45
Fig. 5.5 Espectro de absorbancia de M1.....	46
Fig. 5.6 Espectro de absorbancia de M2.....	47

Fig. 5.7 Espectro de absorbancia de M3.....	47
Fig. 5.8 Espectro de absorbancia de M4.....	48
Fig. 5.9 Estimación del Ancho de Banda Prohibida de M1	49
Fig. 5.10 Estimación del Ancho de Banda Prohibida de M2	50
Fig. 5.11 Estimación del Ancho de Banda Prohibida de M3	50
Fig. 5.12 Estimación del Ancho de Banda Prohibida de M4	51
Fig. 5.13 Espectro de fotoluminiscencia de las muestras M1, M2 y M3	52
Fig. 5.14 Curvas I-V y P-V antes y después del recubrimiento con SiNP's de CS_1 ...	53
Fig. 5.15 Curvas I-V y P-V antes y después del recubrimiento con SiNP's de CS_2 ...	53
Fig. 5.16 Curvas I-V y P-V antes y después del recubrimiento con SiNP's de CS_3 ...	54
Fig. 5.17 Reflectancia de las muestras de Al₂O₃.....	56
Fig. 5.18 Valores ψ y Δ obtenidos por elipsometría para S1	57
Fig. 5.19 Valores ψ y Δ obtenidos por elipsometría para S2	58
Fig. 5.20 Valores ψ y Δ obtenidos por elipsometría para S3	58
Fig. 5.21 Valores ψ y Δ obtenidos por elipsometría para S4	59
Fig. 5.22 Valores ψ y Δ obtenidos por elipsometría para S5	59
Fig. 5.23 Valores ψ y Δ obtenidos por elipsometría para C1.....	60
Fig. 5.24 Valores ψ y Δ obtenidos por elipsometría para C2.....	60
Fig. 5.25 Valores ψ y Δ obtenidos por elipsometría para C3.....	61
Fig. 5.26 Valores ψ y Δ obtenidos por elipsometría para C4.....	61
Fig. 5.27 Valores ψ y Δ obtenidos por elipsometría para C5.....	62
Fig. 5.28 Valores ψ y Δ obtenidos por elipsometría para C6.....	62
Fig. 5.29 Valores ψ y Δ obtenidos por elipsometría para C7.....	63
Fig. 5.30 Curva de saturación.....	64
Fig. 5.31 Curva de crecimiento.....	64
Fig. 5.32 Espectro XPS de la muestra M0	66
Fig. 5.33 Espectro XPS centrado en el pico de Aluminio 2p de la muestra M0.....	66
Fig. 5.34 Espectro XPS centrado en el pico de Oxígeno 1s de la muestra M0	67
Fig. 5.35 Espectro TL de Silicio.....	68
Fig. 5.36 Espectro TL de Al₂O₃ con 100 ciclos	69
Fig. 5.37 Espectro TL de Al₂O₃ con 300 ciclos	69

Fig. 5.38	Curvas I-V y P-V de CS A con y sin nanoencapsulados.....	72
Fig. 5.39	Curvas I-V y P-V de CS B con y sin nanoencapsulados.....	72
Fig. 5.40	Curvas I-V y P-V de CS C con y sin nanoencapsulados.....	73
Fig. 5.41	Curvas I-V y P-V de CS D con y sin nanoencapsulados.....	74

Índice de tablas

Tabla 2.1 Propiedades del α- Al_2O_3.....	14
Tabla 3.1 Tabla de parámetros de depósito de Al_2O_3 por ALD.....	30
Tabla 5.1 Tamaño promedio y desviación estándar de SiNP's	46
Tabla 5.2 Valores estimados del Ancho de Banda Prohibida de SiNP's	51
Tabla 5.3 Características eléctricas de CS con y sin recubrimiento de SiNP's	55
Tabla 5.4 Incremento de la eficiencia η de las CS con SiNP's respecto a la CS sin recubrimiento.....	55
Tabla 5.5 Espesores obtenidos mediante los resultados de reflectancia y elipsometría espectroscópica.	63
Tabla 5.6 Espesores obtenidos por elipsometría espectroscópica de muestras con diferente número de ciclos.	65
Tabla 5.7 Características eléctricas de CS con y sin recubrimiento de nanoencapsulado de SiNP's en Al_2O_3	71
Tabla 5.8 Incremento de la eficiencia η de las CS con los nanoencapsulados respecto a la CS sin recubrimiento.....	71

Capítulo 1

Introducción

1.1 Antecedentes

El desarrollo de energías renovables ha sido de gran interés durante los últimos años, ya que su producción proviene de fuentes naturales que no dañan al medio ambiente, lo opuesto a las maneras convencionales de producción de energía, como el uso de combustibles fósiles, que generan contaminación al ambiente. Una energía renovable ideal, es la luz solar, ya que es limpia, segura y prácticamente infinita, dado que el sol irradia una gran cantidad de luz a la tierra por día, lo cual, podría aprovecharse de forma más eficiente [1]. La forma más común de aprovechar la energía solar es mediante la implementación de celdas solares (CS), las cuales funcionan mediante el efecto fotovoltaico.

Actualmente uno de los retos más importantes para el uso de las CS de forma masiva, es incrementar su eficiencia. Una manera de incrementar la eficiencia es ayudar a que la luz quede atrapada en la CS, esto, utilizando una capa antirreflejante (CAR) en la superficie de ella, ya que uno de los factores que afectan a la eficiencia es la reflexión de la luz sobre la CS [2],[3].

Tradicionalmente, las CARs están hechas de una o varias capas de películas delgadas de algún dieléctrico, utilizando la diferencia de índice de refracción entre el sustrato y la película, tomando como base la interferencia óptica modelada por la ecuación de Fresnell[4]. Los materiales más utilizados para esta aplicación son el TiO_2 , Si_3N_4 , Al_2O_3 , SiO_2 , Ta_2O_5 , y más recientemente, capas amorfas de a – SiN_x : H y a – Si: C: H [3].

Con el rápido desarrollo de la nanotecnología en distintos campos, los nanomateriales han atraído la atención de diversos grupos de investigación para incrementar la eficiencia de las CS. Desde que se descubrió la fluorescencia de silicio poroso por excitación de luz UV en 1990 [5], el silicio a nano escala se ha investigado debido a sus propiedades física y

químicas, como la emisión de luz de distintas longitudes de ondas dependiendo del tamaño y la no toxicidad [6]. Dadas estas características, se ha utilizado como capa antirreflejante en CS para incrementar la eficiencia [7].

Una forma de incrementar la eficiencia es utilizar el fenómeno denominado “Down-shifting” o conversión descendente en la capa antirreflejante de la CS, dicho fenómeno consiste en la absorción de fotones de alta energía y su reemisión con menor energía a la capa activa de la CS y así, dichos fotones contribuirán a la fotocorriente generada [4]. Dicho fenómeno de conversión descendente es lo que se aprovechó para crear un recubrimiento con base en las nanopartículas de silicio [7].

Así mismo, se estudió el uso de alúmina como CAR en celdas solares de silicio, dadas sus características ópticas, como su índice refracción y su transparencia, adicionalmente, cuenta con una buena resistencia mecánica [8].

1.2 Hipótesis

Creando una capa antirreflejante mediante el nanoencapsulado de nanopartículas de silicio en óxido de aluminio se puede incrementar la eficiencia de celdas solares utilizando el efecto de conversión descendente.

1.3 Justificación

En los últimos años las celdas solares comerciales han obtenido eficiencias en el rango de 4% hasta 17.5%. siendo las de silicio monocristalino las más eficientes, seguidas por las de silicio policristalino [9]. Se han dado distintos enfoques para el aumento de la eficiencia de las celdas solares, ya sea utilizar materiales dopados, varias capas de semiconductores n-p, colorantes, capas de nanocristales, materiales orgánicos, etc [10]. Otra forma de mejorar la eficiencia es el uso de CAR, adicionalmente, al utilizarse materiales que presenten el fenómeno de conversión descendente, disminuiría la pérdida de fotones de alta energía en las celdas solares. Así mismo, si se combinan estos materiales con materiales que ya se usaban como CAR, podrían incrementar incluso más la eficiencia.

1.4 Objetivos

Objetivo General

Estudiar las propiedades del nanoencapsulado de nanopartículas de silicio en óxido de aluminio para su aplicación como capa antirreflejante con propiedades de conversión descendente en celdas solares de silicio para incrementar su eficiencia.

Objetivos Particulares

- Sintetizar nanopartículas de silicio.
- Depositar películas delgadas de óxido de aluminio.
- Caracterizar las películas delgadas de óxido de aluminio y las SiNP's.
- Depositar un recubrimiento de nanoencapsulado de SiNP's en óxido de aluminio.
- Incorporar la estructura de nanoencapsulado como recubrimiento en las celdas solares.
- Medir y comparar la eficiencia de las celdas solares con y sin la estructura de nanoencapsulado de SiNP's en óxido de aluminio.

1.5 Contenido de la tesis

Los capítulos de esta tesis se organizaron de la siguiente manera:

En el capítulo 1 se brinda la introducción de la tesis, en donde se hablan de los antecedentes y la justificación de este trabajo de investigación utilizando los objetivos planteados, así mismo se presenta una descripción de contenido de cada capítulo.

En el capítulo 2, se presenta el marco teórico, en el cual se describen los puntos clave para entender este trabajo de investigación, como características y métodos de síntesis de SiNP's y Al_2O_3 , y los tipos de recubrimiento de celdas solares.

En el capítulo 3, se habla del desarrollo experimental, el cual contiene las técnicas de síntesis y depósito utilizadas.

En el capítulo 4, se describen las distintas técnicas de caracterización de materiales utilizadas en esta tesis.

En el capítulo 5, se hace el análisis y discusión de resultados obtenidos en este trabajo de investigación.

En el capítulo 6, se exhiben las conclusiones del trabajo realizado.

En el capítulo 7, se muestra el trabajo futuro que se puede realizar para mejorar este trabajo, así mismo se incluyen las referencias utilizadas.

Capítulo 2

Marco Teórico

2.1 Semiconductores en bulto y nanoescala

Los semiconductores en bulto (o simplemente semiconductores) usualmente se definen como los materiales que tienen una resistividad eléctrica en el rango de $10^{-2} - 10^9 \Omega \cdot \text{cm}$, aunque, también se puede definir en términos de la energía del ancho de banda prohibida, donde esta energía está en el rango de $0 - 4 \text{ eV}$, aunque existen algunas excepciones. Si la energía es 0 eV el material se denomina metal, y si es mayor a 4 eV generalmente se le considera aislante [11], así mismo, se puede definir que un semiconductor es un tipo de material que tiene una conductividad en los metales y los aislantes. Existen dos clasificaciones de semiconductores; los semiconductores elementales, que son los elementos del grupo IV de la tabla periódica, y los semiconductores compuestos, que se componen por combinaciones de elementos del grupo III y V o II y VI. Los semiconductores pueden presentar una estructura amorfa, policristalina o monocristalina; una estructura amorfa es en la cual los átomos no presentan un arreglo ordenado o periódico, en la policristalina existen regiones a lo largo del material que pueden o no tener un orden o arreglo periódico, cada región con un arreglo diferente a las demás, y, por último, la monocristalina presenta un arreglo periódico y ordenado a lo largo de todo el material [12].

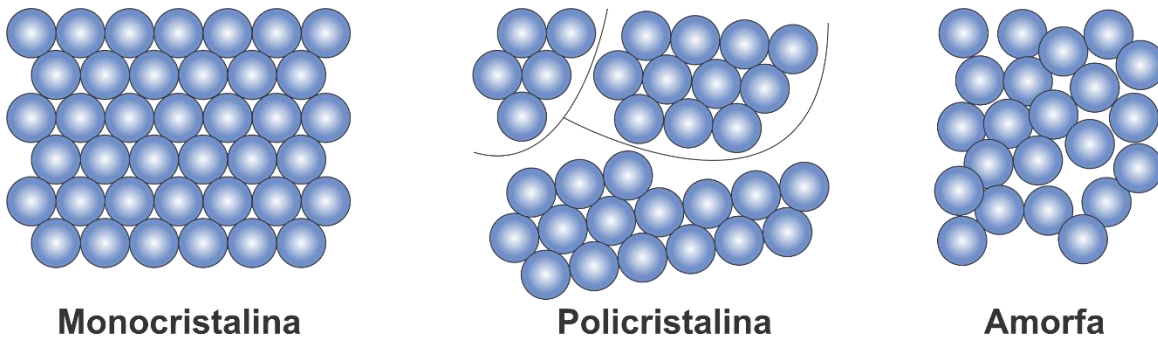


Fig. 2.1 Estructura de un semiconductor

En las estructuras cristalinas, cada electrón compartido por cada átomo que la compone está unido por un enlace covalente, y dada la interacción entre tantos electrones causa que se creen distintos niveles discretos de energía que se denominan bandas de energía, estas bandas se ven ocupadas por electrones que dependen de la energía. La última banda más llena de electrones es la Banda de Valencia, y la siguiente la Banda de Conducción (en la cual los electrones se encuentran libres y pueden participar en los procesos de conducción), a estas bandas la separa una región llamada Banda Prohibida, la cual es la diferencia de energía entre la Banda de conducción y de Valencia; en esta región no hay electrones [13].

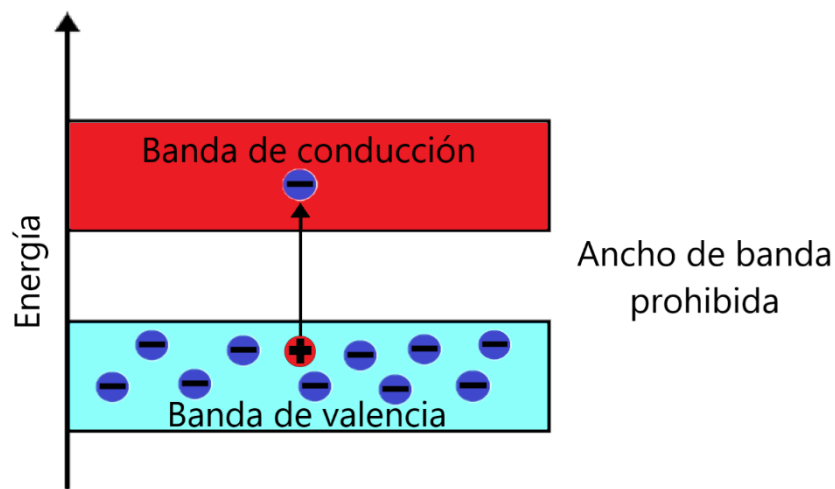


Fig. 2.2 Bandas de energía de un semiconductor

Los semiconductores a nanoescala han sido estudiados de manera muy intensa durante los últimos años, dado que sus características físicas y químicas cambian cuando se presentan tamaños del orden de los nanómetros. Algunos de los ejemplos de las propiedades que presentan los nanomateriales son: *Blue shift* en el espectro de absorción óptico (corrimiento del pico de absorción hacia las altas frecuencias), luminiscencia dependiente del tamaño y efectos ópticos no lineales. Estas propiedades son manifestaciones del llamado Efecto de Cuantización de tamaño (Size Quantization Effect) que aparece debido al incremento del confinamiento cuántico de electrones y huecos con la disminución del tamaño de los cristales y, consecuentemente, cambia la estructura electrónica. Un ejemplo de nanoestructuras son las nanopartículas, pues se sugiere que tienen el potencial para diferentes aplicaciones en electrónica donde los efectos del confinamiento cuántico pueden ser

utilizados de manera ventajosa. Se propone que las nanopartículas pueden ser usadas para producir luz de varios colores variando su tamaño. Esto, teniendo importancia en varias áreas, como el campo de las CS [14].

2.2 Puntos cuánticos

Un tipo de nanoestructura conocida es el punto cuántico (QD), el cual se considera una nanoestructura de dimensiones “cero”, esto es, porque tanto electrones como huecos están confinados en las 3 dimensiones en la estructura. Un QD presenta un limitado número de electrones, lo que resulta en energías cuantificadas discretas en la densidad de estados (DOS, por sus siglas en inglés) para estructuras de dimensión cero no agregadas.

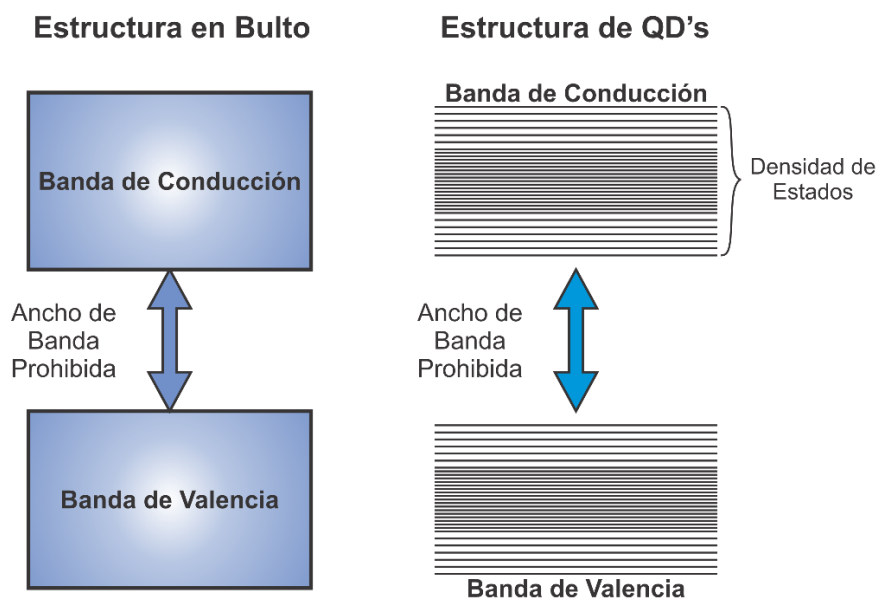


Fig. 2.3 Densidad de estados de un semiconductor en bulto y de un QD

El movimiento de los electrones está confinado en un QD, en el cual solo existen estados discretos, ha esto se le llama confinamiento cuántico, el cual modifica la densidad de estados. Cada estado representa los niveles de energía permitidos, por lo cual, estos niveles de energía son discretos y son los que los electrones pueden ocupar. Algunas de las características más interesantes son que debajo de cierto tamaño de los QD, estos presentan grandes diferencias en las propiedades ópticas, como la absorción y emisión, estas propiedades se deben al mismo efecto del confinamiento cuántico. Estos efectos del confinamiento cuántico se observan específicamente cuando el tamaño es tan pequeño como

para que el espaciado de los niveles de energía excede la constante kT (donde k es la constante de Boltzmann y T la temperatura). [15], [16]

Principalmente, lo que afecta las propiedades ópticas de las nanopartículas de semiconductores es la variación de la energía del ancho de banda prohibida (E_g). La energía mínima requerida para crear un par electrón-hueco (excitón) en QDs o nanopartículas es mediante E_g , por tanto, luz con energía $< E_g$ no puede ser absorbida por el material.

En los semiconductores, los excitones tienen un cierto tiempo de vida dado por la recombinación de un par electrón-hueco excitado por un fotón. En los QDs, la energía liberada después de la aniquilación del excitón es demasiado grande para ser disipada mediante vibraciones. En vez de esto, la energía se libera en forma de luz emitida por los QDs.

La longitud de onda emitida es más grande que la longitud de onda absorbida por los QDs. La diferencia del pico de energía de absorción de los QDs y el pico de emisión correspondiente se le llama “Corrimiento de Stokes” [15].

2.3 Nanopartículas de silicio

Las nanopartículas de silicio (SiNP's) tienen unas características ópticas interesantes y especiales, principalmente la emisión de luz que varía con el tamaño de éstas y el tiempo de vida de la fluorescencia, lo que las hace candidatas para distintas aplicaciones, por ejemplo, para su aplicación en CS.

Existe distintos métodos para la síntesis de SiNP's, como por ejemplo la ablación de pulsos laser, degradación de calentamiento, y micro emulsión, pero todas se enfocan en el tamaño de las partículas, distribución del tamaño, producción escalable y química superficial bien controlada [6]. Así mismo, se ha encontrado que pueden absorber longitudes de onda del orden del UV y reemitir la energía en el rango del visible [17].

2.3.1 Métodos de síntesis

- **Métodos Físicos**

Existen algunos métodos físicos para la síntesis de nanopartículas y cada uno presenta diversas ventajas, uno de los más utilizados es por Abrasión de Pulsos Laser (PLA, por sus

siglas en inglés). Mayormente se utilizan pulsos de nano o femtosegundos para irradiar una oblea de silicio para preparar la SiNP's [6]. Yoshida *et al* utilizaron un láser excímero de argón-flúor (ArF) en una atmósfera de helio (He), y encontraron que el diámetro de las nanopartículas incrementaba con respecto a la presión de la atmósfera de He [6], [18].

Otro método es mediante Degradación por Calentamiento, el cual se enfoca en descomponer térmicamente el silano para obtener las nanopartículas de silicio. Una forma de hacerlo es mediante microondas, dado que el silano es susceptible a la degradación térmica a ciertas microondas [6]. Knipping *et al* realizaron cristales puros de silicio con tamaños de entre 6 y 11 nm descomponiendo silano mediante inducción de microondas. Como resultado obtuvieron que su tamaño era proporcional a la concentración del silano, pero que la concentración del gas es inversamente proporcional a la potencia de las microondas [6], [19].

El método por Molino de Bolas Planetario (Planetary Ball Mill), el cual consiste en dos viales que rotan alrededor de su propio eje y la línea de simetría del plato. El movimiento de las bolas que se encuentran en el interior del vial se da por la fuerza resultante de las fuerzas Coriolis y centrífuga, generando impactos que eliminan fuerzas de cizalla y compresión a una carga sobre los polvos, haciendo que se generen variación en la estructura y microestructura [20]. Utilizando este método y un recocido de 150°C, Lam *et al* produjeron nanopartículas de silicio mediante desgaste mecánico de grafito sólido y polvos de dióxido de silicio dentro de un vial de acero inoxidable junto a bolas de acero inoxidable, obteniendo tamaños de aproximadamente 5 nm [6], [21].

- **Métodos Químicos**

Heath *et al* fueron quienes realizaron la primera síntesis de SiNP's mediante una solución. La síntesis se realizó mediante la reducción de SiCl₄ y RSiCl₃ por sodio metálico en un solvente orgánico no polar a alta presión (>100 ATM) y temperatura (385°C), obteniendo tamaños de hasta 5 nm [6], [22]. Se utilizaron haluros de silicio como material de inicio y para realizar la reducción se manejaron distintos agentes (ej. sales de zinc, naftalenuro de sodio o hidruro de litio-aluminio) en distintos solventes para la obtención de las nanopartículas[6].

Tilley *et al* utilizaron el método de síntesis de micro-emulsión para lograr una distribución de tamaño de nanopartículas más pequeñas, esto se obtiene con potentes hidruros como reductores (LiAlH_4 en este caso) y ciertos tensioactivos (TOAB y C_{12}E_5 en este caso) en micelas. Respecto a este experimento, se utilizó SiCl_4 como fuente de silicio [6], [23].

Wang *et al* las sintetizaron mediante una técnica de un solo paso, en donde utilizaron hexatriclorosilano ($\text{C}_6\text{H}_{13}\text{Cl}_3\text{Si}$) como tensioactivo y reactante, el cual, se mezcla con SiCl_4 para formar micelas. Y finalmente, como reductor se utilizó LiAlH_4 . Mediante esta técnica, se sintetizaron SiNP's luminiscentes y altamente monodispersas, las cuales cuentan con un diámetro de $2\pm 0.5\text{nm}$ y una distribución de tamaño relativamente pequeña [6], [24].

2.3.2 Propiedades ópticas de las SiNP's

Las SiNP's tienen propiedades ópticas especiales, como emisión brillante, fotoestabilidad, longitud de onda luminiscente que depende del tamaño, y largo tiempo de vida fluorescente[6]. Otro fenómeno que presentan es la llamada conversión descendente, este fenómeno consiste en la absorción de fotones que son reemitidos en otros fotones con longitudes de onda más larga[25].

Uno de los aspectos que explican la fotoluminiscencia (FL), es que se debe al efecto de confinamiento cuántico que es consecuencia de la cuantización de tamaño de la estructura de las nanopartículas, el otro es por los defectos debidos a estados localizados alrededor de la nanopartícula. En la región de confinamiento cuántico, la propiedad de FL está muy relacionada con el tamaño de la nanopartícula. Incluso un cambio de 0.1 nm puede provocar diferencia en la banda de energía de emisión. Cuanto más se acerque al punto de tamaño crítico, el pico de FL se desplazará más hacia el rojo.

Uno de los parámetros que influye en el desempeño de FL es la distribución del tamaño de las SiNP's(σ). La forma del espectro fotoluminiscente es muy sensible a σ , incluso una diferencia de 0.05 puede ser significativa en el desempeño de la emisión. Otra cosa que influye en las propiedades FL es la presencia de otros elementos, como el oxígeno y el nitrógeno. [6]

2.3.3 Aplicaciones de las SiNP's

- Bio-imagen: En bio-imagen, una etiqueta es una sustancia que permite observar y detectar bio-moléculas. Los QD's se han utilizado para etiquetar y rastrear células en un cuerpo vivo mediante imagen[26]. Generalmente se busca que las etiquetas luminiscentes para bio-imágenes deben emitir en un espectro donde las células no absorban, que sean solubles en agua, altamente emisivas y estables. El silicio tiene propiedades que entran en lo requerido, pero en forma de nanopartícula lo hace mucho mejor para esta aplicación, ya que es inerte, no tóxico y biocompatible en bulto. Las nanopartículas basadas en silicio presentan una buena eficiencia cuántica en la región visible, es soluble en agua e hidrofílico, lo que previene la agregación o precipitación en el entorno biológico[27], [28].
- Fotocatálisis: Un fotocatalizador es una sustancia o compuesto químico que modifica la velocidad de reacción química utilizando la luz[29]. Un buen fotocatalizador debe ser resistente a la foto-corrosión, no muy caro, no tóxico y capaz de utilizar la luz del espectro visible y/o del UV. Las SiNP's se pueden utilizar para esta aplicación dado que pueden modificar la longitud de onda de las emisiones desde el espectro cercano al infrarrojo hasta el azul, además de que su producción es relativamente barata y no son tóxicas[27].
- Celdas Solares: Uno de los métodos para incrementar la eficiencia en las celdas solares es la implementación de materiales luminiscentes que presentan el fenómeno de conversión descendente, el cual consiste en la absorción de fotones de alta energía para después reemitirlos en fotones con menor energía. Las SiNP's son utilizadas para incrementar la eficiencia en dispositivos fotovoltaicos ya que presentan este fenómeno previamente mencionado. El fenómeno de conversión descendente permite que la CS tenga un rango más amplio de aceptación de luz, los fotones que no absorbe la capa activa de la celda, los absorben las nanopartículas de silicio y reemiten en una longitud de onda que el dispositivo fotovoltaico sí acepta, y por lo tanto, incrementan la eficiencia[25]

2.4 Óxido de aluminio (Al_2O_3)

El óxido de aluminio (Al_2O_3) es un material dieléctrico y cerámico que cuenta con buenas propiedades, tales como: alto punto de fusión, buena resistencia mecánica, estabilidad

química, alta resistividad específica, transparencia y es químicamente inerte [8], [30], [31]. El Al_2O_3 es un material con diversos tipos de cristales o fases, de los cuales están los metaestables ($\rho, \gamma, \eta, \delta, \theta, \kappa$ y χ), la térmicamente estable, fase $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ y en su fase amorfa[30], [32], [33]. Para obtener las formas metaestables, se puede obtener mediante el tratamiento térmico de sales e hidróxidos de aluminio (gibbsite, bayertia, boehmita y diásporo), de los cuales, al aplicarles aún más temperatura al tratamiento térmico, se puede obtener la fase $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$.

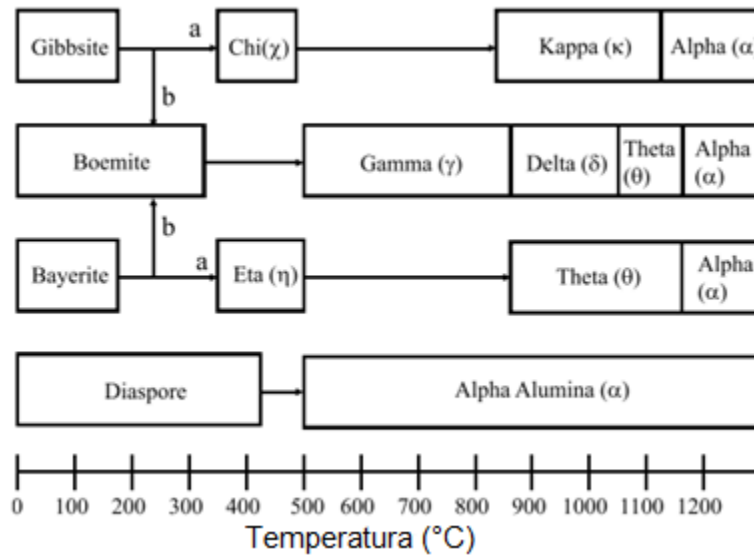


Fig. 2.4 Diagrama de transformación de la estructura de Al_2O_3

La estructura cristalina del $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ (también llamado estructura corindón), consiste en planos compactos de aniones grandes de oxígeno, los cuales se encuentran apilados secuencialmente. Dado que los catinos de aluminio tienen una valencia de +3 y los aniones de oxígeno una de -2, para que haya una neutralidad eléctrica, solo puede haber dos átomos de aluminio por cada tres de oxígeno. [33]

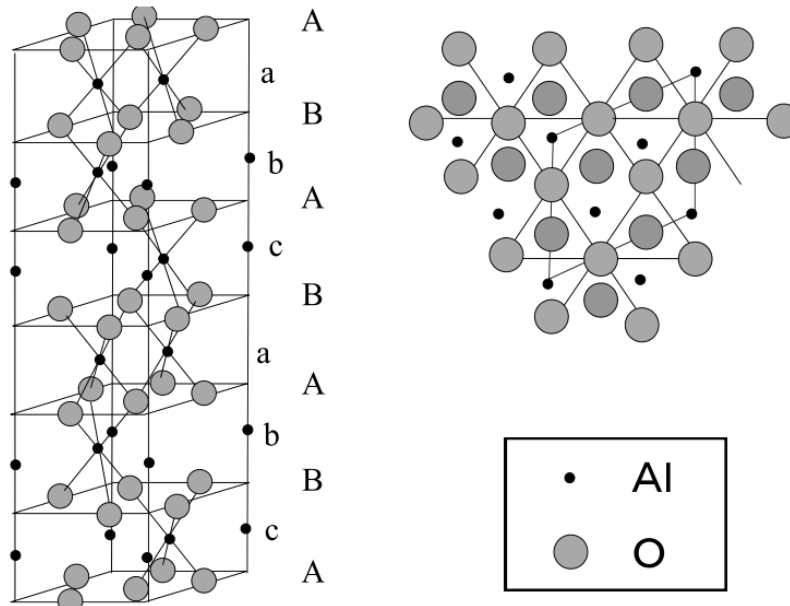


Fig. 2.5 Estructura del α - Al_2O_3

En cuanto a sus propiedades y características mecánicas, el Al_2O_3 es mejor que otros óxidos en términos de dureza, también tiene una resistencia de compresión muy alta, pero en cuanto a la resistencia máxima de flexión y tracción, y resistencia al agrietamiento no es tan bueno como otros materiales.

Su permitividad eléctrica es aproximadamente 10, más grande que la mayoría de los dieléctricos. Si tomamos en cuenta que su permitividad relativa es menor que 15, el Al_2O_3 se ubica en el grupo de materiales con una permitividad eléctrica baja [31]. Es importante recalcar que cada estructura de Al_2O_3 tiene su propio valor de ancho de banda prohibida, se ha reportado que es 8.8eV, 7.0-8.7eV y 5.1-7.1eV para α - Al_2O_3 , γ - Al_2O_3 y Al_2O_3 amorfo, respectivamente [30].

Su conductividad térmica a temperatura ambiente es mucho mayor a la de otros no metales, así como su coeficiente de expansión térmica lineal es mayor que el de otros materiales cerámicos.

Propiedades	α - Al_2O_3
Densidad (γ), g/cm ³	3.99 3-3.98
Punto de fusión(T_m), °C	2054 2004-2096
Fuerza máxima, MPa:	
Flexión (σ_f)	282 152-800
Compresión(σ_c)	2550-3100 690-5500
Módulo de elasticidad (E), GPa	365-393 215-413
Resistencia al agrietamiento (K_{Ic}), MPa · $\sqrt{\text{m}}$	3.3-5.0
Dureza:	
Vickers (HV), GPa	20.6-29.4 5.5-22.0
Mohs (HM)	9
TCLE, ppm/K	7.1-8.3 4.5-10.9
Conductividad térmica (λ), W/(mK)	36-39 12.0-38.5
Resistividad eléctrica (ρ), $\text{Ohm} \cdot \text{cm}$	2×10^{17} 10^{12} - 10^{18}
Resistencia a la ruptura(E_{br}), kV/mm	13 8-43
Permitividad relativa específica (ϵ_r)	9.3,11.5 7.8-11.1

Tabla 2.1 Propiedades del α - Al_2O_3

Posee alta resistencia química en atmósferas oxidantes y reductoras en medios ácidos y alcalinos. Su propiedad de ser químicamente inerte se asocia a que su calor de formación es mayor que la mayoría de los otros óxidos [31].

El Al_2O_3 tiene una gran cantidad de aplicaciones, algunas de estas son como aislantes eléctricos, material abrasivo para maquinado, empaquetado de circuitos integrados, guías de onda, recubrimientos protectores, etc. [31]–[33].

En cuanto a su aplicación en CS, el Al_2O_3 es utilizado como CAR, dada ciertas propiedades ópticas como su transparencia e índice de refracción, adicionalmente, cuenta con la propiedad de pasivación superficial para silicio tipo p alta o ligeramente dopado y también para silicio tipo n ligeramente dopado[8], lo cual se traduce en un incremento en la eficiencia de las CS.

2.4.1 Métodos de síntesis y depósito

El Al_2O_3 puede ser sintetizado y depositado de diversas maneras, por ejemplo, por Depósito por Vapor Químico (CVD, por sus siglas en inglés), síntesis por Sol-Gel y depositado por centrifugado o inmersión, Depósito por Capas Atómicas (ALD, por sus siglas en inglés), entre otros.

El método por CVD consiste en reacciones químicas de reactantes gaseosos, para después formarse un depósito sólido sobre un sustrato. La energía requerida para que sucedan las reacciones químicas puede ser suministrada de manera térmica (CVD térmico), luz (CVD asistido por láser) o electricidad (CVD asistido por plasma). Existen dos reacciones que pueden ocurrir en el CVD; las reacciones químicas heterogéneas, que ocurren cerca o sobre la superficie calentada, y las reacciones homogéneas en fase gaseosa, que ocurren en la fase de gas[34]. Toshiro *et al* sintetizaron y depositaron Al_2O_3 a presión atmosférica mediante este método, utilizando acetilacetonato de aluminio ($(\text{Al}(\text{C}_5\text{H}_7\text{O}_3)_3)$) en forma de polvo como la fuente de aluminio y oxígeno, el cual se calentó a una temperatura de 150°C generando gas que fue arrastrado por gas nitrógeno(N_2). Se utilizaron 3 sustratos, entre ellos obleas de silicio monocristalino (100). El sustrato se colocó sobre un calentador, el cual lo calentaba a una temperatura de entre 250 y 600°C . Se obtuvo Al_2O_3 en su fase amorfa, con transmitancia arriba del 95% a partir de $\lambda = 400\text{nm}$ y un índice de refracción de 1.56 [35].

El proceso por Sol-gel involucra el recubrimiento (mediante centrifugación o inmersión) de sustrato compuesto de soluciones basadas en precursores metal-orgánicos, para posteriormente, realizar una densificación a temperaturas entre 400 y 900°C . Özer *et al*

sintetizaron Al_2O_3 utilizando este método. Utilizó hidrólisis y policondensación de sec-butoxido de aluminio ($\text{Al}(\text{O}^s\text{Bu})_3$) para crear la solución. Se mezcló $\text{Al}(\text{O}^s\text{Bu})_3$ y alcohol isopropílico y se revolvió por 30 minutos. Para la modificación de la gelación se utilizó acetilacetona (AcAcH) como agente quelante, después de que se agregó, se dejó revolviendo por 30 minutos. Para lograr la hidrólisis solo se agregó agua. La solución resultante se dejó mezclando por 1 hora en un ambiente de N_2 y se ajustó el pH con ácido nítrico (HNO_3). Y finalmente, para el depósito en un sustrato, se utilizó la técnica de centrifugado (spin coating). Después del depósito, se dejó secar por 10 minutos, para posteriormente dejarla calentando por 1 hora en un horno con aire circulando, llegando a una temperatura de hasta $400\text{ }^\circ\text{C}$. Por esta metodología se obtuvo Al_2O_3 con una transmitancia del 93% entre las longitudes de onda de 550 y 620 nm, un índice de refracción de $1.56\sim$ (a 600nm), así como un ancho de banda prohibida de 4.1eV, el cual corresponde con valores publicados[36].

El método ALD se distingue por usar pulsos cíclicos y alternados en la cámara de reacción entre los gases precursores y el gas inerte, lo cual permite usar precursores altamente reactivos. El proceso del ALD se basa en dos cosas: la quimiosorción en la superficie y reacciones químicas en la superficie del sustrato. Un ciclo del ALD se conforma por los siguientes pasos: El pulso que inyecta el primer precursor en la cámara, limpiar la cámara con el gas inerte, inyectar el segundo precursor de igual manera que el primero y, finalmente, limpiar de nuevo la cámara con gas inerte. Dobrzański *et al* depositaron Al_2O_3 mediante la técnica de ALD sobre silicio monocristalino (sustrato), en la cual se utilizó Trimetilaluminio (TMA, por sus siglas en inglés) como precursor y agua como reactante. Se utilizaron distintos números de ciclos, con el fin de obtener distintos grosores de película delgada. La cámara se mantuvo a una temperatura de $300\text{ }^\circ\text{C}$. Las propiedades ópticas del Al_2O_3 depositado fueron un índice de refracción de $1.65\sim$ (en 632.8 nm), así mismo se obtuvo que las películas delgadas redujeron la reflexión del sustrato, en $\sim 1\%$, lo cual la hace aptas para su aplicación en celdas solares [37].

2.4.2 Nanolaminados de Al_2O_3

Los materiales nanolaminados son una categoría de nanomateriales 2D en el campo de la química, física de materia condensada y ciencia de materiales. En sí, los materiales nanolaminados se fabrican alternando capas del grosor de nanómetros de al menos dos

materiales diferentes, dichas capas pueden variar en grosor, desde algunas capas de átomos hasta decenas de nanómetros. Estos, principalmente se fabrican mediante depósitos de abajo hacia arriba (ALD, PLD, CVD, Sputtering, etc). Las propiedades de los nanolaminados varían, su comportamiento se determina por su composición, su arreglo y su espesor (siempre difiere a su comportamiento en bulto), pero se mantienen dos características principales: dado su espesor de tamaño atómico, este le brinda una gran flexibilidad mecánica y transparencia óptica, y la otra, dada su gran largo lateral (relativo a su espesor), esto lo hace un buen candidato para aplicaciones como superficie activa. Los nanolaminados pueden ser fabricados utilizando elementos binarios o ternarios de varias capas de espesor.

Hablando específicamente de nanolaminados con materiales binarios, estos presentan muchas ventajas, como, por ejemplo: estabilidad química, excelentes propiedades mecánicas y ópticas; así como la modificación de las propiedades dieléctricas que pueden ser obtenidas mediante multicapas.

El Al_2O_3 es un excelente aislante ($E_g = 5.95\text{eV}$ y constante dieléctrica $k = 9$), que se puede combinar con óxidos que tienen una constante dieléctrica alta, como el óxido de hafnio (HfO_2), dióxido de titanio (TiO_2) o dióxido de zirconio (ZrO_2), que tienen una constante dieléctrica (k) de 25, 80 y 25, respectivamente. La constante dieléctrica se vio incrementada utilizando nanolaminados de $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$, por ejemplo, utilizando Al_2O_3 amorfo con la estructura $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ se obtuvo una $k = 8$, con Al_2O_3 nanocristalino y la misma estructura se obtuvo una $k = 20$, y con la estructura de tres capas $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ una $k = 26$ [38]. Rizwar *et al* depositaron nanolaminados en forma de bicapas de $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ con distintos grosores de Al_2O_3 mediante ALD, el cual midió con una temperatura variable de 22 a 102°C, obteniendo para el Al_2O_3 , un índice de refracción de 1.61 (600nm) a 22°C, el cual incrementó conforme a la temperatura [39]. Gonullu *et al* sintetizaron el mismo material en 2 tipos de sustrato (silicio y vidrio) y variando la temperatura del tratamiento térmico, consiguió una reflectancia de ~7% (330 nm) para la muestra de 1100°C en sustrato de silicio, también se realizó la medición de E_g , obteniendo que este tiende a disminuir conforme aumenta la temperatura (3.86-3.22 eV para transiciones directas y 3.75-3.02 para indirectas). Para el sustrato de vidrio alcanzó una reflectancia de ~27% (310nm) para la muestra de 600°C, así mismo, se observó una transmitancia máxima del 63% a partir de los

700 nm para las muestras con tratamiento térmico, y en cuanto al E_g , este tiende a variar conforme a la temperatura (3.56-3.49 eV para transiciones directas y 2.93-3.16 eV para indirectas) [40].

Chaaya *et al* depositaron bicapas de nanolaminados de $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZnO}$ sobre un sustrato de silicio variando el tamaño y el número de bicapas mediante ALD y realizaron caracterización óptica. Encontraron que las muestras eran transparentes en el rango de los 550-1100nm, también conforme el grosor de los nanolaminados era menor, más incrementaba el E_g . Comparando las muestras con una película de ZnO, los nanolaminados tuvieron mejores propiedades fotoluminiscentes, incrementando los tamaños de los picos en el espectro UV y en el espectro visible, siendo el incremento en el espectro visible lo más prominente. Por último, centrándonos en el Al_2O_3 , este fue transparente en el espectro ultravioleta, así como también se logró incrementar el índice de refracción de dicha monocapa (comparándolo con una película delgada de Al_2O_3), llegando a tener hasta $n = \sim 1.77$ (600nm)[41]. Estos resultados hacen al Al_2O_3 un gran candidato para formar nanolaminados junto con SiNP's.

2.4.3 Aplicaciones de nanolaminados de Al_2O_3

Las propiedades de los nanolaminados de Al_2O_3 son similares a las que presenta en forma de película delgada, pero estas cambian dependiendo del otro material con el que se depositan (TiO_2 , ZnO, HfO_2 , SiO_2), las cuales tienen distintas aplicaciones:

- Aislante de compuerta: El Al_2O_3 , ZrO_2 , TiO_2 y HfO_2 son materiales con alta constante dieléctrica que tiene aplicaciones como aislante de compuerta en MOSFET's o TFT's[42], [43]. Al utilizar nanolaminados de $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{ZrO}_2$ en un TFT's se combinaron las ventajas de estos dieléctricos, la alta constante dieléctrica del ZrO_2 y la baja corriente de fuga del Al_2O_3 , lo que incrementa el desempeño de los TFT's en comparación a los que tienen monocapas de estos aislantes[44]. De la misma manera, con nanolaminados de $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{TiO}_2$ aplicados como aislante en la compuerta de un MOSFET, tiene las ventajas de alta constante dieléctrica del TiO_2 y las propiedades aislantes del Al_2O_3 [42].

- Protección a la corrosión: Se han estudiado distintos materiales como recubrimiento y protección, como el Al_2O_3 , TiO_2 y Ta_2O_5 . Se ha mostrado que Al_2O_3 como recubrimiento en acero inoxidable disminuye la densidad de corriente de corrosión en cuatro ordenes de magnitud, además gracias a que puede ser amorfo no tiene límites de grano defectuoso y tiene excelentes propiedades de sellado, la desventaja es su solubilidad a medios ácidos y básicos. El Ta_2O_5 posee la propiedad de que es intrínsecamente estable en medios químicos desafiantes. Al utilizar nanolaminados de $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Ta}_2\text{O}_5$ como recubrimiento protector en acero inoxidable combina las dos propiedades de estos materiales, haciendo más resistente a la corrosión el acero inoxidable. Las propiedades de resistencia a la corrosión de los nanolaminados están en un punto medio entre las monocapas de Ta_2O_5 y Al_2O_3 [45].
- Celdas Solares: El Al_2O_3 tiene el funcionamiento como capa de pasivación superficial sobre silicio, al depositar nanolaminados en conjunto con TiO_2 se compensan el uno con el otro. El Al_2O_3 tiene baja conductividad y buena capacidad como pasivador superficial, mientras que el TiO_2 posee una mejor conductividad, pero un peor comportamiento como pasivador. Al depositar los nanolaminados de $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{TiO}_2$, estos presentaron un buen desempeño en cuanto a la pasivación y mayor conductividad que el Al_2O_3 [46]. Lo que lo hace un buen prospecto como recubrimiento en CS.

2.5 Celdas solares

Una CS es un dispositivo electrónico hecho a partir de la unión de dos semiconductores, uno tipo p (portadores mayoritarios con cargas positivas o huecos) y otro tipo n (portadores mayoritarios con cargas negativas o electrones) en donde la incidencia de un fotón con energía mayor al ancho de banda prohibida del semiconductor tipo n hace que se libere un electrón dado que el fotón le brinda al electrón la energía necesaria para pasar de la banda de valencia a la banda de conducción y así mismo, el electrón deja un espacio que es ocupado por un hueco, generando un par electrón-hueco, por tanto, creando una corriente generada por la incidencia de luz (fotocorriente), este fenómeno es llamado efecto fotovoltaico, y es el principio básico de toda CS [47]. En la figura 2.6 se observa el funcionamiento de una celda solar de silicio, en donde se muestra el par electrón-hueco generado y la dirección del flujo de portadores.

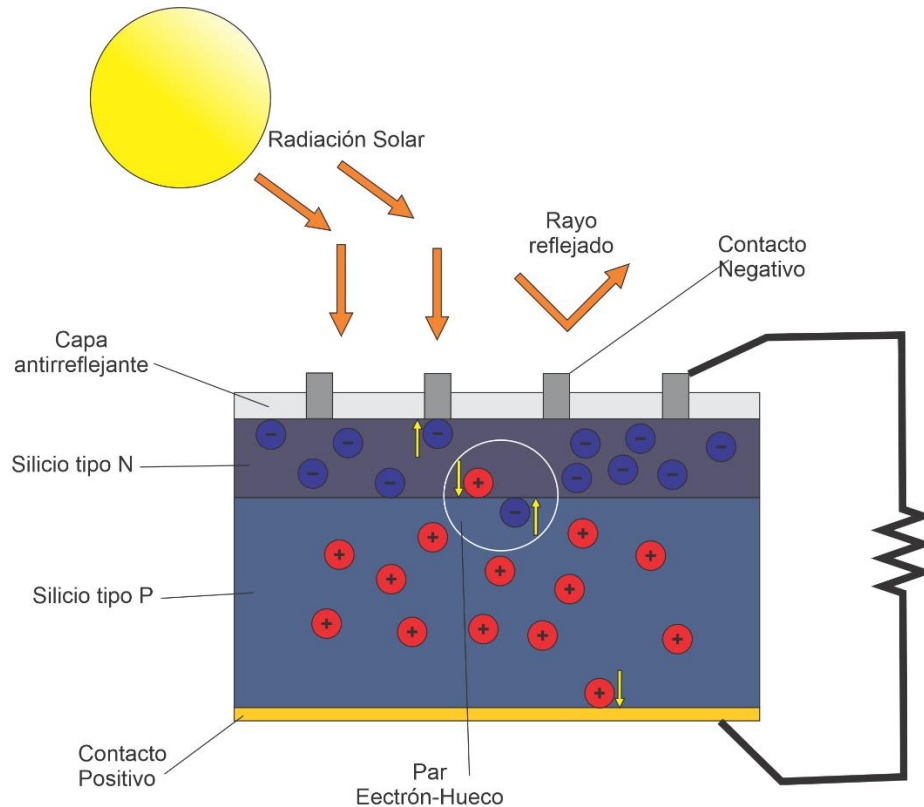


Fig. 2.6 Funcionamiento de una CS

2.5.1 Recubrimientos de conversión descendente en celdas solares

Los recubrimientos de conversión descendente o capas luminiscentes de conversión descendente (capas LDS) son capas de materiales luminiscentes que se depositan sobre una celda solar, con el fin de incrementar la eficiencia aprovechando el efecto de conversión descendente (down-shifting)[48].

El efecto de conversión descendente consiste en que un material absorba fotones de alta energía (o λ -corta) promoviendo un electrón a un estado de excitación secundario, lo cual, al decaer genera dos fotones de menor energía [48], [49].

La función específica de las capas LDS en las celdas solares, principalmente es para incrementar el rango de aceptación de las CS, específicamente las longitudes de onda cortas, las cuales absorberían λ cortas y reemitirían fotones de λ más larga hacia la celda, incrementando la eficiencia. En sí, las capas LDS son un componente pasivo que no interfieren con la capa activa de la CS. En la figura 2.7 se muestra un esquema del

funcionamiento de una película luminiscente sobre una celda solar, en el cual se observan los diferentes casos cuando la luz interactúa con la película LDS.

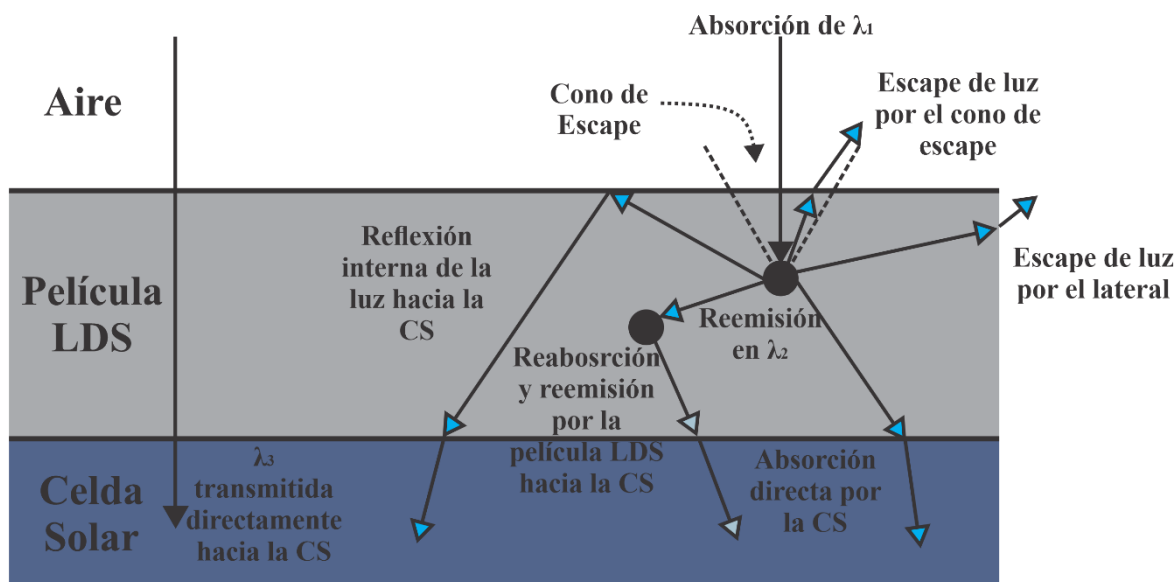


Fig. 2.7 Diagrama del funcionamiento de una película LDS sobre una CS

Los materiales utilizados para capas LDS idealmente deberían de tener las siguientes características (aparte de que deben de ser baratos y longevos):

- Eficiencia cuántica luminiscente igual a la unidad ($LQE = 1$)
- Un amplio rango de absorción en la región donde la eficiencia cuántica externa (EQE) de la celda es baja.
- Alto coeficiente de absorción
- Angosto rango de emisión, el cual debe coincidir con el pico de EQE de la CS.
- Una buena separación entre las bandas de emisión y absorción, para no obtener muchas pérdidas por reabsorción.

Se han estudiado una gran cantidad de materiales luminiscentes para su aplicación como capas LDS, los cuales se pueden separar en 3 categorías: Puntos cuánticos (QD's), colorantes orgánicos y iones de tierras raras/complejas. Las características interesantes de los QD's en este ámbito son que sus bandas de emisión y absorción se pueden modificar (dependiendo del tamaño del QD), tienen una amplia banda de absorción, alta intensidad de emisión y una fotoestabilidad relativamente buena [48].

Las SiNP's tienen las ventajas de tener estabilidad química y a la temperatura, y de su bajo costo de producción [50]. Al ser un material luminiscente con la propiedad de conversión descendente, se pueden aprovechar los fotones de altas energías para generar fotones con una energía menor [51]–[53], específicamente, absorber luz en el espectro UV para reemitir en el visible [25]. Con estas características, las SiNP's se pueden implementar como recubrimiento sobre CS.

Utilizar capas de SiNP's es aprovechar el efecto de conversión descendente para permitir que la CS absorba más luz e incrementar el rango de aceptación de luz de la CS, y con ello minimizar pérdidas en el proceso de conversión de energía de la CS, y, por tanto, incrementar la eficiencia [51], [53].

2.5.2 Recubrimientos antirreflejantes en celdas solares

Dado que lo que se busca en las CS es que estas absorban toda la luz posible, se busca reducir la reflexión de algunas maneras. Una de estas maneras es utilizar recubrimientos antirreflejantes, los cuales se utilizan para evitar pérdidas por reflexión de Fresnel cuando la luz pasa de un medio a otro. La pérdida por reflexión de Fresnel cuando hay un cambio en el índice de refracción, lo que ocasiona que una pequeña parte de la luz se desvíe en forma de reflexión.

Un tipo de CAR consiste en una o varias películas delgadas sobre el sustrato. Las películas delgadas reducen la reflexión aprovechando el principio de interferencia destructiva, lo cual ocurre cuando hay distintas películas. Utilizar distintos materiales para los CAR de varias capas es importante, ya que son más eficientes.

El funcionamiento de un CAR se puede comprender mediante una sola película delgada con un índice de refracción n , el cual debe ser menor que el del sustrato n_s ($n < n_s$). En la figura 2.8 se muestra un esquema de un CAR sobre una celda solar, en el cual se observan las distintas trayectorias que toma la luz al interactuar con el CAR .

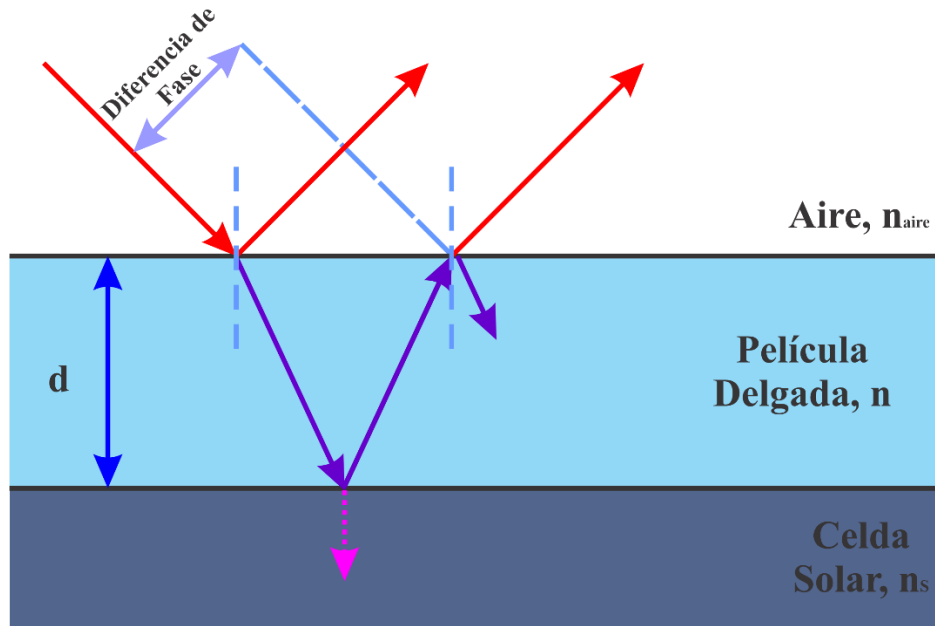


Fig. 2.8 Diagrama de funcionamiento de un CAR sobre una CS

La película delgada tiene dos interfaces (aire-película y película-sustrato), las cuales crean 2 ondas reflejadas. Cuando estos frentes de onda están desfasados, se produce una interferencia destructiva, lo que elimina completamente estos rayos, lo que mejora la transmisión de luz. Los requisitos para que esto suceda son los siguientes:

- Los frentes de onda deben estar desfasados en 180°
- Los rayos reflejados deben tener la misma intensidad después de reflejarse en las dos interfaces.
- El espesor debe tener un valor de un múltiplo de un cuarto de la longitud de onda incidente $\left(\frac{\lambda}{4}\right)$.

La ecuación que representa la reflectividad es la siguiente:

$$R = \left| \frac{(n_0 n_s - n^2)}{n_0 n_s + n^2} \right|^2$$

Los CAR de una sola capa solo son útiles en un rango angosto de longitudes de onda, mientras que, si se utilizan distintas capas, se incrementa rendimiento óptico en un amplio rango de longitudes de onda con baja reflectividad y, aparte amplía el rango de ángulos

incidentes. Algo que se tiene que recalcar, es que el principio es el mismo en monocapa y en multicapa, solo que cambia un poco el modelo matemático. [2]

Como ya se mencionó, el Al_2O_3 es utilizado como CAR dado que tiene buenas propiedades ópticas, tales como la transparencia en el espectro visible y su índice de refracción (~ 1.65), y a parte tiene una buena pasivación superficial [8].

La pasivación superficial ayuda a que no haya recombinación de pares electrón-hueco generados por fotones, dicha recombinación ocasiona perdidas en cuanto a la eficiencia. La recombinación total en la superficie se caracteriza por la velocidad por recombinación superficial efectiva (SRV), y entre menor sea este valor en la superficie mejor, dado que menos portadores se pierden en este proceso de recombinación [54], Wener *et al* lograron obtener una SRV de 2.9 cm/s para el Al_2O_3 sobre CS de silicio [55].

A arte de esta propiedad, también se demostró tener un buen valor de reflectancia de una CS de silicio, llegando hasta un valor de 1%, lo que lo convierte en un buen material para aplicarlo sobre CS e incrementar su eficiencia[8], [37].

2.5.3 Parámetros de las celdas solares y eficiencia

Una CS ideal puede representarse como el siguiente circuito o modelo equivalente, mostrado en la Figura 2.9 [56]. El circuito es constituido por una fotocorriente (I_{ph}), corriente generada por el efecto fotovoltaico, un diodo que genera una corriente $\left(I_s e^{\frac{qV}{kT}}\right)$, que representa a la unión np o pn de la CS, y dos resistencias, una en serie (R_s), que representa los contactos metálicos, y otra en paralelo (R_p), la cual representa la perdida debido a los defectos cristalográficos o debido a la fuga en la superficie a lo largo del borde de la celda [57].

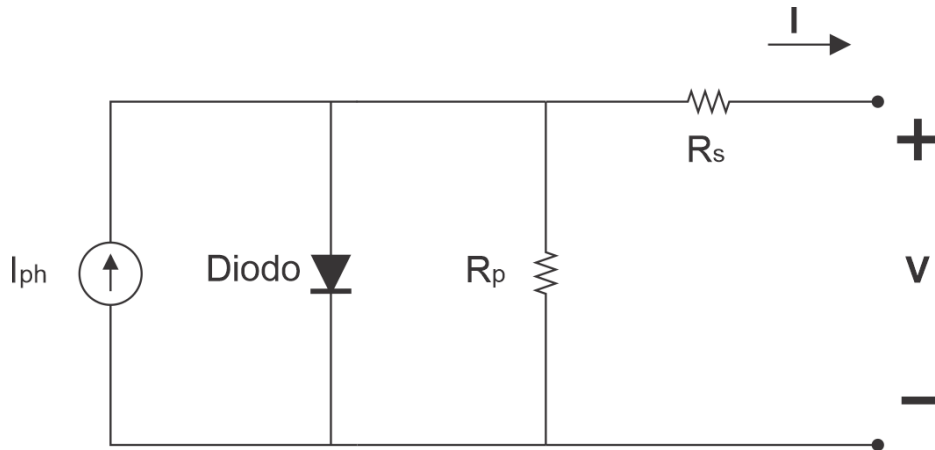


Fig. 2.9 Circuito equivalente de una CS ideal

Se utilizan distintos parámetros para caracterizar la eficiencia de una CS, como el punto de potencia máxima (P_{max}), la eficiencia de conversión de energía (η), y el factor de llenado o *fill factor* (FF). El punto de potencia máxima (P_{max}) se produce en la corriente máxima (I_{max}) y en el voltaje máximo (V_{max}) donde la potencia de salida de la celda es mayor.

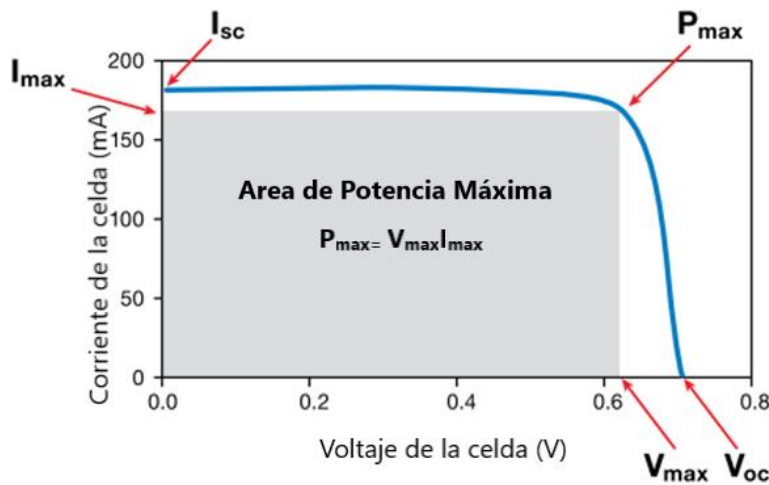


Fig. 2.10 Curvas I-V de una CS

El FF se mide en cuán lejos están las características I-V de la CS actual de una ideal. Por lo tanto, la ecuación del factor de llenado es la siguiente:

$$FF = \frac{I_{max} V_{max}}{I_{sc} V_{oc}}$$

Dónde:

I_{max} = Corriente en la potencia máxima de salida [A]

V_{max} = Voltaje en la potencia máxima de salida [V]

I_{sc} = Corriente de corto circuito [A]

V_{oc} = Voltaje de circuito abierto [V]

Una CS ideal tiene un FF igual a uno (1), pero las no ideales tienen pérdidas por la resistencia de serie y en paralelo, la cual decrece la eficiencia.

Otro parámetro importante es la conversión eficiente de energía (η), que se define como la razón de la potencia máxima de salida respecto a la potencia de entrada:

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}}$$

Dónde:

P_{max} = Potencia máxima de salida [W].

P_{in} = Potencia de entrada de la celda, definida como la energía total incidente en la superficie de las celdas [W]. [57]

La generación de las curvas I-V depende de muchos factores, como, por ejemplo: el espectro de la radiación solar incidente, la orientación de la celda respecto al rayo de luz, la temperatura de la celda, etc. Para realizar la caracterización eléctrica de una celda y que sea comparable debe tener unas condiciones de operación base. El primer set de condiciones de operación es el SRC (Standard Reporting Conditions). La referencia espectral estándar para el SRC es el espectro solar “Air mass 1.5 global (AM 1.5G)” con una irradiancia total de 1000 W/m², dicho espectro corresponde al que se observa típicamente en la superficie terrestre para latitudes medianas. El SRC dicta que el dispositivo debe operar a 25°C.[58]

Capítulo 3

Desarrollo Experimental

Introducción

En este capítulo se presenta el desarrollo experimental de este proyecto. Primeramente, se muestra el método de síntesis y depósito de SiNP's sobre CS comerciales, después se explica el depósito de las películas delgada de alúmina, y por último la implementación del nanoenpasulado de SiNP's en Al_2O_3 como recubrimiento en la superficie de CS comerciales.

3.1 Síntesis de nanopartículas de silicio y depósito sobre CS

La técnica para la síntesis de nanopartículas de silicio fue la de un solo paso a temperatura ambiente, donde se utiliza 3-Aminopropyl triethoxisilano (APTES) como fuente de silicio y ascorbato de sodio (AS) como agente reductor. Los materiales y equipo utilizados son los siguientes:

- (+) L-ascorbato de Sodio (AS)
- (3-Aminopropyl) triethoxisilano (APTES)
- Agua desionizada
- Alcohol etílico
- Vasos de precipitado de 100 mL.
- Viales de 12 mL.
- Prototipo dispensador de nanopartículas.
- Spin Coater LaiZhou Weiyi VTC-50A.
- Agitador magnético.
- Balanza analítica Ohaus Pioneer PA224C

En esta técnica, se mezcla 1 ml de APTES con 4 ml de agua desionizada por 10 minutos utilizando agitación magnética. Lo siguiente es agregarle 1.25 ml de AS a 0.1 M disuelto en

agua y por 20 minutos más se mezcla de la misma manera [7]. En la figura 3.1 se muestra el diagrama seguido para la síntesis de SiNP's.

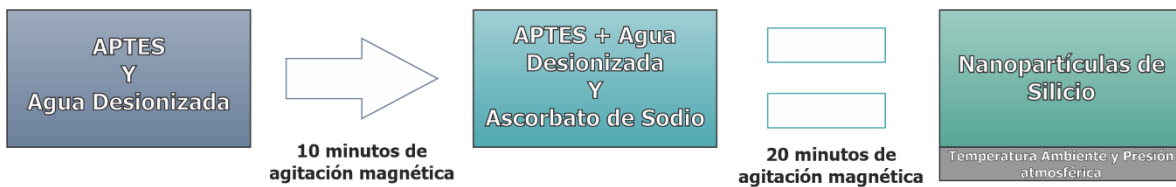


Fig. 3.1 Diagrama del proceso de síntesis de SiNP's

Para el depósito sobre CS se utilizó el método por spincoating, el cual consiste en utilizar una solución sobre un sustrato, el cual se encuentra sujeto sobre un dispositivo giratorio, y la solución se va a distribuir por la superficie dada la rotación del sustrato, creando una capa uniforme sobre el sustrato [59]. Se depositó 1 ml de la solución de SiNP's sobre las CS a una velocidad de 4000 RPM por un tiempo de 60 segundos. En la figura 3.2 se muestra un esquema del proceso utilizado para realizar el depósito mediante spincoating.

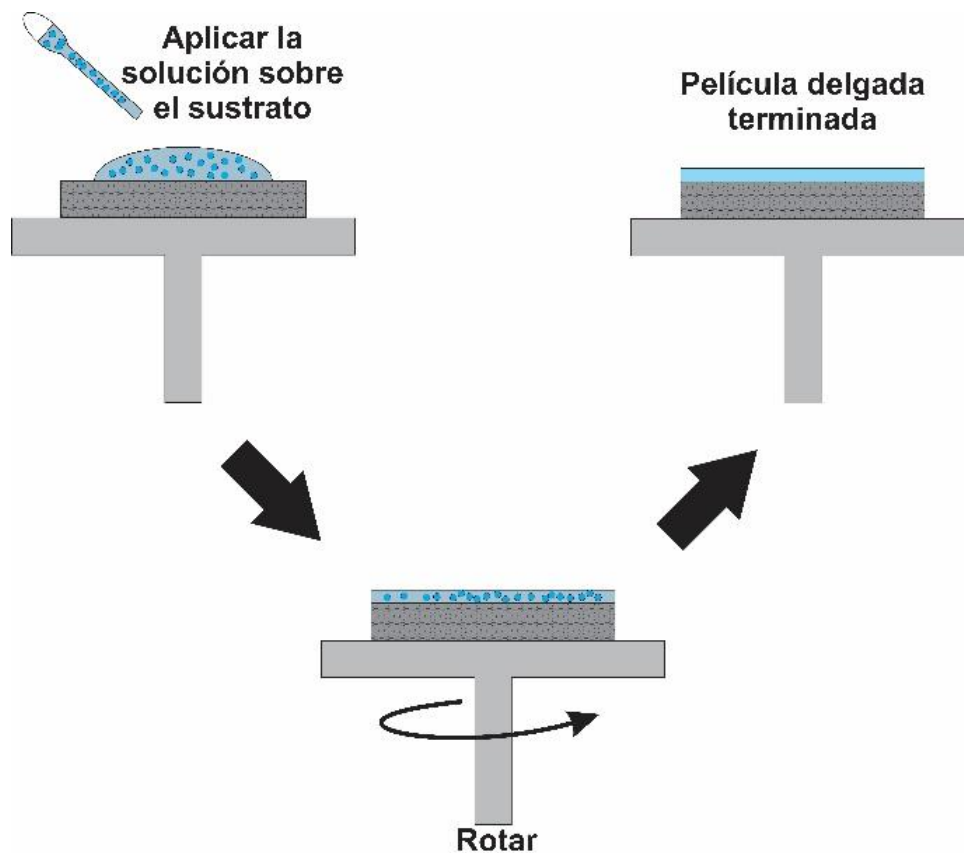


Fig. 3.2 Diagrama esquemático de depósito por Spin-Coating

Las SiNP's se caracterizaron utilizando un equipo Zetasizer Nano ZS marca Malvern, que utiliza la técnica dispersión dinámica de luz (DLS, por sus siglas en inglés) para obtener la distribución de tamaño de las nanopartículas. Se empleó un espectrómetro Thermo Fisher Scientific modelo Evolution 220 UV-Vis para obtener el espectro de absorbancia de las muestras desde los 300 nm a los 700 nm. Para la obtención de la respuesta fotoluminiscente, se utilizó un espectrómetro UV-Vis modelo Avantes, con una fuente de luz laser de 325 nm. Por último, para medir las CS con el recubrimiento se utilizó el analizador de parámetros Keithley 4200A-SCS en conjunto con un simulador solar Oriel LCS-100, el cual tiene una lamara de Xenon de 100W y un filtro AM 1.5G.

3.2 Depósito de Al₂O₃ por depósito por capa atómica (ALD)

Para el depósito se utilizó el sistema ALD que se encuentra en el laboratorio de NanoFAB, en la Universidad de Sonora. Como precursor del aluminio se utilizó un metalorgánico (MO) llamado trimetilaluminio (TMA, Al₂(CH₃)₆) y agua (H₂O) como reactante y fuente de oxígeno, y nitrógeno (N₂) como gas de purga a una temperatura de 180 °C, por último, el depósito se realizó sobre sustrato de silicio tipo p. El equipo y materiales utilizados se enlistan a continuación:

- Trimetilaluminio (TMA)
- Agua desionizada
- Obleas de silicio tipo p [100]
- Nitrógeno (N₂)
- Equipo ALD hecho en casa

El método consiste en la repetición de ciclos en la cámara de reacción entre los gases del precursor y reactante, y el flujo del gas de purga. En la figura 3.3 se observa un esquema de lo que es un ciclo ALD, el cual consiste en:

- Un pulso del gas precursor (en este caso TMA).
- Flujo de nitrógeno para limpiar la cámara.
- Pulso del gas reactante (en este caso agua).
- Flujo de nitrógeno. [37]

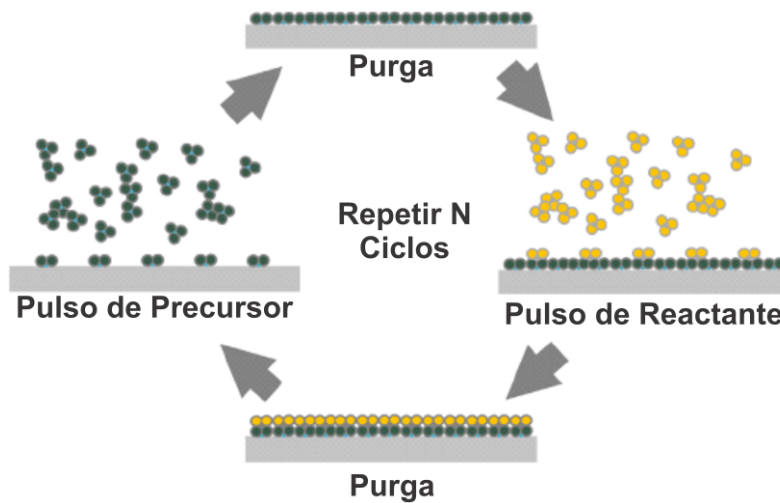


Fig. 3.3 Diagrama de un ciclo ALD

Los parámetros utilizados para el depósito de Al_2O_3 se muestran en la Tabla 1. Con esta variación de parámetros y obteniendo los espesores se obtiene la curva de saturación del sistema ALD térmico. En la figura 5.30 se observa la curva de saturación utilizando reflectancia para estimar el espesor y elipsometría espectroscópica para corroborar.

Parámetro	Valor
Ciclos	100
Temperatura	~180 °C
Tiempo de TMA	20-125 ms
Tiempo de Purga de TMA	15 s
Tiempo de H ₂ O	100 ms
Tiempo de purga de H ₂ O	15 s
Presión de trabajo	1.8 Torr
Flujo de nitrógeno	~101 sccm

Tabla 3.1 Tabla de parámetros de depósito de Al₂O₃ por ALD

Se encontró que 50 ms es un buen tiempo ya que tiene un rango de crecimiento aceptable con respecto al tiempo de disparo. Esto, dado que a tiempos de pulso mayor (75, 100 y 125 ms) el crecimiento de la película es muy poco con respecto al tiempo de disparo, lo que significa pérdida de material. Mientras que 20 ms es un tiempo bastante bajo y también presenta el menor crecimiento, por lo que se optó por utilizar 50 ms, un tiempo intermedio y

sin muchas pérdidas de material. Con esto, se realizaron experimentos variando el número de ciclos para obtener la tasa de crecimiento, la cual se observa en la figura 5.31.

Para obtener la curva de crecimiento y curva de saturación del sistema ALD fue necesario conocer el tamaño de las películas delgadas, para ello se midió la reflectancia utilizando un espectrómetro UV-Vis modelo Avantes y, se obtuvieron los ángulos Ψ y Δ mediante un elipsómetro espectroscópico de ángulo variable (VASE, por sus siglas en inglés) modelo Woollam Co M-2000. Para conocer la composición química se caracterizó con un XPS modelo Perkin-Elmer PHI 5100 el cual utiliza una fuente de Mg K(α). Por último, para saber la respuesta termoluminiscente se utilizó un equipo Risø TL/OSL Reader modelo DA-20 con una fuente de radiación β de 5 Gy por minuto.

3.3 Depósito de nanoencapsulado de SiNP's en Al₂O₃

Se utilizaron los parámetros de depósito de SiNP's mencionados en la sección 3.2, así como también los mismos parámetros para el Al₂O₃ de la sección 3.3, exceptuando por el número de ciclos. Se aplicaron 23 ciclos para la alúmina ya que con estos se obtienen aproximadamente 5 nm de espesor. En la figura 3.4 se observa un esquemático de la estructura que tendrá el nanoencapsulado, cabe de recalcar que es con un fin ilustrativo. Las mediciones eléctricas se realizaron después de cada recubrimiento de Al₂O₃, las cuales se observan en el esquema como M1, M2 y M3. El recubrimiento se deposita sobre celdas solares comerciales para incrementar su eficiencia mediante el fenómeno de corrimiento descendente, en el siguiente capítulo se presentan los principales resultados del proceso de caracterización de los materiales y de los recubrimientos aplicados a incrementar la eficiencia de la CS.

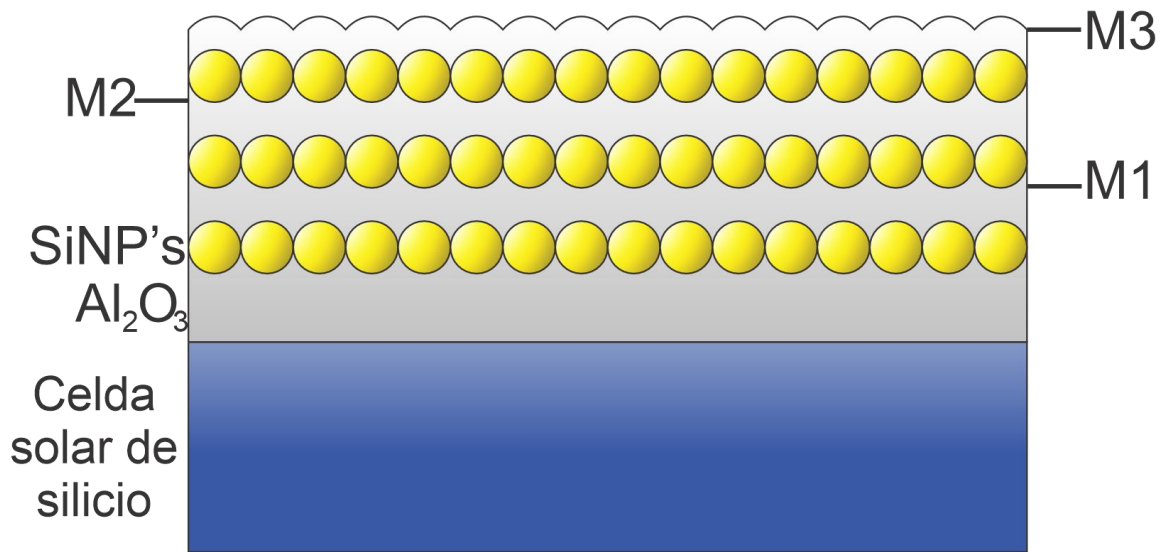


Fig. 3.4 Esquemático de CS con recubrimiento de nanoencapsulado de SiNP's en Al₂O₃

Capítulo 4

Técnicas de Caracterización

Introducción

En este capítulo se explican las técnicas de caracterización de materiales utilizadas en este proyecto. Las cuales corresponden a la caracterización óptica y de tamaño de las SiNP's, y el espesor, composición química y respuesta termoluminiscente del óxido de aluminio. Y, por último, se explica la metodología de la caracterización eléctrica de las CS.

4.1 Dispersión Dinámica de la Luz (DLS)

El método de dispersión dinámica de luz (DLS), es utilizado para medir el tamaño de partículas en rangos debajo de las micras utilizando su movimiento Browniano en un medio acuoso. En esta técnica, un láser pasa a través de las nanopartículas y la luz que se dispersa es detectada por un fotomultiplicador, el cual transforma las variaciones de intensidad de luz en variaciones de voltaje evaluando la señal con una función de correlación.

La intensidad de luz que se dispersa es convertida a un coeficiente de difusión (D) por el fotodetector, y, utilizando la ecuación de Stokes-Einstein podemos transformar el coeficiente de difusión a términos del diámetro hidrodinámico, que será un aproximado al tamaño de las nanopartículas:

$$D = \frac{kT}{3\pi\eta d}$$

Donde, k es la constante de Boltzmann, T es la temperatura absoluta, η es la viscosidad del medio utilizado para la dispersión de las NPs y d es el diámetro hidrodinámico de la partícula [60]. En la figura 4.1 se muestra un esquemático del procedimiento de caracterización por DLS, en donde a) es un esquema de la instrumentación para DLS, configurado para detectar la luz dispersada de la muestra, b) muestra la réplica de la distribución del tamaño de partícula promediadas en el tiempo para una proteína, en c) se

observa un pico para $t > 8$ segundos debido a la aparición de un agregado, d) que puede degradar la función de correlación medida ($g_2 - 1$) y en e) se observa la distribución de tamaño de la muestra [61].

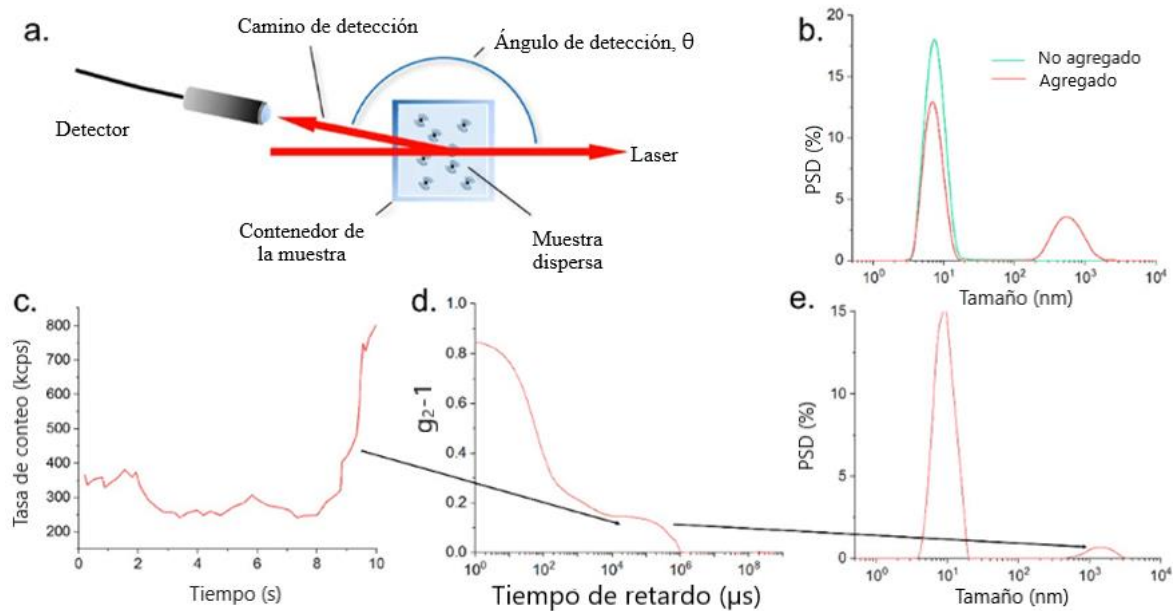


Fig. 4.1 Procedimiento y funcionamiento de la caracterización por DLS

4.2 Espectroscopía Ultravioleta-Visible (UV-VIS)

El espectro electromagnético se divide en múltiples regiones, en donde la región visible y la región ultravioleta solo constituyen una sección muy pequeña de todo el espectro electromagnético. Estos rangos del espectro son los más usados para mediciones espectroscópicas, dado que pueden dar información relevante en cuanto a estructura cuando se analizan moléculas, así como, corresponden a las transiciones electrónicas moleculares. En la figura 4.2 se muestra el espectro electromagnético, que va desde los rayos gamma (< 0.1 nm) hasta las ondas de radio (10^9 nm), así mismo entre menor la longitud de onda, mayor es la energía que presenta el fotón correspondiente.

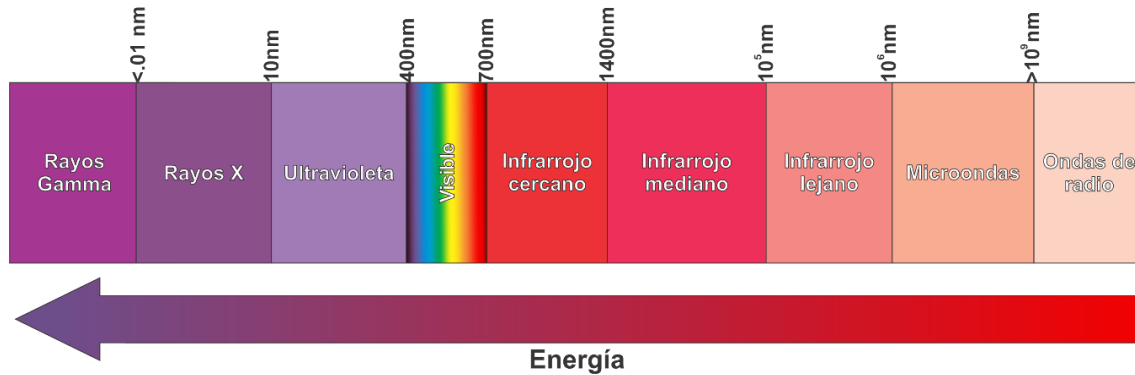


Fig. 4.2 Espectro electromagnético

La absorción de fotones por “especies” es dada por la ley de Beer-Lambert:

$$-\log(T) = A = \epsilon lc$$

donde T es la transmitancia de la luz a través de la muestra, A es la absorbancia, ϵ es el coeficiente de absorción molar, l es la distancia de interacción, y c es la concentración molar. Una manera simple de medir la absorbancia es usando T , la cual se puede medir mediante:

$$T = \frac{I}{I_0}$$

donde I e I_0 son las intensidades de la luz incidente y transmitida, respectivamente.

En cuanto al procedimiento de la espectroscopía, un haz luminoso pasa a través de un monocromador, la luz monocromática se divide en dos, una de las dos luces pasa a través de una celda de absorción “blanca” (para medir I), y, la otra a través de la muestra (para medir I_0). Un detector registra las intensidades de las señales, y el cociente de estas es directamente la medición de la transmitancia [62]. En la figura 4.3 se observa el esquema de medición de un espectrómetro UV-Vis, el cual se compone de una fuente de luz, un monocromador para realizar el barrido de longitudes de onda, la muestra y el detector al final.

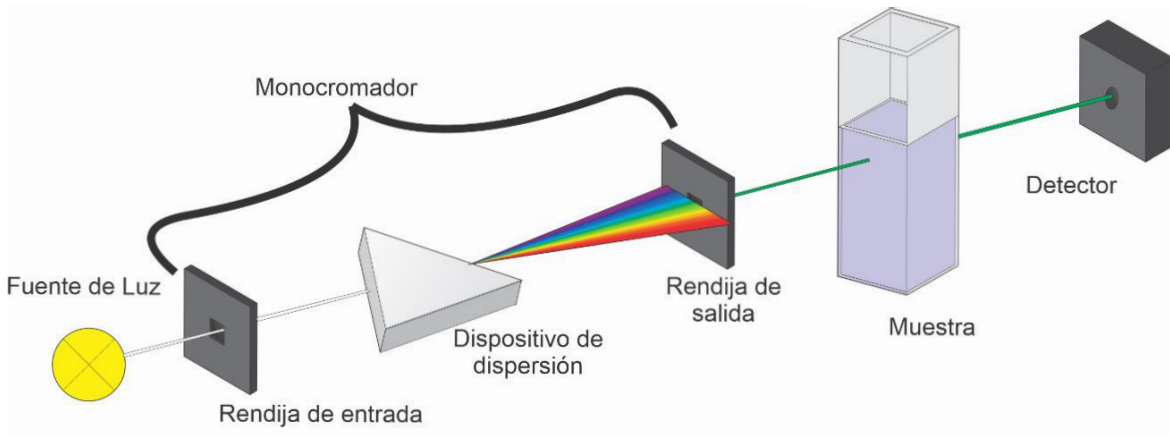


Fig. 4.3 Esquema de un espectrómetro UV-Vis

4.3 Fotoluminiscencia (FL)

La fotoluminiscencia es una técnica óptica no destructiva que se utiliza para conocer algunos tipos de impurezas en los semiconductores. Particularmente, es utilizada para detectar impurezas de nivel superficial, pero también se puede utilizar para cierto tipo de impurezas de nivel profundo, dado a que su recombinación es radiativa. La FL nos puede decir la información de muchos tipos de impurezas en las muestras de manera simultánea, pero dichas impurezas deben producir recombinación radiativa para poder ser detectada. La fotoluminiscencia emitida de la muestra se analiza mediante el monocromador y se detecta por el fotodetector [63], [64]. En la figura 4.4 se observa el esquema de un equipo de medición de fotoluminiscencia, que consta de una fuente de luz, 2 monocromadores (antes y después de la muestra) y el detector al final.

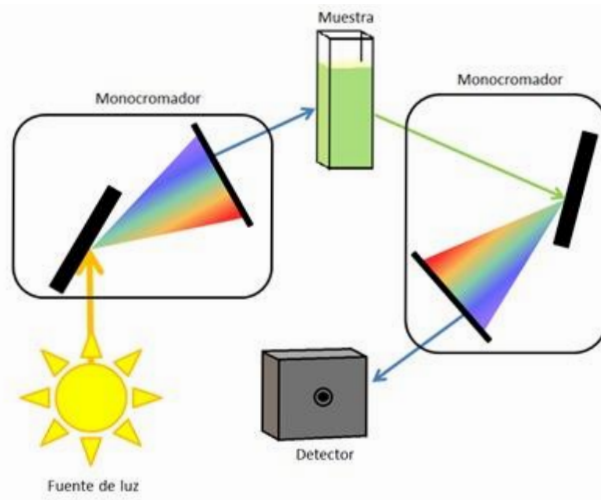


Fig. 4.4 Esquema de un espectrofotómetro de fotoluminiscencia

4.4 Espectroscopía de fotoelectrones de rayos X (XPS)

Este método es principalmente utilizado para identificar elementos químicos en la superficie de una muestra, permitiendo identificar todos los elementos exceptuando el hidrógeno y el helio. En XPS los fotones que interactúan con los electrones de los niveles nucleares son los rayos X. Los electrones pueden ser emitidos por cualquier orbital con fotoemisión, dado que la energía de los rayos X excede la energía de enlace [63].

El análisis por XPS se logra mediante la irradiación de una muestra con rayos X monoenergéticos suaves y analizando la energía de los electrones detectados. Usualmente se utilizan rayos X de Mg K α (1253.6 eV) o Al K α (1486.6 eV). Estos fotones tienen un poder de penetración limitado en un sólido, del orden de 1-10 micrómetros. Estos interactúan con los átomos en la superficie de la muestra, causando que los electrones puedan ser emitidos dado el efecto fotoeléctrico. Los electrones emitidos se miden mediante su energía cinética, que es dada por:

$$KE = h\nu - BE - \phi_s$$

Donde $h\nu$ es la energía del fotón, BE es la energía de enlace del orbital atómico del cual se origina el electrón, y ϕ_s es la función de trabajo del espectrómetro.

La energía de enlace se da como la diferencia entre el estado inicial y final del fotoelectrón al dejar el átomo. Dado que existe una variedad de posibles estados finales de los iones por cada tipo de átomo, existe una correspondiente variación de la energía cinética de los electrones emitidos, además de existir una probabilidad o sección transversal para cada estado final. Entonces, dado que cada elemento tiene sus propias energías de enlace correspondientes, mediante XPS se puede determinar los elementos que se encuentran en la superficie de la muestra [65].

4.5 Elipsometría Espectroscópica

La elipsometría espectroscópica es una técnica de caracterización óptica no destructiva, no invasiva y sin contacto, la cual se basa en el cambio de la polarización de la luz la cual se refleja de una muestra con una película delgada. Se utiliza para determinar el espesor de la película delgada, la interfaz, espesores de rugosidad superficial, propiedades ópticas, entre otras cosas [65]

La elipsometría espectroscópica se encarga de medir los ángulos elipsométricos Ψ y Δ , los cuales están relacionados con la luz polarizada reflejada por la muestra y con los coeficientes complejos de Fresnell, estos parámetros se definen como $\rho \equiv \tan(\Psi) e^{i\Delta}$, también se puede expresar de la siguiente manera:

$$\tan(\Psi) e^{i\Delta} = \rho(N_0, N_1, N_2, d, \theta_0)$$

Donde:

- N es el índice de refracción complejo, N_0 para el aire, N_1 para una película delgada y N_2 para el sustrato.
- d es el espesor de la película delgada
- θ_0 es el ángulo de incidencia de la luz [63], [66], [67]

En la figura 4.5 se observa un esquema del principio de medición de elipsometría. E_{ip} y E_{is} es el campo eléctrico incidente con polarización p y s respectivamente, E_{rp} y E_{rs} es el campo eléctrico reflejado con polarización p y s, respectivamente.

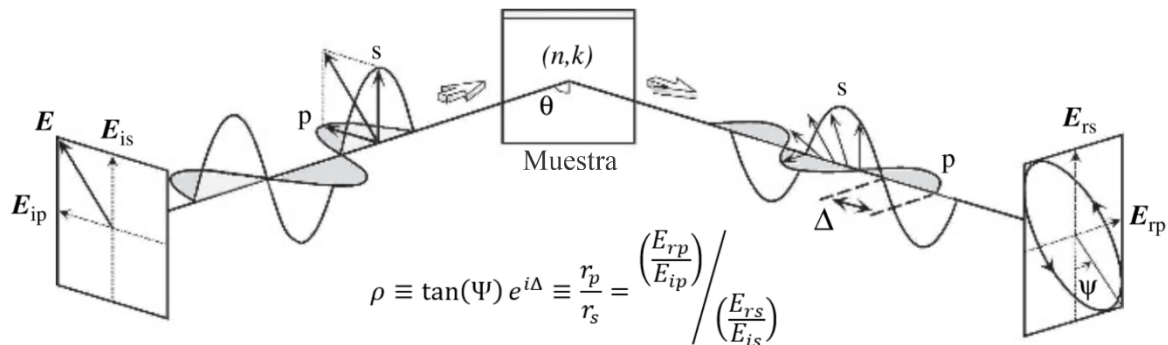


Fig. 4.5 Esquema del principio de medición en un elipsómetro

Sustituyendo, se obtienen las siguientes ecuaciones para Ψ y Δ :

$$\Psi = \tan^{-1}|\rho|; \Delta = \Delta_p - \Delta_s$$

Donde:

- r_p y r_s son los coeficientes de reflexión de Fresnell.

- $\rho = \frac{r_p}{r_s}$, que es la relación entre los coeficientes de reflexión de las polarizaciones p y s.
- $\Delta_p - \Delta_s$ es la diferencia de fase entre las direcciones p y s respecto al plano de reflexión.

En el análisis de elipsometría espectroscópica, el espesor de películas delgadas y multicapas se determina mediante el efecto de interferencia. En la figura 4.6 se muestra un esquema óptico para una película delgada sobre un sustrato. Cuando la absorción de la luz dentro de la película delgada es deficiente, la onda incidente se refleja en la superficie de la película y en el interfaz de la película delgada y el sustrato. Esto ocasiona que el haz de luz de la superficie y el de la interfaz se superpongan, lo que ocasiona la interferencia óptica. Utilizando la ley de Snell y matemática, se obtiene la variación de fase:

$$\beta = \frac{2\pi d}{\lambda} N_1 \cos \theta_1 = \frac{2\pi d}{\lambda} (N_1^2 - N_0^2 \sin^2 \theta_0)$$

Utilizando las ecuaciones de Fresnell para ondas con polarización p y s, se obtienen los coeficientes de reflexión (r_{012}) y transmisión (t_{012}) para su respectivo tipo de polarización (p y s).

$$r_{012} = \frac{r_{01} + r_{12}e^{-i\beta^2}}{1 + r_{01}r_{12}e^{-i\beta^2}}; \quad t_{012} = \frac{t_{01}t_{12}e^{-i\beta^2}}{1 + r_{01}r_{12}e^{-i\beta^2}}$$

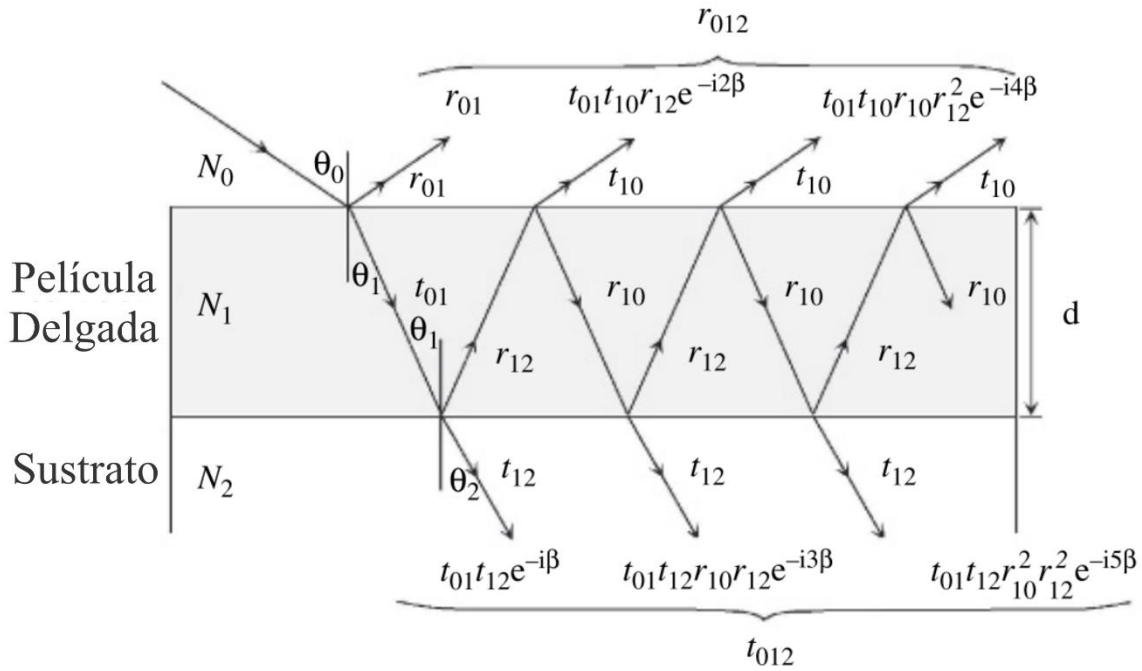


Fig. 4.6 Esquema óptico de 3 medios, aire/película delgada/sustrato.

En un medio transparente, N_1 no tiene una parte imaginaria, solo real, por lo tanto $N_1 = n_1$. Cuando $\frac{2dn_1 \cos \theta_1}{\lambda} = 1$, teniendo en cuenta que $2\beta = 2\pi$. Bajo estas condiciones, $e^{-i2\beta} = 1$, lo que significa que el cambio de fase del haz secundario se convierte en una sola longitud de onda, obteniendo:

$$d = \frac{\lambda}{2n_1 \cos \theta_1}$$

Cuando la interferencia óptica es en un medio transparente, los rangos de los parámetros obtenidos son de $0^\circ \leq \Psi \leq 90^\circ$ y $0^\circ \leq \Delta \leq 360^\circ$ (o $-180^\circ \leq \Delta \leq 180^\circ$). Cuando hay un decaimiento en el valor Ψ , quiere decir que en esa longitud de onda $2\beta = 2\pi$ y, al contrario, cuando llega a un máximo es cuando $2\beta = \pi$. Así mismo, para estas longitudes de onda Δ siempre tiene un valor de 0° . Estos puntos ocurren cada cierto valor de λ , con esto, se obtiene la siguiente ecuación:

$$m = \frac{2dn_1 \cos \theta_1}{\lambda}, m = 1, 2, 3 \dots$$

Siendo m un número entero el cual corresponde a los decrementos en Ψ y a $\Delta = 0$. Utilizando esta ecuación se puede obtener el espesor de una película delgada transparente [67]

4.6 Termoluminiscencia (TL)

La termoluminiscencia es un fenómeno luminiscente que se observa cuando un semiconductor o un aislante se estimula térmicamente. Para que ocurra de manera correcta este fenómeno, se necesita que el material sea un aislante o semiconductor, ya que los metales no tienen propiedades luminiscentes. Además, el material necesita ser expuesto a radiación ionizante, la energía de esta radiación se absorberá por el material, y, por último, se expone a temperatura generando la emisión de luz[68].

TL o luminiscencia térmicamente estimulada (TSL, en sus siglas en inglés) y luminiscencia ópticamente estimulada (OSL, por sus siglas en inglés) son ampliamente utilizadas para mediciones de dosis de radiación ionizante (rayos X, rayos γ y partículas β). La señal de TL tiene distintos picos a diferentes temperaturas, las cuales se relacionan con las trampas de electrones en la muestra. Los defectos en la red cristalina son los que crean estas trampas. Cuando un electrón es atrapado por estas trampas, eventualmente este será liberado mediante las vibraciones térmicas en la estructura de la red. A medida que la temperatura aumenta, las vibraciones se vuelven cada vez más fuertes, incrementando la probabilidad de liberarse. A parte, algunos electrones dan lugar a recombinaciones con huecos atrapados, lo que genera la emisión de luz[69].

4.7 Caracterización eléctrica de las celdas solares

Para proveer una iluminación con una potencia no variable se utiliza un simulador solar Oriel LCS-100 que genera una pequeña área de iluminación a un Sol de potencia ($100\text{mW}/\text{cm}^2$). Utiliza una lámpara de Xenon de 100W y un filtro AM 1.5G, este último es lo que hace que se genere un Sol de potencia de salida. El área de iluminación es de 1.5x1.5 pulgadas, por lo tanto, las celdas deben ser de menor o igual tamaño que esta área mencionada, para poder aprovechar bien el simulador solar. La distancia óptima de trabajo es a 7 pulgadas, ya que a esta distancia es cuando se obtiene un sol de potencia, conforme disminuye o incrementa esta distancia, la potencia también cambia.

Combinando el simulador solar con un analizador de parámetros Keithley 4200A-SCS, se generarán las curvas I-V para obtener el FF y los valores antes mencionados. En la figura 4.7 se muestra el esquemático para la obtención de las curvas IV en el analizador de parámetros utilizando 4 cables de conexión, lo cual ayuda bastante a la precisión de la medición. Las terminales Force y Sense de SMU1 se conectan a un lado de la CS, mientras que del otro lado el Sence y Force de GNDU (o SMU2). El voltaje se genera entre Force HI y Force LO, y la caída de voltaje en la CS se mide a través de Sense HI y Sense LO [57].

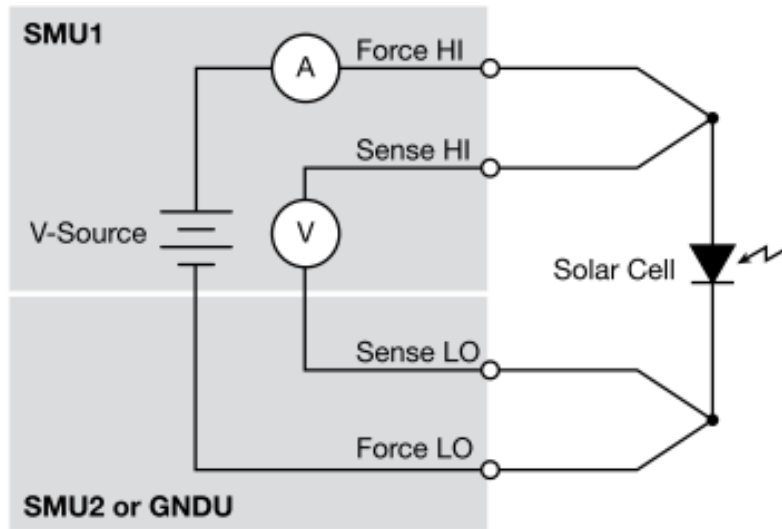


Fig. 4.7 Esquema de medición de curvas IV de CS

Capítulo 5

Análisis y Discusión de Resultados

Introducción

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos de la medición del tamaño las SiNP's, el espectro de absorbancia, la respuesta fotoluminiscente y el ancho de banda prohibida, así como las curvas I-V y P-V de CS con recubrimiento de SiNP's. Además, se muestran los resultados de las películas delgadas de Al_2O_3 , se exhiben los espesores obtenidos utilizando datos de reflectancia y elipsometría espectroscópica, la composición química y la respuesta termoluminiscente. Finalmente, se muestran las características eléctricas de CS comerciales con el recubrimiento de nanoencapsulado de SiNP's en Al_2O_3 , resaltando el incremento en la eficiencia obtenida.

5.1 Nanopartículas de Silicio

5.1.1 Distribución de tamaño de nanopartículas de silicio

A continuación, se muestran gráficas del tamaño con respecto al porcentaje de volumen de las nanopartículas, las cuales se sintetizaron utilizando los mismos parámetros, buscando obtener SiNP's similares entre sí. En las figuras 5.1, 5.2, 5.3 y 5.4, se observan las distribuciones de tamaño de las SiNP's.

En la figura 5.1 se muestra la distribución del tamaño de nanopartículas de la muestra M1, con una distribución de diámetro entre 1.74 y 6.5 nm, con un pico máximo en 3.62 nm.

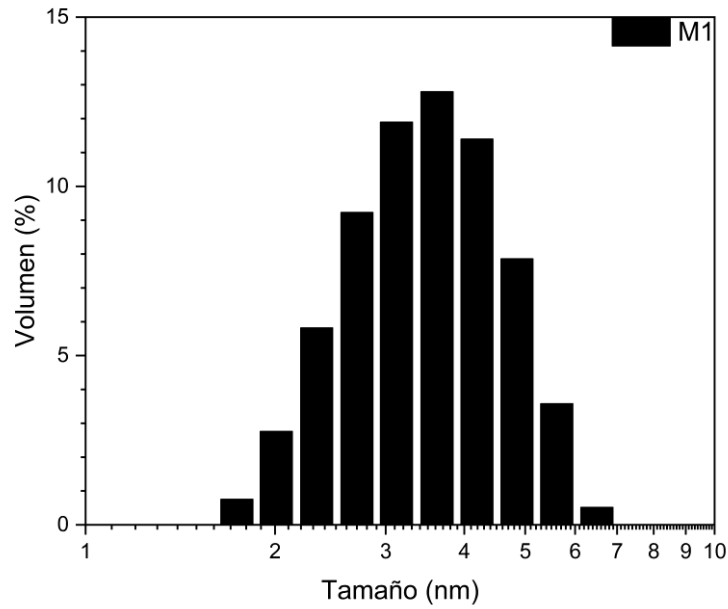


Fig. 5.1 Distribución de tamaños de M1

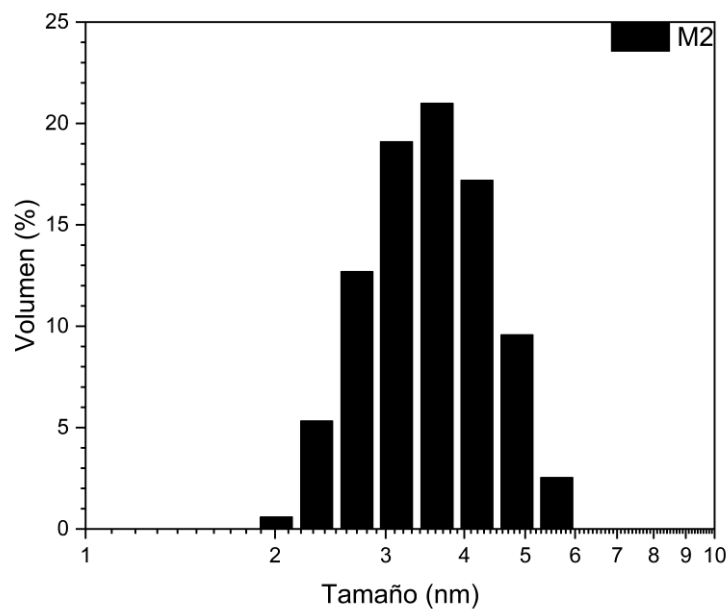


Fig. 5.2 Distribución de tamaños de M2

En la figura 5.2 se observa la distribución de tamaño de la muestra M2, obteniendo diámetros de 2 nm hasta 5.61 nm, con un pico máximo en 3.62 nm.

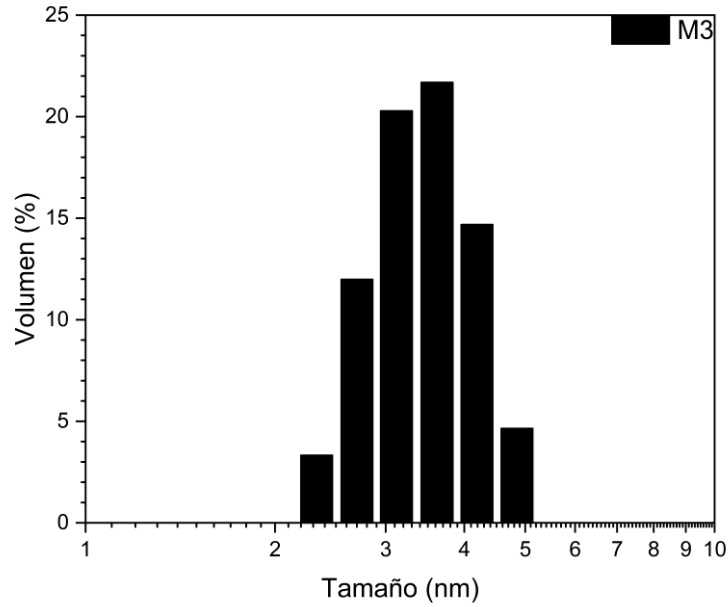


Fig. 5.3 Distribución de tamaños de M3

En la figura 5.3 se muestra la distribución de tamaños de M3, donde se observa un pico máximo 3.62 nm y una distribución de 2.33 a 4.85 nm.

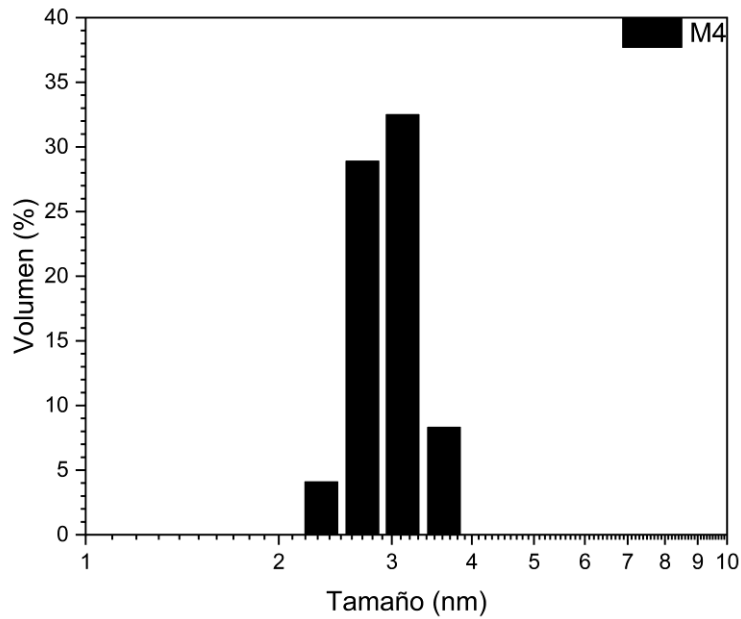


Fig. 5.4 Distribución de tamaños de M4

En la figura 5.3 se muestra la distribución de tamaños de M4, donde se encontraron diámetros de 2.33 a 3.62 nm y un pico máximo en 3.12 nm.

En la tabla 5.1 se muestra el resumen de las gráficas 5.1-5.4. Donde se observa el promedio de los diámetros obtenidos con su respectiva desviación estándar, destacando que tienen valores promedio similares entre sí.

Muestra	Promedio	Desviación Estándar
M1	3.493 nm	0.91 nm
M2	3.59 nm	0.80 nm
M3	3.469 nm	0.6344 nm
M4	2.966 nm	0.3307 nm

Tabla 5.1 Tamaño promedio y desviación estándar de SiNP's

5.1.2 Espectroscopía UV-Visible

Las caracterizaciones corresponden a las muestras de SiNP's M1, M2, M3 y M4 que corresponden a las figuras 5.5, 5.6, 5.7 y 5.8.

En la figura 5.5 se observa el espectro de absorbancia de la muestra de SiNP's denominada M1, el rango de las longitudes de onda va de 300 a 700 nm. Se obtuvo que cerca de los 500 nm las nanopartículas empiezan a absorber.

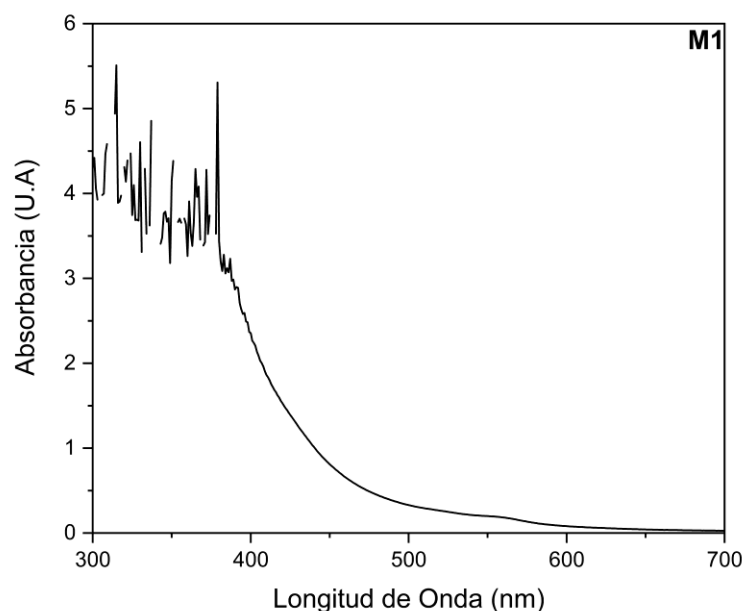


Fig. 5.5 Espectro de absorción de M1

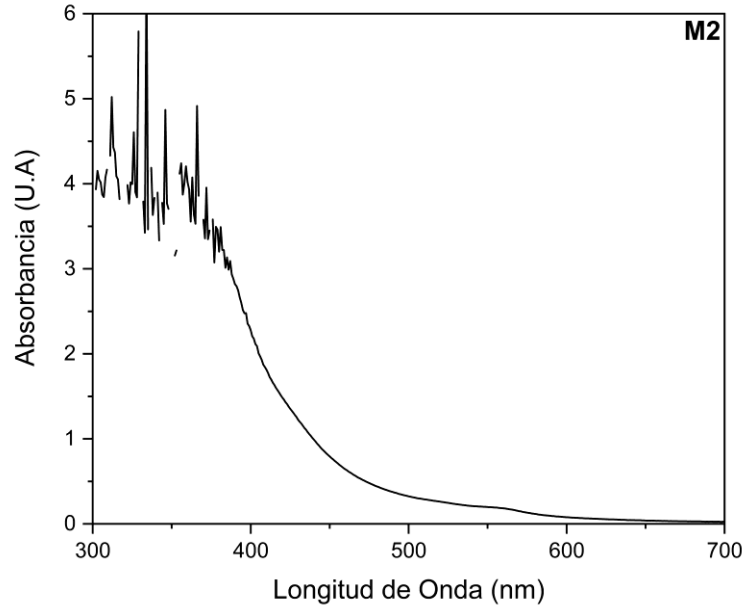


Fig. 5.6 Espectro de absorbancia de M2

En la figura 5.6 se muestra el rango de absorbancia de M2, el cual va 300 a 700 nm y se observa que en longitudes de onda menores a 500 nm es cuando las nanopartículas absorben la luz.

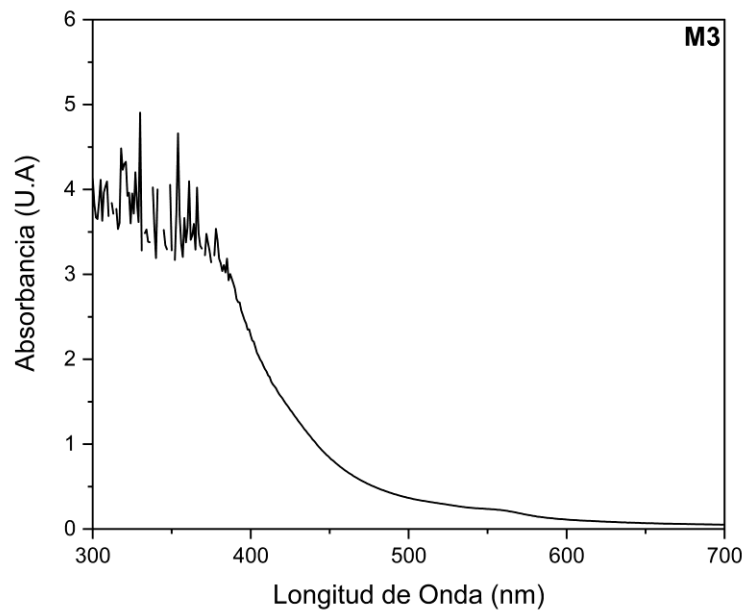


Fig. 5.7 Espectro de absorbancia de M3

En la figura 5.7 se observa el espectro de absorbancia de M3 desde 300 a 700 nm, en el cual se obtiene que cerca de los 500 nm el material empieza a absorber.

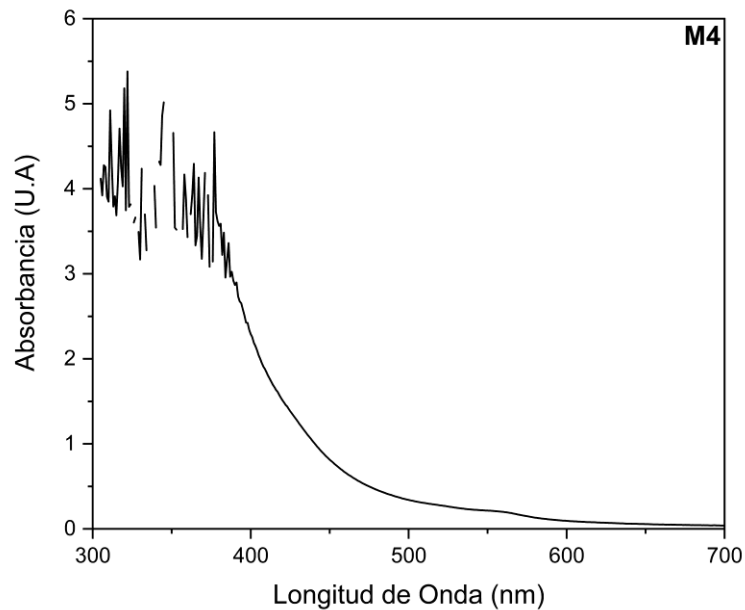


Fig. 5.8 Espectro de absorbancia de M4

En la figura 5.8 se muestra el espectro de absorción de M4. Se observa la muestra empieza a absorber cercano a los 500 nm, el rango del espectro es de los 300 a 500 nm.

En las gráficas 5.5-5.8 se observa que las SiNP's empiezan a absorber a los 500 nm, en longitudes de onda menores es cuando la absorbancia incrementa. Lo que nos indican estos resultados es que las SiNP's van a dejar pasar el espectro visible en su mayoría y, aplicado a un recubrimiento, esta luz llegaría a la CS. Mientras que las SiNP's absorben longitudes de onda menores a 500 nm, lo que implica que estos fotones interactúan de alguna manera con las nanopartículas. Cabe de mencionar que en algunos puntos de los espectros obtenido existen discontinuidades, esto se debe al equipo de medición.

5.1.3 Estimación del ancho de banda prohibida utilizando el método de Tauc

Utilizando el método de Tauc en conjunto con los datos de la absorbancia de las SiNP's podemos estimar su ancho de banda prohibida, el método consiste en la utilización de la siguiente ecuación:

$$(\alpha h\nu)^{\frac{1}{n}} = A(h\nu - E_g)$$

Donde:

- h es la constante de Planck.
- ν es la frecuencia del fotón.
- α es el coeficiente de absorción, proporcional a los datos de absorbancia obtenidos.
- E_g es el ancho de banda prohibida.
- A es una constante

La estimación para E_g se realiza graficando $(\alpha h\nu)^{\frac{1}{n}}$ vs $h\nu$ y aplicando un ajuste lineal a la gráfica obtenida. El valor del exponente n se determina por la naturaleza de las transiciones electrónicas. $1/2$ para transiciones directas, $3/2$ para directas prohibidas, 2 para indirectas y 3 para indirectas prohibidas [70]. El ancho de banda prohibida estimado para las muestras se observan en la Tabla 5.2 y sus respectivas gráficas en las figuras 5.9, 5.10, 5.11 y 5.12.

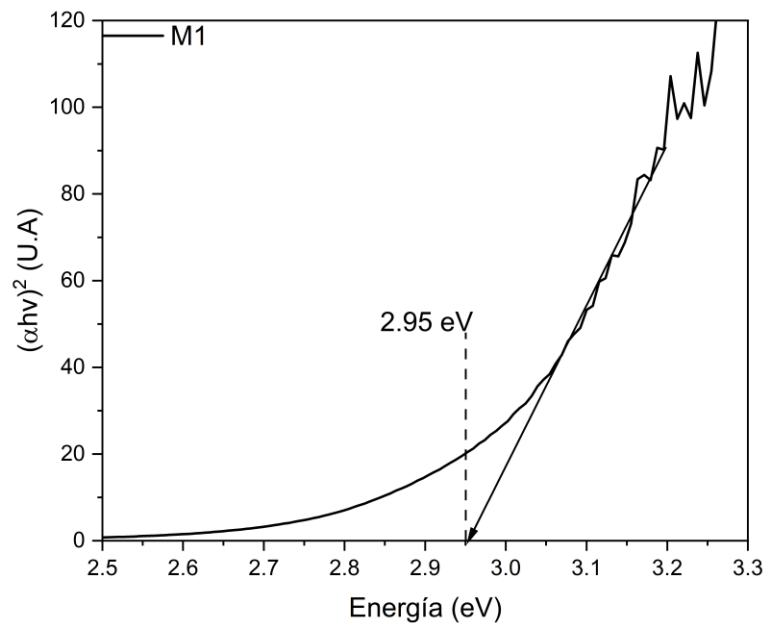


Fig. 5.9 Estimación del Ancho de Banda Prohibida de M1

En la figura 5.9 se observa la gráfica obtenida mediante el método de Tauc para la muestra de SiNP's denominada M1, obteniendo un ancho de banda prohibida de 2.95 eV.

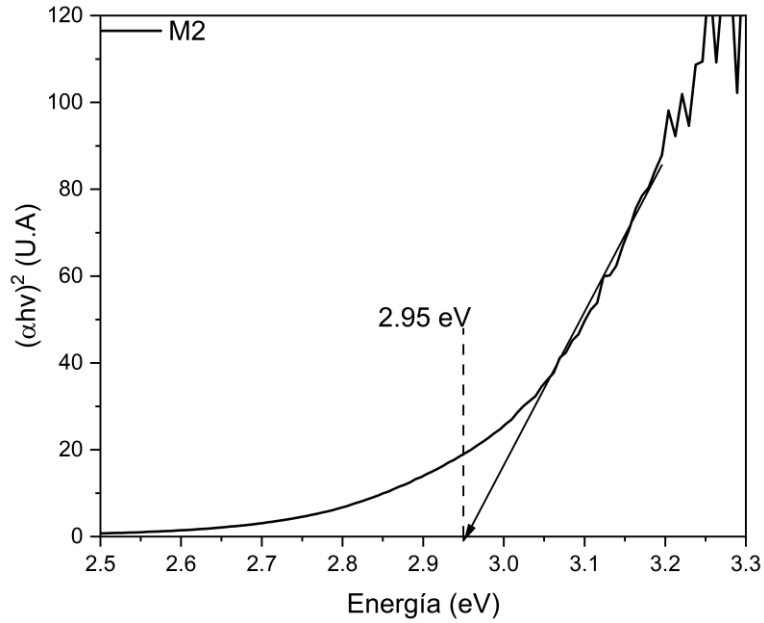


Fig. 5.10 Estimación del Ancho de Banda Prohibida de M2

En la figura 5.10 se muestra la gráfica de la estimación de ancho de banda prohibida de M2, en donde se obtuvo el valor de 2.95 eV.

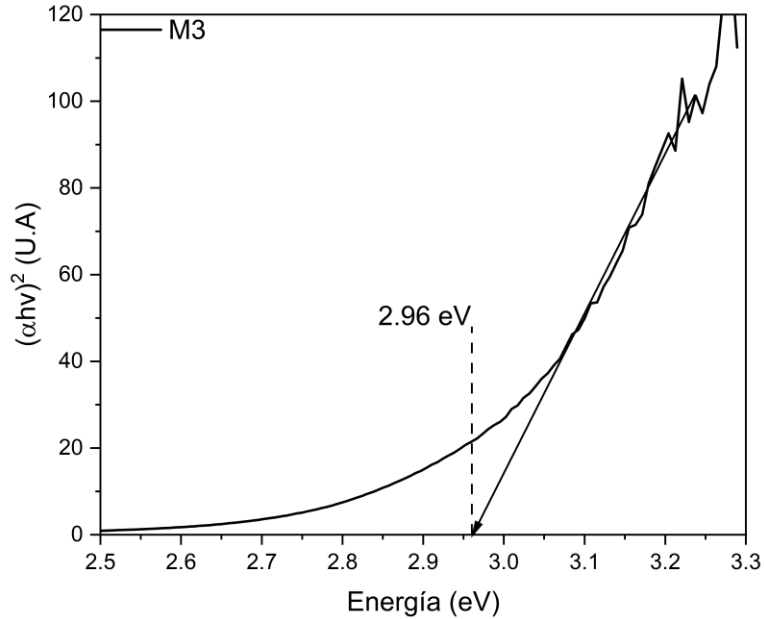


Fig. 5.11 Estimación del Ancho de Banda Prohibida de M3

En la figura 5.11 se observa la gráfica obtenida de M3 utilizando el método de Tauc, en donde se obtiene que el valor del ancho de banda prohibida de las SiNP's es de 2.96eV.

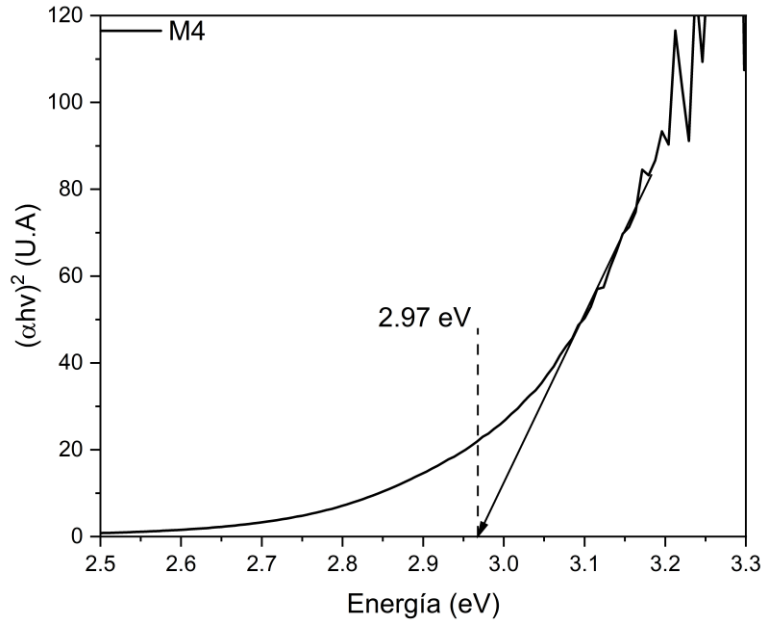


Fig. 5.12 Estimación del Ancho de Banda Prohibida de M4

En la figura 5.12 se observa la gráfica obtenida mediante el método de Tauc de la muestra M4, obteniendo un ancho de banda prohibida de 2.97eV.

En la tabla 5.2 se observan las estimaciones del ancho de banda prohibida de las muestras M1-M4 de las SiNP's sintetizadas, que corresponden a las figuras 5.9-5.12, obteniendo un valor mínimo de 2.95 eV y 2.97 eV.

Muestra	E_g
M1	2.95 eV
M2	2.95 eV
M3	2.96 eV
M4	2.97 eV

Tabla 5.2 Valores estimados del Ancho de Banda Prohibida de SiNP's

5.1.4 Fotoluminiscencia

Los resultados de Intensidad con respecto a la longitud de onda de las muestras M1, M2 y M3 se observan en la figura 5.13.

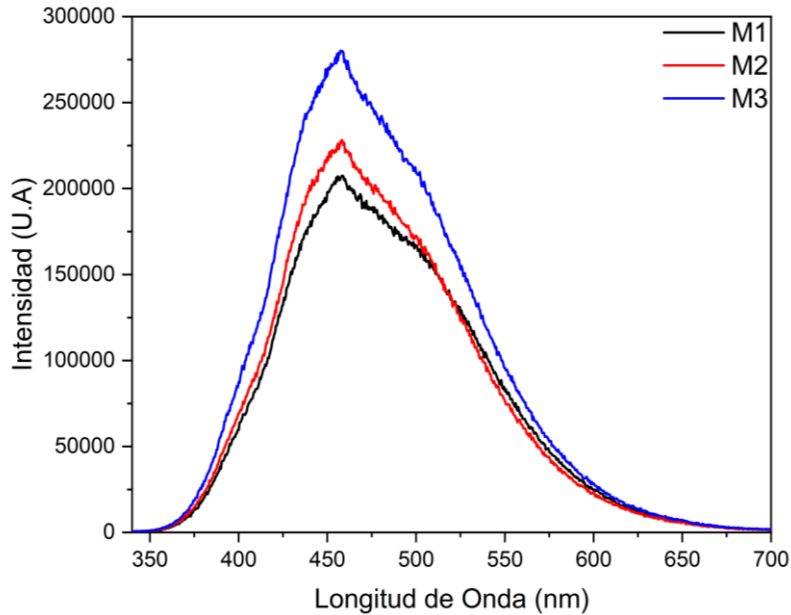


Fig. 5.13 Espectro de fotoluminiscencia de las muestras M1, M2 y M3

En la figura 5.13 se observa la respuesta de fotoluminiscencia de las muestras de SiNP's M1, M2 y M3. Se obtuvo que todas las muestras presentan su pico máximo en 457nm (azul) y emitiendo en un rango de 400 a 600 nm (violeta a anaranjado), aproximadamente. Se observan otras contribuciones de longitudes de onda de ~420 nm (violeta) y ~500 nm (verde). Las únicas diferencias en las muestras es su cambio en la intensidad y ancho de pico, la cual no es mucha. Tanto la diferencia de intensidades como las contribuciones se debe a la existencia de SiNP's de diferente tamaño.

5.1.5 Caracterización eléctrica de CS con recubrimiento de SiNP's

Se utilizaron celdas solares de silicio policristalino comerciales (1.9×3.9 cm). Las SiNP's se depositaron mediante spin coating sobre la ventana de la celda solar. Se utilizó 1 ml de nanopartículas con una velocidad de 4000 RPM por 60 segundos. Para asegurar un depósito uniforme, se utilizó un sistema que dejaba gotear el mililitro de coloide durante los 60 segundos que duraba el depósito. Todas las muestras (CS_1, CS_2 y CS_3) se depositaron de la misma manera. La caracterización eléctrica se realizó antes y después de agregar las SiNP's, con el fin de comparar los rendimientos con y sin el recubrimiento. En general, las CS con SiNP's tienen un incremento tanto en I_{sc} como V_{oc} . En las figuras 5.14, 5.15 y 5.16 se observan las curvas I-V y P-V de las CS con y sin recubrimiento de SiNP's.

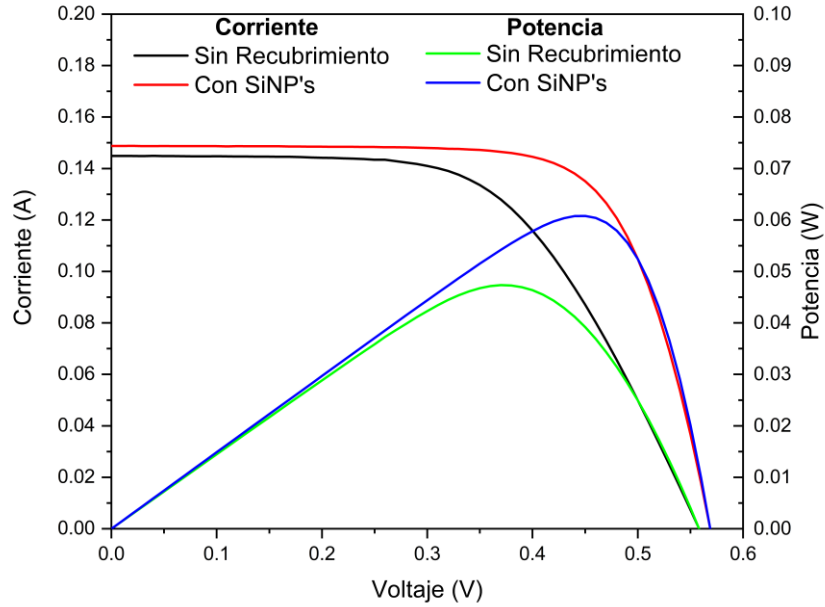


Fig. 5.14 Curvas I-V y P-V antes y después del recubrimiento con SiNP's de CS_1

En la figura 5.14 se observan curvas de corriente y potencia respecto al voltaje de una CS con y sin SiNP's. Se obtuvo un claro incremento en I_{sc} , V_{oc} y P_{max} , con un aumento de 0.0039 A, 0.01 V y 0.0135W.

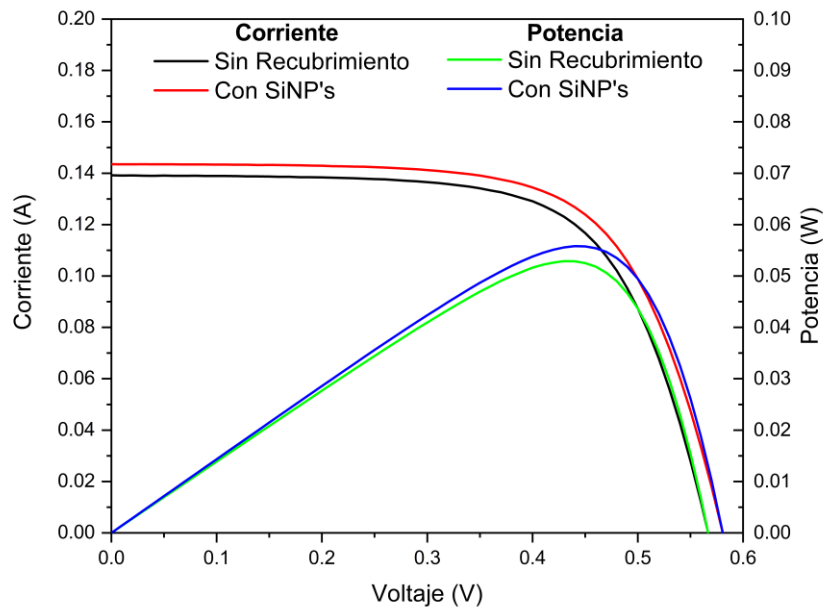


Fig. 5.15 Curvas I-V y P-V antes y después del recubrimiento con SiNP's de CS_2

En la figura 5.15 se muestran las curvas I-V y P-V de la CS_2 con y sin nanopartículas. Se observa un aumento en I_{sc} de 0.0044 A y en V_{oc} de 0.02V. La P_{max} se ve incrementada pero solo en 0.0029W.

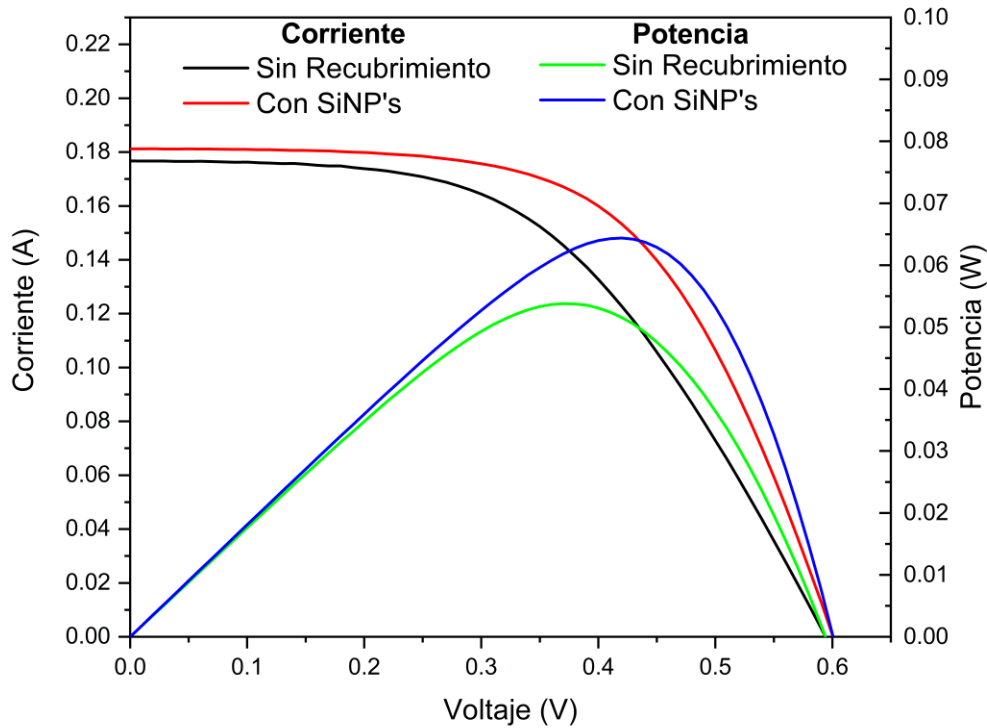


Fig. 5.16 Curvas I-V y P-V antes y después del recubrimiento con SiNP's de CS_3

En la figura 5.16 se muestran las curvas de potencia y corriente respecto al voltaje de la CS_3 con y sin el recubrimiento de nanopartículas. Se obtuvo un incremento en la I_{sc} de 0.0045 A y de 0.01 en V_{oc} , así mismo, un notable incremento de la potencia máxima (0.0106W).

En la tabla 5.3 se muestran I_{sc} , V_{oc} , I_{max} , V_{max} , P_{max} , η y FF . En todos los casos hubo un incremento en las propiedades eléctricas, exceptuando en CS_2, en donde decrece el FF , pero todo lo demás incrementa con el recubrimiento de SiNP's. El decremento del FF solo es de 0.8%, que cual es insignificante. Para el cálculo mostrado en la tabla 5.4 se utilizaron las siguientes ecuaciones:

$$\eta_{rel} = \frac{\eta_2 - \eta_1}{\eta_1} \times 100, \eta_{abs} = \eta_2 - \eta_1$$

En donde η_1 es la eficiencia de las CS sin recubrimiento y η_2 cuando se le aplica el recubrimiento. En la Tabla 5.4 se observa el incremento de la eficiencia de las CS con SiNP's con respecto a las que no tienen recubrimiento. Obteniendo hasta un incremento de la η_{rel} del 28.42% y η_{abs} de 1.82% en la CS_1.

Muestra	$I_{sc}(A)$	$V_{oc}(V)$	$I_{max}(A)$	$V_{max}(V)$	$P_{max}(W)$	η (%)	FF (%)
CS_1	0.1449	0.56	0.1279	0.37	0.0473	6.3884	58.34
CS_1 + SiNP's	0.1488	0.57	0.1351	0.45	0.0608	8.2038	71.68
CS_2	0.1391	0.57	0.1230	0.43	0.0529	7.14	66.73
CS_2 + SiNP's	0.1435	0.59	0.1268	0.44	0.0558	7.53	65.93
CS_3	0.1767	0.6	0.1454	0.37	0.0538	7.2607	50.76
CS_3 + SiNP's	0.1812	0.61	0.1533	0.42	0.0644	8.6896	58.26

Tabla 5.3 Características eléctricas de CS con y sin recubrimiento de SiNP's

Muestra	η (%)	η_{rel} (%)	η_{abs} (%)
CS_1	6.3884	-	-
CS_1 + SiNP's	8.2038	28.4171	1.8154
CS_2	7.14	-	-
CS_2 + SiNP's	7.53	5.4621	0.39
CS_3	7.2607	-	-
CS_3 + SiNP's	8.6896	19.6799	1.4289

Tabla 5.4 Incremento de la eficiencia (η) de las CS con SiNP's respecto a la CS sin recubrimiento

5.2 Caracterización de Óxido de Aluminio (Al_2O_3)

5.2.1 Reflectancia

Los depósitos mostraron 2 picos máximos y 2 mínimos. Utilizando la longitud de onda que se encuentra en estos picos, es posible obtener los espesores de las películas delgadas de Al_2O_3 . En la Figura 5.17 se observa la gráfica de la reflectancia con respecto a la longitud de onda de todas las muestras. Se obtuvo que en los casos de S1 a S4 tienen sus máximos y mínimos muy similares entre sí, mientras que en S5 es relativamente más diferente. Así mismo, S5 presenta una menor reflectancia a partir de los 250 nm, aproximadamente.

En la tabla 5.5 se observan los espesores estimados para las muestras, así como la comparación con los espesores obtenidos mediante elipsometría espectroscópica. Por este método se obtuvieron espesores de entre 23.6 nm y 28.8 nm.

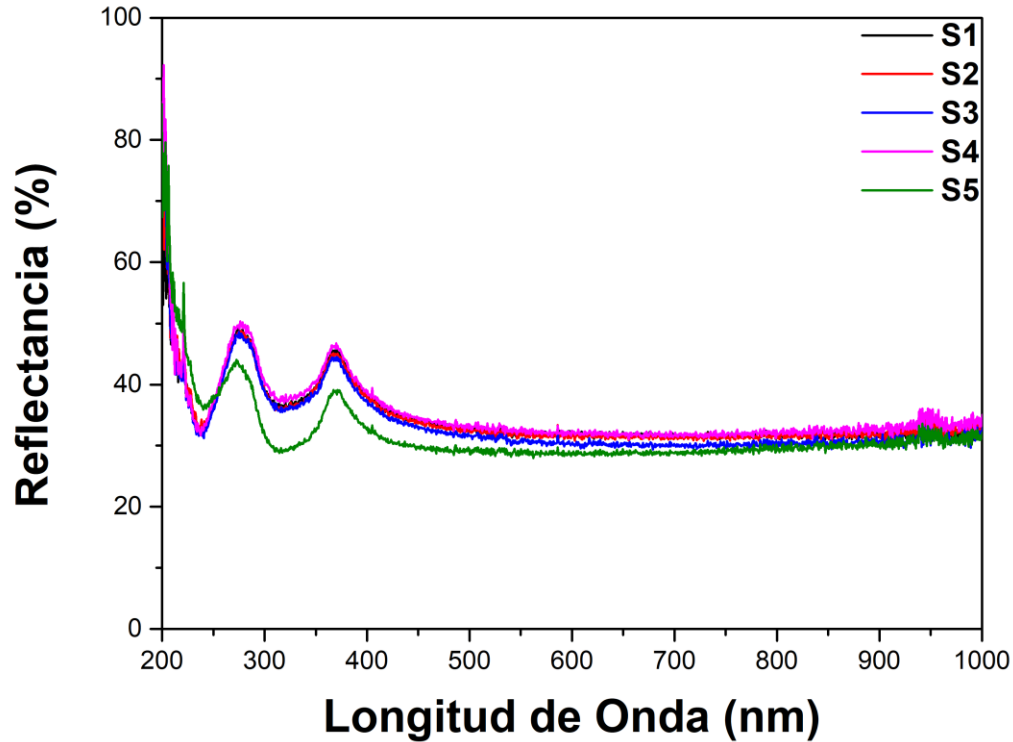


Fig. 5.17 Reflectancia de las muestras de Al₂O₃

5.2.2 Elipsometría espectroscópica

Se obtuvieron las curvas de Ψ y Δ con respecto a la longitud de onda en diferentes ángulos de incidencia para realizar una comparación con los espesores obtenidos mediante reflectancia, así como la medición de más muestras. Para crear el modelo, se utilizó el modelo de Cauchy, el cual se utiliza para estimar la función dieléctrica de un material transparente, el modelo se utilizó en el software Complete EASE. El modelo de Cauchy consiste en la siguiente ecuación:

$$n = A + \frac{B}{\lambda^2} + \frac{C}{\lambda^4}$$

En la cual, el software estima los valores de las constantes A, B y C, [67] y con n calcula el espesor de la película delgada.

En las figuras 5.18, 5.19, 5.20, 5.21 y 5.22 se muestran las gráficas obtenidas de las películas delgadas depositadas en las cuales se varió el tiempo de pulso del MO. En las figuras 5.23, 5.24, 5.25, 5.26, 5.27, 5.28 y 5.29 se observan las gráficas de las muestras con diferente número de ciclos. En todas las figuras mencionadas, se puede observar que el

modelo generado por el software (Cauchy) es casi idéntico a los valores medidos de Ψ y Δ para los distintos ángulos de incidencia de la fuente de luz (45° , 55° , 65° y 75°). En la figura 5.29 se puede observar un cambio abrupto de del ángulo Δ en $\sim 730\text{nm}$, el cual es bastante común conforme se incrementa el espesor de las películas delgadas.

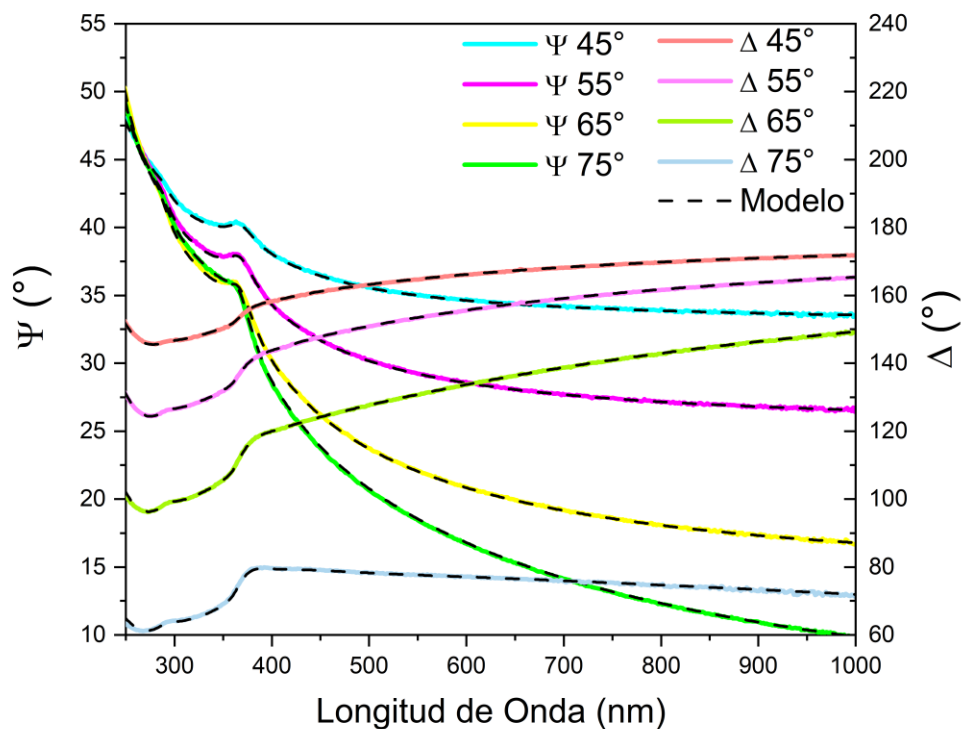


Fig. 5.18 Valores ψ y Δ obtenidos por elipsometría para S1

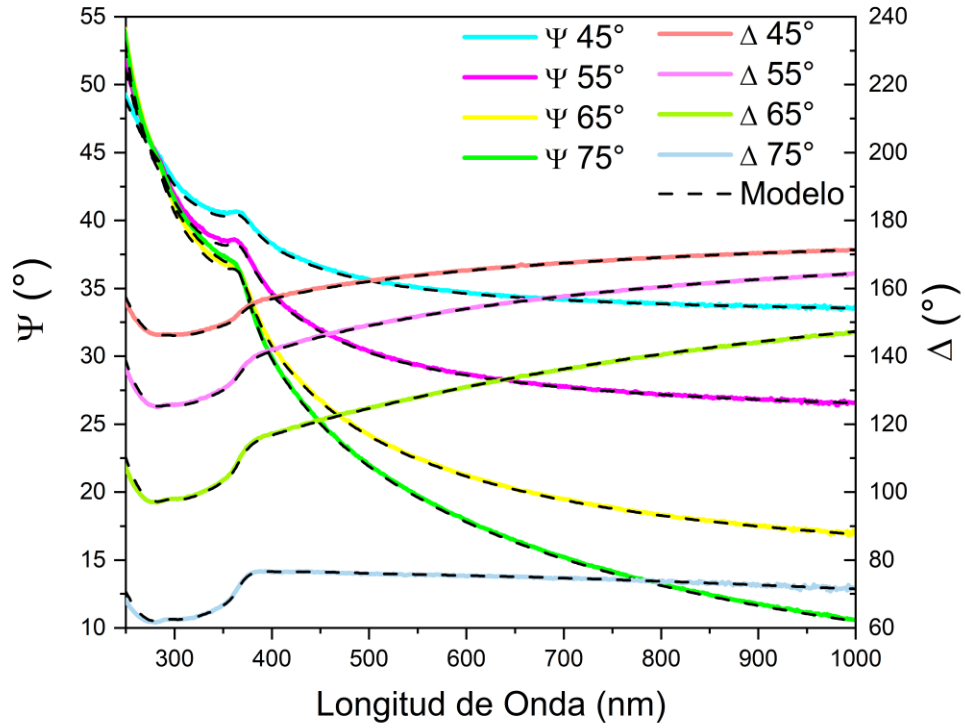


Fig. 5.19 Valores ψ y Δ obtenidos por elipsometría para S2

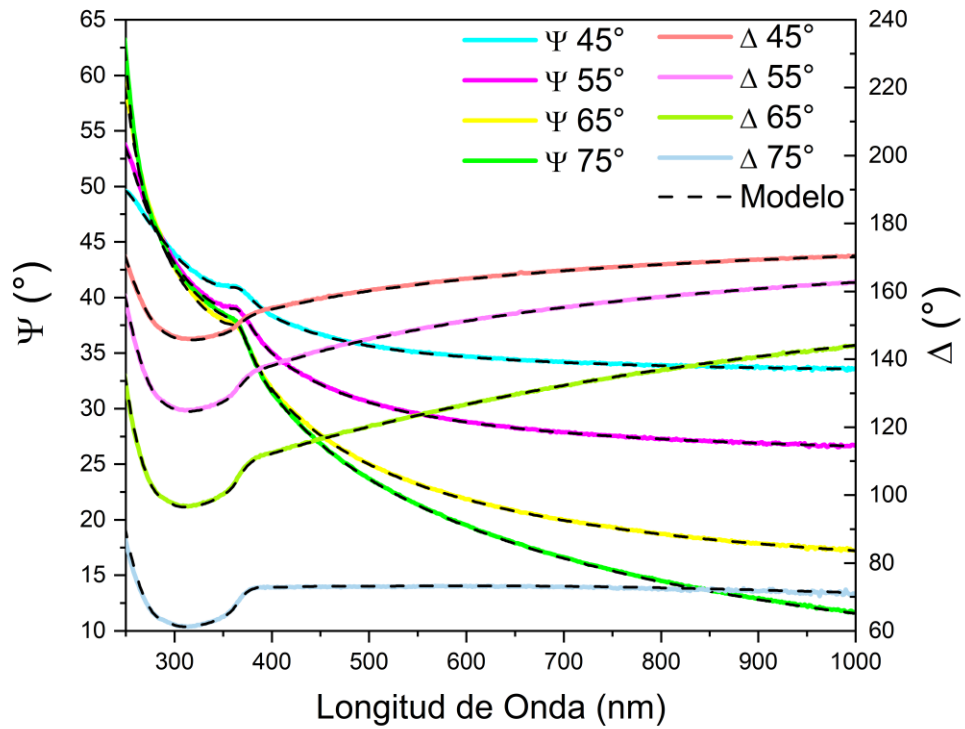


Fig. 5.20 Valores ψ y Δ obtenidos por elipsometría para S3

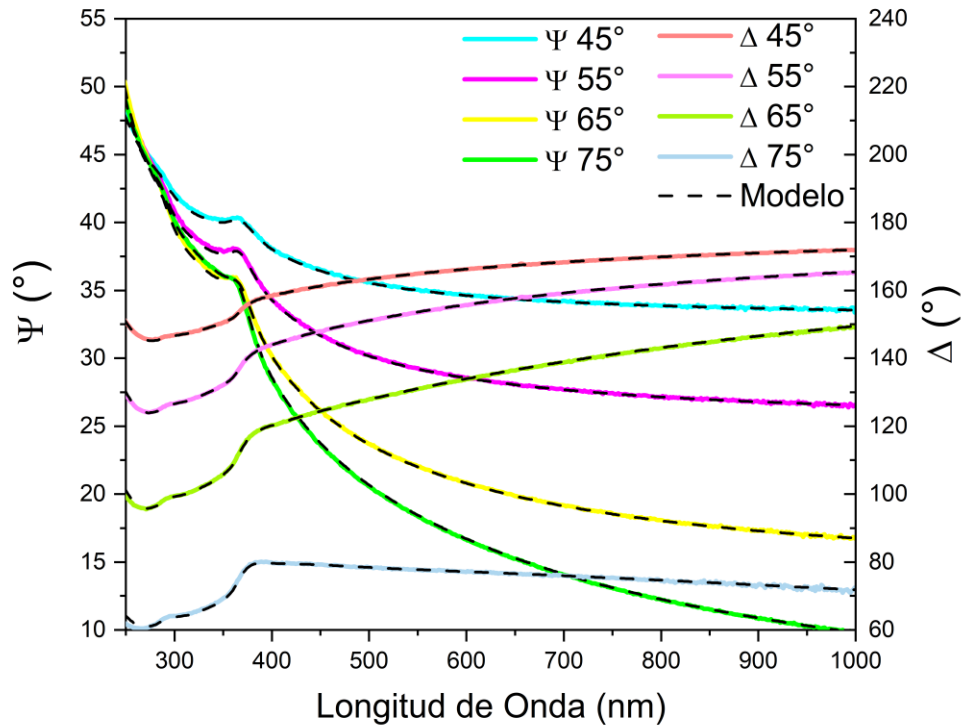


Fig. 5.21 Valores ψ y Δ obtenidos por elipsometría para S4

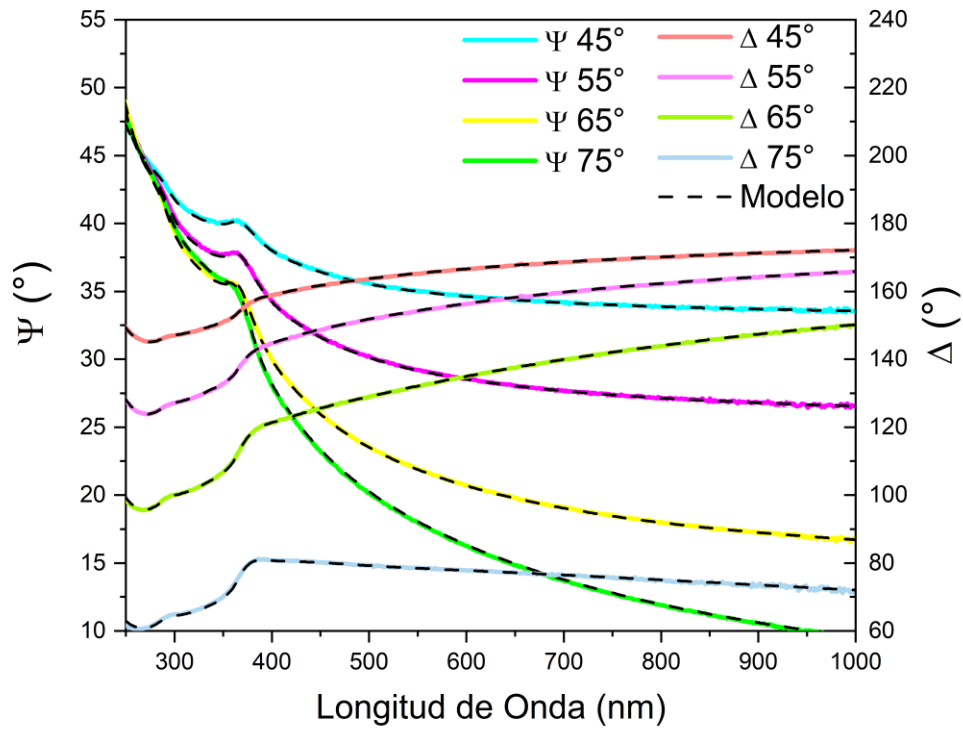


Fig. 5.22 Valores ψ y Δ obtenidos por elipsometría para S5

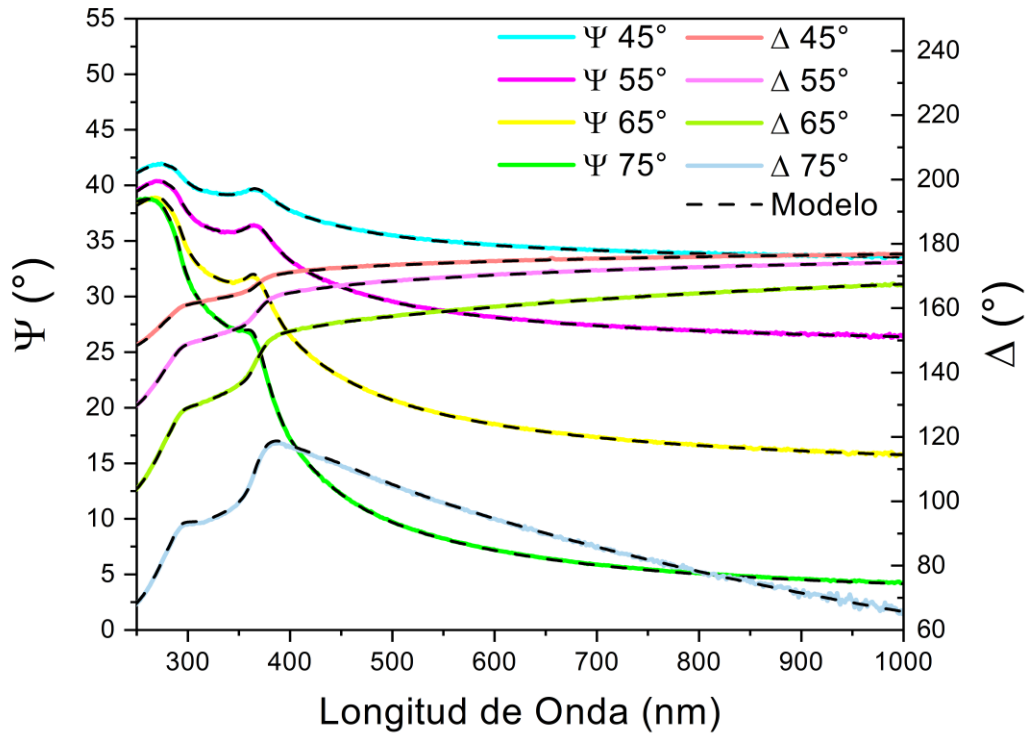


Fig. 5.23 Valores ψ y Δ obtenidos por elipsometría para C1

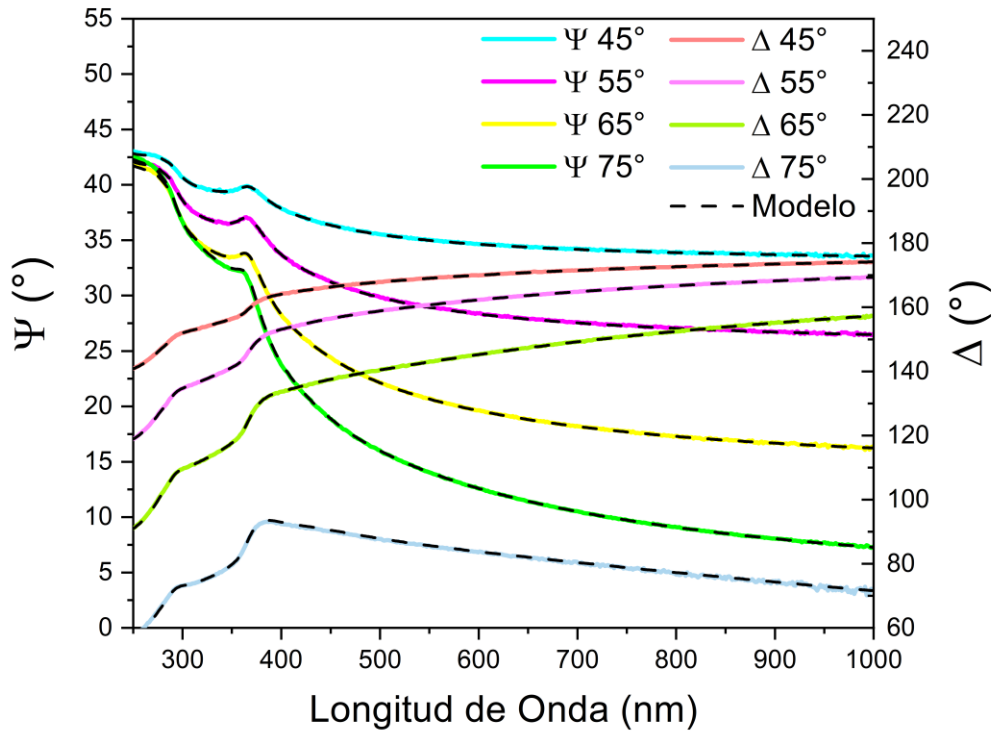


Fig. 5.24 Valores ψ y Δ obtenidos por elipsometría para C2

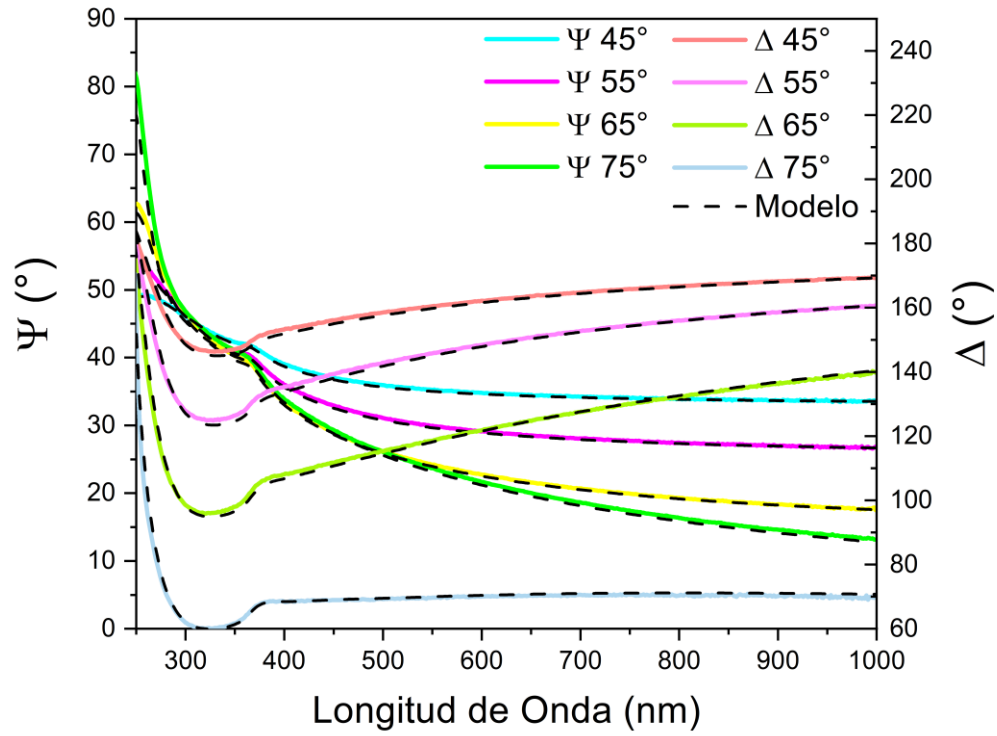


Fig. 5.25 Valores ψ y Δ obtenidos por elipsometría para C3

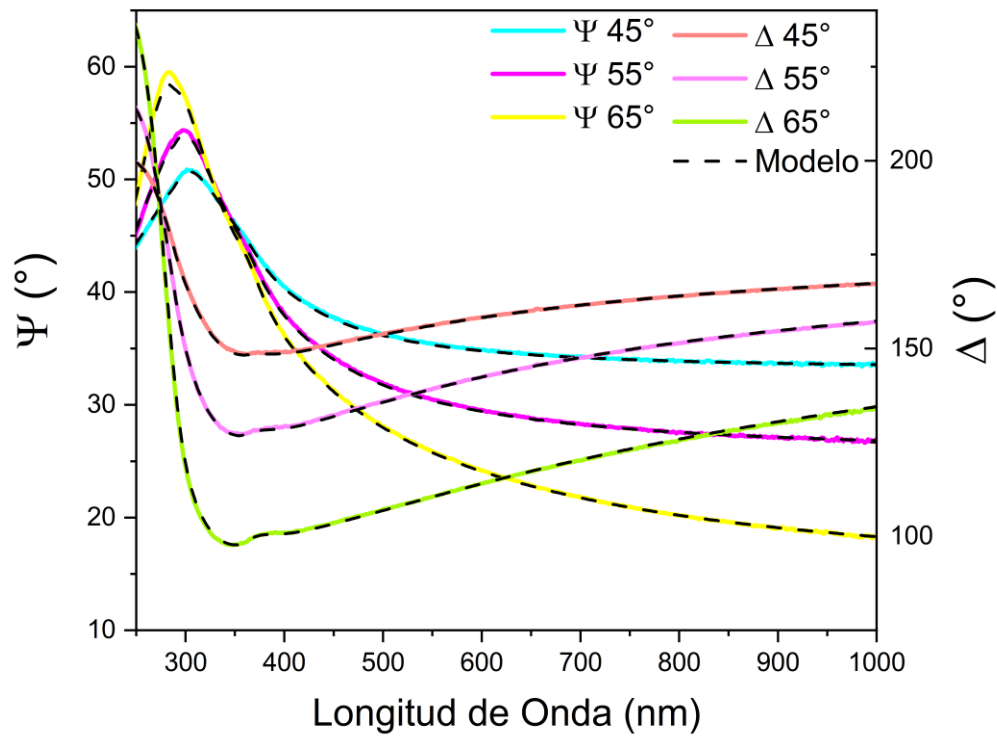


Fig. 5.26 Valores ψ y Δ obtenidos por elipsometría para C4

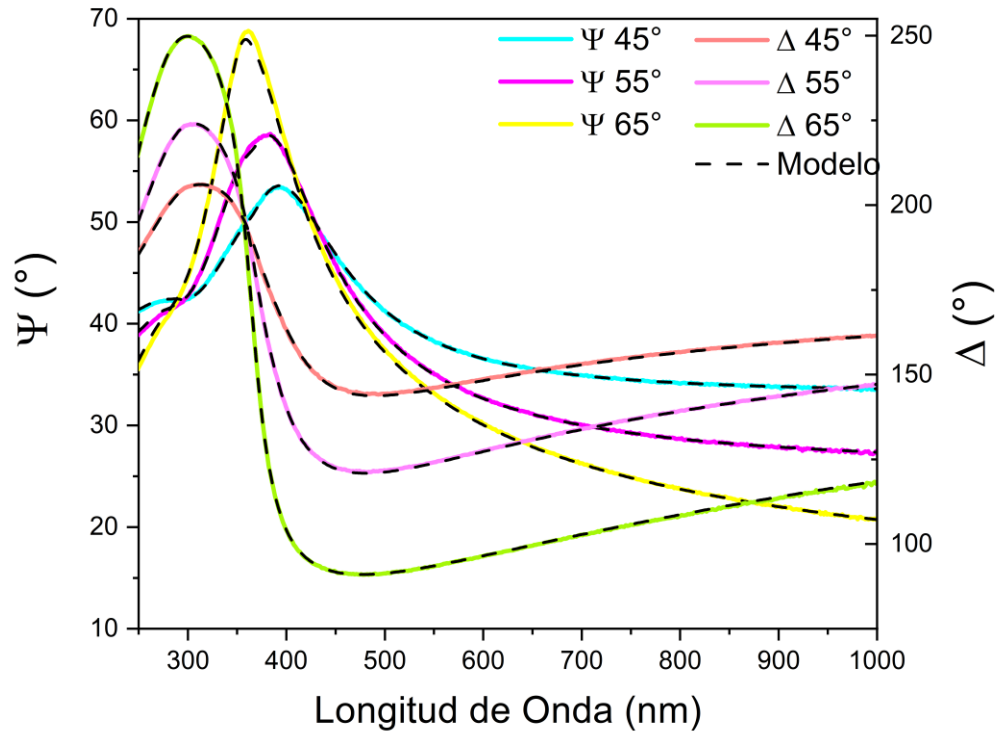


Fig. 5.27 Valores ψ y Δ obtenidos por elipsometría para C5

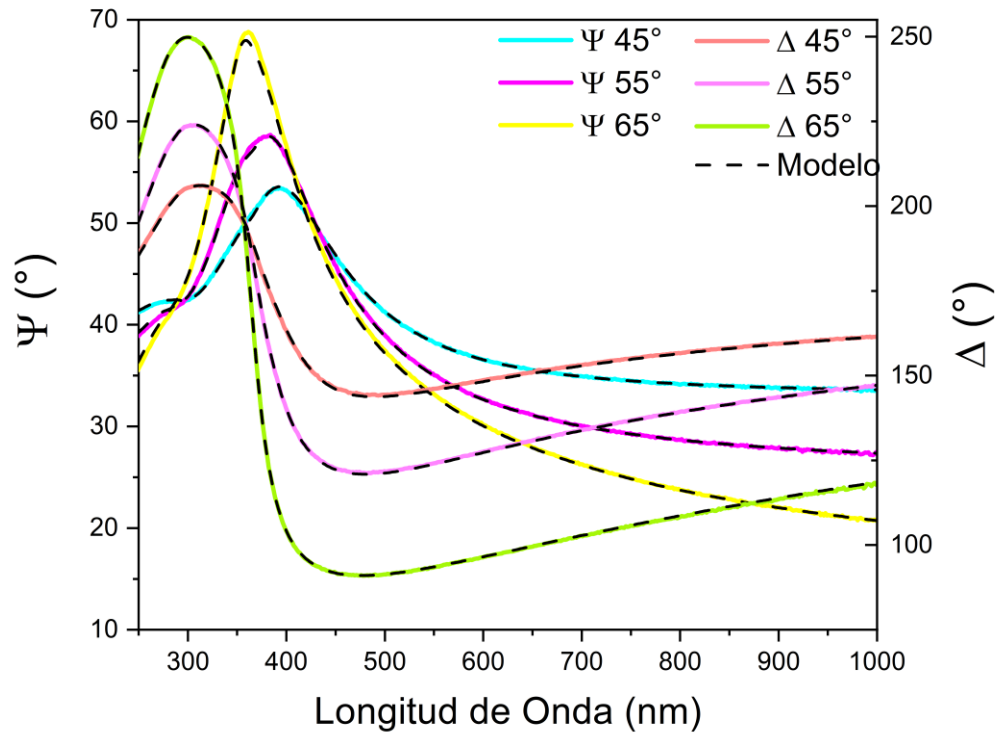


Fig. 5.28 Valores ψ y Δ obtenidos por elipsometría para C6

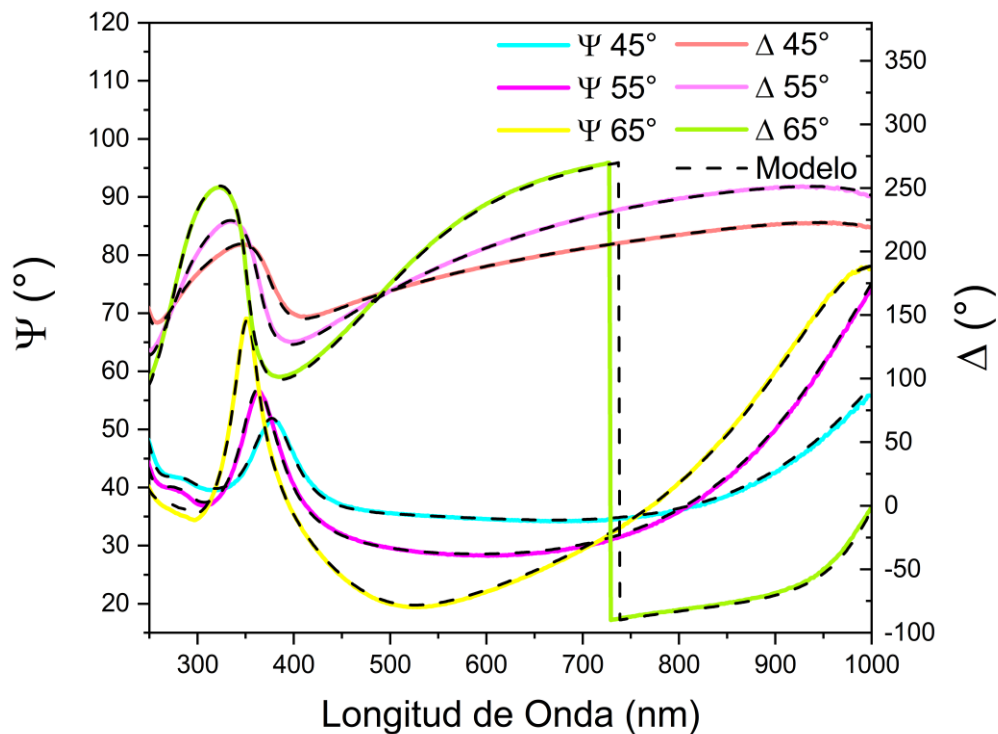


Fig. 5.29 Valores ψ y Δ obtenidos por elipsometría para C7

En la tabla 5.5 se observan los espesores estimados por el software para las muestras S1 a S5, donde los espesores obtenidos mediante elipsometría espectroscópica van de los 24.8 nm hasta 29.62 nm, para tiempos de disparo de MO de 25 a 125 ms. Utilizando estos datos se graficó la curva de saturación de la figura 5.30.

En la tabla 5.6 se presentan los espesores para las muestras C1 a C7, obteniendo espesores de 5.51 a 185.67 nm para distintos números de ciclos, estos valores se utilizaron para crear la curva de crecimiento de la figura 5.31, en la cual se observa una tendencia lineal de crecimiento.

Muestra	Tiempo TMA	Espesor (Reflectancia)	Espesor (Elipsometría)
S1	25 ms	23.6 nm	24.8 nm
S2	50 ms	24.3 nm	26.52 nm
S3	75 ms	25.5 nm	27.02 nm
S4	100 ms	25.8 nm	28.35 nm
S5	125 ms	28.8 nm	29.62 nm

Tabla 5.5 Espesores obtenidos mediante los resultados de reflectancia y elipsometría espectroscópica.

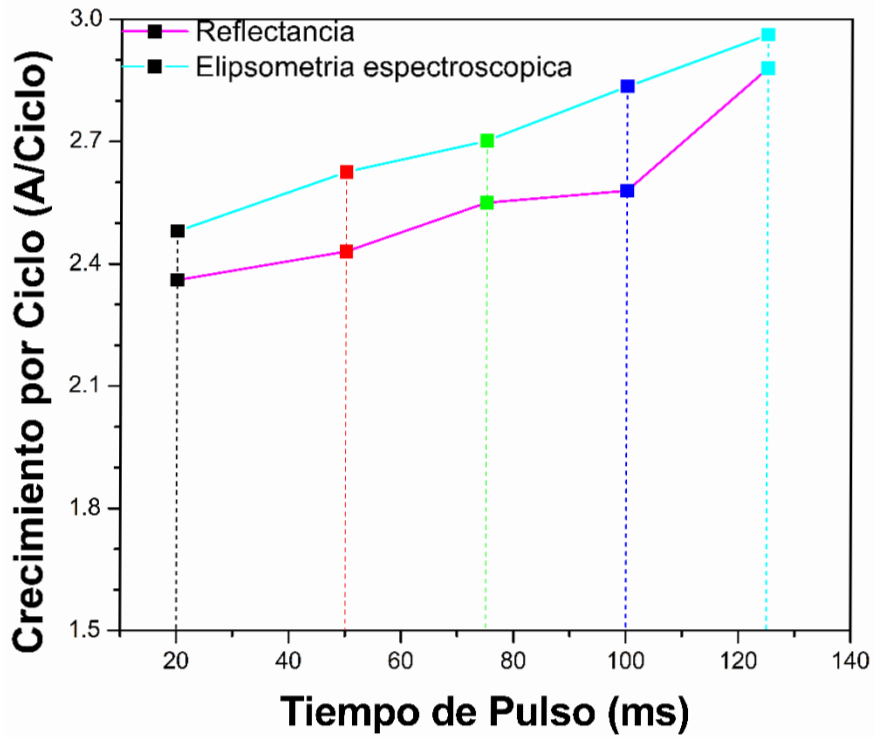


Fig. 5.30 Curva de saturación

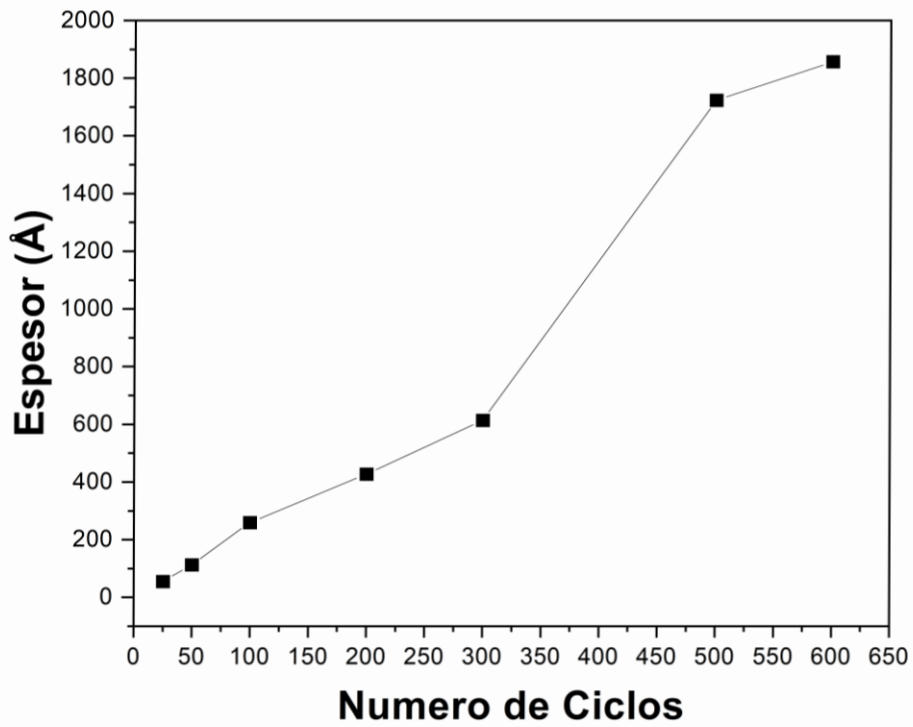


Fig. 5.31 Curva de crecimiento

Muestra	Ciclos	Espesor
C1	25	5.51 nm
C2	50	11.3 nm
C3	100	25.95 nm
C4	200	42.7 nm
C5	300	61.38 nm
C6	500	172.30 nm
C7	600	185.67 nm

Tabla 5.6 Espesores obtenidos por elipsometría espectroscópica de muestras con diferente número de ciclos.

5.2.3 Espectroscopía de fotoelectrones de rayos X (XPS)

La caracterización, se realizó un depósito de una muestra denominada M0, la cual tiene 400 ciclos de depósito, con la finalidad de obtener una película de mayor espesor. Se obtuvo el espectro XPS que se observa en la Figura 5.32 donde se corrobora la composición química de Al_2O_3 de la muestra. No se detectaron otros elementos no deseados, exceptuando el carbono, que es el material de referencia. El carbono se utiliza para realizar correcciones en los desplazamientos de los picos. Los picos del aluminio y del oxígeno corresponden a los investigados en la literatura. Además, se observan picos que corresponden a las líneas Auger del oxígeno (KLL) [65].

En la Figura 5.30 se muestra el espectro general XPS obtenido, en la figura 5.33 el pico de aluminio 2p (74.9 eV) y en la 5.34 los picos presentes del oxígeno 1s (531.22 eV y 533.1 eV), los cuales corresponden a los datos obtenidos de la literatura cuando existe el compuesto Al_2O_3 y el segundo pico más pequeño del oxígeno a un enlace entre átomos de carbono y oxígeno [71], [72], lo que comprueba que el depósito se hizo correctamente. Con esto se determinó que los pulsos de las válvulas ALD funcionaban correctamente y se realizó la reacción del TMA y del agua de forma correcta.

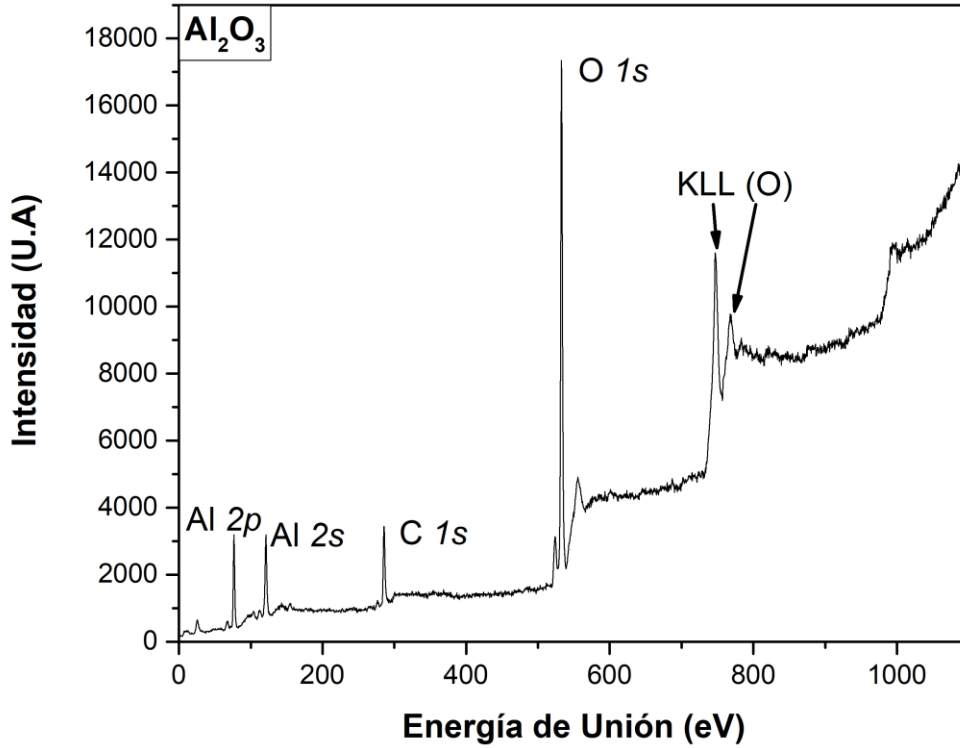


Fig. 5.32 Espectro XPS de la muestra M0

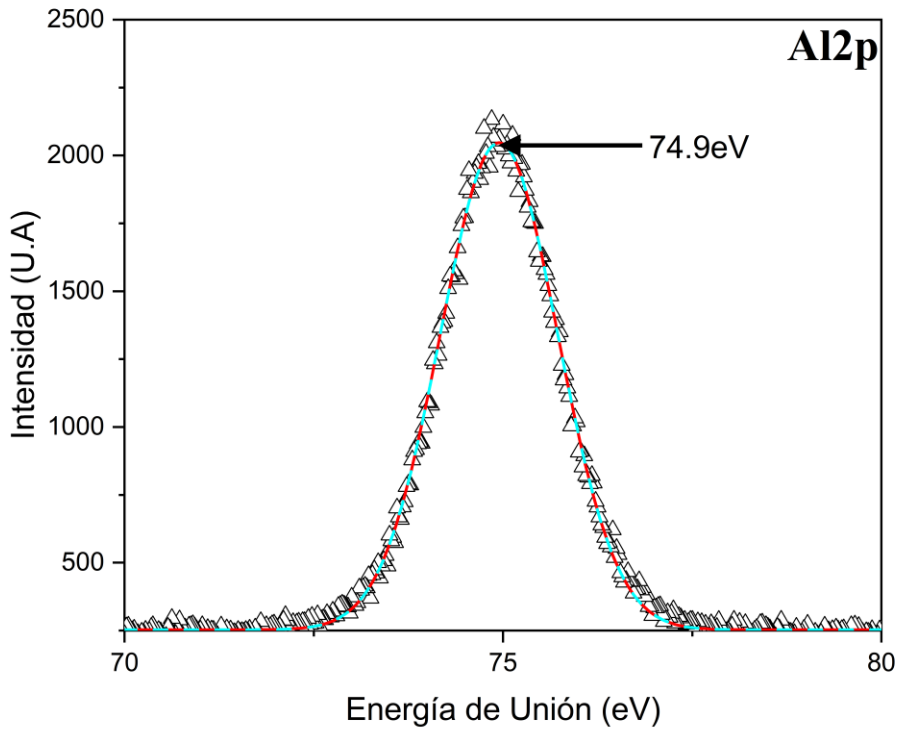


Fig. 5.33 Espectro XPS centrado en el pico de Aluminio 2p de la muestra M0

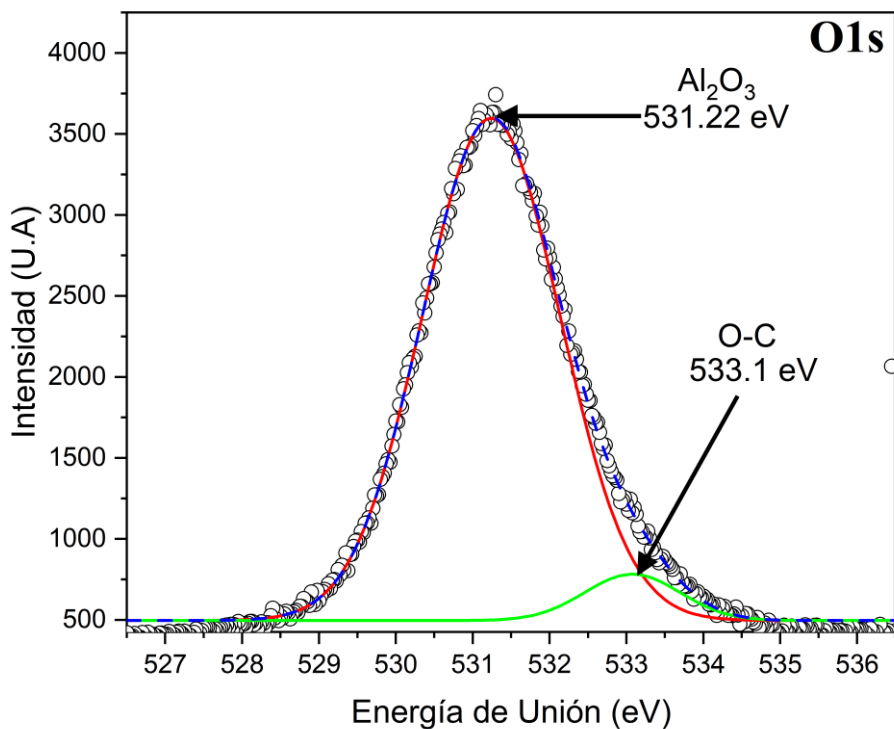


Fig. 5.34 Espectro XPS centrado en el pico de Oxígeno 1s de la muestra M0

5.2.4 Termoluminiscencia

Las muestras se expusieron a radiación beta a diferentes periodos de tiempo, con el fin de intensificar los picos de TL. En las figuras 5.35, 5.36 y 5.37 se observa las curvas de TL resultantes del silicio y dos muestras de Al_2O_3 , una utilizando 100 ciclos ALD y otra con 300. La radiación utilizada fue radiación $\beta = 2 \frac{\text{Gy}}{\text{min}}$.

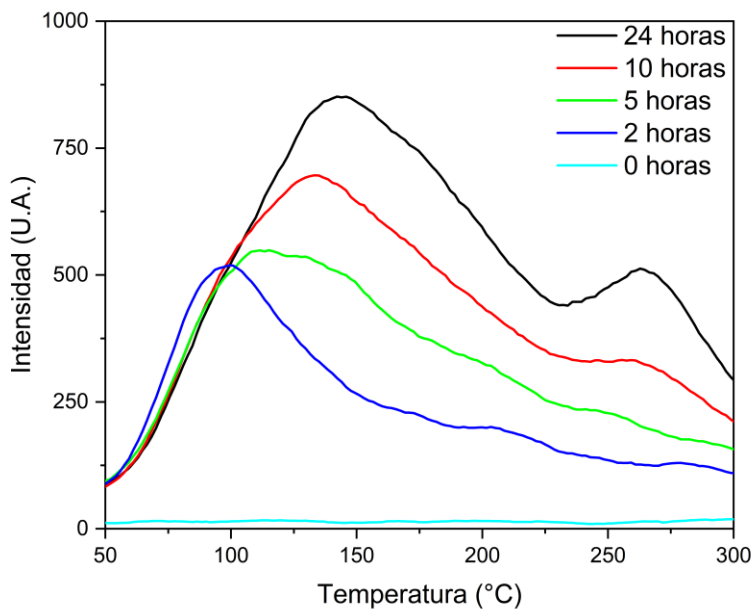


Fig. 5.35 Curva TL de Silicio

En la figura 5.35 se muestra la curva TL del sustrato de silicio utilizado para depositar las películas delgadas de Al_2O_3 , se observa que mientras que conforme el tiempo de exposición incrementa se observa un incremento en la intensidad. Así mismo, conforme el tiempo aumenta, el pico máximo se ve recorrido, y en 10 y 24 se crea otro pico. En 2 horas se presenta el pico en 99°C y para 5 horas se encuentra en 111.6°C . El pico más grande para 10 y 24 horas de exposición corresponde a 133°C y 142.2°C , respectivamente, mientras que los otros picos se encuentran en 261°C y 263°C , respectivamente.

En la figura 5.36 se observan la gráfica obtenida para una muestra de alúmina utilizando 100 ciclos ALD. Se obtuvo que conforme se incrementaba el tiempo de exposición, la intensidad de la señal incrementaba, al igual que había un mínimo recorrimiento del pico máximo. La señal de 2 y 0 horas prácticamente es inexistente, mientras que, en 5, 10 y 24 horas se presentan los picos que corresponden a 158.4°C , 154°C y 154°C , respectivamente, muy cercano al valor del óxido de aluminio con carbono [73]–[75].

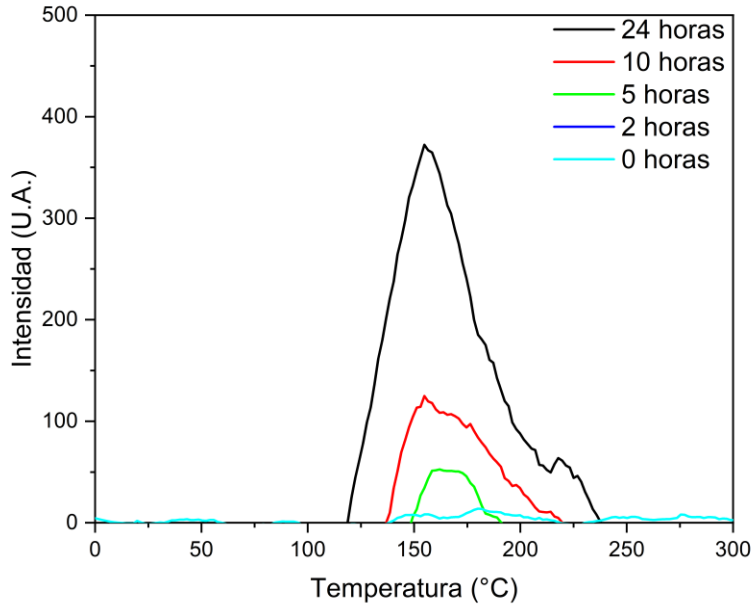


Fig. 5.36 Curva TL de Al₂O₃ con 100 ciclos

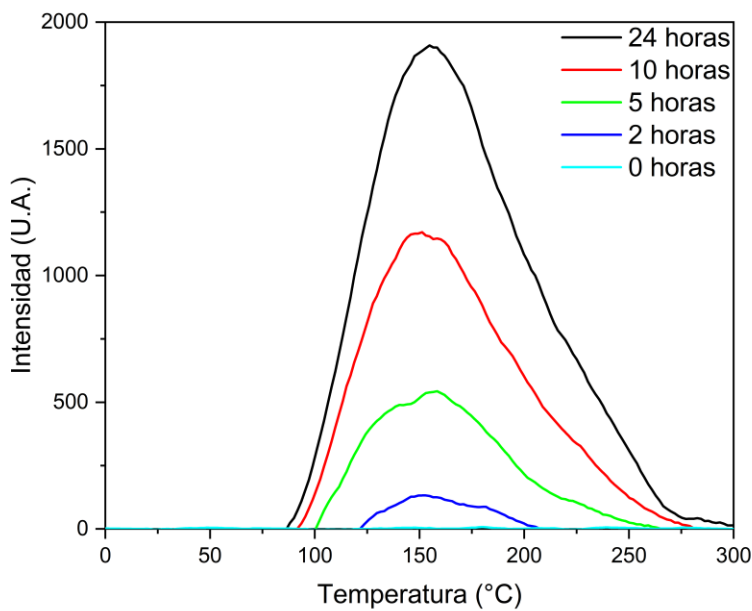


Fig. 5.37 Curva TL de Al₂O₃ con 300 ciclos

En la figura 5.37 se muestra la curva TL para una película delgada depositada con 300 ciclos ALD. En todos los demás casos se observa un pico máximo de 154°C y un incremento en la intensidad conforme se incrementaba el tiempo de exposición. El pico de 154°C se asemeja al encontrado en la literatura, que corresponde al Al₂O₃:C [73]–[75].

Se observa que el pico máximo de las muestras se encuentra alrededor 153°C, que corresponde a un valor cercano al $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$ [73]–[75]. Se obtuvo un incremento en la intensidad de las muestras con 300 ciclos respecto a la de 100 ciclos, esto se puede deber a que la película delgada de Al_2O_3 es más gruesa, evitando que la radiación llegue hasta el silicio y dado al espesor, la red cristalina presenta más defectos. Observando los resultados de XPS en la figura 5.30, se puede notar la existencia de picos del C1s el cual es el elemento de referencia, que siempre se presenta en todas las mediciones de este tipo. La presencia del carbono en la muestra se puede deber a los residuos del MO, el cual no se elimina completamente durante los periodos de purga, lo cual es completamente normal[76]. De esta forma se puede explicar por qué los picos TL encontrados corresponden al Al_2O_3 con carbono.

5.3 Caracterización eléctrica de CS con nanoencapsulado de SiNP's en Al_2O_3

Para realizar la caracterización final de las celdas solares con el nanoencapsulado de SiNP's en Al_2O_3 , se utilizaron celdas solares de silicio policristalino comerciales (1.9×3.9 cm) y se midieron las características eléctricas utilizando el analizador de parámetros Keithley 4200. Todas las muestras tienen los mismos parámetros de depósito, 4000 RPM por 1 minuto para el depósito de SiNP's y $\sim 5\text{nm}$ de espesor de película delgada de Al_2O_3 , con el fin de corroborar el comportamiento de las CS con los recubrimientos. En la tabla 5.7 se observan los parámetros eléctricos de las CS con y sin los recubrimientos. Como se puede observar, en todas las muestras en las mediciones M1 la I_{sc} se ve disminuida, pero al momento de agregar más capas esta incrementa. El primer decremento en la corriente se puede deber a que los contactos no están del todo recubiertos, provocando que aun así se haya depositado alúmina o SiNP's, esto puede perjudicar al flujo de electrones de la CS al equipo de medición. Los siguientes aumentos de I_{sc} se pueden deber al incremento en la fotocorriente generada por las SiNP's y a que el Al_2O_3 funciona como CAR, permitiendo que los fotones generados por las nanopartículas se redirijan a la CS. El aumento más significativo se presenta en la P_{max} y en η , en todos los casos se presenta un incremento de estos parámetros conforme se agregan más capas. El FF aumenta en casi todos los casos, exceptuando en CS_D M3, en donde este disminuye en un 0.54%, pero es insignificante este cambio, ya que aun así la eficiencia aumenta. En la Tabla 5.8 se muestran los incrementos en la eficiencia con el nanoencapsulado respecto a la CS sin el recubrimiento.

Muestra	$I_{sc}(A)$	$V_{oc}(V)$	$I_{max}(A)$	$V_{max}(V)$	$P_{max}(W)$	η (%)	FF (%)
CS_A	0.1566	0.58	0.1017	0.31	0.0315	4.25	34.69
CS_A M1	0.1501	0.57	0.1181	0.34	0.0402	5.42	46.94
CS_A M2	0.1473	0.57	0.1193	0.35	0.0418	5.64	49.76
CS_A M3	0.1483	0.56	0.1285	0.38	0.0488	6.59	58.82
CS_B	0.1518	0.56	0.1296	0.34	0.0441	5.95	51.84
CS_B M1	0.1521	0.57	0.1349	0.42	0.0567	7.65	65.37
CS_B M2	0.1482	0.58	0.1355	0.43	0.0583	7.86	67.78
CS_C	0.1448	0.57	0.136	0.43	0.0575	7.75	68.12
CS_C M1	0.1448	0.58	0.1312	0.45	0.0590	7.97	70.29
CS_C M2	0.1493	0.58	0.1359	0.45	0.0611	8.25	70.58
CS_D	0.1449	0.56	0.1314	0.43	0.0565	7.62	69.60
CS_D M1	0.1434	0.58	0.1317	0.44	0.580	7.82	69.68
CS_D M2	0.1461	0.58	0.1332	0.44	0.586	7.91	69.16
CS_D M3	0.1478	0.57	0.1339	0.44	0.0589	7.95	69.90

Tabla 5.7 Características eléctricas de CS con y sin recubrimiento de nanoencapsulado de SiNP's en Al_2O_3

Muestra	η (%)	η_{rel} (%)	η_{abs} (%)
CS_A	4.25	-	-
CS_A M1	5.42	27.47	1.17
CS_A M2	5.64	32.55	1.38
CS_A M3	6.59	54.99	2.34
CS_B	5.95	-	-
CS_B M1	7.65	28.55	1.70
CS_B M2	7.86	32.17	1.91
CS_C	7.75	-	-
CS_C M1	7.97	2.76	0.21
CS_C M2	8.25	6.41	0.50
CS_D	7.62	-	-
CS_D M1	7.82	2.61	0.20
CS_D M2	7.91	3.73	0.28
CS_D M3	7.95	4.27	0.33

Tabla 5.8 Incremento de la eficiencia(η) de las CS con los nanoencapsulados respecto a la CS sin recubrimiento

En la figura 5.38 se observan las curvas I-V y P-V de la CS A con y sin el recubrimiento de nanoencapsulados. En primera instancia, se observa un decremento en todos los casos de la corriente de cortocircuito y el voltaje de circuito abierto, pero un incremento bastante notable en la potencia máxima conforme aumentaba el número de nanocapas.

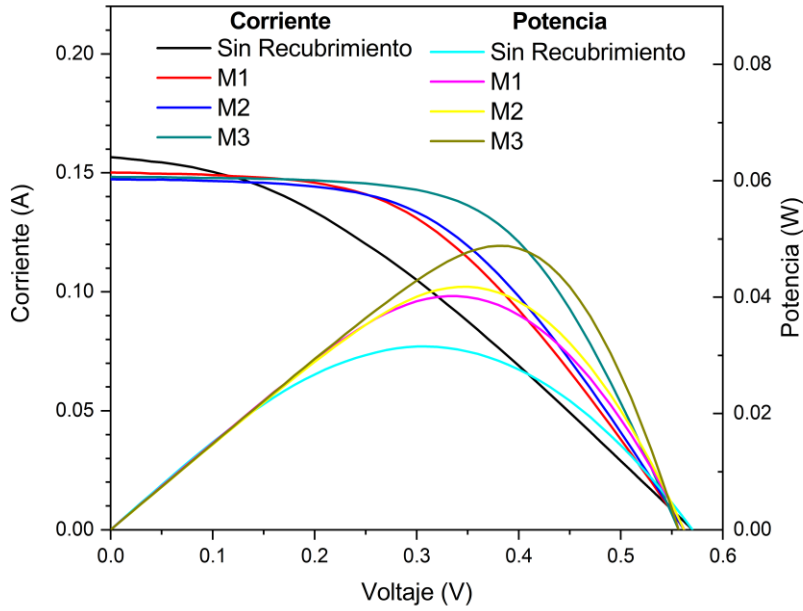


Fig. 5.38 Curvas I-V y P-V de CS A con y sin nanoencapsulados

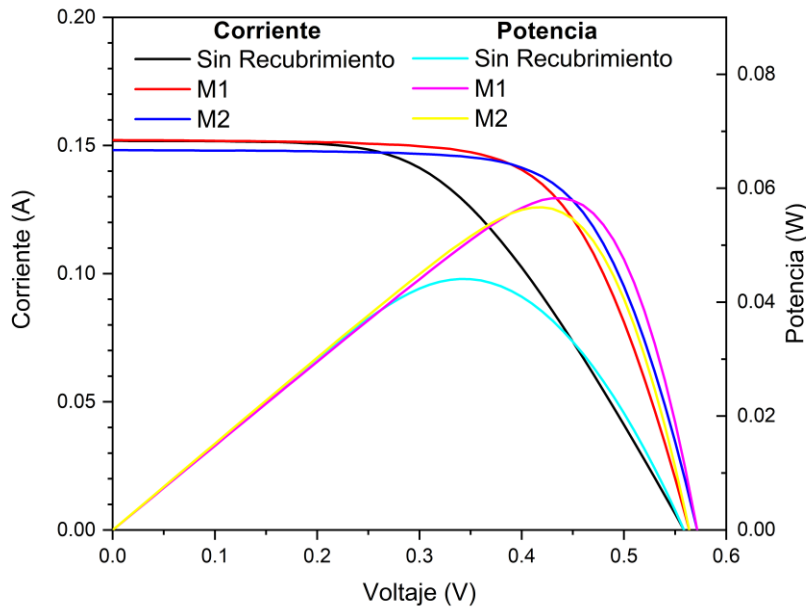


Fig. 5.39 Curvas I-V y P-V de CS B con y sin nanoencapsulados

En la figura 5.39 se observa la gráfica de corriente y potencia respecto al voltaje de la CS B con y sin recubrimiento. Se observa que con las primeras capas la I_{SC} baja, pero al agregarle más capas esta incrementa. El V_{oc} y la P_{max} incrementaron conforme se agregaban más recubrimiento.

En la figura 5.40 se muestran las curvas de corriente y potencia contra voltaje de la CS C con y sin el recubrimiento. Se obtiene que el valor de I_{sc} se mantiene con las primeras capas, pero incrementó al agregarle más. La P_{max} y el V_{oc} se ven incrementados al agregarle cada vez más capas como recubrimiento, pero aún así, el incremento no es tan notable.

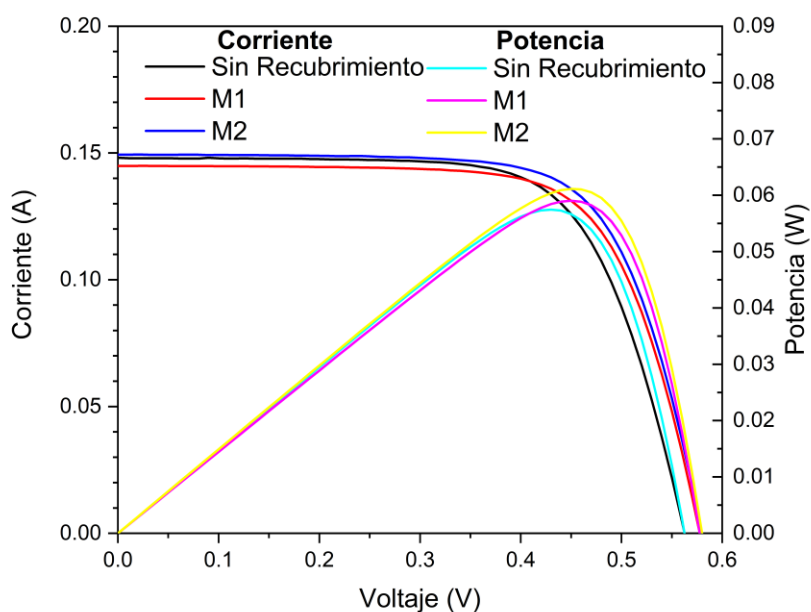


Fig. 5.40 Curvas I-V y P-V de CS C con y sin nanoencapsulados

En la figura 5.41 se observan las curvas I-V y P-V de la CS D antes y después de los recubrimientos. Se obtiene que los parámetros de I_{sc} , y P_{max} se incrementan conforme se agregan capas, aunque el incremento es muy poco. El V_{oc} se mantiene, pero al agregar las últimas nanocapas, disminuye un poco.

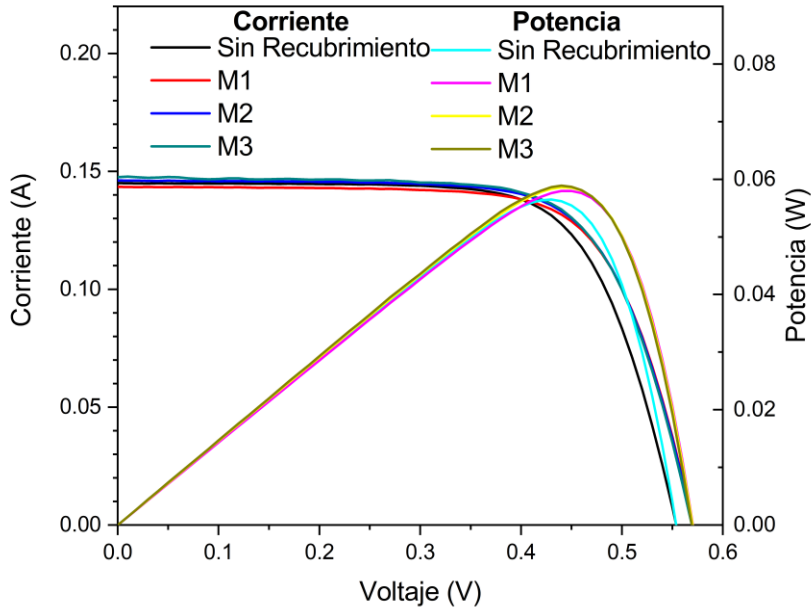


Fig. 5.41 Curvas I-V y P-V de CS D con y sin nanoencapsulados

En los resultados presentados en este capítulo, se muestra una mejora relativa de hasta un 54.99% y 2.34% de mejora absoluta. Comparando resultados de eficiencia relativa, CS A y CS B con las primeras 3 nanocapas de materiales tienen una eficiencia de 27.46% y 28.54% respectivamente, que respecto a la mejor muestra de CS con SiNP's es un valor muy cercano (28.41%), y conforme se incrementan el número de capas de Al_2O_3 y SiNP's, la eficiencia relativa supera a la de la CS con SiNP's, llegando hasta 54.99%.

Capítulo 6

Conclusiones

Se lograron sintetizar SiNP's utilizando un método químico, con tamaños entre 2.97 nm y 3.59 nm. El espectro de absorción disminuyó cerca de los 500 nm, lo que va a permitir que longitudes onda menores sean absorbidas por las nanopartículas, y utilizando el método de Tauc se estimó el ancho de banda prohibida, con un rango de valores que van desde 2.95 eV hasta 2.97 eV. El espectro de FL tiene un pico de 457 nm en todos los casos, lo que indica que son luminiscentes y reaccionan a longitudes de onda bajas, debido a su propiedad de conversión descendente. Las CS con SiNP's lograron mejorar en eficiencia relativa hasta un 28.42%.

Se logró depositar Al_2O_3 mediante la técnica ALD sobre sustratos de silicio, obteniendo distintos espesores a distintos números de ciclos con una tasa de crecimiento de 2.595Å por ciclo. El espectro XPS muestra picos correspondientes al Al2p, O1s y C1s. Los picos concordaron con los vistos en la literatura correspondientes al Al_2O_3 . Mediante TL se obtuvo que las muestras tenían un pico característico en 154°C, el cual es cercano al correspondiente del $\text{Al}_2\text{O}_3\text{:C}$, lo cual indica el depósito correcto de óxido de aluminio mediante ALD.

Se lograron depositar nanoencapsulados de SiNP's en Al_2O_3 sobre CS de silicio policristalino, obteniendo una mejora en la eficiencia relativa de hasta el 54.99%.

Capítulo 7

Trabajo Futuro

En cuanto a los recubrimientos sobre las celdas solares, se puede realizar un diseño de experimentos variando el espesor de las películas delgadas de Al_2O_3 y los parámetros de depósito de las SiNP's mediante spin coating. Así mismo, realizar un análisis estructural y de superficie de la CS con nanoencapsulados. También, se pueden probar los recubrimientos en distintos tipos de CS para observar cómo estos le afectan a la eficiencia a los parámetros eléctricos.

Se pueden sustituir las SiNP's por ZnO con nanopartículas de silicio embebidas, y caracterizar eléctricamente como recubrimiento en CS para observar cómo influye en la eficiencia.

Por último, se le puede aplicar un tratamiento térmico a la CS con los nanoencapsulados, para intentar provocar una difusión de las SiNP's y el Al_2O_3 para observar cómo influye en los parámetros eléctricos de la CS.

Bibliografía

- [1] A. S. Sarkin, N. Ekren, and Ş. Sağlam, “A review of anti-reflection and self-cleaning coatings on photovoltaic panels,” *Solar Energy*, vol. 199, no. June 2019, pp. 63–73, 2020, doi: 10.1016/j.solener.2020.01.084.
- [2] N. Shanmugam, R. Pugazhendhi, R. M. Elavarasan, P. Kasiviswanathan, and N. Das, “Anti-reflective coating materials: A holistic review from PV perspective,” *Energies (Basel)*, vol. 13, no. 10, pp. 1–93, 2020, doi: 10.3390/en13102631.
- [3] B. Swatowska, T. Stapinski, K. Drabczyk, and P. Panek, “The role of antireflective coatings in silicon solar cells,” *Optica Applicata*, vol. XLI, no. 2, pp. 487–492, 2011.
- [4] Y. H. Ghymn, K. Jung, M. Shin, and H. Ko, “A luminescent down-shifting and moth-eyed anti-reflective film for highly efficient photovoltaic devices,” pp. 18642–18650, 2015, doi: 10.1039/c5nr04440e.
- [5] L. T. Canham, “Silicon quantum wire array fabrication by electrochemical and chemical dissolution of wafers,” *Appl Phys Lett*, vol. 57, no. 10, pp. 1046–1048, 1990, doi: 10.1063/1.103561.
- [6] H. Chang and S. Q. Sun, “Silicon nanoparticles: Preparation, properties, and applications,” *Chinese Physics B*, vol. 23, no. 8, 2014, doi: 10.1088/1674-1056/23/8/088102.
- [7] H. J. Higuera Valenzuela, “Síntesis De Nanopartículas de Silicio Para La Fabricación De Recubrimientos En Celdas Solares,” 2019.
- [8] L. A. Dobrzański, M. Szindler, A. Drygała, and M. M. Szindler, “Silicon solar cells with Al₂O₃ antireflection coating,” *Central European Journal of Physics*, vol. 12, no. 9, pp. 666–670, 2014, doi: 10.2478/s11534-014-0500-9.
- [9] S. Sharma, K. K. Jain, and A. Sharma, “Solar Cells : In Research and Applications — A Review,” no. December, pp. 1145–1155, 2015.

- [10] A. M. Bagher, M. Mahmoud, A. Vahid, and M. Mohsen, “Types of Solar Cells and Application,” vol. 3, no. 5, pp. 94–113, 2015, doi: 10.11648/j.ajop.20150305.17.
- [11] P. Y. Yu and M. Cadona, *Fundamental of semiconductors*. 2012.
- [12] D. A. Neamen, *Semiconductor Physics and Devices Basic Principles*, vol. 9, no. 5. 2006.
- [13] A. Augustyn, “Semiconductor,” *Encyclopaedia Britannica*, 2021.
<https://www.britannica.com/science/semiconductor> (accessed Jul. 12, 2021).
- [14] K. K. Sahu, S. N.; Nanda, “Nanostructure Semiconductors: Physics and Applications,” *Proceedings of the Indian National Science Academy*, vol. 67A, no. 1. pp. 103–130, 2001.
- [15] G. Schmid, *Nanoparticles: From Theory to Application*. Wiley-VCH, 2004.
- [16] D. Bera, L. Qian, T. K. Tseng, and P. H. Holloway, “Quantum dots and their multimodal applications: A review,” *Materials*, vol. 3, no. 4, pp. 2260–2345, 2010, doi: 10.3390/ma3042260.
- [17] T. V. S. Adinarayana, A. Mishra, I. Singhal, and D. V. R. Koti Reddy, “Facile green synthesis of silicon nanoparticles from: Equisetum arvense for fluorescence based detection of Fe(iii) ions,” *Nanoscale Adv*, vol. 2, no. 9, pp. 4125–4132, 2020, doi: 10.1039/d0na00307g.
- [18] T. Yoshida, S. Takeyama, Y. Yamada, and K. Mutoh, “Nanometer-sized silicon crystallites prepared by excimer laser ablation in constant pressure inert gas,” *Appl Phys Lett*, vol. 68, no. 13, pp. 1772–1774, 1996, doi: 10.1063/1.116662.
- [19] J. Knipping, H. Wiggers, B. Rellinghaus, P. Roth, D. Konjhdzic, and C. Meier, “Synthesis of high purity silicon nanoparticles in a low pressure microwave reactor,” *J Nanosci Nanotechnol*, vol. 4, no. 8, pp. 1039–1044, 2004, doi: 10.1166/jnn.2004.149.

- [20] M. Mhadhbi, "Modelling of the High-Energy Ball Milling Process," *Advances in Materials Physics and Chemistry*, vol. 11, no. 01, pp. 31–44, 2021, doi: 10.4236/ampc.2021.111004.
- [21] C. Lam, Y. F. Zhang, Y. H. Tang, C. S. Lee, I. Bello, and S. T. Lee, "Large-scale synthesis of ultrafine Si nanoparticles by ball milling," *J Cryst Growth*, vol. 220, no. 4, pp. 466–470, 2000, doi: 10.1016/S0022-0248(00)00882-4.
- [22] J. R. Heath, "A Liquid-Solution-Phase Synthesis of Crystalline Silicon," *Science (1979)*, vol. 258, no. November, pp. 1131–1133, 1992.
- [23] R. D. Tilley and K. Yamamoto, "The microemulsion synthesis of hydrophobic and hydrophilic silicon nanocrystals," *Advanced Materials*, vol. 18, no. 15, pp. 2053–2056, 2006, doi: 10.1002/adma.200600118.
- [24] J. Wang, S. Sun, F. Peng, L. Cao, and L. Sun, "Efficient one-pot synthesis of highly photoluminescent alkyl-functionalised silicon nanocrystals," *Chemical Communications*, vol. 47, no. 17, pp. 4941–4943, 2011, doi: 10.1039/c1cc10573f.
- [25] M. Stupca, M. Alsalhi, T. Al Saud, A. Almuhanha, and M. H. Nayfeh, "Enhancement of polycrystalline silicon solar cells using ultrathin films of silicon nanoparticle," *Appl Phys Lett*, vol. 91, no. 6, pp. 50–53, 2007, doi: 10.1063/1.2766958.
- [26] K. E. Sapsford, T. Pons, I. L. Medintz, and H. Mattoussi, "Biosensing with luminescent semiconductor quantum dots," *Sensors*, vol. 6, no. 8, pp. 925–953, 2006, doi: 10.3390/s6080925.
- [27] Z. Kang, Y. Liu, and S. T. Lee, "Small-sized silicon nanoparticles: New nanolights and nanocatalysts," *Nanoscale*, vol. 3, no. 3, pp. 777–791, 2011, doi: 10.1039/c0nr00559b.
- [28] N. O'Farrell, A. Houlton, and B. R. Horrocks, "Silicon nanoparticles: Applications in cell biology and medicine," *Int J Nanomedicine*, vol. 1, no. 4, pp. 451–472, 2006, doi: 10.2147/nano.2006.1.4.451.

- [29] M. Iqbal, T. K. Purkait, J. G. C. Veinot, and G. G. Goss, "Benign-by-Design : Synthesis of Engineered Silicon Nanoparticles and their Application to Oil Sands Water Contaminant Remediation," no. November, 2013.
- [30] E. O. Filatova and A. S. Konashuk, "Interpretation of the Changing the Band Gap of Al₂O₃ Depending on Its Crystalline Form: Connection with Different Local Symmetries," *Journal of Physical Chemistry C*, vol. 119, no. 35, pp. 20755–20761, 2015, doi: 10.1021/acs.jpcc.5b06843.
- [31] A. M. Abyzov, "Aluminum Oxide and Alumina Ceramics (review). Part 1. Properties of Al₂O₃ and Commercial Production of Dispersed Al₂O₃," *Refractories and Industrial Ceramics*, vol. 60, no. 1, pp. 24–32, 2019, doi: 10.1007/s11148-019-00304-2.
- [32] J. Houska, J. Blazek, J. Rezek, and S. Proksova, "Overview of optical properties of Al₂O₃ films prepared by various techniques," *Thin Solid Films*, vol. 520, no. 16, pp. 5405–5408, 2012, doi: 10.1016/j.tsf.2012.03.113.
- [33] T. Shirai, H. Watanabe, M. Fuji, and M. Takahashi, "Structural Properties and Surface Characteristics on Aluminum Oxide Powders," *Ceramics Research Lab*, vol. 9, pp. 23–31, May 2009.
- [34] B. R. Muñoz and C. Gómez-aleixandre, "Review of CVD Synthesis of Graphene **," *Chem. Vap. Deposition*, vol. 19, pp. 297–322, 2013, doi: 10.1002/cvde.201300051.
- [35] T. Maruyama and S. Arai, "Aluminum oxide thin films prepared by chemical vapor deposition from aluminum acetylacetonate," *Appl Phys Lett*, vol. 60, pp. 322–323, 1992.
- [36] N. Özer, J. P. Cronin, Y. Yao, and A. P. Tomsia, "Optical properties of sol-gel deposited Al₂O₃ films," *Solar Energy Materials & Solar Cells*, vol. 59, pp. 355–366, 1999.

- [37] L. A. Dobrzański and M. Szindler, "Al₂O₃ antireflection coatings for silicon solar cells," *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, vol. 59, no. 1, pp. 13–19, 2013.
- [38] J. Azadmanjiri, C. C. Berndt, J. Wang, A. Kapoor, and V. K. Srivastava, "Nanolaminated composite materials: Structure, interface role and applications," *RSC Adv*, vol. 6, no. 111, pp. 109361–109385, 2016, doi: 10.1039/c6ra20050h.
- [39] R. Ali, M. R. Saleem, P. Pääkkönen, and S. Honkanen, "Thermo-Optical properties of thin-film TiO₂–Al₂O₃ bilayers fabricated by atomic layer deposition," *Nanomaterials*, vol. 5, no. 2, pp. 792–803, 2015, doi: 10.3390/nano5020792.
- [40] M. P. Gonullu and H. Ates, "The characteristic evolution of TiO₂/Al₂O₃ bilayer films produced by ALD: Effect of substrate type and wide range annealing temperature," *Superlattices Microstruct*, vol. 142, no. April, p. 106529, 2020, doi: 10.1016/j.spmi.2020.106529.
- [41] A. A. Chaaya *et al.*, "Tuning optical properties of Al₂O₃/ZnO nanolaminates synthesized by atomic layer deposition," *Journal of Physical Chemistry C*, vol. 118, no. 7, pp. 3811–3819, 2014, doi: 10.1021/jp411970w.
- [42] N. Y. Garces, D. J. Meyer, V. D. Wheeler, Z. Liliental-Weber, D. K. Gaskill, and C. R. Eddy, "Plasma-assisted atomic layer deposition of nanolaminates for gate dielectric applications," *Journal of Vacuum Science & Technology B, Nanotechnology and Microelectronics: Materials, Processing, Measurement, and Phenomena*, vol. 32, no. 3, p. 03D101, 2014, doi: 10.1116/1.4818254.
- [43] A. Kumar, "Leakage Current Controlling Mechanism Using High K Dielectric + Metal Gate," *International Journal of Information Technology and knowledge*, vol. 5, no. 1, pp. 191–194, 2012.
- [44] T. Waggoner, J. Triska, K. Hoshino, J. F. Wager, and J. F. Conley, "Zirconium oxide-aluminum oxide nanolaminate gate dielectrics for amorphous oxide semiconductor thin-film transistors," *Journal of Vacuum Science & Technology B, Nanotechnology and Microelectronics: Materials, Processing, Measurement, and Phenomena*, vol. 29, no. 4, p. 04D115, 2011, doi: 10.1116/1.3609254.

- [45] E. Härkönen *et al.*, “Corrosion Protection of Steel with Oxide Nanolaminates Grown by Atomic Layer Deposition,” *J Electrochem Soc*, vol. 158, no. 11, pp. 369–378, 2011, doi: 10.1149/2.061111jes.
- [46] D. K. Simon, P. M. Jordan, M. Knaut, T. Chohan, T. Mikolajick, and I. Dirnstorfer, “ALD Al₂O₃ based nanolaminates for solar cell applications,” *2015 IEEE 42nd Photovoltaic Specialist Conference (PVSC)*, vol. 2, no. c, 2015, doi: 10.1109/PVSC.2015.7356401.
- [47] A. Luque and S. Hegedus, *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*. 2003.
- [48] E. Klampaftis, D. Ross, K. R. McIntosh, and B. S. Richards, “Enhancing the performance of solar cells via luminescent down-shifting of the incident spectrum: A review,” *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 93, no. 8, pp. 1182–1194, 2009, doi: 10.1016/j.solmat.2009.02.020.
- [49] J. Day, S. Senthilarasu, and T. K. Mallick, “Improving spectral modification for applications in solar cells: A review,” *Renew Energy*, vol. 132, pp. 186–205, 2019, doi: 10.1016/j.renene.2018.07.101.
- [50] A. Furasova *et al.*, “Resonant Silicon Nanoparticles for Enhanced Light Harvesting in Halide Perovskite Solar Cells,” *Adv Opt Mater*, vol. 6, no. 21, pp. 1–7, 2018, doi: 10.1002/adom.201800576.
- [51] F. I. Chowdhury, A. Alnuaimi, N. El-Atab, M. Nayfeh, and A. Nayfeh, “Enhanced performance of thin-film amorphous silicon solar cells with a top film of 2.85nm silicon nanoparticles,” *Solar Energy*, vol. 125, pp. 332–338, 2016, doi: 10.1016/j.solener.2015.12.030.
- [52] S. G. Dorofeev *et al.*, “On the application of thin films of silicon nanoparticles for increasing solar cell efficiency,” *Semiconductors*, vol. 48, no. 3, pp. 360–368, 2014, doi: 10.1134/S1063782614030105.
- [53] H. R. Rasouli, A. Ghobadi, T. G. Uli soy Ghobadi, H. Ates, K. Topalli, and A. K. Okyay, “Nanosecond pulsed laser ablated sub-10 nm silicon nanoparticles for

- improving photovoltaic conversion efficiency of commercial solar cells,” *Journal of Optics*, vol. 19, no. 10, 2017.
- [54] R. S. Bonilla, B. Hoex, P. Hamer, and P. R. Wilshaw, “Dielectric surface passivation for silicon solar cells: A review,” *Physica Status Solidi (A) Applications and Materials Science*, vol. 214, no. 7, 2017, doi: 10.1002/pssa.201700293.
- [55] F. Werner, W. Stals, R. Görtzen, B. Veith, R. Brendel, and J. Schmidt, “High-rate atomic layer deposition of Al₂O₃ for the surface passivation of Si solar cells,” *Energy Procedia*, vol. 8, no. April, pp. 301–306, 2011, doi: 10.1016/j.egypro.2011.06.140.
- [56] E. Karatepe, M. Boztepe, and M. Çolak, “Development of a suitable model for characterizing photovoltaic arrays with shaded solar cells,” *Solar Energy*, vol. 81, no. 8, pp. 977–992, Aug. 2007, doi: 10.1016/J.SOLENER.2006.12.001.
- [57] Tektronix, “Electrical Characterization of Photovoltaic Materials and Solar Cells with the 4200A-SCS Parameter Analyzer Electrical Characterization of Photovoltaic Materials and Solar Cells with the 4200A-SCS Parameter Analyzer,” pp. 1–20.
- [58] B. H. Hamadani and B. Dougherty, “Solar cell characterization,” pp. 1–18.
- [59] D. P. Birnie, “Spin Coating Technique,” in *Sol-Gel Technologies for Glass Producers and Users*, M. A. Aegerter and M. Mennig, Eds. Boston, MA: Springer US, 2004, pp. 49–55. doi: 10.1007/978-0-387-88953-5_4.
- [60] M. Aliofkhazraei, *Handbook of Nanoparticles*. 2019.
- [61] A. v. Malm and J. C. W. Corbett, “Improved Dynamic Light Scattering using an adaptive and statistically driven time resolved treatment of correlation data,” *Sci Rep*, vol. 9, no. 1, pp. 1–11, 2019, doi: 10.1038/s41598-019-50077-4.
- [62] N. C. Polfer and P. Dugourd, *Laser Photodissociation and Spectroscopy of Mass-separated Biomolecular Ions*. Springer, Cham. doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-01252-0>.

- [63] D. K. Schroder, *Semiconductor Material and Device Characterization Third Edition*, vol. 44, no. 4. 2006. doi: 10.1063/1.2810086.
- [64] LibreTexts, “10.6 Photoluminescence Spectroscopy,” 2019. https://chem.libretexts.org/Courses/Northeastern_University/10%3A_Spectroscopic_Methods/10.6%3A_Photoluminescence_Spectroscopy (accessed Feb. 12, 2020).
- [65] J. F. Moulder, W. F. Stickle, P. E. Sobol, and K. D. Domben, *Handbook of X-Ray photoelectron spectroscopy*. 1992. doi: 10.1002/0470014229.ch22.
- [66] Horiba, “Spectroscopic Ellipsometry: Basic Concepts.” <https://www.horiba.com/ind/spectroscopic-ellipsometry/> (accessed Jan. 12, 2022).
- [67] H. Fujiwara, *Spectroscopic Ellipsometry: Principles and Applications*. John Wiley & Sons, Inc., 2007. doi: 10.1002/9780470060193.fmatter.
- [68] A. J. J. Bos, “Theory of thermoluminescence,” *Radiat Meas*, vol. 41, no. SUPPL. 1, pp. 45–56, 2006, doi: 10.1016/j.radmeas.2007.01.003.
- [69] K. V. R. Murthy, “Thermoluminescence and its applications: A review,” *Defect and Diffusion Forum*, vol. 347, pp. 35–73, 2014, doi: 10.4028/www.scientific.net/DDF.347.35.
- [70] S. Guo, K. Hayakawa, and C. Link, “Evaluation of the Tauc Method for Optical Absorption Edge Determination: ZnO Thin Films as a Model System,” vol. 60, no. 8, pp. 1789–1796, 2016, doi: 10.2337/db10-1371.
- [71] T. F. Scientific, “Oxygen|XPS Periodic Table|Thermo Fisher Scientific-MX,” 2022. <https://www.thermofisher.com/mx/es/home/materials-science/learning-center/periodic-table/non-metal/oxygen.html> (accessed Mar. 14, 2022).
- [72] T. F. Scientific, “Aluminum|XPS Periodic Table|Thermo Fisher Scientific-MX,” 2022. <https://www.thermofisher.com/mx/es/home/materials-science/learning-center/periodic-table/other-metal/aluminium.html> (accessed Mar. 14, 2022).
- [73] F. D. Walker, L. E. Colyott, N. A. Larsen, and S. W. S. McKeever, “The wavelength dependence of light-induced fading of thermoluminescence from α -Al₂O₃:C,”

Radiat Meas, vol. 26, no. 5, pp. 711–718, 1996, doi: 10.1016/S1350-4487(97)82885-5.

- [74] M. L. Chithambo, C. Seneza, and F. O. Ogundare, “Kinetic analysis of high temperature secondary thermoluminescence glow peaks in α -Al₂O₃:C,” *Radiat Meas*, vol. 66, pp. 21–30, 2014, doi: 10.1016/j.radmeas.2014.04.025.
- [75] A. N. Yazici, S. Solak, Z. Öztürk, M. Topaksu, and Z. Yegingil, “The analysis of dosimetric thermoluminescent glow peak of α -Al₂O₃:C after different dose levels by β -irradiation,” *J Phys D Appl Phys*, vol. 36, no. 2, pp. 181–191, 2003, doi: 10.1088/0022-3727/36/2/318.
- [76] J. Haerberle *et al.*, “Ellipsometry and XPS comparative studies of thermal and plasma enhanced atomic layer deposited Al₂O₃-films,” *Beilstein Journal of Nanotechnology*, vol. 4, no. 1, pp. 732–742, 2013, doi: 10.3762/bjnano.4.83.