



"El saber de mis hijos  
hará mi grandeza"

UNIVERSIDAD DE SONORA  
DIVISIÓN DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES  
DEPARTAMENTO DE FÍSICA



"El saber de mis hijos  
hará mi grandeza"

Propiedades ópticas, electrónicas y eléctricas de películas delgadas  
semiconductoras de CdS y CdS:Eu sintetizadas por baño químico

TESIS

Que para obtener el título de:

LICENCIADO EN FÍSICA

PRESENTA:

Sael Beltran Torres

# 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**

Agradezco infinitamente a mi familia, en especial a mis padres, ya que sin su amor y sin su apoyo incondicional esto no fuera posible.

A mis directores de tesis por mostrarme el camino de la investigación y por su confianza en llevar a cabo este trabajo.

A mis sinodales de tesis que se tomaron el tiempo de estar aquí para calificar mi examen profesional.

A todos mis maestros que alguna vez tuve en la Licenciatura en Física de la Universidad de Sonora.

## Contenido

0. Resumen.....	6
0.1 Antecedentes.....	6
1. Marco Teórico .....	7
1.1. Semiconductores.....	7
1.1.1. Modelo de Kronig-Penney.....	8
1.1.2. Clasificación de los materiales según la teoría de bandas .....	12
1.1.3. Clasificación de los Semiconductores .....	13
1.1.4. Tierras raras.....	15
1.2. Depósito por baño químico.....	17
1.2.1. Generalidades del Método.....	17
1.2.2. Constante del Producto de Solubilidad ( $K_{ps}$ ).....	17
1.2.3. Compuestos Utilizados como Fuente de Ion Cadmio y Ion Azufre .....	18
1.2.4. Formación de Complejos y Constantes de Estabilidad ( $K_f$ ) .....	20
1.2.5. Crecimiento Ion por Ion .....	21
1.2.6. Crecimiento por Formación de Hidróxidos .....	22
2. Objetivos .....	28
2.1. Objetivo General .....	28
2.2. Objetivos Particulares .....	28
3. Técnicas de caracterización.....	29
3.1. Espectroscopía UV-VIS .....	29
3.1.1. Ley de Beer-Lambert .....	29
3.1.2. Coeficiente de absorción.....	31
3.1.3. Índice de refracción.....	32
3.1.4. Coeficiente de Reflexión .....	34
3.2. Técnica para obtener alta resistencia eléctrica ( $10^9 \Omega$ ) .....	35
4. Desarrollo Experimental.....	38
4.1. Material y Equipo Utilizado para el Depósito de Películas de CdS.....	38
5. Resultados .....	41
5.1. Espectros de Transmisión.....	41
5.2. Espectros de Absorción .....	42
5.3. Espectros de Absorción y Transmisión.....	43
5.4. Espectros de Reflexión, Absorción y Transmisión.....	44

5.5. Banda de Energía Prohibida .....	45
5.6. Índice de refracción de las películas de CdS y CdS:Eu.....	46
5.7. Coeficiente de extinción de las películas de CdS y CdS:Eu.....	47
5.8. Profundidad de penetración de la luz ( $\Delta_p$ ).....	48
5.9. Resistividad Eléctrica.....	49
6. Conclusiones.....	50
6.1. Perspectivas .....	51
7. Referencias.....	52

## 0. Resumen

El objetivo del presente trabajo fue sintetizar películas delgadas semiconductoras de sulfuro de Cadmio (CdS) y CdS dopadas con diferentes concentraciones de Europio (Eu) (CdS:Eu) utilizando la técnica de baño químico. Todas las películas fueron caracterizadas para obtener sus propiedades ópticas, electrónicas y eléctricas.

Se obtuvieron los espectros de transmisión y absorción de dichas películas con el fin de calcular las propiedades ópticas y electrónicas. Los espectros de absorción fueron utilizados para obtener los coeficiente de extinción, la banda de energía prohibida de todas las películas delgadas de CdS:Eu y CdS utilizando el modelo de Tauc y la profundidad de penetración de la luz visible. Con los espectros de transmisión y absorción se calcularon los espectros de reflexión de las muestras. Los espectros de reflexión fueron utilizados para calcular los índice de refracción de todas las películas delgadas semiconductoras de CdS y CdS:Eu. Finalmente se midieron las resistencia eléctrica sin iluminación de todas las películas de CdS:Eu las cuales se utilizaron para calcular la resistividad eléctrica.

### 0.1. Antecedentes

Durante décadas, la física de semiconductores ha sido un área de inmenso interés para los científicos, debido a sus aplicaciones en diferentes campos que incluyen optoelectrónica, fuentes de detección de luz y celdas solares. La investigación sobre diversos materiales semiconductores realizada mediante métodos teóricos y experimentales ha generado una gran confianza en los avances tecnológicos. Los semiconductores pertenecen al grupo II-VI tienen un fuerte impacto en la remodelación de la nanotecnología, ya que tienen amplias aplicaciones en el campo de la energía y las aplicaciones fotográficas. Se obtienen combinando elementos del grupo II (Zn, Cd) y VI (S, Se). Los materiales semiconductores de los grupos II-VI son de interés ya que funcionan principalmente en la región visible de la luz y tienen banda prohibida directa. El Sulfuro de Cadmio (CdS) es uno de los semiconductores de la familia II-VI que muestra un comportamiento óptico y conductivo favorable. Sirve como material de capa para celdas solares de heterunión y se vuelve atractivo debido a sus usos en los dispositivos nanotecnológicos actuales [1].

El estudio y manejo de semiconductores hechos a base de Sulfuro de Cadmio no es algo nuevo en la actualidad. Dentro de este ámbito de investigación tecnológica, el CdS ha sido un material de interés debido al valor energético de su banda prohibida en bulto (*bulk*) (2.42 eV a 300 K). Además, debido a su alta transparencia permite ser utilizado en aplicaciones que utilizan dispositivos optoelectrónicos, por ejemplo, celdas solares. El CdS también ha sido utilizado en áreas como laser, sensor y fotodetector [1].

El análisis estructural muestra que las películas delgadas de CdS realzaron su calidad cuando fueron dopadas con Europio hasta un 10 % de su peso atómico. Cuando se realizó

dopaje de mayor porcentaje la estructura de la película delgada empezó a mostrar distorsión. El tamaño de los cristalitas disminuyó de 36.2 nm a 32.4 nm a medida que los niveles de dopaje de Europio incrementaron hasta un 10 % de su peso atómico [1].

El análisis morfológico mostro que un aumento de dopaje está relacionado con la variación de la morfología de la superficie de la película al formarse granos más pequeños. También se encontró una disminución en el valor de la banda prohibida de 2.58 a 2.47 eV al dopar desde 0 a 10 % de su peso atómico. En la parte óptica, un dopaje mayor a 10 at.% dio como resultado una transmitancia máxima del 68% a una longitud de onda de 820 nm, lo cual significó un aumento en la transparencia de la película[1].

En cuanto al análisis eléctrico, el dopaje con Europio hasta un 6 % de su peso atómico aumento la densidad de portadores de carga de las películas delgadas de CdS de  $4.38 \times 10^{13} \text{cm}^{-3}$  a  $2.46 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$  y disminuyó la resistividad de  $2.59 \times 10^4 \Omega \text{cm}$  a  $5.85 \times 10^3 \Omega \text{cm}$ . Después de esa cantidad de dopaje las propiedades eléctricas empezaron a empeorar [1].

En general, el dopaje moderado con Europio en las películas delgadas de Sulfuro de Cadmio mejoró tanto las propiedades ópticas, así como las propiedades eléctricas, siendo este dopaje deseable al momento de desarrollar dispositivos optoelectrónicos.

# 1. Marco Teórico

## 1.1. Semiconductores

Los semiconductores son materiales que funcionan como un conductor o como un aislante dependiendo de algunos factores, como la radiación electromagnética, la presión o la temperatura del ambiente en el que se encuentre.

Para entender los principios físicos de los semiconductores tenemos que conocer como están colocados los átomos que conforman dicho material. En el núcleo del átomo se encuentran protones, con carga positiva y los neutrones, solo con masa, no tienen carga eléctrica. Fuera del núcleo y girando alrededor de él, en las llamadas órbitas, se encuentran los electrones, con la misma carga que los protones, pero negativa.

Cualquier átomo tiene el mismo número de protones en su núcleo que electrones girando en órbitas alrededor del núcleo. La carga positiva de los protones se anula con la negativa de los electrones, por eso el átomo, en su estado normal, tiene carga eléctrica nula (no tiene carga).

Los electrones son las partículas que realmente importan para estudiar la conducción eléctrica. La corriente eléctrica es un movimiento de electrones. Si somos capaces de mover los electrones de los átomos de un material de un átomo a otro, conseguiremos generar corriente eléctrica por él. Este material se convertirá en conductor.

Hay materiales en los que no podemos mover los electrones de sus átomos nunca, estos serán los aislantes.

Los electrones en un átomo están divididos en orbitas o capas. Los electrones que necesitan menos energía para abandonar el átomo son los que están en la banda de valencia, llamados electrones de valencia, los cuales están en la órbita más externa del átomo. Cada una de estas orbitas tiene asociada una banda de energía, la cual es la misma energía que se necesita suministrarle a un electrón para hacerlo subir de orbita, pasándolo a otra banda asociada a esa capa.

Para que la conducción suceda es necesario liberar a los electrones de valencia de su banda de valencia y suministrarles energía suficiente para que lleguen a la banda de conducción, que es el espacio donde los electrones se mueven libremente a través de la red de átomos creando una corriente eléctrica. Esa energía suficiente de la que se habla es la energía que corresponde a la banda prohibida, la cual está en medio de la banda de valencia y la banda de conducción.

En los materiales aislantes la banda prohibida es muy grande, les cuesta mucho a los electrones llegar a la banda de conducción; en los materiales conductores la banda



prohibida es prácticamente inexistente, como consecuencia es fácil que los electrones lleguen a la banda de conducción [2], [3].

### 1.1.1. Modelo de Kronig-Penney

Este modelo propuesto por Ralph Kronig un físico de origen alemán y estadounidense que realizó importantes contribuciones en la cuántica y espectroscopia, dentro de sus contribuciones destacan el descubrimiento del spin y contribuciones a la teoría sobre la espectroscopia de rayos x, por otro lado tenemos a William George Penney un matemático de origen Inglés, profesor de física y matemáticas en el Imperial College de Londres, él desempeñó un papel protagónico en el desarrollo del programa nuclear de Gran Bretaña [4].

El modelo de Kronig-Penney fue de los primeros intentos formales para describir el comportamiento de los electrones en presencia de potenciales periódicos, como podía ser el de una estructura cristalina de un metal o un semiconductor, dicho modelo se planteaba la idea de asumir los iones de un cristal metálico como una sucesión de barreras de potencial periódicos de altura  $V_0$  como el que podemos observar a continuación:

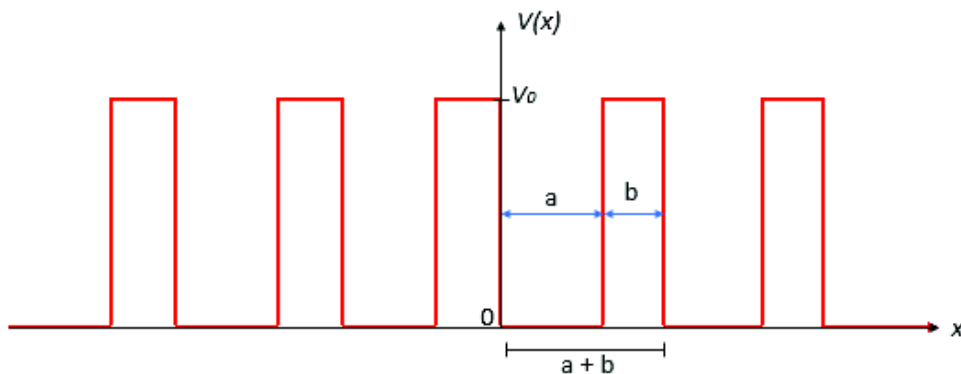


FIGURA I.1.1.1.- BARRERAS DE POTENCIAL PERIÓDICO.

Se resuelve la ecuación de Schrödinger en dos regiones, la primera es  $0 < x < a$ , donde solo consideramos la energía cinética ya que en esta región la energía potencial es igual a cero, por otro lado, tenemos la región  $-b < x < 0$  correspondiente a la barrera de potencial, por lo que partiremos de la ecuación de Schrödinger del sistema:

$$-\frac{\hbar}{2m} \frac{d^2\psi}{dx^2} + V(x)\psi = E\psi \quad (\text{I. 1. 1. 1})$$

Para la región de  $0 < x < a$  donde el potencial  $V = 0$ , la ecuación de Schrodinger queda de la siguiente manera:

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} + \alpha\psi = 0 \quad \text{con} \quad \alpha^2 = \frac{2mE}{\hbar^2} \quad (\text{I. 1. 1. 2})$$

Por otro lado, para la región  $-b < x < 0$  donde se encuentra una barrera de potencial  $V = V_0$ , en este caso la ecuación de schrodinger queda de la siguiente forma:

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} - \beta\psi = 0 \quad \text{con} \quad \beta^2 = \frac{2m(E - V_0)}{\hbar^2} \quad (\text{I. 1. 1. 3})$$

La solución a la ecuación de Schrodinger para cada una de las regiones antes mencionadas, serán soluciones que podemos expresar mediante el teorema de Bloch, el cual establece que la función de onda para una partícula sometida a potenciales periódicos la podemos expresar con una función de onda plana que está siendo modulada por un término periódico que es característico del potencial. Por lo que dichas funciones tendrán la siguiente forma:

$$\psi_{nk_x}(x) = e^{ikx} U_{nk_x}(x) \quad \text{Teorema de Bloch} \quad (\text{I. 1. 1. 4})$$

Donde  $U_{nk_x}(x)$  representa el termino que modula la onda plana  $e^{ikx}$ , a partir de estas podemos describir el movimiento de un electrón el cual se desplaza por un arreglo cristalino, sustituimos (4) en (2) y (3)

$$U''(x) + 2ikU'(x) + (\alpha^2 - k^2)U = 0 \quad 0 < x < a \quad (\text{I. 1. 1. 5})$$

$$U''(x) + 2ikU'(x) - (\beta^2 - k^2)U = 0 \quad -b < x < 0 \quad (\text{I. 1. 1. 6})$$

Resolviendo las ecuaciones (5) y (6), obtenemos las funciones de onda para cada una de las regiones, las cuales se cumple para el resto de los potenciales.

$$\psi(x) = Ae^{i(\alpha-k)x} + Be^{-i(\alpha+k)x} \quad 0 < x < a \quad (\text{I. 1. 1. 7})$$

$$\psi(x) = Ce^{(\beta+ik)x} + De^{-i(\beta+ik)x} \quad -b < x < 0 \quad (\text{I. 1. 1. 8})$$

Debemos de tener en cuenta que  $A, B, C$  y  $D$  son constantes escogidas tales que,  $U(x)$  y  $U'(x)$  sean continuos cuando  $x = 0$  y  $x = a$ , y por la periodicidad del potencial también debe cumplirse para  $U(a) = U(-b)$  y  $U'(a) = U'(-b)$ , con estas condiciones de frontera podemos expresar el siguiente sistema de ecuaciones:

$$A + B = C + D$$

$$i(\alpha - k)A - i(\alpha + k)B = (\alpha - ik)C - (\alpha + k)D$$

$$Ae^{i(\alpha-k)a} + Be^{-i(\alpha+k)a} = Ce^{-(\beta+ik)b} + De^{(\beta+ik)b}$$

$$i(\alpha - k)Ae^{i(\alpha-k)a} - i(\alpha + k)Be^{-i(\alpha+k)a} = (\beta + ik)Ce^{-(\beta+ik)b} - (\beta + ik)De^{(\beta+ik)b}$$

La solución no trivial del sistema de ecuaciones es la siguiente:

$$\frac{\beta^2 - \alpha^2}{2\beta\alpha} \text{Senh}(\beta b) \text{Sen}(aa) + \text{Cosh}(\beta b) \text{Cosh}(aa) = \text{Cos}[k(a + b)] \quad (\text{I. 1. 1. 9})$$

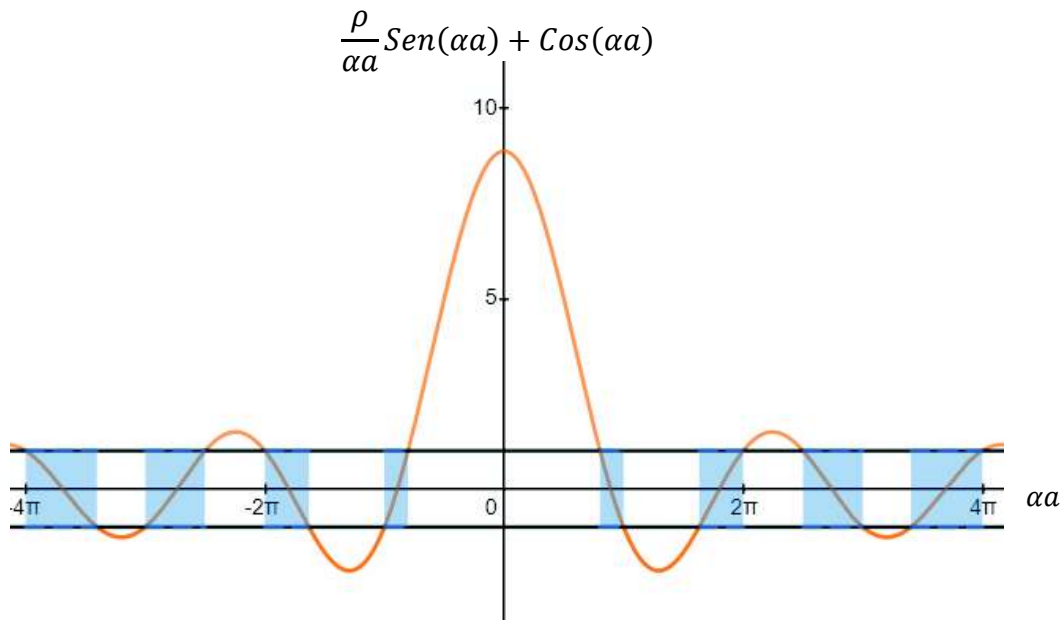
Esta ecuación la podemos simplificar si el potencial periódico se aproxima como funciones delta, tal que  $V_0 \rightarrow \infty$  al mismo tiempo que hacemos  $b \rightarrow 0$ , pero conservando el producto de  $V_0 b$  constante, de esta forma como  $V_0 \gg E$  entonces logramos aproximar  $\beta \approx \frac{2mV_0}{\hbar^2}$ , por lo que  $\text{Cosh}(\beta b) \rightarrow 1$ , además por consecuencia de  $V_0 \gg E$  también podemos observar que el termino  $[(\beta^2 - \alpha^2)/2\beta\alpha] \text{Senh}(\beta b) \approx (\beta^2/2\beta\alpha) \text{Senh}(\beta b)$ , sin embargo podemos aplicar la aproximación de ángulos pequeños para  $\text{Senh}(\beta b) \approx \beta b$

cuando  $b \rightarrow 0$ , por lo que todo ese término se simplifica a  $(\beta^2 b/2\alpha) \text{Sen}(\alpha a)$ , de esta forma podemos escribir la siguiente expresión:

$$\text{Cos}(\alpha a) = \frac{\rho}{\alpha a} \text{Sen}(\alpha a) + \text{Cos}(\alpha a) \quad (\text{I. 1. 1. 10})$$

Donde  $\rho = 2\beta^2 b a/2$  es cual se le denomina parámetro de impermeabilidad y está relacionado con la intensidad del potencial de las barreras, donde si  $\rho \rightarrow \infty$  entonces es el caso de un material aislante, en contraparte si  $\rho \rightarrow 0$  entonces estamos hablando de un material conductor.

La ecuación (20) representa la energía de los electrones en la dirección  $x$ , sin embargo, no todos los valores de energía están permitidos ya que los valores permitidos estarán determinados por el parámetro  $\rho$ , ya que  $\text{Cos}(ka)$  solo puede tomar valores entre  $\pm 1$  y si  $\rho > 0$ , entonces esto genera bandas de energía permitidas.



**FIGURA I.1.1.1.- GRÁFICO DE  $\frac{\rho}{\alpha a} \text{Sen}(\alpha a) + \text{Cos}(\alpha a)$  DONDE  $\rho = \frac{5\pi}{2}$ , PODEMOS OBSERVAR QUE LAS BANDAS SOMBRADAS REPRESENTAN LOS VALORES DE LAS ENERGÍAS PERMITIDAS PARA EL ELECTRÓN.**

### **1.1.2. Clasificación de los materiales según la teoría de bandas**

A partir de las bandas energéticas obtenidas se puede hacer una clasificación de los materiales según sea el ancho de sus bandas de energía permitidas, de las cuales podemos distinguir entre, la banda de valencia la cual es la banda energética donde se encuentran los electrones ligados a su correspondiente átomo, por otro lado tenemos la banda de conducción la cual es la banda energética en la cual los electrones que cuentan con esa energía tienen un enlace muy débil y estos pueden separarse fácilmente de su átomo, sin embargo existe una sección intermedia en la cual existen valores energéticos prohibidos para los electrones, a esta banda se le conoce como banda de energías prohibidas, a partir de ella podemos distinguir entre materiales conductores aislantes o semiconductores [5].

Para que exista el fenómeno de conducción es necesario que los electrones de la banda de valencia pasen a la banda de conducción para lo cual deben adquirir energía suficiente para superar la banda de energías prohibidas, a este fenómeno se le conoce como "band gap".

En los materiales aislantes el ancho de la banda prohibida es muy grande por lo que resulta muy complicado que los electrones pasen de la banda de la banda de valencia a la banda de conducción ya que necesitarían mucha energía para que esto suceda. Estos son materiales que tienen muy baja conductividad eléctrica, por lo que oponen una gran resistencia al paso de corriente eléctrica a través de ellos, estos materiales son generalmente denominados no metales entre ellos se encuentran el carbono, flúor, nitrógeno entre otros [5].

Por otro lado, los materiales conductores tienen su banda de valencia y su banda de conducción casi traslapados por lo que resulta muy fácil que exista un transporte de electrones de la banda de valencia a la de conducción y que los electrones se puedan desplazarse con facilidad a través de la estructura cristalina. Estos son materiales generalmente metálicos los cuales incrementan su conductividad eléctrica conforme baja

su temperatura permitiendo el libre flujo de corriente eléctrica a través de ellos, algunos ejemplos son metales como el oro, la plata, cobre entre muchos otros.

Finalmente tenemos a los semiconductores los cuales tienen un ancho de banda prohibida intermedio, entre .1 y 4 eV, por lo cual las transiciones de su banda de valencia a su banda de conducción son relativamente fáciles de ocurrir, pero es necesario añadirle energía a los electrones para que esta transición ocurra. Estos materiales que comparten características tanto de aislantes como de conductores son los denominados semiconductores, los cuales incrementan su conductividad eléctrica conforme aumenta su temperatura, estos materiales generalmente son los metaloides o aleaciones con estos, algunos ejemplos son el silicio, germanio y antimonio por mencionar algunos. A continuación, podemos observar una representación de la clasificación de los tipos de materiales antes mencionados mediante la teoría de bandas [5].

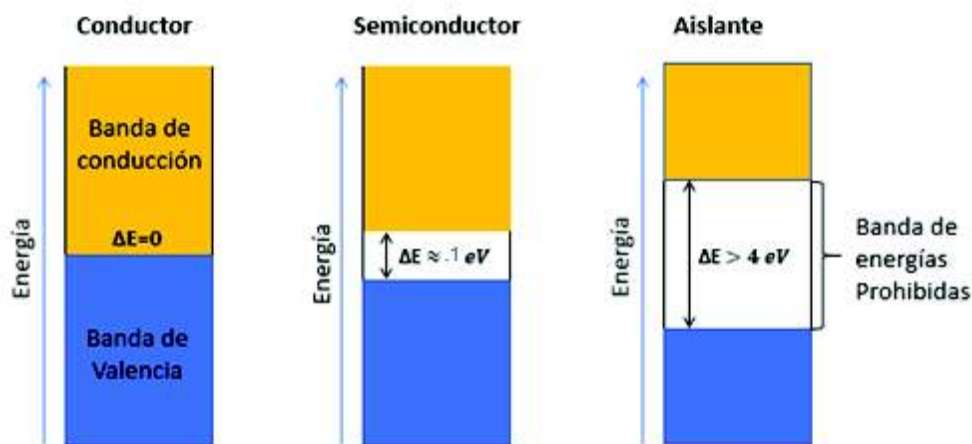
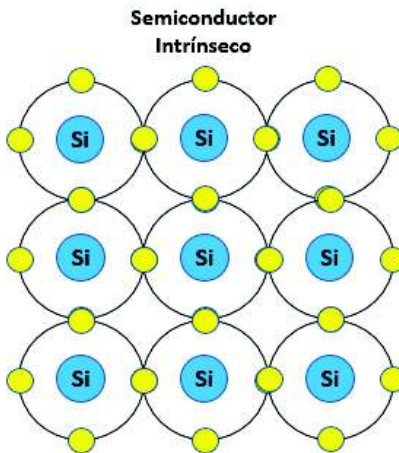


FIGURA I1.1.1.- CLASIFICACIÓN DE LOS MATERIALES SEGÚN SU BANDA DE ENERGÍAS PROHIBIDAS.

### 1.1.3. Clasificación de los Semiconductores

Los semiconductores a su vez suelen ser clasificados en dos grandes tipos, los semiconductores extrínsecos e intrínsecos, siendo los primeros los que están compuestos por átomos de un solo elemento formando estructuras cristalinas, mientras que los

semiconductores extrínsecos son aquellos que cuentan con impurezas de otros átomos en su arreglo cristalino a lo que se le conoce como dopaje [5].



**FIGURA I.1.3.1.- ESQUEMA DE LA CONFIGURACIÓN DE UN SEMICONDUCTOR INTRÍNSECO.**

Por sus propiedades eléctricas los semiconductores fueron una gran revolución durante la segunda mitad del siglo pasado gracias en su implementación en numerosos dispositivos electrónicos, como lo son los transistores y los diodos. Los semiconductores que están compuestos por estructura cristalinas de un solo átomo son denominados semiconductores intrínsecos, algunos ejemplos son el germanio (Ge) y el Silicio (Si), siendo el silicio la base de la electrónica moderna gracias a su abundancia y sus propiedades [5].

Sin embargo, con el paso del tiempo se descubrió que se podía mejorar las propiedades eléctricas de los semiconductores añadiendo impurezas en su estructura cristalina, a lo que se denomina dopaje, y consiste en incorporar átomos de otro elemento para mejorar las propiedades eléctricas del material, estos materiales semiconductores dopados se les denomina semiconductores extrínsecos, según el dopaje podemos distinguir entre los materiales:

- Semiconductores tipo P: los cuales se caracterizan por contar con impurezas con átomos que otorgan deficiencia de electrones a la red cristalina tal es el caso del boro, Indio (In) o Galio (Ga), estos conducen a una deficiencia de portadores de carga a lo que se le conoce como “huecos” por lo que este tipo de material acepta

electrones que no pertenezcan a su red cristalina, es por esta razón que se les denominan donadores de huecos.

- **Semiconductores tipo N:** son aquellos que cuentan con impurezas que causan un exceso de portadores de carga (electrones), algunos ejemplos son el fosforo (P), el Arsénico (As) o el Antimonio (Sb), estos otorgan un exceso de electrones que se podrán desplazar a través de la red cristalina mejorando sus propiedades eléctricas. En las figuras podemos observar ejemplos de semiconductores tipo N y tipo P respectivamente:

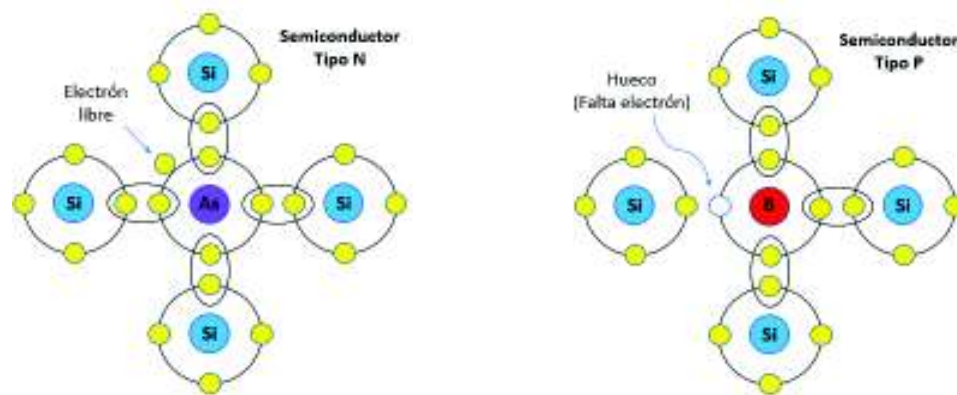


FIGURA I.1.3.1.- ESQUEMA DE EJEMPLOS DE SEMICONDUCTOR EXTRÍNSECO DE TIPO-P Y TIPO-N.

#### 1.1.4. Tierras raras

Las tierras raras con un conjunto de elementos químicos de la tabla periódica, específicamente los quince lantánidos, así como también el Escandio y el Itrio.

Los 17 elementos de tierras raras son cerio (Ce), disprosio (Dy), erbio (Er), europio (Eu), gadolinio (Gd), holmio (Ho), lantano (La), lutecio (Lu), neodimio (Nd), praseodimio (Pr), prometio (Pm), samario (Sm), escandio (Sc), terbio (Tb), tulio (Tm), iterbio (Yb) e itrio (Y). A menudo se encuentran en minerales con torio (Th) y, con menos frecuencia, uranio (U). Todos los elementos del conjunto de tierras raras son metales.

Los metales y las aleaciones de tierras raras que los contienen se utilizan en muchos dispositivos que las personas usan todos los días, como memoria de computadora, DVD, baterías recargables, teléfonos celulares, convertidores catalíticos, imanes, iluminación fluorescente y mucho más.

Muchas baterías recargables están hechas con compuestos de tierras raras. La demanda de baterías está impulsada por la demanda de dispositivos electrónicos portátiles como



teléfonos celulares, lectores, computadoras portátiles y cámaras. Las tierras raras se usan como catalizadores, fósforos y compuestos de pulido. Estos se utilizan para el control de la contaminación del aire, pantallas iluminadas en dispositivos electrónicos y el pulido de vidrio de calidad óptica.

## 1.2. Depósito por baño químico

Deposito por baño químico (CDB), o deposición de solución química (CSD), es un método para depositar películas delgadas y nanomateriales, descritos por primera vez en 1869. En 1933 Bruckman deposita sulfuro de plomo (II) de película delgada (PbS) por CBD. Esta técnica se utiliza ampliamente para depositar capas de amortiguamiento en las células fotovoltaicas de película delgada.

La principal ventaja de CDB es que requiere en su forma más simple sólo recipientes de solución y dispositivos de montaje de sustrato, haciéndola una técnica sencilla, económica y escalable. La deposición por baño químico produce películas homogéneas que presentan buena adherencia al sustrato con buena reproducibilidad mediante un proceso relativamente simple [6]. El crecimiento de películas delgadas depende fuertemente de las condiciones de crecimiento, como la duración de la deposición, la composición y temperatura de la solución, y la naturaleza topográfica y química del sustrato.

Cuando se utiliza con sulfuros metálicos, se obtienen películas semiconductoras con propiedades eléctricas, estructurales y ópticas apropiadas para ser usadas en dispositivos electrónicos [7].

### 1.2.1. Generalidades del Método

Para sintetizar una película por DBQ, es necesario establecer un sistema de reacciones y un conjunto de condiciones experimentales, que permitan obtener el depósito de forma lenta y gradual sobre un sustrato, evitando la precipitación del material. Para evitar que el material se precipite y lograr que se forme la película sobre el sustrato se debe cumplir que el *producto de las concentraciones iónicas en disolución que no corresponde a condiciones de equilibrio (Q)* debe ser igual o muy ligeramente superior a la constante del *producto de solubilidad (Kps)* del material a obtener: es decir  $Q \geq Kps$ .

### 1.2.2. Constante del Producto de Solubilidad (Kps)

Se sabe que todos los materiales son más o menos solubles en algún disolvente; siendo el agua el disolvente universal. La solubilidad de las sustancias de moderada a gran solubilidad en este disolvente se expresa a través del concepto de **Constante del Producto de Solubilidad** el cual se define de la siguiente manera: *Es el producto de las concentraciones molares de los iones constituyentes, cada uno elevado a la potencia de su*

coeficiente estequiométrico en la ecuación de equilibrio, esto con el fin de evaluar cuantitativamente la solubilidad de tales sustancias muy poco solubles.

El proceso de disolución de estas sustancias poco solubles puede ser representado mediante una ecuación química de la siguiente manera (tomando como ejemplo el CdS mismo):



Esta ecuación representa al equilibrio que existe entre la parte del CdS que se disuelve y la parte que queda sin disolver. Como en todo equilibrio químico, a una temperatura dada, se puede determinar la constante del producto de solubilidad, que en este caso se define como:

$$K_{ps}\text{CdS} = [\text{Cd}^{2+}_{(ac)}] [\text{S}^{2-}_{(ac)}] \quad (1.2.2.2)$$

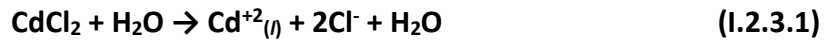
Para el CdS a temperatura ambiente la  $K_{ps}=10^{-29}$ . Este valor es extremadamente bajo, de lo que se deduce que el CdS es un material muy poco soluble, y por tanto, por muy pequeñas las concentraciones de las sales que contengan a los iones  $\text{Cd}^{2+}$  y  $\text{S}^{2-}$  que se mezclen, su producto alcanza el valor indicado, con lo que de inmediato el equilibrio (I) se desplaza hacia la izquierda, precipitando incontroladamente el CdS.

En el caso de los iones metálicos, esto se logra generalmente por formación de compuestos complejos con sustancias que se agregan en el sistema a tal fin. Como formadores de complejos para el CdS se han empleado el **Amoniaco**, **Citrato de Sodio**, Tartrato de Sodio y Tiosulfato entre los más comunes.

### 1.2.3. Compuestos Utilizados como Fuente de Ion Cadmio y Ion Azufre

**Fuente de ion Cadmio:** Para la obtención del ion cadmio se han utilizado diversas sales, tales como Nitrato de Cadmio ( $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2$ ), Sulfato de Cadmio ( $\text{CdSO}_4$ ), Acetato de Cadmio ( $\text{Cd}(\text{CH}_3\text{COO})_2$ ) entre otras sales. En nuestro trabajo se utilizó Cloruro de Cadmio ( $\text{CdCl}_2$ ) como fuente para obtener los iones  $\text{Cd}^{+2}$ .

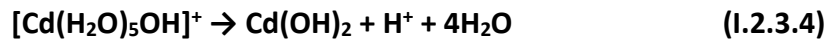
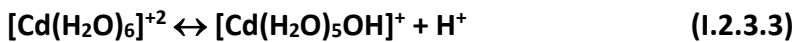
La ecuación 1.2.3.1 representa el estado del  $\text{CdCl}_2$  en solución acuosa.



La ecuación I.2.3.1 implica que todo el Cd está disponible en forma ionizada, sin embargo sabemos que esta especie no se encuentra libre como  $\text{Cd}^{+2}$ , sino en su forma hidratada, como se muestra en la ecuación I.2.3.2.



Los iones Cadmio en su estado hidratado, se comportan de acuerdo a las siguientes ecuaciones químicas.

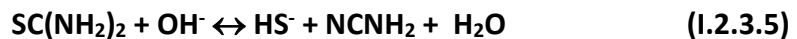


La solución fuente de Cd se compone fundamentalmente de especies hidratadas de Cd ionizado e Hidróxido de cadmio. Para facilitar la notación continuaremos utilizando  $\text{Cd}^{+2}$  para representar la forma ionizada del Cadmio interactuando con la solución de reacción.

**Fuente de ion Azufre:** Para obtener el ion sulfuro se emplean compuestos que contienen al átomo de azufre enlazado covalentemente a otros átomos. Ejemplo de estos compuestos son la tiourea ( $\text{SC}(\text{NH}_2)_2$ ) y varios de sus derivados, la tioacetamida ( $\text{H}_3\text{C-CS-NH}_2$ ).

Los procesos que llevan a la formación de ion sulfuro libre a partir de estos compuestos, por lo general son procesos de hidrólisis que tiene lugar en disolución acuosa. Podemos ejemplificar la hidrólisis de la tiourea, proceso que se favorece en un medio básico.

En la solución de crecimiento, los iones  $\text{S}^{-2}$  se obtienen luego de la hidrólisis completa de la Tiourea, la cual se lleva a cabo bajo condiciones de pH alcalino y calentamiento.



#### 1.2.4. Formación de Complejos y Constantes de Estabilidad ( $K_f$ )

La formación de complejos tiene lugar cuando un átomo, generalmente metálico, tiene orbitales de alta energía desocupado e interactúa con una especie química que tiene electrones libres, o sea, no comprometidos en ningún enlace con otros átomos, que puede donar o compartir con el átomo metálico.

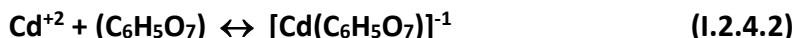
El cadmio tiene la estructura electrónica siguiente  $[\text{Kr}] 4d^{10} 5s^2$ . Cuando se forma el ion  $\text{Cd}^{2+}$  se remueven los dos electrones  $5s$ , quedando entonces este orbital  $s$  disponible para aceptar electrones de otra especie que actúe como donante electrónico, como es el caso del amoníaco ( $:\text{NH}_3$ ), cuya estructura electrónica presenta un par de electrones libres sobre el átomo de nitrógeno. Entonces se forma un nuevo enlace entre el ion cadmio y el amoníaco que da lugar a la formación de una especie compleja o complejo, simplemente. Este proceso en equilibrio se lleva a cabo de la siguiente manera:

**El Citrato de Sodio** ( $\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7$ ) en una disolución acuosa en equilibrio es representado por la siguiente ecuación.



de la ecuación I.2.4.1 podemos apreciar que de esta reacción se obtiene los iones Citratos.

La reacción de formación de complejo con el ion Citrato es mostrado por la siguiente ecuación.



En la reacción los iones  $\text{Cd}^{+2}$  libres interaccionan con iones Citratos ( $\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7$ ) formando iones complejos que regulan su concentración en el baño químico.

Como todo proceso de equilibrio químico, el proceso (I.2.4.2) de formación del complejo Citrato es reversible, por lo que si un agente externo hace disminuir la concentración de ion  $\text{Cd}^{2+}$  en la disolución, según el principio de Le Chatelier, el

complejo se destruye gradual y controladamente para mantener una concentración de  $\text{Cd}^{2+}$  en el equilibrio que satisfaga el valor de su constante. De esta manera, el complejo Citrato se convierte en un reservorio de liberación controlada de iones cadmio libres para participar en la formación del sulfuro de cadmio. que pueden ocurrir durante un DBQ.

### **1.2.5. Crecimiento Ion por Ion**

Para que se realice la nucleación en un proceso que transcurra sin formación de partículas en la disolución, se requiere que haya sobre saturación de las concentraciones iónicas respecto al valor del *Kps*, pero que ésta no sea excesiva, pues de lo contrario la precipitación se realizará en todo el volumen en vez de sobre las superficies deseadas.

Las superficies de los sustratos, así como de los recipientes de reacción, introducen heterogeneidades de muy diversas clase que favorecen energéticamente la atracción de los iones sobre esta superficie, por lo que de hecho pueden considerarse un catalizador de estos procesos. De este modo, cuando se produce la nucleación ion por ion, se obtiene el depósito sobre las superficies con preferencia en el seno de la disolución, como ocurre en el otro mecanismo que discutiremos posteriormente.

Una vez que se han formado los primeros núcleos del depósito deseado, tiene lugar el crecimiento de la película, en el cual es un factor de primordial importancia la manera en que ésta se adhiere a la superficie deseada. Se ha demostrado que las fuerzas de Van der Waals son las más importantes fuerzas que intervienen en la adhesión de un depósito con independencia de que puedan existir otras interacciones químicas específicas entre el depósito y el sustrato en las etapas del crecimiento, o que existan interacciones químicas y electrostáticas entre las superficies de los cristales individuales que se forman en la nucleación. Generalmente son suficientes las Fuerzas de Van der Waals para la adhesión de las películas. Una prueba de ello es que se pueden obtener películas razonablemente bien adheridas sobre sustratos

aparentemente inertes tales como ciertos polímeros, y hasta sobre teflón, bien conocido por ser un material inerte e hidrófobo.

Una vez que la nucleación se ha iniciado sobre el sustrato, se facilita el crecimiento de la película a partir de estos puntos. Los cristales entonces comienzan a crecer hasta que su crecimiento es bloqueado por algún proceso, tal como el impedimento estérico de cristales vecinos o la absorción de sustancias de la disolución que inactiven la superficie del cristal.

En la Figura 1.2.5.1 se muestra el esquema de nucleación y crecimiento mediante el proceso de ion a ion.

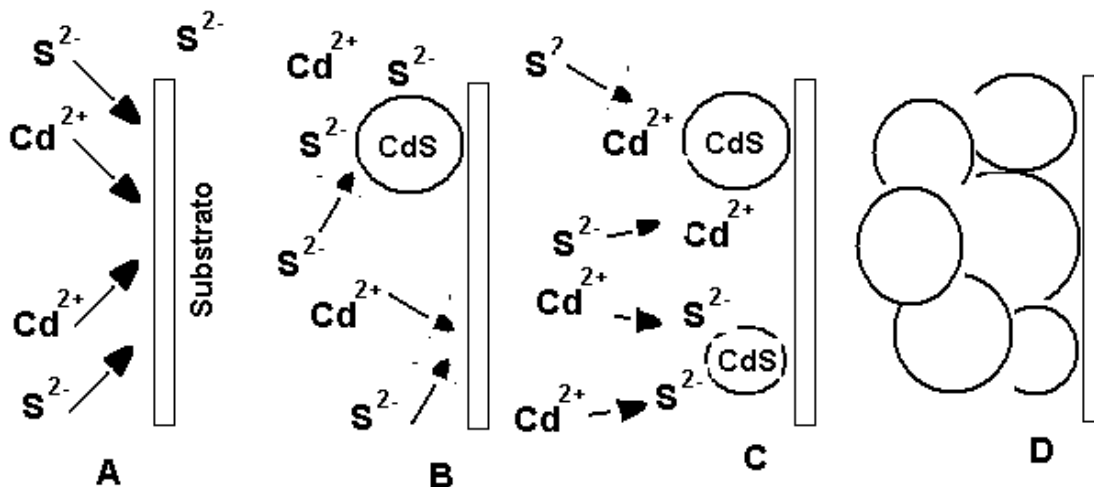


Figura 1.2.5.1.- Esquema de los pasos involucrados en el mecanismo de ion a ion. A: Difusión de los iones  $\text{Cd}^{2+}$  y  $\text{S}^{2-}$  hacia el sustrato. B: Nucleación de los iones sobre el sustrato formando núcleos de CdS. C: Crecimiento de los núcleos de CdS por adsorción de los iones  $\text{Cd}^{2+}$  y  $\text{S}^{2-}$  presentes en la disolución y formación de nuevos núcleos cristalinos. D: Crecimiento continuo de los cristales, los que se adhieren unos a otros por fuerzas de Van der Waals.

### 1.2.6. Crecimiento por Formación de Hidróxidos

En dependencia del sistema de reacción y de las condiciones seleccionadas, en algunos procesos de depósito puede tener lugar la formación inicial de hidróxidos metálicos en forma coloidal. Esto implica la presencia inicial de una fase sólida en el sistema, lo cual

hace mucho más simple el proceso de nucleación, puesto que el crecimiento transcurrirá por sustitución de una fase sólida por otra.

En este caso, la etapa inicial del proceso es la adhesión de las partículas sólidas del hidróxido a la superficie, lo cual se logra mediante las interacciones de Van der Waals ya mencionadas. El hidróxido se transforma por reacción química en el calcogenuro, digamos CdS, formándose un depósito primario de clusters de CdS. En la medida que procede la reacción de transformación del  $\text{Cd}(\text{OH})_2$  en CdS, se van adhiriendo a la superficie libre o a las ya depositadas, nuevas partículas del material.

Puesto que la nucleación inicial del hidróxido ocurre homogéneamente en la disolución, el CdS también se forma homogéneamente y precipita en el seno de la disolución en gran extensión, sobre todo cuando se forman *clusters* de gran tamaño.

Es relevante entonces tener en cuenta que la formación de la película tiene lugar solamente cuando las partículas de mayor energía superficial, o sea, las de menor tamaño (nanocristales aislados o pequeños agregados), alcanzan la superficie del sustrato antes de formar grandes agregados.

Puede comprenderse que la agregación y formación del precipitado puede controlarse mediante una selección inteligente de los parámetros de crecimiento.

En la figura I.2.6.1 puede verse un esquema del proceso de nucleación y crecimiento por el mecanismo de hidróxidos.



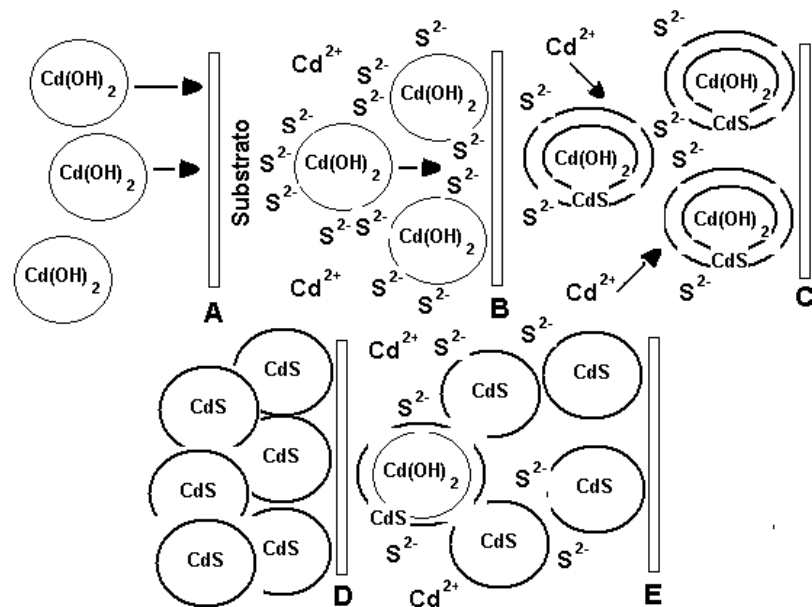


Figura I.2.6.1.- Esquema de los pasos involucrados en el mecanismo de hidróxidos. A: difusión de partículas coloidales hacia el sustrato. B: reaccionan con los iones sulfuro produciendo el cambio del CdOH en CdS. C: esta reacción ocurre tanto en las partículas coloidales adheridas a la superficie del sustrato, como en las que están dispersas en la disolución. D: la reacción continúa hasta que la mayoría del hidróxido se convierte en CdS. E: las partículas CdS así formadas se adhieren unas a otras dando lugar a una película de CdS, pero usualmente las partículas no adheridas también se agregan y precipitan en la disolución.

Existe una diferencia esperable entre el tamaño de cristales que se obtiene mediante cada tipo de proceso. En el crecimiento por vía de hidróxidos, como el depósito inicial está determinado por clusters de tamaño dado, la transformación hacia el calcogenuro no cambia apreciablemente el tamaño del cristal durante el tiempo del depósito. En cambio, en la nucleación ion a ion, se van agregando nuevos iones al núcleo inicial, con lo que el tamaño de partícula aumenta durante el depósito.

Para terminar este tema, es conveniente analizar brevemente la influencia que puede tener el sustrato en el proceso de nucleación y crecimiento de las películas en el método de DBQ.

### **I.2.7.- Influencia del Sustrato en los Procesos de Nucleación y Crecimiento**

El método de DBQ en principio puede emplearse para depositar películas sobre cualquier superficie, a menos que ésta sea reactiva en la disolución del baño, y por tanto inestable, o que el sustrato se encuentre sucio. Una importante ventaja del método es que la forma del sustrato no es relevante. Sin embargo, la naturaleza del sustrato es importante para el propósito de obtener películas adherentes. Al igual que en otros métodos de depósito, los sustratos ásperos son mejores, probablemente debido a la gran área real de contacto por unidad de área geométrica de superficie.

Los óxidos, entre los que se incluyen los vidrios ordinarios, los óxidos conductores transparentes (TCO por sus siglas en inglés) y también la silica, a pesar de su inercia química, son muy activos en sus propiedades de adsorción.

### **I.2.8.- Cinética del Deposito por Baño Químico (DBQ)**

Considerando el tiempo que puede tomar un depósito, algunos pueden completarse en unos pocos minutos, en tanto otros pueden demorar horas y a veces días, hasta no llegar a completarse. Esto es muy lógico si se tiene en mente las diferentes formas en que puede evolucionar el sistema de reacción. Sin embargo, existen ciertas características generales de la cinética del proceso de DBQ que son independientes del mecanismo de reacción que tiene lugar. Es una práctica muy común referirse a la forma en que varía el espesor de una película con el tiempo y con frecuencia esta determinación se identifica como el “estudio cinético” de un crecimiento. En la Figura I.2.8.1 se puede observar una curva típica de variación de espesor con el tiempo de depósito [7].

En la mayoría de los casos, se observa un período de inducción al inicio del proceso durante el cual no se produce crecimiento, luego una región aproximadamente lineal que corresponde con el pleno proceso de crecimiento y posteriormente una región de saturación o terminación, en la cual no hay más crecimiento.

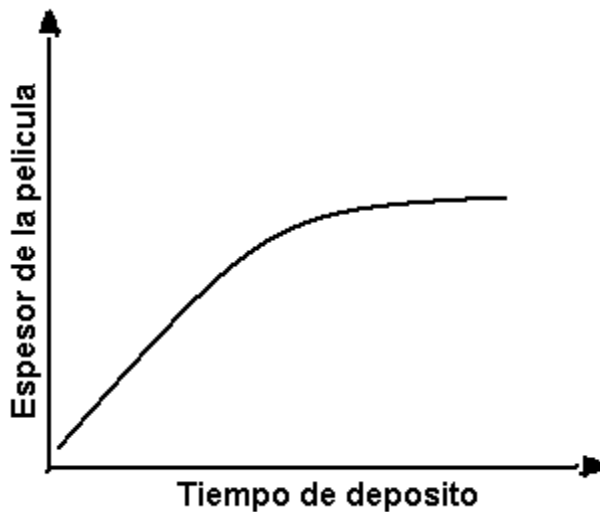


Figura I.2.8.1.- Curva característica de la variación del espesor con el tiempo de depósito.

Curiosamente, este tipo de comportamiento se encuentra con independencia del tipo de mecanismo que esté teniendo lugar.

En el crecimiento ion a ion este comportamiento es muy fácil de explicar. El depósito comienza sólo cuando la concentración del calcogenuro es lo suficientemente alta para permitir que ocurra la nucleación (período de inducción); luego tiene lugar el crecimiento sobre estos núcleos inicialmente formados en conjunto con nuevas nucleaciones. Posteriormente, cuando la sustancia limitante se va terminando, el crecimiento comienza a hacerse más lento, hasta que finalmente se detiene.

En el mecanismo de hidróxidos, mientras que los períodos de crecimiento y terminación pueden ser similarmente explicados, es menos obvio el periodo de inducción, ya que las partículas primarias de hidróxido pueden comenzar a adsorberse inmediatamente después de la inmersión del sustrato en la disolución de depósito. Sin embargo, hay pruebas de que el crecimiento puede tardar varios minutos. Aunque la razón no está clara, ello puede estar relacionado con las partículas de hidróxido a menudo no forman películas hasta que no hay una absorción primaria sobre la superficie. Entonces, sólo cuando comienza la reacción de formación del calcogenuro, comienza a desarrollarse la formación de la película. Existen estudios sobre la velocidad de depósito que han sugerido que el

paso controlante de la velocidad de reacción es químico y no la difusión de las partículas hacia el sustrato.

Las películas obtenidas por DBQ pueden llegar a alcanzar espesores de varios cientos de nanómetros, aunque en algunos casos pueden llegar a alcanzar las micras. En el caso del CdS una película de unos 20 nm no es visible al ojo humano. Pueden obtenerse películas más gruesas por inmersiones sucesivas del sustrato en nuevos baños, pero hay que señalar que cuando las películas son muy gruesas, comienzan a desprenderse del sustrato.

## 2. Objetivos

### 2.1. Objetivo General

Sintetizar películas delgadas semiconductoras de CdS y CdS dopadas con diferente concentraciones de Europio (CdS:Eu) utilizando la técnica de baño químico y estudiar sus propiedades ópticas, electrónicas y eléctricas.

### 2.2. Objetivos Particulares

- Depositar películas de CdS y CdS:Eu con diferente molaridad de Eu (0.005, 0.01, 0.03 y 0.05 M) sobre sustratos de vidrio Corning utilizando el método de baño químico.
- Obtener los espectros de transmisión y absorción de todas las películas delgadas semiconductoras.
- A partir de los espectros de transmisión y absorción calcular los espectros de Reflexión de todas las muestras de CdS:Eu y CdS.
- A partir de los espectros de reflexión obtener los índices de refracción ( $n$ ) de todas las películas semiconductoras.
- Utilizar los espectros de absorción para calcular la banda de energía prohibida utilizando el método de Tauc , los coeficientes de extinción ( $k$ ) y la profundidad de penetración de la luz visible de todas las películas de CdS:Eu y CdS.
- calcular la resistividad eléctrica de cada una de las películas delgadas semiconductoras a partir de la resistencia eléctrica obtenida de un aparato diseñado y construido en el departamento de física el cual se basa en un amplificador operacional y capacitor.

### 3. Técnicas de caracterización

#### 3.1. Espectroscopía UV-VIS

La espectroscopia ultravioleta-visible (UV/VIS) es una espectroscopia de emisión de fotones también llamada espectroscopia de absorción. Utiliza luz de las regiones visible, ultravioleta cercana (UV) e infrarroja cercana (NIR), es decir, una longitud de onda entre 380nm y 780nm. La radiación absorbida por las moléculas desde esta región del espectro provoca transiciones electrónicas que pueden ser cuantificadas.

El espectro de absorción de una materia muestra la fracción de la radiación electromagnética incidente que un material absorbe dentro de un rango de frecuencias. Cada elemento químico posee líneas de absorción en algunas longitudes de onda, hecho que está asociado a las diferencias de energía de sus distintos orbitales atómicos.

De manera similar, el espectro de transmisión muestra la región de la radiación que un material emite luego de ser irradiado, debido a un átomo o molécula que realiza una transición de un estado de alta energía a un estado de menor energía. Hay muchas transiciones de electrones posibles para cada átomo, y cada transición tiene una diferencia de energía específica. Esta colección de diferentes transiciones, que conducen a diferentes longitudes de onda radiadas, conforma un espectro de emisión. El espectro de emisión de cada elemento es único. Por lo tanto, la espectroscopia se puede utilizar para identificar los elementos en materia de composición desconocida. De manera similar, los espectros de emisión de moléculas pueden usarse en el análisis químico de sustancias.

Es posible encontrar el valor de la banda prohibida de un semiconductor utilizando la absorbancia del material irradiado. Un método comúnmente utilizado es el Método de Tauc.

##### 3.1.1. Ley de Beer-Lambert

La intensidad del haz de luz se va atenuando a medida que atraviesa la muestra debido a la absorción de las moléculas de la muestra (Figura 3.1.1.1). El ritmo de absorción depende de la intensidad inicial de luz y de la concentración de moléculas. De esta manera, cuando un haz de luz de intensidad  $I$  recorre una distancia  $dL$  en una muestra con una concentración de moléculas  $c$ , se produce una atenuación de dicha intensidad a medida que va atravesando la muestra y está dada por:

$$dI = -kcl dL \text{ ---3.1.1.1}$$

La constante  $k$  se denomina coeficiente de extinción. Integrando la expresión anterior obtenemos:

$$\frac{dI}{I} = -kcdL$$

$$\int_{I_0}^{I_f} \frac{dI}{I} = -kc \int_0^L dL$$

$$\ln \frac{I_f}{I_0} = -kcL \text{ ----3.1.1.2}$$

lo cual da lugar a la **ley de Beer-Lambert** para la absorción que relaciona la intensidad a la salida de la muestra  $I_f$ , con la intensidad inicial  $I_0$ , la concentración de moléculas y la distancia recorrida  $L$  por la luz en la muestra:

$$I_f = I_0 \exp(-kcL) \text{ ----3.1.1.3}$$

El espectrofotómetro, en lugar de la intensidad, mide la absorbancia **A** que se define por:

$$A = \log \frac{I_0}{I_f} \text{ ----3.1.1.4}$$

La utilización de la absorbancia al realizar los espectros tiene la ventaja de ser directamente proporcional a la concentración de moléculas en la muestra.

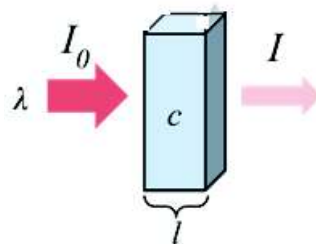
Cuando se hace incidir un haz de luz en el rango UV-Vis, se mide la intensidad inicial del haz y también la intensidad final del haz después de pasar por la muestra (en nuestro caso son películas delgadas semiconductoras transparentes) como se muestra en la Figura III.2.1, podemos definir la transmitancia (**T**):

$$T = \frac{I}{I_0} \text{ ----3.1.1.5}$$

La absorbancia (ecuación III.2.4) se puede poner en función de la transmitancia quedando:

$$A = \log \frac{1}{T} = -\log T \text{ ----3.1.1.6}$$

En el caso de los semiconductores, los fotones que serán absorbidos tendrán la energía necesaria para llevar a los electrones del nivel de mayor energía de la banda de valencia al nivel de menor energía de la banda de conducción.



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

Figura 3.1.1.1.- Muestra la luz incidente  $I_0$  sobre un material y su relación con la transmitancia.

Para encontrar que tanto penetra la luz monocromática que viaja en la dirección  $x$  en un medio podemos reescribir la ecuación 3.1.1.3 como:

$$I_f = I_0 \exp(-\alpha x) \text{ ---- 3.1.1.7}$$

Donde  $\alpha$  es el coeficiente de absorción, sabemos que la intensidad de la luz es directamente proporcional al cuadrado del campo eléctrico por lo que la ecuación III.1.1.7 puede tomar la siguiente forma:

$$E^2 = E_0^2 \exp(-\alpha x) \text{ ---- 3.1.1.8}$$

Si queremos saber la profundidad de penetración cuando el campo eléctrico decae  $\frac{1}{e}$ , es decir que la intensidad de la luz decae aproximadamente el 37%, solamente introducimos la condición  $E = \frac{E_0}{e}$  en la ecuación 3.1.1.8:

$$\left(\frac{1}{e}\right)^2 E_0^2 = E_0^2 \exp(-\alpha x)$$

$$\left(\frac{1}{e}\right)^2 = \exp(-\alpha x)$$

$$\frac{1}{e} = \{\exp(-\alpha x)\}^{\frac{1}{2}}$$

$$\frac{1}{e} = \frac{1}{e^{\left(\frac{\alpha x}{2}\right)}}$$

$$x = \frac{2}{\alpha} = 2\Delta_p \text{ ---- 3.1.1.9}$$

Donde  $\Delta_p$  es la profundidad de penetración de la luz.

### 3.1.2. Coeficiente de absorción

Sea la radiación una onda plana de frecuencia  $\nu$  que se propaga en la dirección  $x$  con una velocidad  $v$

$$E = E_0 \exp\left\{i 2\pi \nu \left[t - \left(\frac{x}{v}\right)\right]\right\} \text{ ----3.1.2.1}$$



La velocidad de propagación a través de un semiconductor que tiene un índice complejo de refracción

$$n_c = n - ik \text{ ----3.1.2.2}$$

Está relacionada con la velocidad de propagación en el vacío,  $c$ , por

$$v = \frac{c}{n_c} \text{ ----3.1.2.3}$$

Por lo tanto,

$$\frac{1}{v} = \frac{n}{c} - \frac{ik}{c} \text{ ----3.1.2.4}$$

Sustituyendo la ecuación III.1.2.4 en la ecuación III.1.2.1 se obtiene:

$$E = E_0 \exp(i2\pi vt) \exp(-i2\pi x n/c) \exp(2\pi vk x/c) \text{ ----3.1.2.5}$$

Hay que tener presente que el último término de la ecuación (III.1.2.5) es un factor de amortiguación. La fracción de la potencia incidente disponible después de propagar una distancia  $x$  a través de un material con una conductividad  $\sigma$  es:

$$\frac{P(x)}{P(0)} = \frac{\sigma E^2(x)}{\sigma E^2(0)} = \exp(-4\pi vk x/c) \text{ ----3.1.2.6}$$

En términos del coeficiente de absorción  $\alpha$  obtenemos:

$$\frac{P(x)}{P(0)} = \exp(-\alpha x) \text{ ----3.1.2.7}$$

Por lo tanto

$$\alpha = 4\pi vk/c \text{ ----3.1.2.8}$$

Donde  $k$ , la parte imaginaria de  $n_c$  se denomina "coeficiente de extinción".

### 3.1.3. Índice de refracción

Radiación que se propaga a través de un semiconductor homogéneo sin carga que tiene una permeabilidad magnética  $\mu$ , una constante dieléctrica  $\epsilon$  y una conductividad eléctrica  $\sigma$  obedece las ecuaciones de Maxwell:

$$\nabla \times E = \frac{-\mu}{c} \frac{dH}{dt} \text{ ----3.1.3.1}$$

$$\nabla \times H = \frac{4\pi\sigma}{c} E + \frac{\epsilon}{c} \frac{dE}{dt} \text{ ----3.1.3.2}$$

$$\nabla \cdot H = 0 \text{ ----3.1.3.3}$$

$$\nabla \circ E = 0 \text{ ----3.1.3.4}$$

Aplicando el rotacional a la ecuación (III.1.3.1) obtenemos:

$$\nabla x \nabla x E = -\frac{\mu}{c} \frac{d(\nabla x H)}{dt} \text{ ----3.1.3.5}$$

Sustituyendo la ecuación 3.1.3.2 en la ecuación 3.1.3.5 obtenemos:

$$\nabla x \nabla x E = -\frac{\mu 4\pi\sigma}{c^2} \frac{dE}{dt} - \frac{\mu\epsilon}{c^2} \frac{d^2E}{dt^2} \text{ ----3.1.3.6}$$

Sabemos que  $\nabla x \nabla x E = \nabla(\nabla \circ E) - \nabla^2 E$  y sustituyéndola en la ecuación 3.1.3.6 podemos reescribir:

$$\frac{d^2E}{dx^2} = \frac{\mu 4\pi\sigma}{c^2} \frac{dE}{dt} - \frac{\mu\epsilon}{c^2} \frac{d^2E}{dt^2} \text{ ----3.1.3.7}$$

Ahora, si introducimos la ecuación (3.1.3.1) en la ecuación diferencial (3.1.3.7) obtenemos:

$$-\frac{(2\pi\nu)^2}{v^2} = i2\pi\nu \frac{\mu}{c} 4\pi\sigma - \frac{\mu\epsilon}{c^2} (2\pi\nu)^2 \text{ 3.1.3.8}$$

La cual se puede reducir a:

$$\frac{1}{v^2} = \frac{\mu\epsilon}{c^2} - i \frac{\mu 2\sigma}{vc^2} \text{ ----3.1.3.9}$$

Para todos los semiconductores se considera que  $\mu = 1$ ; así la ecuación (3.1.3.9) puede ser reescrito:

$$\frac{1}{v^2} = \frac{\epsilon}{c^2} - i \frac{2\sigma}{vc^2} \text{ ----3.1.3.10}$$

de las ecuaciones (III.1.2.2) y (III.1.2.4) podemos obtener la siguiente relación:

$$\frac{1}{v^2} = \frac{n_c^2}{c^2} = \frac{(n-ik)^2}{c^2} = \frac{(n^2-k^2)}{c^2} - \frac{i2nk}{c^2} \text{ ----3.1.3.11}$$

Igualando las ecuaciones (3.1.3.10) y (3.1.3.11) obtenemos:

$$n^2 - k^2 = \epsilon \text{ ----3.1.3.12}$$

$$n k = \frac{\sigma}{v} \text{ ----3.1.3.13}$$

Ahora podemos resolver n y para k:

$$n^2 - k^2 = (n + k)(n - k)$$

$$\epsilon^2 = (n^2 + k^2 + 2nk)(n^2 + k^2 - 2nk)$$

$$\epsilon^2 = (n^2 + k^2)^2 - (2nk)^2$$

$$\epsilon^2 = (n^2 + k^2)^2 - \left(\frac{2\sigma}{v}\right)^2$$

$$n^2 + k^2 = \left[\epsilon^2 - \left(\frac{2\sigma}{v}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}} \text{----3.1.3.14}$$

Haciendo uso de las ecuaciones (3.1.3.12) y (3.1.3.14) podemos obtener:

$$n^2 = \frac{1}{2} \epsilon \left\{ \left[ 1 + \left(\frac{2\sigma}{v\epsilon}\right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} + 1 \right\} \text{----3.1.3.15}$$

$$k^2 = \frac{1}{2} \epsilon \left\{ \left[ 1 + \left(\frac{2\sigma}{v\epsilon}\right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} - 1 \right\} \text{----3.1.3.16}$$

Cuando  $\sigma$  tiende a cero, como en los materiales aislantes,  $n$  tiende a  $\sqrt{\epsilon}$  y el coeficiente de extinción  $k$  tiende a cero. De ahí que el material se vuelva transparente.

### 3.1.4. Coeficiente de Reflexión

Para incidencia normal, el coeficiente de reflexión que afecta la intensidad de la radiación está dada por:

$$R = \frac{(n-1)^2 + k^2}{(n+1)^2 + k^2} \text{----3.1.4.1}$$

Cuando  $k = 0$ , es decir, en el rango transparente, entonces:

$$R = \frac{(n-1)^2}{(n+1)^2} \text{----2.1.4.2}$$

Si  $n = 0$ ,  $R = 1$  y el semiconductor refleja totalmente.

En ambos casos, cuando  $n$  o  $k$  es nulo, la ecuación. (4-17) requiere que  $\sigma = 0$ , es decir, que el medio no tenga pérdidas. Si  $\sigma$  no es cero, el material tampoco es perfectamente transparente ni perfectamente reflectante, y la radiación experimenta

pérdidas. Las pérdidas se manifiestan a través del coeficiente de absorción  $\alpha$  como vimos en la Ec. (III.3.1.8). Por lo tanto

$$k = \frac{c\alpha}{4\pi v} \text{ ----3.1.4.3}$$

Substituyendo el valor de k de la ecuación (III.3.2.13) a la ecuación anterior obtenemos:

$$\alpha = \frac{4\pi\sigma}{nc} \text{ ----3.1.4.4}$$

Cuando  $\sigma$  es grande, las Ecs. (III.3.2.15) y (III.3.2.16) muestran que n y k aumentan y tienden a ser iguales. También en ese caso, la reflectancia se aproxima a la unidad. Despejando n de la ecuación (III.2.3.2):

$$R = \frac{(n - 1)^2}{(n + 1)^2}$$

Sacando raíz cuadrada en ambos lados y despejando n obtenemos:

$$\sqrt{R} = \frac{(n - 1)}{(n + 1)}$$

$$n = \frac{(1+\sqrt{R})}{(1-\sqrt{R})} \text{ ----3.1.4.5}$$

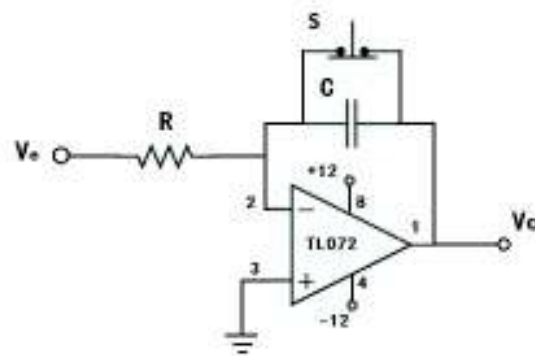
La ecuación (III.1.4.5) se puede utilizar para encontrar n a partir de los espectros de reflexión de un semiconductor transparente.

### 3.2. Técnica para obtener alta resistencia eléctrica ( $10^9 \Omega$ )

La obtención de la resistencia eléctrica de los semiconductores es una de las medidas más útiles que pueden hacerse en el laboratorio. Existen diferentes métodos para medir la resistencia eléctrica de los materiales, si la resistencia a medir se encuentra en el rango de  $10 \Omega$  a  $10 M\Omega$  se utiliza un multímetro digital ya que es el intervalo de estos medidores. Pero si la resistencia de los semiconductores se encuentra fuera de este rango, entonces se debe utilizar un aparato más específico. Uno de los aparatos utilizados para medir resistencias mayores a  $10 M\Omega$  es el conocido amplificador Lock-In. Este es un

instrumento ideal para la medición de voltajes del orden de nano-voltios y corrientes en el orden de pico-amperios.

Para medir la resistencia eléctrica de nuestras películas delgadas semiconductoras se utilizo un aparato relativamente sencillo el cual fue desarrollado en el Laboratorio de Electrónica de la Universidad de Sonora. En la Figura 3.2.1 se muestra el circuito que nos permite medir resistencia hasta  $10^9 \Omega$  El circuito lo forman un amplificador operacional TL072 que tiene una resistencia de entrada típica de  $10^{14} \Omega$ . Otra ventaja de este amplificador es su muy bajo ruido, lo que significa una salida más limpia en comparación con otros amplificadores operacionales, un condensador de mica de 1nF de capacitancia, un interruptor y finalmente una resistencia eléctrica R, dicha resistencia eléctrica es la que presenta nuestra película delgada semiconductoras al paso de la corriente.



**Figura 3.2.1.- Circuito Integrador**

Este circuito es un amplificador operacional configurado como integrador. La relación entre el voltaje de salida  $V_0$  y el voltaje de entrada  $V_e$  con el interruptor  $s$  abierto es:

$$V_0 = \frac{-1}{RC} \int V_e dt \text{ ----3.2.1}$$

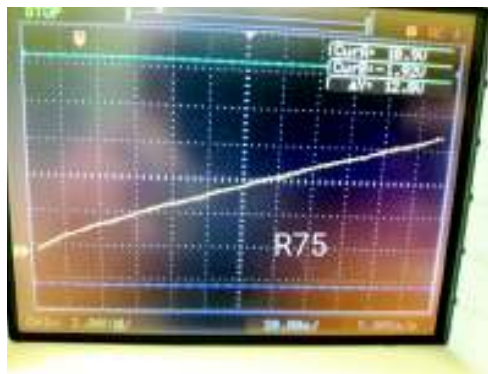
Si el voltaje de entrada es constante y si el interruptor  $s$  se abre en  $t = 0$ , el voltaje de salida inicia un proceso de carga lineal en el capacitor  $C$  que termina cuando el amplificador está saturado. Si el voltaje de entrada es igual a  $-V_e$  la salida será:

$$V_0 = (V_e / RC) t \text{ ----} 3.2.2$$

Esta relación es cierta siempre que  $V_0$  no alcance el nivel de saturación, esta saturación se alcanza aproximadamente a los 11 voltios cuando el voltaje de entrada es de 12v.

Si se grafica el voltaje de salida vs tiempo en un osciloscopio en un modo de barrido lento, se observa una línea recta como lo muestra la Figura III.2.2 cuya pendiente  $m$  está dada por:

$$m = \Delta V / \Delta t \text{ ----} 3.4.3$$



**Figura III.2.2.- El Osciloscopio muestra como varía el voltaje de salida del Amplificador Operacional en función del tiempo.**

Si sustituimos esta ecuación en la ecuación anterior y despejamos R obtenemos:

$$R = V_e / mC \text{ ----} 3.4.4$$

Si la pendiente  $m$  es medida y conociendo que  $V_e = 12$  volts y  $C = 1nF$  el valor de resistencia puede ser calculada.

Finalmente, para calcular la resistividad eléctrica de nuestras películas delgadas semiconductoras se hacen uso de la siguiente ecuación:

$$\rho = R A / L$$

Donde  $\rho$  es la resistividad eléctrica,  $R$  es la resistencia eléctrica,  $A$  es la sección transversal de la película y  $L$  es la longitud de la película.

## **4. Desarrollo Experimental**

En este trabajo se depositaron por DBQ películas delgadas de CdS y CdS dopadas con diferentes concentraciones de Europio (Eu) (CdS:Eu). La formulación utilizada para la elaboración de las películas de CdS es libre de amoníaco. El amoníaco es un compuesto altamente volátil, tóxico y nocivo al medio ambiente, en su lugar se usa solamente Citrato de Sodio como agente complejante, es decir que esta formulación es más amigable al medio ambiente que la formulación convencional utilizada para la elaboración de dichas películas, además se agrega Hidróxido de Potasio la cual funciona como fuente de ion  $\text{OH}^-$ , estos iones hidroxilos son utilizados para hidrolizar la tiourea.

Tanto la película de CdS como las CdS:Eu fueron depositadas sobre sustratos de vidrio a  $40\text{ }^\circ\text{C}$  y 3 hrs de reacción.

Las propiedades ópticas de todas las películas fueron determinadas por espectroscopia de transmisión.

La descripción de deposición de las películas semiconductoras de CdS y CdS:Eu se hace en este capítulo, así como la preparación de los sustratos, las características de los materiales empleados.

### **4.1. Material y Equipo Utilizado para el Depósito de Películas de CdS**

El Sulfuro de cadmio (CdS) es un semiconductor binario de banda directa de los grupos II-VI, con un valor de banda de energía prohibida en bulto y a temperatura ambiente de 2.42 eV. Gracias a que tiene una banda de energía prohibida ancha y buen coeficiente de transmisión óptica, la luz lo atraviesa sin que se tenga apreciable pérdida de fotones. Es utilizado como capa ventana en celdas solares de películas delgadas (CSPD). El CdS presenta una estructura hexagonal altamente estable  $\alpha$ -CdS en la Wurtzita, pero también se puede obtener en la fase cúbica metaestable  $\beta$ -CdS.

Para la deposición de películas de CdS por DBQ se utilizaron sustratos de vidrio Corning, y como contenedores de la reacción, vasos de precipitado de vidrio de 100 ml. Los sustratos y los contenedores fueron previamente lavados con agua y jabón, inmediatamente después se enjuagaron con agua deionizada.

Para regular la temperatura de reacción en la deposición de las películas de CdS se utilizó un baño de agua de temperatura controlada Lauda Brinkman, ecoline REZZO.

Los reactivos utilizados para la fabricación de las películas de CdS y CdS:Eu por DBQ son mostrados en la tabla 4.1.A:

**Tabla 4.1.A – Tabla que muestra los reactivos utilizados tanto para la creación de las películas delgadas de CdS como para el conjunto de películas delgadas de CdS dopadas con Europio.**

Reactivos	CdS	CdS:Eu
<b>Cloruro de cadmio Hidratado</b> , CdCl <sub>2</sub> .2.5H <sub>2</sub> O, cristales. Reactivo Baker 79.7%,PM = 228.34	✓	✓
<b>Cloruro de europio</b>		✓
<b>Citrato de Sodio Hidratado</b> , C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> O <sub>7</sub> Na <sub>3</sub> .2H <sub>2</sub> O, cristales. Reactivo Baker 99.1%,PM = 294.10	✓	✓
<b>Hidróxido de Potasio</b> , KOH, perlas. Reactivo Baker, 89.13%, PM = 56.11	✓	✓
<b>Tiourea</b> , (NH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> CS, cristales. Reactivo Baker 99.2%, PM = 76.12	✓	✓

La formulación química desarrollada en esta investigación, utiliza precursores químicos comunes, fáciles de manejar. La secuencia de reactivos es la siguiente: En un vaso de precipitado de vidrio de 100 ml se agregan 10 ml de CdCl<sub>2</sub> (0.05 M), se utilizó el mismo volumen de cloruro de europio para diferentes concentraciones, luego se agregan 20 ml de Na<sub>3</sub>C<sub>6</sub>H<sub>5</sub>O<sub>7</sub> (0.5 M), 5 ml de KOH 0,3 M), 10 ml de CS (NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub> (0,5 M), finalmente se añaden 25 ml de agua desionizada hasta alcanzar un volumen final de 80 ml.

El tiempo de reacción y la temperatura fueron de 3 horas. y 40 °C, respectivamente. En este trabajo, las muestras elaboradas fueron etiquetadas como M0 = CdS, M1 = CdS: Cr (0.005 M), M2 = CdS: Cr (0.01 M), M3 = CdS: Cr (0.03 M), M4 = CdS: Cr ( 0.05 M).



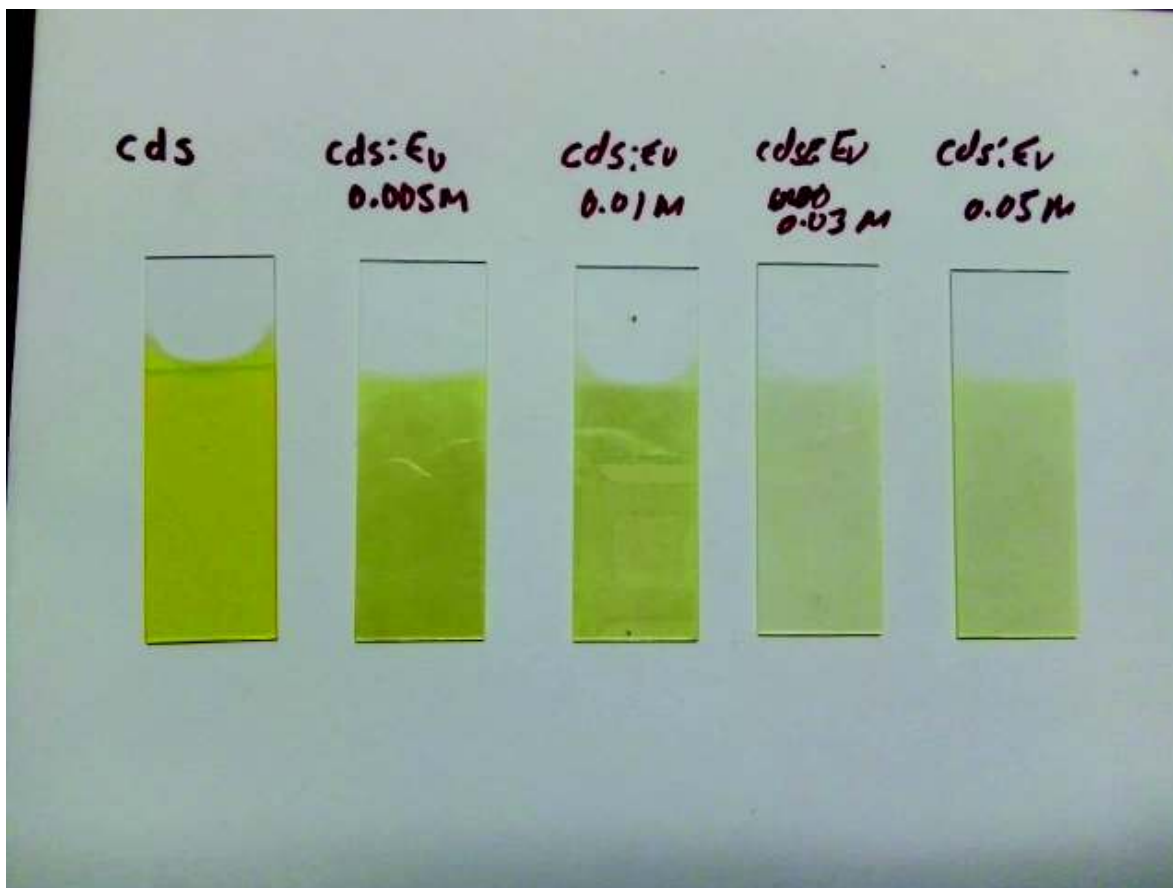
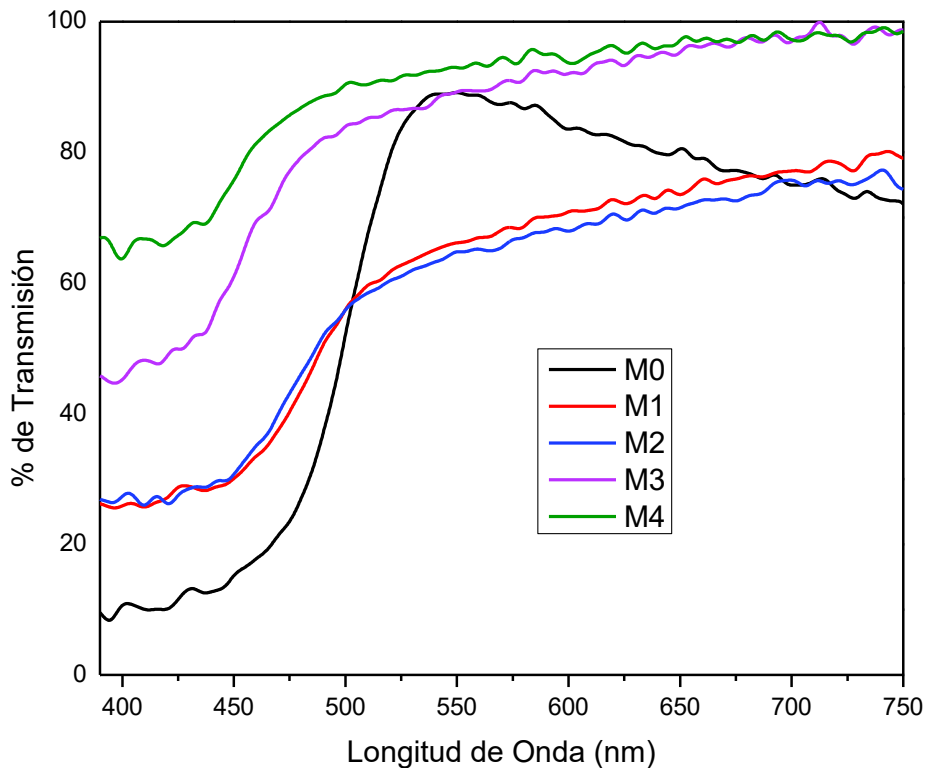


Figura IV.1.1.- Aspecto de las películas delgadas semiconductoras de CdS y CdS dopadas con diferentes concentraciones de Europio.

## 5.Resultados

### 5.1. Espectros de Transmisión

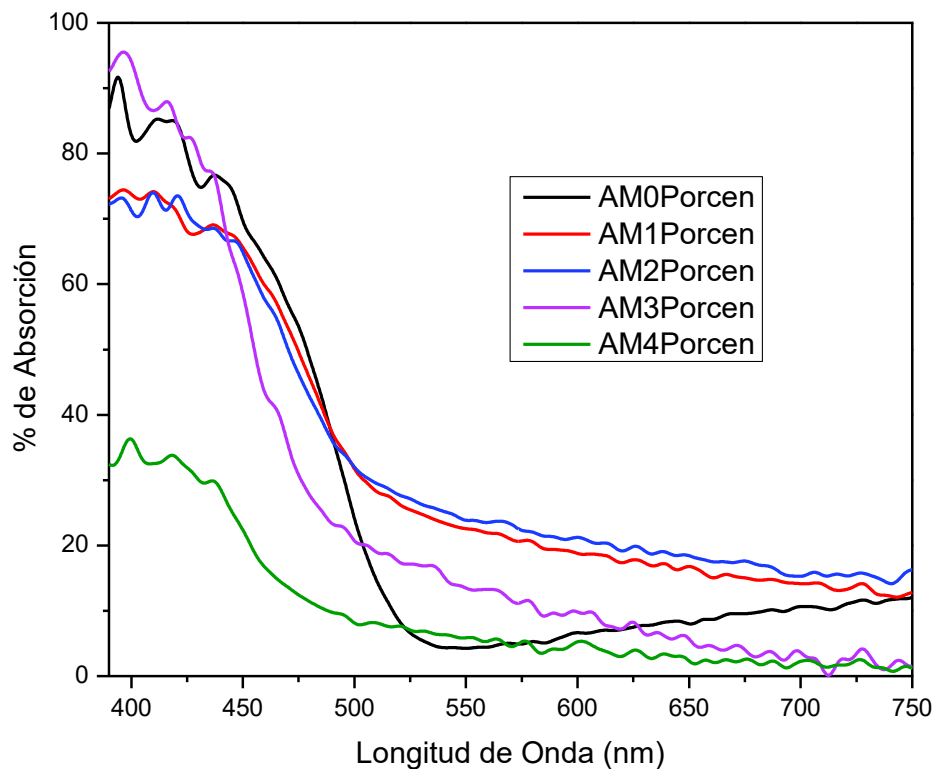
Los espectros de transmisión de todas las películas delgadas semiconductoras de CdS y CdS dopados con Eu son mostrados en la Figura 5.1.1. Todos los espectros fueron obtenidos experimentalmente usando un espectrómetro UV-Visible, de la figura se puede observar que los espectros de transmisión corresponden a las películas M3 y M4 las cuales tiene una concentración de Europio de 0.03 y 0.05 M respectivamente presentan una mayor transmisión de la luz respecto a la película delgada semiconductor CdS (M0), es decir que las películas M3 y M5 son más antirreflectoras en el espectro visible que la película M0. También se puede observar que las muestras M1 y M2 las cuales contiene una concentración de Europio de 0.005 y 0.01 M presentan una menor transmisión en el espectro visible que la muestra M0.



**Figura 5.1.1.- Espectros de Transmisión de las películas delgadas semiconductoras de CdS y CdS dopadas con diferente concentración de Europio.**

## 5.2. Espectros de Absorción

La Figura 5.2.1 Muestra los espectros de Absorción de todas las películas delgadas semiconductoras de CdS y CdS:Eu con diferentes concentraciones de Eu. Todos los espectros de absorción fueron calculados a partir de la relación:  $A = \text{Log} (100/T)$ , dicha ecuación relaciona el espectro de transmisión con el espectro de absorción. De la Figura V.2.1 se puede apreciar que las muestras M4 y M3 presentan una menor absorción de la luz visible en las longitudes de onda mayores a 575 nm y a 620 nm respectivamente que la película M0 (CdS). Mientras que las películas M1 y M2 presentan mayor absorción de la luz visible a longitudes de onda mayor a 500 nm aproximadamente que la muestra M0.



**Figura 5.2.1.- Espectros de Absorción de las películas delgadas semiconductoras de CdS y CdS dopadas con diferente concentración de Europio.**

### 5.3. Espectros de Absorción y Transmisión

La Figura 5.3.1 muestra los espectros de absorción y transmisión de todas las películas delgadas semiconductoras de CdS y CdS:Eu, se puede observar que debido a que todas las películas son traslucidas prácticamente la suma de la transmisión y la absorción para cada película es casi 100%, es decir son complementarias. La suma de la absorción y la transmisión no llega al 100 % ya que una pequeña parte de la luz visible es reflejada.

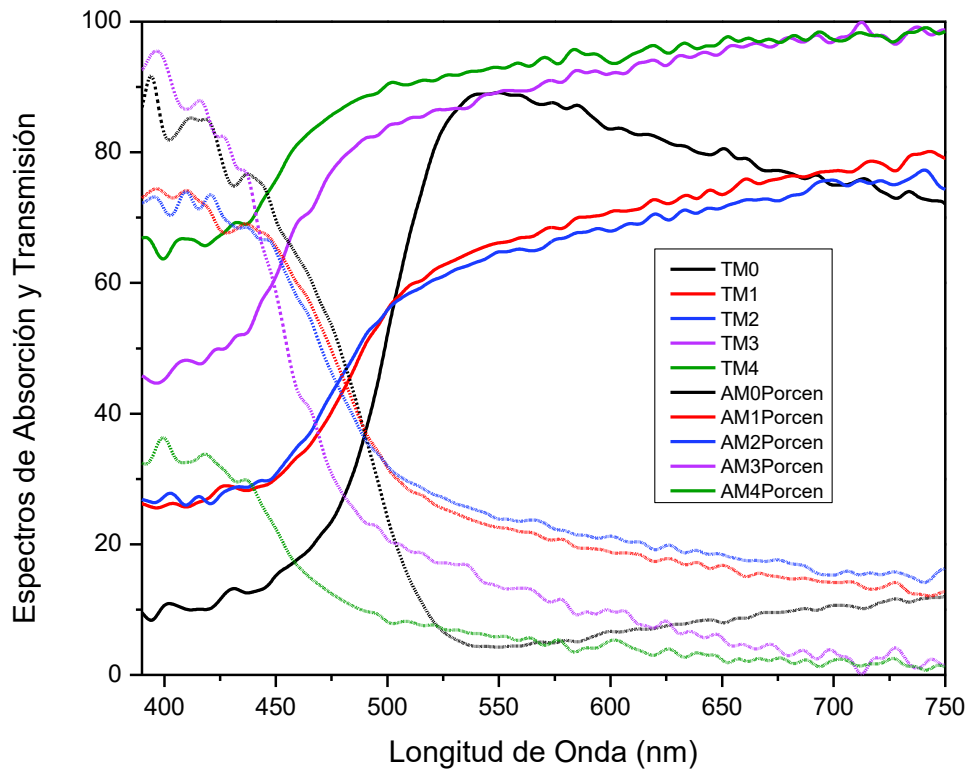
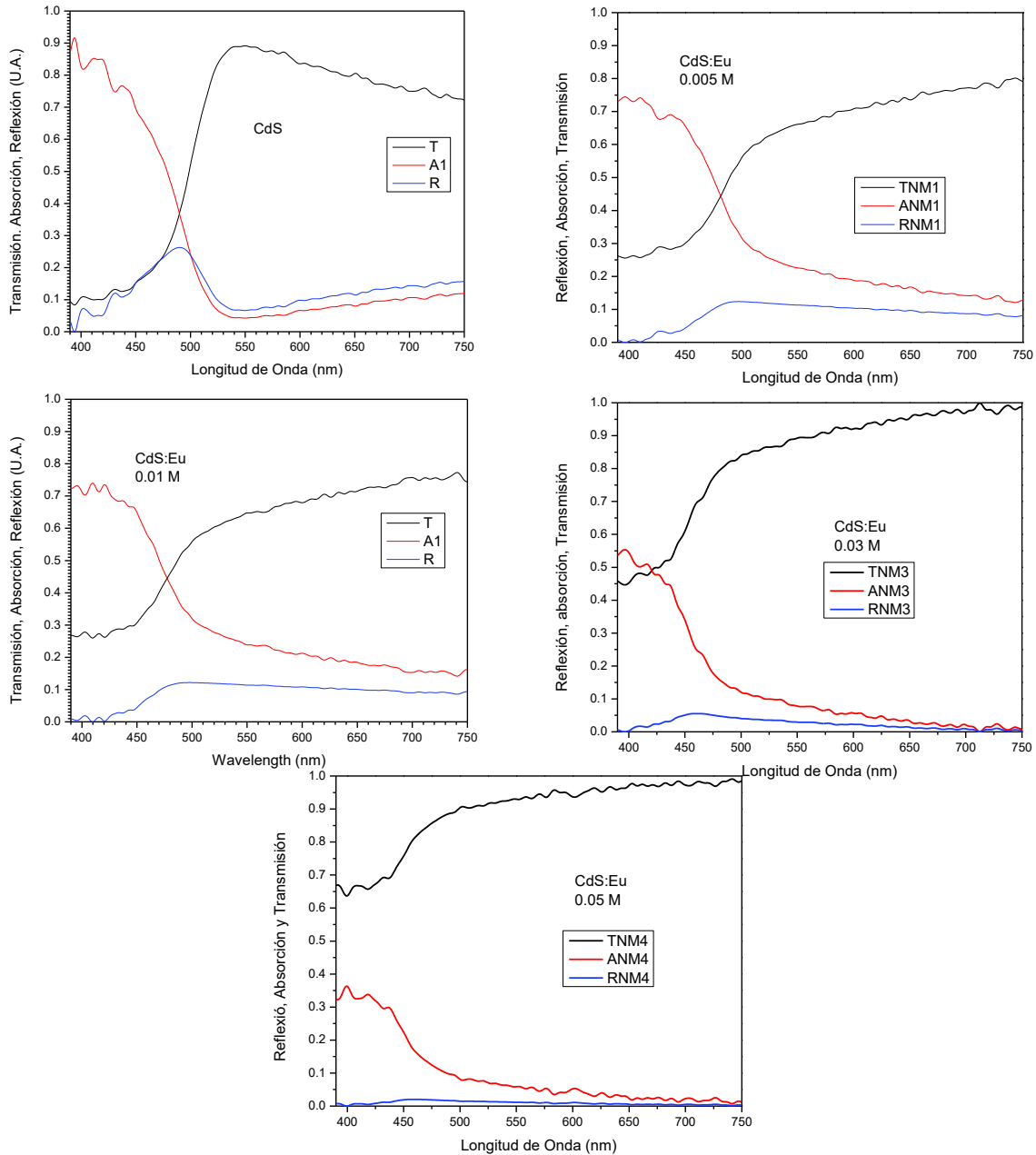


Figura 5.3.1.- Espectros de Absorción y Transmisión de las películas delgadas semiconductoras de CdS y CdS dopadas con diferente concentración de Europio.

## 5.4. Espectros de Reflexión, Absorción y Transmisión

Las Figuras 5.4 muestran los espectros de reflexión, absorción y transmisión de cada una de las películas delgadas semiconductoras de CdS y CdS:Eu. Los espectros de reflexión fueron obtenidas a partir de la expresión:  $R = 1 - T - A$ , los espectros de absorción y transmisión fueron normalizadas previamente para posteriormente ser introducidas en dicha ecuación. Se puede apreciar que los espectros de reflexión se reducen a medida que se incrementa la concentración de Eu en las películas de CdS.



**Figura 5.4.1.- Espectros de Reflexión, Absorción y Transmisión de las películas delgadas semiconductoras de CdS y CdS dopadas con diferente concentración de Europio.**

## 5.5. Banda de Energía Prohibida

La Figura 5.5.1 Muestra la banda de energía prohibida de todas las películas delgadas semiconductoras de CdS y CdS:Eu. La banda de energía prohibida de todas las películas se calculó utilizando el modelo de Tauc.

Se puede apreciar que a medida que se incrementa la concentración de europio la banda de energía prohibida aumenta, este comportamiento es congruente con lo que se observa en los espectros de transmisión ya que en dichos espectros se puede ver como el borde de absorción se recorre a menores longitudes de onda es decir a mayores energías.

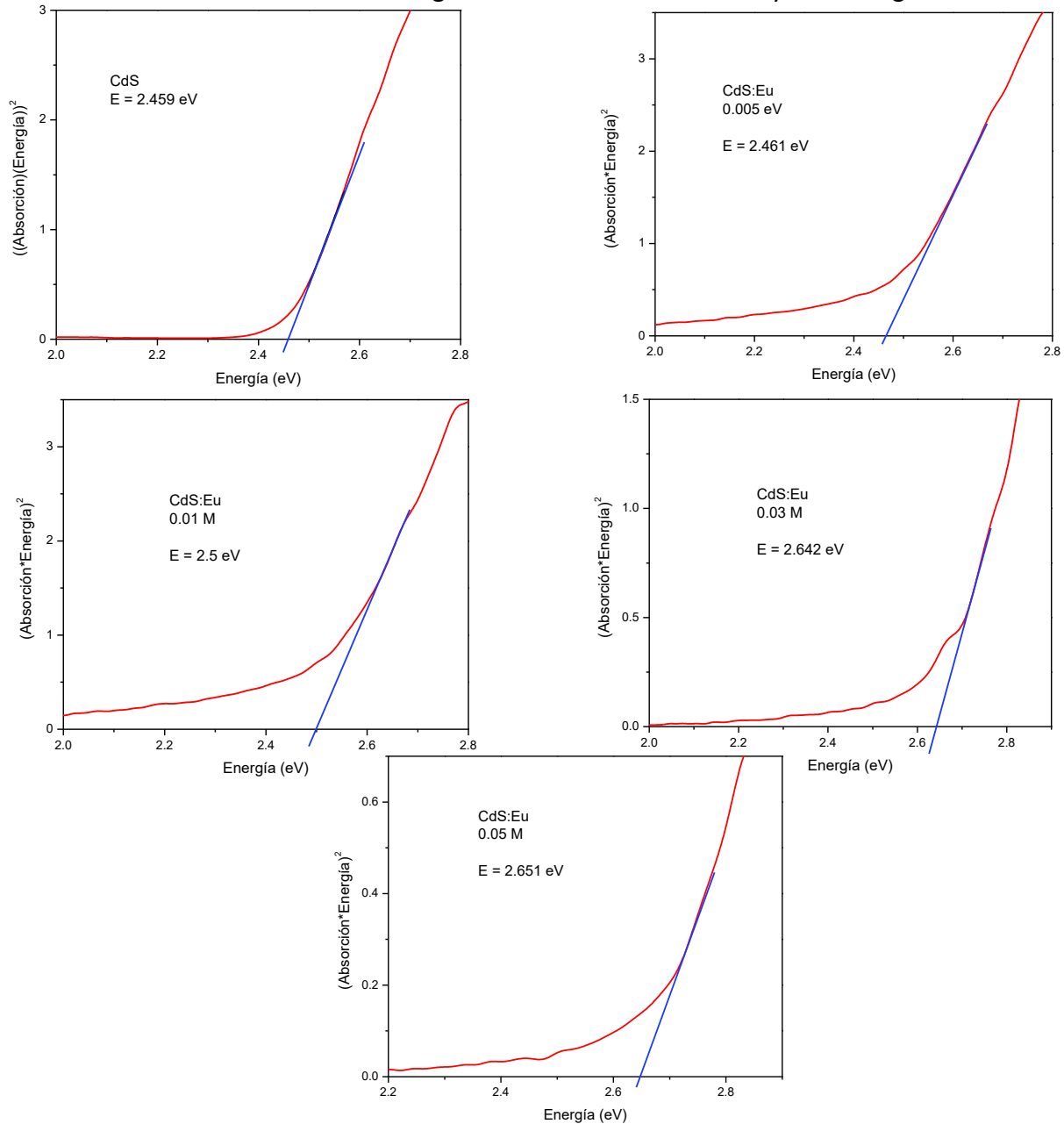


Figura 5.5.1.- Banda de energía prohibida de todas las películas semiconductoras.

## 5.6. Índice de refracción de las películas de CdS y CdS:Eu.

La Figura V.6.1 muestra los índices de refracción de todas las películas delgadas semiconductoras de CdS y CdS dopadas con diferentes concentraciones de europio. Los índices de refracción de todas las películas fueron calculados utilizando la ecuación III.1.4.5 la cual es para incidencia normal y en materiales transparentes.

$$n = \frac{(1 + \sqrt{R})}{(1 - \sqrt{R})}$$

La Figura 5.6.1 nos muestra que las películas M3 y M4, las cuales contienen una mayor concentración de europio, presentan un índice de refracción menor en todas las longitudes de onda de la luz visible con respecto a la película M0 (CdS), esta información nos dice que estas películas son menos compactas que la película de CdS. También podemos observar que las que las muestras M1 y M2 presentan un índice mayor que la muestra M0 solamente en la región comprendida entre 525 y 625 nm aproximadamente.

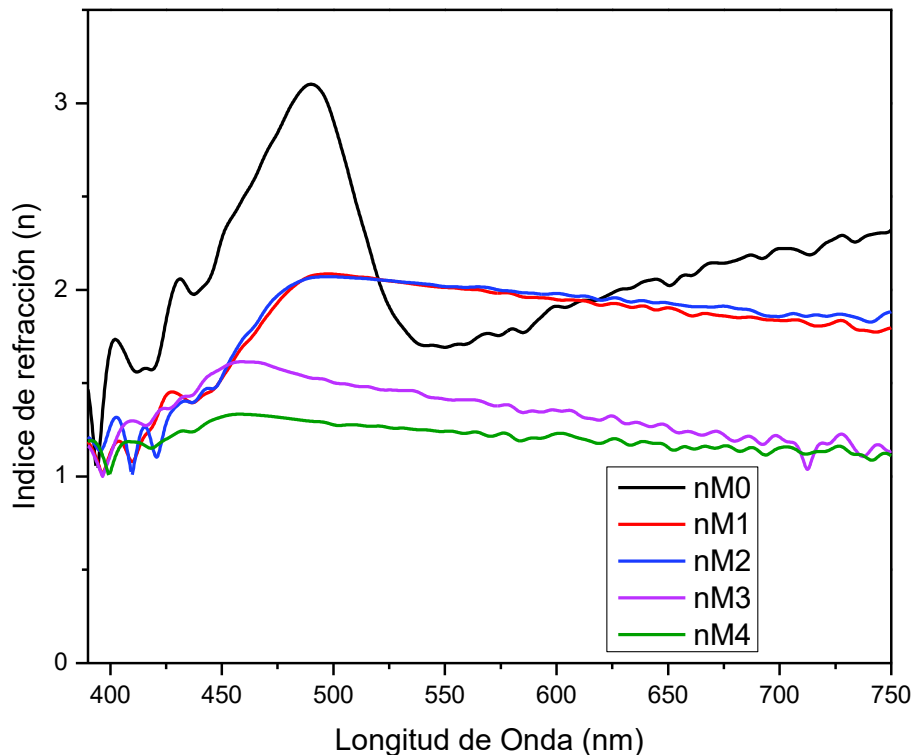


Figura 5.6.1.- Índice de refracción de todas las películas semiconductoras de CdS y CdS:Eu.

## 5.7. Coeficiente de extinción de las películas de CdS y CdS:Eu.

La Figura 5.7.1 muestra los coeficientes de extinción en función de la longitud de onda de todas las películas delgadas semiconductoras de CdS y CdS dopadas a diferentes concentraciones de europio. Los coeficientes de extinción fueron obtenidos aplicando la ecuación:

$$k = \frac{(A)(\lambda)}{4\pi d}$$

Donde **A** es la absorción normalizada,  $\lambda$  es la longitud de onda y **d** es el espesor de la película, que en nuestro caso es aproximadamente 100 nm. De la ecuación utilizada para encontrar los coeficientes de extinción se puede ver que es directamente proporcional a la absorción, por esta razón el comportamiento de las gráficas de absorción y k son semejantes.

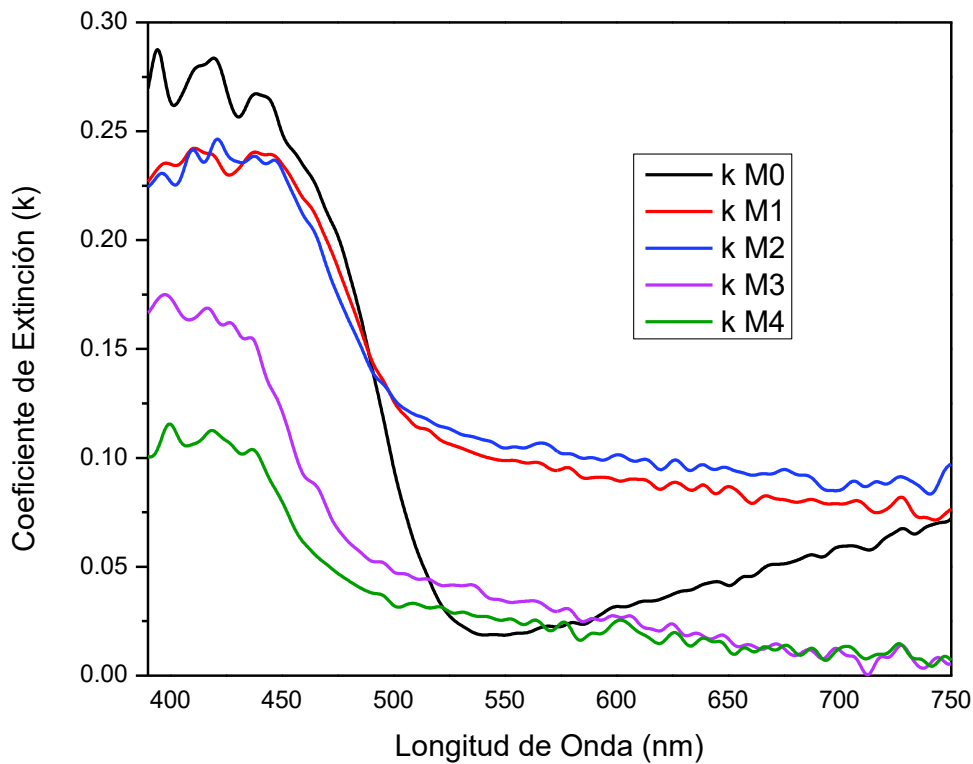


Figura 5.7.1.- Coeficiente de Extinción de todas las películas semiconductoras de CdS y CdS:Eu.



## 5.8. Profundidad de penetración de la luz ( $\Delta_p$ ).

La Figura 5.8.1 Muestra la profundidad de penetración de la luz cuando el campo eléctrico incidente decae  $\frac{1}{e}$  (37%) vs longitud de onda en todas las películas delgadas semiconductoras de CdS y CdS:Eu con diferentes concentraciones de europio. De la Figura V.8.1 podemos observar que las muestras M3 y M4 presentan mayor profundidad de penetración en todo el espectro visible que la muestra M0 excepto en el rango de 523 a 567 nm, mientras que las muestras M1 y M2 presentan una menor penetración de la luz en el rango de 475 a 750 nm.

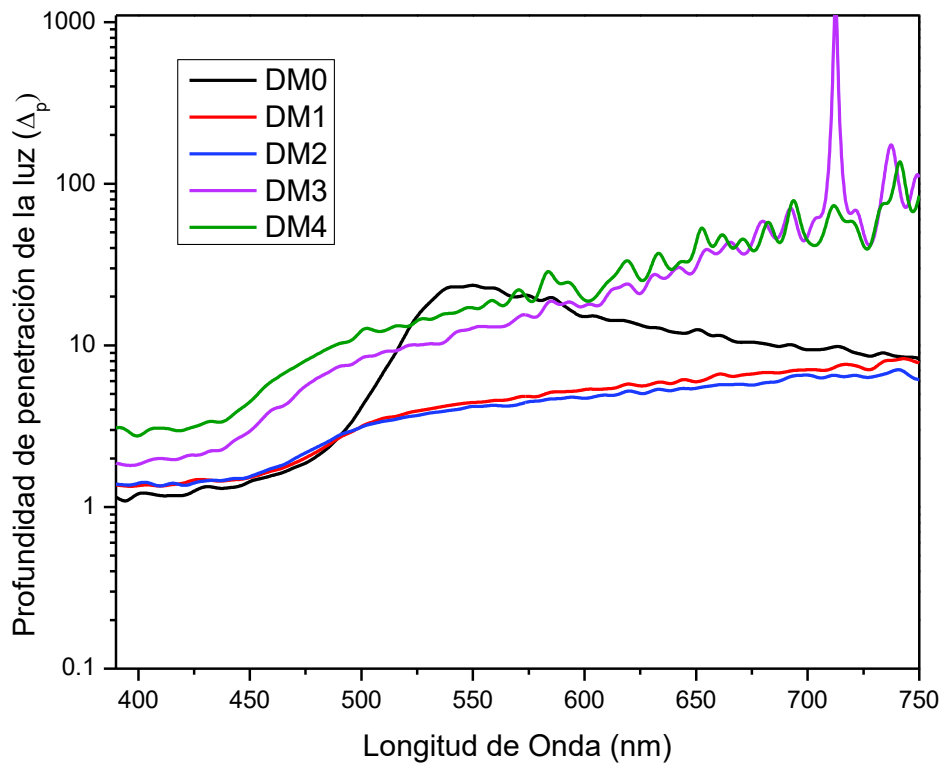


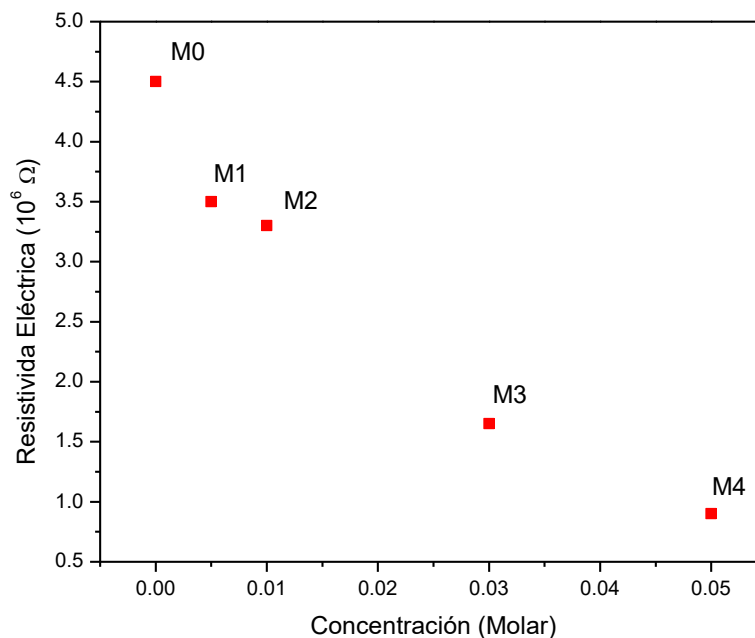
Figura 5.8.1.- Profundidad de penetración de la luz cuando el campo eléctrico decae  $\frac{1}{e}$  de todas las películas semiconductoras de CdS y CdS:Eu.

## 5.9. Resistividad Eléctrica

La tabla 5.9.A Muestra las medidas de las películas delgadas semiconductoras, donde el área se obtiene del producto del espesor de la película (100 nm) por el ancho de la película (1.2 cm), además muestra la resistencia y resistividad eléctrica del semiconductor en la oscuridad. Se puede ver que a medida que aumenta el dopaje de europio la resistividad eléctrica se reduce levemente. La Figura V.9.1 muestra claramente como se reduce la resistividad eléctrica a medida que aumenta la concentración de europio en la muestra.

**Tabla 5.9.A – Tabla que muestra las medidas de las películas delgadas semiconductoras, su resistencia y su resistividad eléctrica en la oscuridad.**

Muestra	Longitud	Área	Resistencia	Resistividad $\rho$
CdS	0.004m	$12 \times 10^{-10} \text{ m}^2$	$150 \times 10^9 \Omega$	$4.5 \times 10^6 \Omega \text{ cm}$
CdS:Eu 0.005	0.004 m	$12 \times 10^{-10} \text{ m}^2$	$130 \times 10^9 \Omega$	$3.5 \times 10^6 \Omega \text{ cm}$
CdS:Eu 0.01	0.004 m	$12 \times 10^{-10} \text{ m}^2$	$110 \times 10^9 \Omega$	$3.3 \times 10^6 \Omega \text{ cm}$
CdS:Eu 0.03	0.004m	$12 \times 10^{-10} \text{ m}^2$	$55 \times 10^9 \Omega$	$1.65 \times 10^6 \Omega \text{ cm}$
CdS:Eu 0.05	0.004 m	$12 \times 10^{-10} \text{ m}^2$	$30 \times 10^9 \Omega$	$9 \times 10^5 \Omega \text{ cm}$



**Figura 5.9.1.- Resistividad Eléctrica vs Concentración de todas las películas semiconductoras de CdS y CdS:Eu**

## 6. Conclusiones

- ❖ Se obtuvieron películas delgadas semiconductoras de CdS y CdS dopadas con diferentes concentraciones de europio elaboradas por la técnica de baño químico, todas las películas son homogéneas, translúcidas, la película M0 es de color amarillo, mientras que las películas dopadas con Eu son de color verde, además presentan buena adherencia al substrato de vidrio Corning.
- ❖ Los espectros de transmisión muestran que las películas M3 y M4 las cuales contienen una concentración de Eu de 0.03 y 0.05 M respectivamente presentan mayor transmisión de la luz visible que la película de CdS.
- ❖ Las gráficas de índice de refracción vs longitud de onda muestran que las muestras M3 y M4 tiene menor índice de refracción en todo el espectro que la muestra M0 lo cual indica que dichas películas son menos compactas o densas que la película de CdS.
- ❖ Los cálculos de la banda de energía prohibida muestran que dicha banda aumenta al ir aumentando el dopaje de europio, esto indica mejoras en las propiedades optoelectrónicas de las películas de CdS dopadas con europio.
- ❖ Los cálculos de la profundidad de penetración de la luz nos muestran que las muestras M3 y M4 son las que nos presentan más profundidad de la luz que todas las demás muestras.
- ❖ Los cálculos de la resistividad eléctrica muestran que esta propiedad eléctrica disminuye paulatinamente al aumentar la concentración de europio.

## 6.1. Perspectivas

- ❖ Obtener los difractómetros de rayos X de todas las películas semiconductoras para ver los cambios en la estructura del sulfuro de cadmio cuando es dopado con diferentes proporciones de europio.
- ❖ Obtener las micrografías de todas las películas delgadas con el fin de obtener la superficie de las películas y ver los cambios en dichas superficies.
- ❖ Utilizar las películas M3 o M4 para aplicarse como capa ventana en una celda solar de películas delgadas del tipo CdS:Eu/CdTe o CdS:Eu/CdSe.
- ❖ Publicar dicha investigación en una revista especializada.

## 7. Referencias

- 1- S. Yilmaz, I. Polat, M. Tomakin, E. Bacaksiz. (2019). A research on growth and characterization of CdS:Eu thin films. *Applied Physics A*, 26(1), 1-2. <https://doi.org/10.1007/s00339-018-2369-8>
- 2- Shalimova K.V. (1975). *Física de los Semiconductores*. (pp. 13-24). URSS, Moscú: Editorial Mir.
- 3- Jacques I. Pankove. (1975). *Optical Processes In Semiconductors*. (pp. 1-11). USA, New York: Dover Publications, Inc.
- 4- Griffiths. D, Schroeter. D. (1995). *Introduction to Quantum Mechanics; Solid state*. Estados Unidos. Prentice Hall. pp. 208-220.
- 5- Horacio. P. (2012). Presentacion de una Formulación Alternativa para la elaboración de películas nanoestructuradas de PbS mediante la técnica de Deposito de Baño Químico. Tesis Maestría. Universidad de Sonora. México.
- 6- De Guire, M. R., Bauermann, L. P., Parikh, H., & Bill, J. (2013). Chemical bath deposition. In *Chemical Solution Deposition of Functional Oxide Thin Films* (pp. 319-339). Springer, Vienna.
- 7- Nieto, E., Fernández, J. F., Durán, P., & Moure, C. (1994). Películas delgadas: fabricación y aplicaciones. *Boletín de la sociedad Española de cerámica y vidrio*, 33(5), 245-258.