

Caracterización Eléctrica en Películas Delgadas de CdS y PbS para obtención de Resistencia y Resistividad usando casos de estudio

Electrical characterization of CdS and PbS thin films to obtain resistance and resistivity using case studies

Jorge Oswaldo Rivera-Nieblas ^{a, b*}, Eduardo Chávez-Mendiola ^{a, b}, Juan Carlos Grijalva-Acuña ^{a, b}, Rogelio Acedo-Ruiz ^{a, b}, Santos Jesús Castillo ^c, Carolina Alcántar-Cienfuegos ^d

^a Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Carreras de Ingeniería Biomédica, Semiconductores y Electrónica, Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Hermosillo, Ave. Tecnológico 115, Col. Sahuaro, C.P. 83170 Hermosillo, Sonora, México.

^b Departamento de Metal-Mecánica, Carrera de Ingeniería Mecatrónica y Mecánica, Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Hermosillo, Ave. Tecnológico 115, Col. Sahuaro, C.P. 83170 Hermosillo, Sonora, México.

^c Departamento de Investigación en Física, Universidad de Sonora, Blvd. Luis Encinas y Rosales S/N, Hermosillo, Sonora 83000, México.

^d Carrera de Ingeniería en Semiconductores, Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Hermosillo, Ave. Tecnológico 115, Col. Sahuaro, C.P. 83170 Hermosillo, Sonora, México.

Correo electrónico: jorge.riveran@hermosillo.tecnm.mx

(Recibido: 22 de febrero 2024; Aceptado: 10 de abril 2024; Publicado: 01 de mayo 2024)

Resumen

En este artículo se presentan técnicas de caracterización eléctrica de Películas Delgadas de CdS y PbS en escala nanométrica, para la obtención de Resistencia y Resistividad. Muchas de las Películas Delgadas presentan resistencias altas en escala de megaohms, por lo que se requiere equipos especializados. Al aplicar las técnicas se tendrá que medir en algunos casos espesor, longitud o rugosidad para determinar resistividad, en otros se obtendrá la medición directa de Resistencia. Se describen los pasos para aplicar las distintas técnicas con diversos equipos. La finalidad del artículo es proporcionar a investigadores, docentes y estudiantes de Electrónica, Mecatrónica, Semiconductores u afines de técnicas para la medición de estas dos variables importantes en materiales semiconductores.

Palabras claves: Resistencia, Resistividad, Películas Delgada, Elipsómetro, Óhmetro, CdS, PbS, caso de estudio.

Abstract

This article presents electrical characterization techniques for CdS and PbS thin films at the nanometer scale, to obtain resistance and resistivity. Many thin films have high resistances in the megaohm range, requiring specialized equipment. Applying the techniques will require, in some cases, measuring thickness, length, or roughness to determine resistivity; in others, direct resistance measurements will be obtained. The steps for applying the different techniques with various equipment are described. The purpose of this article is to provide researchers, teachers, and students of electronics, mechatronics, semiconductors, and related fields with techniques for measuring these two important variables in semiconductor materials.

Keywords: Resistance, Resistivity, Thin Films, Ellipsometer, Ohmmeter, CdS, PbS, case studies.

1. Introducción

El problema geopolítico global ha hecho que el tema de los semiconductores se haya popularizado a nivel global. En México no es la excepción por estar a un lado de uno de las partes en conflicto, en la llamada Guerra de Chips, durante la Administración del Presidente Biden. [1][2]

Esto ha provocado que la Educación Superior en México apueste por carreras como la Ingeniería en Semiconductores. En esta carrera y otras afines se ve la necesidad de caracterizar las propiedades de material semiconductores, por ejemplo, a Películas Delgadas (thin films), la obtención de estas es más sencilla y no requiere de equipos especiales.

Hay diversas técnicas para obtener las Películas Delgadas como el Depósito por Baño Químico (CBD, Chemical bath deposition), Depósito a partir de solución, Depósito Mediado por Láseres, Agregación Química, etc.

La Deposición por Baño Químico (CBD) es una técnica simple, se realiza a baja temperatura, tiene una alta confiabilidad, es un proceso de bajo costo, es un proceso de química suave y es aplicable a diferentes tipos de películas delgadas con esta se puede lograr una alta calidad en las películas semiconductoras al ajustar la temperatura [3] el pH [4], y las concentraciones de reactivos [5] en la solución.

Las películas obtenidas mediante CBD deben de caracterizarse con diversas técnicas, una de estas es la caracterización de las propiedades eléctricas, en este artículo se trata acerca de la Resistencia y la Resistividad y se presentan algunas técnicas de obtención para apoyar a los investigadores, docentes y estudiantes que requieran aplicarlas en su quehacer.

2. Desarrollo

En este trabajo se realizará caracterizaciones de propiedades eléctricas (Resistividad y Resistencia) a Películas Delgadas de Sulfuro de plomo (PbS) y Sulfuro de Cadmio (CdS).

2.1 Caracterización de propiedades eléctricas

La caracterización eléctrica es un conjunto de técnicas y mediciones que se utilizan para determinar las propiedades eléctricas de un material, componente o dispositivo. [6] [7]

Esto incluye medir parámetros como:

- **Resistencia:** Es la oposición al flujo de corriente eléctrica. Depende del tamaño y forma.
- **Resistividad:** Es la oposición al flujo de corriente eléctrica. Depende de la longitud, área y resistencia del material en específico.
- **Capacitancia:** La capacidad de almacenar carga eléctrica.
- **Voltaje:** La Diferencia de Potencial Eléctrico entre dos puntos.
- **Corriente:** El flujo de carga eléctrica.
- **Impedancia:** La oposición total al flujo de Corriente Alterna(CA).

La caracterización eléctrica es esencial en una amplia gama de aplicaciones, incluyendo:

- **Desarrollo de materiales:** Para comprender cómo se comportan los materiales en diferentes condiciones eléctricas.
- **Diseño de dispositivos electrónicos:** Para asegurar que los componentes funcionen correctamente.
- **Control de calidad:** Para verificar que los productos cumplan con las especificaciones eléctricas.
- **Investigación y desarrollo:** Para explorar nuevas tecnologías y aplicaciones.

2.2 Resistividad

La resistividad (ρ) se define como la resistencia eléctrica de un material de longitud unitaria y área de sección transversal unitaria. La resistividad es una propiedad fundamental de los materiales que describe su capacidad para oponerse al flujo de corriente eléctrica.

Es una propiedad que es sensible a la microestructura. [8] Es también la medida de la dificultad del paso de corriente eléctrica a través de un volumen unitario de un material. [9]

La Resistividad se puede obtener mediante la fórmula:

$$\rho = \frac{R \cdot A}{L}$$

Donde:

ρ = Resistividad. ($\Omega \cdot m$)

R = Resistencia. (Ω)

A = Área. (m^2)

L = Longitud. (m)

Un valor de resistividad:

- **Baja:** Indica un material que permite fácilmente el movimiento de carga eléctrica.
- **Alta:** Indica que el material es mal conductor mientras que uno bajo indicará que es un buen conductor.

La figura 1 presenta dos tipos de cuerpos geométricos un cilindro y un prisma rectangular.

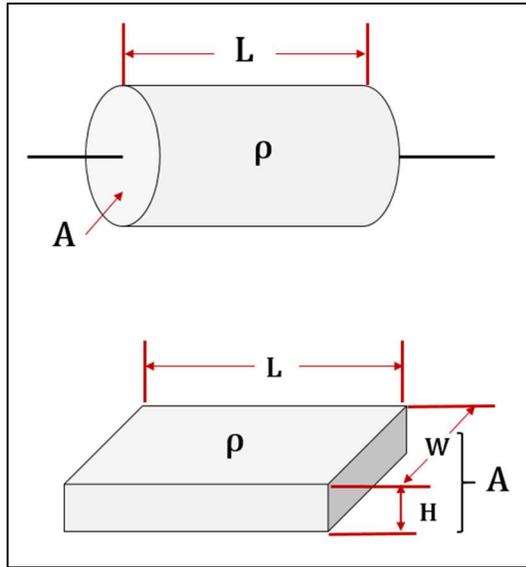


Fig. 1 La resistividad en dos cuerpos geométricos cilindro y prisma rectangular.

La resistividad se puede medir mediante técnicas como:

- 1) **Método de cuatro puntas.** Este método es muy utilizado para medir la resistividad de semiconductores y otros materiales conductores. Consiste en hacer pasar una corriente a través de dos electrodos exteriores y medir la caída de tensión entre dos electrodos interiores. La resistividad se calcula a partir de la corriente y la tensión medidas, así como de la geometría del material. Un equipo de medición es el SMR232. [7]
- 2) **Método de dos puntas.** Este método es más sencillo, pero menos preciso que el de cuatro puntas. Consiste en hacer pasar una corriente a través de dos electrodos y medir la caída de tensión entre ellos. La resistividad se calcula a partir de la corriente y la tensión medidas, pero este método incluye la resistencia de contacto de los electrodos.
- 3) **Técnicas de corrientes de Foucault.** Estas técnicas se utilizan campos electromagnéticos para medir la resistividad de materiales conductores. Son especialmente útiles para medir la resistividad de películas delgadas y recubrimientos.

Generalmente la resistividad de los metales aumenta con la temperatura, mientras que la resistividad de los semiconductores disminuye ante el aumento de la temperatura.

Cuando el material está en forma de Películas Delgadas semiconductoras, la resistividad puede ser

afectada por: la microestructura, la presencia de poros, la homogeneidad química, el campo eléctrico, etc. [8]

2.3 Resistencia eléctrica

La resistencia es una medida de la oposición al flujo de corriente en un circuito eléctrico. La resistencia se mide en ohmios, que se simbolizan con la letra griega omega (Ω). La unidad de medida se llama ohmios en honor a Georg Simon Ohm (1784-1854), un físico alemán que estudió la relación entre Voltaje(V), Corriente(I) y Resistencia(R). Con esta relación planteó la Ley de Ohm, cuya fórmula es:

$$R = \frac{V}{I}$$

La resistencia se mide con un Óhmetro que puede ser parte de un Multímetro. [10]

La Resistencia también se puede obtener mediante la fórmula:

$$R = \frac{\rho \cdot L}{A}$$

2.4 Películas Delgadas

Las síntesis para elaborar películas delgadas son conocidas ampliamente, permitiendo un depósito controlado de numerosos materiales. [3-6] [11-13]

Existen diferentes criterios para clasificar las técnicas de depósito entre ellas tenemos:

- 1) **Deposito por baño químico.** (CBD, *Chemical bath deposition*)
- 2) **Agregación química.**
- 3) **Depósito mediado por láseres.**
- 4) **Depósito a partir de vapores:**
 - a) Depósito físico de vapores. (PVD, *Physical Vapor Deposition*)
 - b) Depósito químico de vapores. (CVD, *Chemical Vapor Deposition*)
 - c) Depósito químico de vapores mediante compuestos metal-orgánicos.
- 5) **Depósito a partir de solución**
 - a) Depósito por el método de rotación.
 - b) Depósito por recubrimiento por inmersión (*Dip coating*).
 - c) Depósito por recubrimiento por goteo (*Drop coating*).
 - d) Depósito por recubrimiento por rotación o centrifugación (*Spin coating*).

La figura 2 muestra técnicas de fabricación por Deposito de Películas Delgadas. [14]

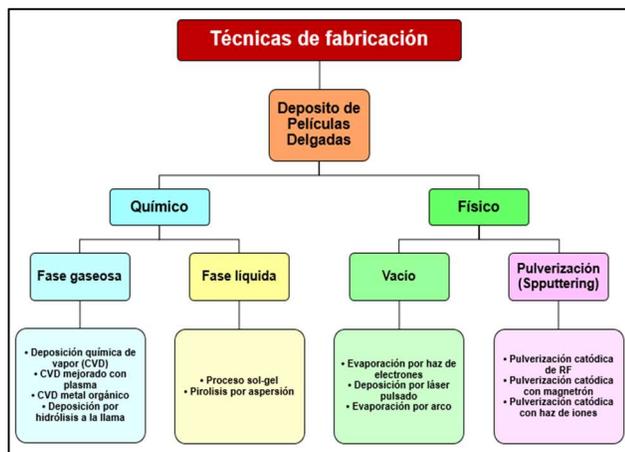


Fig. 2 Técnicas de fabricación por Deposito de Películas Delgadas.

Para este artículo se aplicó el Deposito por Baño Químico (CBD) para la obtención de Películas Delgadas de PbS y CdS crecidas en vidrio.

2.4.1 Películas Delgadas de CdS

El sulfuro de cadmio (CdS) es un semiconductor calcogenuro, es un material tipo N, Peso molecular de 144.48 g/mol, constante dieléctrica de 8.9, su band gap es de 2.42 eV, en películas delgadas 2.45 eV y resistividad eléctrica de 0.1-10 $\Omega \cdot \text{cm}$ (300 K). Está presente en minerales como la Greenocktita. [15, 16]

En el caso de las películas de CdS los efectos del tamaño cuántico son observados a través de una diferencia obvia en los colores de las muestras de los bultos o nanopartículas. El color vivo hace diferencia entre los bultos (naranja) y las partículas de tamaño nanométrico (amarillo). [13]

La figura 3 muestra la síntesis de las películas delgadas de CdS.

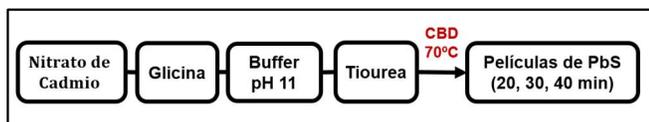


Fig. 3 Mecanismo de síntesis de Películas Delgadas de CdS.

2.4.2 Películas Delgadas de PbS

El sulfuro de plomo (PbS) es un semiconductor calcogenuro, con estructura cristalina cúbica, es un material tipo P, con peso molecular de 239.3 g/mol, con un band gap de 0.37 y 0.41 eV (En bulto) y resistividad

de 0.01-1 $\Omega \cdot \text{cm}$ (300 K), tiene una estructura cúbica y está presente en minerales como la Galena. [17, 18]

El PbS es usado en detectores de luz infrarroja, las películas delgadas de PbS son utilizadas para la detección de radiación entre longitudes de onda entre 1 a 3 μm .

La figura 4 muestra dos síntesis de películas delgadas de PbS.

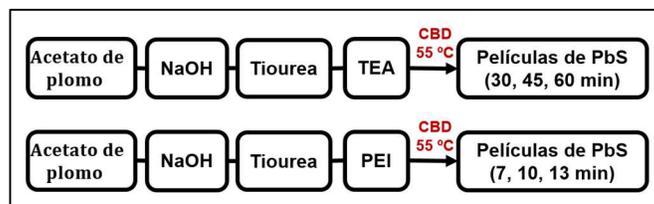


Fig. 4 Mecanismo de síntesis de Películas Delgadas de PbS.

2.5 Espesor

El espesor es una característica dimensional que describe la distancia entre la cara frontal y la cara posterior de un objeto, como una pared, una lámina de metal o un panel de vidrio.

Para la obtención del espesor se pueden utilizar diversas técnicas como:

- 1) **Técnicas directas:** En estas se entra en contacto físico directo. Ejemplos: perfilometría, micrómetros, calibradores, medidores de espesor de contacto, etc.
- 2) **Técnicas indirectas:** En estas no se entra en contacto físico directo. Ejemplos: medición ultrasónica, medición de corrientes de Foucault, medición por radiografía, medición óptica (elipsometría y espectrofotometría), etc. [19]

2.6 Técnicas Didácticas

Las técnicas didácticas son el conjunto de estrategias y herramientas que los educadores utilizan para facilitar el aprendizaje de los estudiantes.

Estas técnicas buscan hacer el proceso educativo más efectivo, atractivo y significativo. [20-21]

Los tipos de técnicas didácticas son:

- 1) **Técnicas Expositivas.**
 - a) Conferencia.
 - b) Explicación.
- 2) **Técnicas de Interacción y Participación.**
 - a) Discusión guiada.
 - b) Trabajo en equipo.

- c) Lluvia de ideas.
- d) Debate.
- 3) **Técnicas de Aprendizaje Activo.**
 - a) Aprendizaje basado en problemas.
 - b) Aprendizaje basado en proyectos.
 - c) Estudio de casos.
 - d) Simulación.
- 4) **Técnicas de Evaluación.**
 - a) Cuestionarios.
 - b) Portafolios.
 - c) Rubricas.

En el quehacer de ciencia e ingeniería es muy común que usemos técnicas de Aprendizaje Activo mediante Aprendizajes basado en problemas, en proyectos, estudios de casos y sobre todo la simulación que es muy usada hoy en día.

2.6.1 Estudio de casos

Un estudio de caso es un “método de aprendizaje acerca de una situación compleja (como un aula en un centro escolar); se basa en el entendimiento comprensivo de dicha situación (aula), el cual se obtiene a través de la descripción y análisis de la situación, situación tomada como un conjunto y dentro de su contexto”.

Por tanto, el estudio de casos, implica un entendimiento comprensivo, una descripción extensiva de la situación y el análisis de la situación en su conjunto, y dentro de su contexto. Muchos autores coinciden en que el estudio de casos es una investigación procesual, sistemática y profunda de un caso en concreto. [22-23]

Las partes son:

- 1) **Descripción o contexto.**
- 2) **Objetivo.**
- 3) **Metodología para la obtención de datos.**
 - a) Medición.
 - b) Análisis de datos.
 - c) Identificación de causa(s).
 - d) Propuesta de solución(es).
- 4) **Resultado(s).**

2.6.2 Simulación

La simulación es un proceso computacional que permite imitar el comportamiento de un sistema o proceso, a menudo complejo, mediante la utilización de un modelo matemático o estadístico.

En el contexto de la inteligencia artificial y el aprendizaje automático, la simulación puede ser utilizada para entrenar y validar modelos de aprendizaje

automático en situaciones controladas, antes de aplicarlos en el mundo real.

La simulación también puede ser útil para modelar y simular el comportamiento de sistemas complejos, como el tráfico, la economía o el clima, lo que puede proporcionar información valiosa para la toma de decisiones. [24]

3. Metodología

En este artículo se propondrán una metodología que ayude en la enseñanza de caracterización y medición de propiedades eléctricas.

3.1 Caso de Estudio: Medición de directa de Resistencia a Película Delgada

Nuestro primer caso de estudio será la medición de Resistencia Eléctrica de una Película Delgada, como se comentó a PbS, porque las de CdS su resistencia es muy alta.

- 1) **Contexto:** En un laboratorio de investigación se desea conocer la caracterización de propiedades eléctricas en este caso la resistencia eléctrica de películas delgadas de PbS, como parte de un estudio y comparar los efectos en la Resistencia eléctrica del material al manipular los parámetros de estas.
- 2) **Objetivo:** Realizar la medición de Resistencia eléctrica a Películas Delgadas de PbS y compararlas.
- 3) **Metodología:** Se realizarán mediciones directas a las Películas Delgadas ya caracterizadas.
 - a) **Medición:** Realizar mediciones directas de resistencia eléctrica a las Películas Delgadas, para ello debemos de preparar la película delgada añadiendo contacto con plata con separación de 1 cm aproximadamente, de esta manera tendremos el largo (L), ancho (W) (ver figura 5). Usando un óhmetro, en este caso el multímetro GDM8034 (ver figura 6), que nos permite medir en un rango de escalas de 200 Ω hasta 20 $M\Omega$, y cuenta con puntas especializada para medición. (ver figura 7)

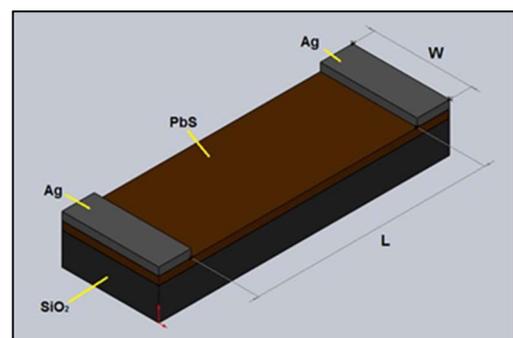


Fig. 5 Preparación de la Película Delgada con los contactos de plata.



Fig. 6 Multímetro GDM-8034.

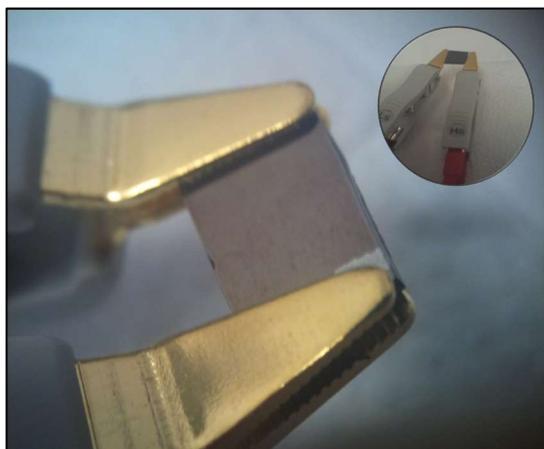


Fig. 7 Puntas de Multímetro GDM-8034 y Película Delgada de PbS.

- b) **Análisis de datos.** Realizar varias mediciones para comparar repetibilidad y anótelas en una tabla, para su procesamiento. En nuestro caso la Tabla 1 presenta resultados de mediciones de películas de PbS.
 - c) **Identificación de causas.** ¿Qué causa las diferencias entre las películas delgadas del mismo material?
 - d) **Propuesta de solución.** ¿Qué soluciones propone para tener mediciones más adecuadas en las películas?
- 4) **Resultados.** Estos se presentan en la sección Resultados de este artículo, para Películas Delgadas de PbS.

3.2 Caso de Estudio: Medición indirecta de Resistividad a Película Delgada

En siguiente caso de estudio se realiza la medición de Resistividad a Películas Delgadas, como se comentó a CdS o PbS.

- 1) **Contexto:** En un laboratorio de investigación se desea conocer la caracterización de propiedades eléctricas en este caso la resistividad de películas delgadas de CdS y PbS, como parte de un estudio y comparar los efectos en la Resistencia eléctrica del material al manipular los parámetros de estas.

2) **Objetivo:** Realizar la medición de Resistividad a Películas Delgadas de CdS y PbS y compararlas.

3) **Metodología:** Se realizarán mediciones indirectas a las Películas Delgadas ya caracterizadas.

- a) **Medición:** Para conocer la Resistividad se tendrán que realizar mediciones indirectas. En primer lugar, las Películas Delgadas se deben preparar añadiendo los contactos con pintura de plata con una separación de 1 cm (10 mm) aproximadamente, de esta manera tendremos el largo (L). El ancho (W) aproximado al cortar las Películas Delgadas son de 9 mm. (ver figura 5) En el caso del espesor de las películas usaremos el Elipsómetro para obtenerlo. Estos parámetros son necesarios para la ecuación de la resistividad para obtener el Área y el largo. Después se usará un circuito integrador mediante un opamp en nuestro caso el TL071 por su alta impedancia de entrada. La figura 8 muestra el diagrama de un circuito Integrador con un LM107. Para la medición se utilizó un TL071 en lugar LM107.

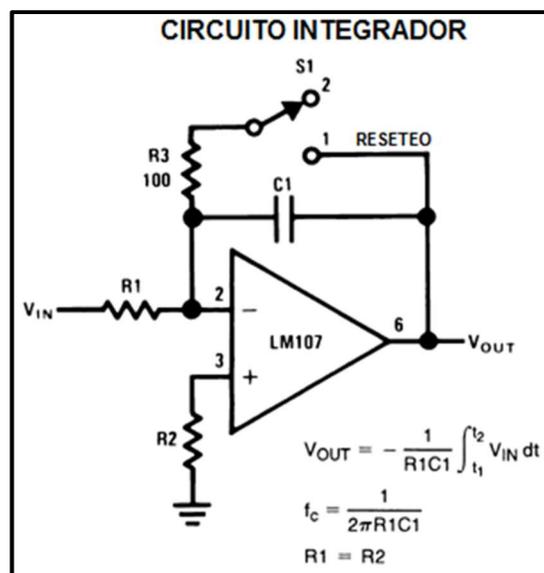


Fig. 8 Circuito integrador con LM107. Fuente: <http://www.tradeofic.com/Circuit/15634-Integrator.html>

- b) **Identificación de causas.** ¿Qué causa las diferencias entre las películas delgadas del mismo material? ¿Qué pasa con el espesor en la medida?
 - c) **Propuesta de soluciones.** ¿Qué soluciones propone para tener mediciones más adecuadas en las películas? ¿Qué medición podría ahorrar costos? ¿Qué tipo de medición nos ayudaría a ser más didáctica y fácil de implementar en aula?
- 4) **Resultados.** Estos se presentan en la sección Resultados de este artículo, para Películas Delgadas de PbS

3.3 Simulación de medición usando circuito integrador

En este apartado usaremos la Simulación que es una Técnica de Aprendizaje Activo para demostrar que a través de la configuración del Integrador con opamp, podemos obtener la resistencia eléctrica.

Con el circuito se obtiene el tiempo de descarga del capacitor, mediante una pendiente de la cual se tomará el tiempo de duración y con estos datos podemos obtener el valor de la resistencia eléctrica.

El circuito que simularemos en la medición de la resistencia eléctrica de las películas delgadas, consta de los siguientes componentes:

- 1 Resistencia de 3.3 MΩ.
- 1 Amplificador operacional TL072.
- 1 Capacitor de 100 nF.

La figura 9 se muestra el circuito integrador en el software Multisim®. En el circuito la resistencia R_1 representa a la película delgada la cual simularemos.

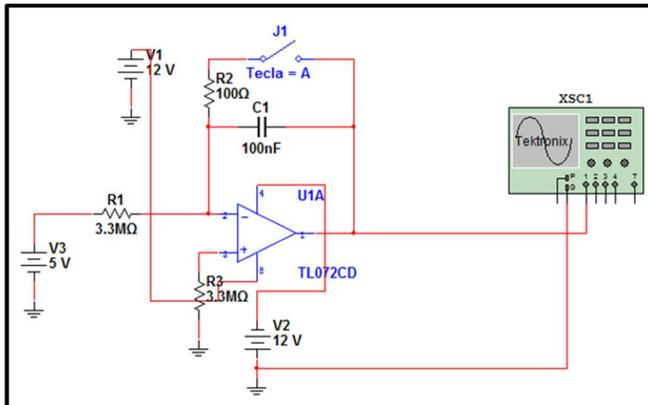


Fig. 9 Circuito integrador simulado en software. Fuente: Propia.

En la figura 10 de muestra el circuito simulado, el cual contiene las resistencias R_1 y R_2 con valores de 500 KΩ, el circuito tiene conectado un osciloscopio Tektronix® virtual.

Al dar doble clic en el icono del osciloscopio, se abre la caratula frontal del osciloscopio, en ella podemos observar la rampa de descarga del capacitor.

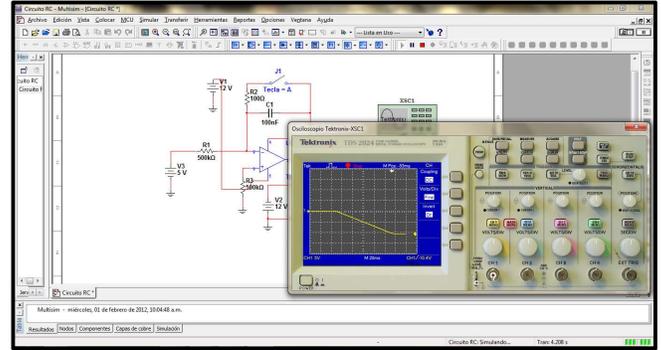


Fig. 10 Simulación de circuito integrador y medición en osciloscopio. Fuente: Propia.

Si se imprimiera la pantalla del osciloscopio en Multisim®, obtendríamos la figura 11, en la cual se muestra la pendiente de descarga del circuito integrador.

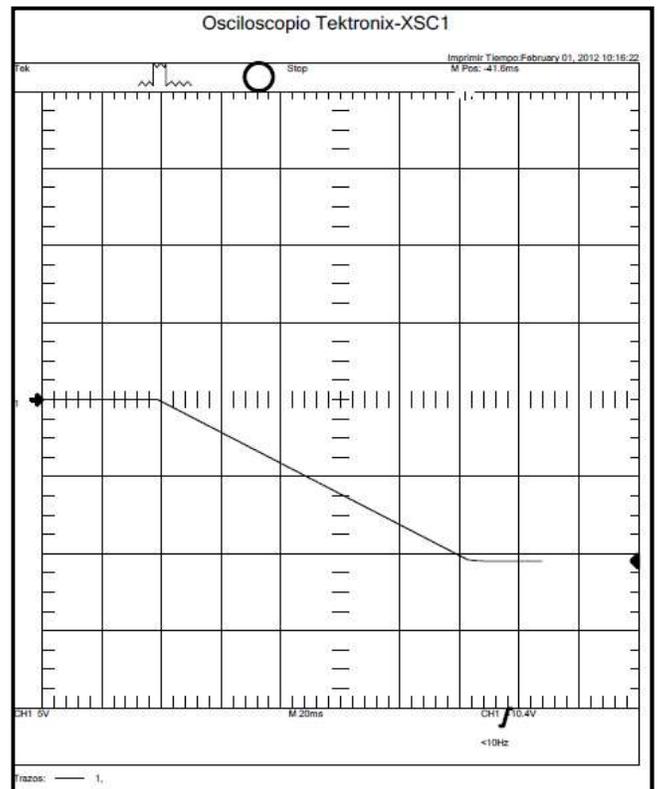


Fig. 11 Pantalla del osciloscopio con respuesta del circuito integrador. Fuente: Captura de pantalla de Multisim®.

De la figura 11 podemos obtener las siguientes mediciones:

$$5.2 \text{ Div} \left(20 \frac{\text{ms}}{\text{Div}} \right) = 104 \text{ ms}$$

$$2.08 \text{ Div} \left(5 \frac{\text{V}}{\text{Div}} \right) = 10.4 \text{ V}$$

3.4 Comprobación teórica de la medición con circuito integrador

Si utilizamos la ecuación del integrador:

$$R = \frac{V_i}{V_o \cdot C} \int_0^t dt$$

Y en ella sustituimos los siguientes datos:

$$\begin{aligned} V_o &= 10.4 \text{ V} \\ V_i &= 5 \text{ V} \\ t &= 104 \text{ ms} \\ C &= 100 \text{ nF} \end{aligned}$$

Con lo cual obtendríamos el valor de la resistencia:

$$R = \frac{5 \text{ V}}{10.4 \text{ V} \cdot 100 \text{ nF}} \int_0^{0.104 \text{ s}} dt = \frac{5 \text{ V} (0.104 \text{ s})}{10.4 \text{ V} \cdot 100 \text{ nF}}$$

$$R = \frac{5 \text{ V} (0.104 \text{ s})}{10.4 \text{ V} \cdot 100 \text{ nF}} = \frac{0.52 \text{ Vs}}{1.04 \mu\text{C}} = 500 \text{ k}\Omega$$

4. Resultados

Se presentan a continuación los resultados según el caso de estudio.

4.1 Resultados del Caso de Estudio: Medición de directa de Resistencia a Película Delgada

Los resultados obtenidos fueron los siguientes: 13.6 MΩ para la película delgada de PbS con TEA; y para las películas delgadas de PbS con PEI fueron de 4.9 MΩ para la de 7 min; 6.9 MΩ para la de 10 min y 8.7 MΩ para la de 13 min, la Tabla 1 presenta estos valores.

Tabla 1 Medición de Resistencia a Películas Delgadas de PbS.
Fuente: Propia.

Material de Película Delgada y tiempo de caracterización	Resistencia (MΩ)
PbS TEA 30 min	13
PbS PEI 7 min	4.9
PbS PEI 10 min	6.8
PbS PEI 13 min	8.7

No se realizaron mediciones de Películas Delgadas de CdS pues la Resistencia del material es muy alta y se sale del rango del multímetro usado.

4.2 Resultados del Caso de Estudio: Medición indirecta de Resistividad a Película Delgada

Para estimar la resistividad de las películas fue necesario determinar el espesor de las películas, estas se midieron por medio de Elipsometría espectroscópica, como se muestra el resultado del espesor.

En la figura 12 se muestra la medición realizada a 4 películas distintas del mismo material, en este caso PbS.

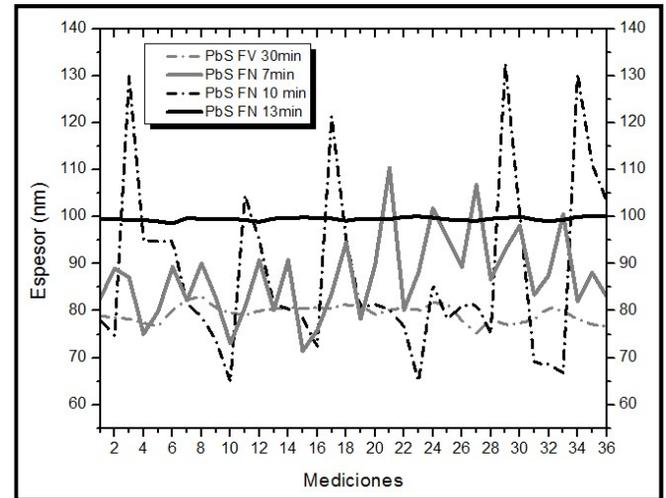


Fig. 12 Mediciones de Elipsometría de películas de PbS.
Fuente: Propia, realizada en Origin®.

Los resultados de los valores de espesores de todas las películas sintetizados se presentan en la figura 13.

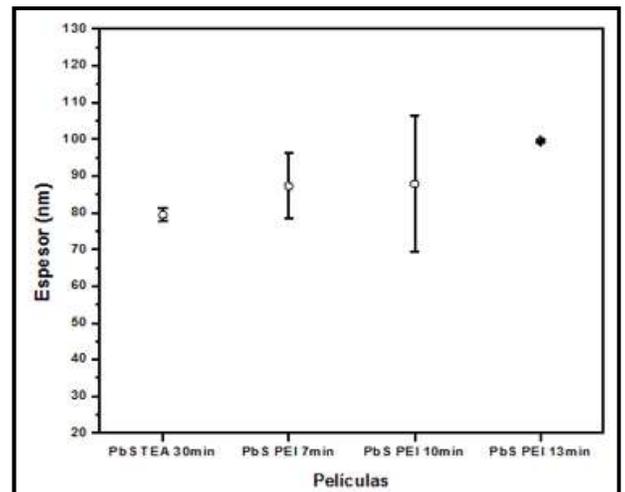


Fig. 13 Comparación del espesor de las películas delgadas de PbS. Fuente: Propia, realizada en Origin®

Los valores de espesor promedio obtenidos mediante el elipsómetro, el largo y ancho se muestran la Tabla 2. Con estos parámetros obtenemos la resistividad usando la ecuación de Resistividad.

Tabla 2 Valores de grosor, largo y ancho de Películas Delgadas de PbS. Fuente: Propia.

	Resistencia (MΩ)	Largo (cm)	Grosor (nm)	Ancho (cm)	ρ (Ω·cm)
PbS TEA 30min	13	0.9	79 ± 2	0.8	92.4
PbS PEI 7min	4.9	0.9	87 ± 9	0.8	37.9
PbS PEI 10min	6.8	0.9	88 ± 18	0.8	53.2
PbS PEI 13min	8.7	0.9	100 ± 0.4	0.8	77.3

La figura 14 presenta la medición del circuito Integrador con un Osciloscopio digital Agilent®.

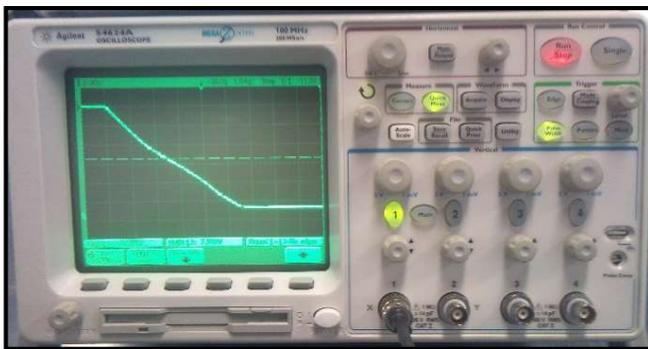


Fig. 14 Resultado en Osciloscopio digital Agilent®. Fuente: Propia.

La medición obtenida del circuito, se muestra en la figura 15 donde se muestra la pendiente de la cual obtenemos el tiempo (t).

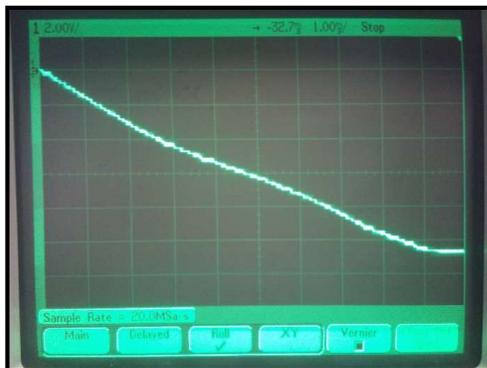


Fig. 15 Pantalla del Osciloscopio digital Agilent®. Fuente: Propia.

Los valores de voltaje y tiempo obtenidos de las figuras 11 y 12 son:

$$9.3 \text{ Div} \left(1 \frac{\text{ms}}{\text{Div}} \right) = 9.3 \text{ ms}$$

$$5.375 \text{ Div} \left(2 \frac{\text{V}}{\text{Div}} \right) = 10.75 \text{ V}$$

Los datos obtenidos son:

$$V_o = 10.75 \text{ V}$$

$$V_i = 5 \text{ V}$$

$$t = 9.3 \text{ ms}$$

$$C = 1 \text{ nF}$$

Si sustituimos estos valores en la ecuación del integrador obtenemos el siguiente valor de resistencia:

$$R = \frac{5 \text{ V}}{10.75 \text{ V} \cdot 1 \text{ nF}} \int_0^{9.3 \text{ ms}} dt = \frac{5 \text{ V} (9.3 \text{ ms})}{10.75 \text{ V} \cdot 1 \text{ nF}}$$

$$R = \frac{5 \text{ V} (9.3 \text{ ms})}{10.75 \text{ V} \cdot 1 \text{ nF}} = \frac{0.0465 \text{ Vs}}{1.075 \times 10^{-8} \text{ C}}$$

$$R = 4.3255 \text{ M}\Omega$$

En la tabla 3 presenta el comparativo entre los dos casos de mediciones Resistencia eléctrica de las Películas Delgadas de PbS y CdS, mediante el Circuito Integrador y el Multímetro.

Tabla 3 Mediciones de Películas Delgadas de PbS y CdS. Fuente: Propia.

Material	Integrador	Multímetro GDM8034
CdS, 30 min	199.3075 MΩ	∞
PbS, 30 min	12.9767 MΩ	13.4 – 13.7 MΩ
PbS 7 min	4.912941 MΩ	4.81 - 4.85 MΩ 4.92 - 4.95 MΩ
PbS 10 min	6.795294 MΩ	6.68 – 6.71 MΩ 6.91 – 6.95 MΩ

5. Conclusiones

La caracterización de propiedades eléctricas proporciona información valiosa sobre el comportamiento eléctrico de los materiales y dispositivos, lo que permite mejorar su rendimiento y fiabilidad. También le proporciona a investigadores, docentes y estudiantes experiencia en el uso de diversos equipos que estarán presentes en los laboratorios y empresas de la cadena de suministro de semiconductores.

Para el primer caso de estudio una forma de medir la resistencia eléctrica de manera directa mediante el uso

de multímetros que tienen un óhmetro para rangos de escala de ohm hasta los megaohms, el problema que surge es que estos equipos para medir resistencia eléctrica alta son caros y se puede tener problemas en conseguirlos. Para nuestras mediciones utilizamos un multímetro marca GwINSTEK modelo GDM8034 con un rango máximo de medición de 20 M Ω , con resolución de 10 K Ω su precio oscila entre los 2 mil a 4 mil pesos.

La metodología propuesta nos permite realizar mediciones que pueden usarse para estimar la resistividad de las películas, pero se requerirá en algunos casos de equipos que permitan medir el espesor de la película como por ejemplo un elipsómetro.

Podemos obtener mediciones de películas de una alta resistencia eléctrica con una buena aproximación a los equipos costosos. Además, al contar con un equipo de elipsometría se pueden obtener otras caracterizaciones a las mismas.

La resistividad eléctrica de las películas se midió usando dos métodos diferentes, todos los experimentos se llevaron a cabo a temperatura ambiente.

Los valores obtenidos en los dos casos son muy similares y pueden usarse para estimar la resistividad de las películas. La ventaja es que los valores de resistencia tienen menos error de fluctuación de medición asociado al multímetro; la variación en las mediciones se relaciona con la alta resistencia del material.

Al medir películas debemos tomar en cuenta que la colocación de los caimanes o pinzas afectan la medición por lo que se debe tener cuidado de esta sobre el elemento conductor o conector. Para la medición de películas con resistencia mayor a 20 M Ω , las mediciones con el multímetro, marca GwINSTEK® modelo GDM8034 tenderán a infinito.

6. Agradecimientos

Agradecemos al Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Hermosillo por los apoyos otorgado para la realización de esta Investigación. Se agradece de igual a la Universidad de Sonora (USON) por el uso de equipos e instalaciones. Se agradece también la colaboración de estudiantes de la primera generación de la carrera de Ingeniería en Semiconductores del TecNM campus Hermosillo.

7. Referencias

- [1] Iglesias Álvarez, Irene. *Guerra abierta entre la Administración Biden y China por la soberanía de los chips*. Computerworld Spain, September 12, 2022. Gale OneFile: Informe Académico (accessed March 22, 2025). <https://link.gale.com/apps/doc/A758619828/IFME?u=anon~608d1fe0&sid=googleScholar&xid=bcd73cb9>.
- [2] Feás, Enrique. *La guerra tecnológica EEUU-China y sus efectos sobre Europa*. Real Instituto Elcano. ARI, 2023, vol. 6, p. 2023.
- [3] Guillén, C.; Martínez, M. A.; Herrero, J. *Accurate control of thin film CdS growth process by adjusting the chemical bath deposition parameters*. Thin solid films, 1998, vol. 335, no 1-2, p. 37-42.
- [4] Barman, J.; Borah, J. Prasad; Sarma, K. C. *Effect of pH variation on size and structure of CdS nanocrystalline thin films*. Chalcogenide Lett, 2008, vol. 5, no 11, p. 265-271.
- [5] Carrillo, Amanda. *Desarrollo de un TFT basado en PbS como semiconductor depositado por baño químico: efecto de parámetros de depósito*. Instituto de Ingeniería y Tecnología, 2018.
- [6] Morales Sánchez, E. et al. *Efecto de los contactos en películas delgadas de GeSbTe*. Superficies y vacío, 2002, no 15, p. 26-29.
- [7] Arreguín, R. Vázquez, et al. *Propiedades eléctricas, ópticas y estructurales de películas delgadas de SnO2 nanoestructuradas, depositadas a partir de acetilacetatos*. Revista mexicana de física, 2011, vol. 57, no 2, p. 162-165.
- [8] Askeland, D. R.; Wright, W. J. (2016). *Ciencia e ingeniería de materiales* (séptima Ed.). México, D.F., México: CENGAGE Learning. ISBN: 9786075260624, 6075260625
- [9] Smith, W. F., & Hashemi, J. (2023). *Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de los Materiales* (Séptima edición). Cd. México, México. McGraw Hill. ISBN: 9786071520241, 607152024X.
- [10] Fluke.com. ¿Qué es la resistencia eléctrica? (Visitado: 02/02/2024) <https://www.fluke.com/es-mx/informacion/blog/electrica/que-es-la-resistencia>

- [11] Nieto, E., et al. *Películas delgadas: fabricación y aplicaciones*. Boletín de la sociedad española de cerámica y vidrio, 1994, vol. 33, no 5, p. 245-258.
- [12] Wang, Debao, et al. *Dendritic growth of PbS crystals with different morphologies*. Journal of crystal growth, 2003, vol. 257, no 3-4, p. 384-389.
- [13] Winkelmann, Kurt; Noviello, Thomas; Brooks, Steven. *Preparation of CdS nanoparticles by first-year undergraduates*. Journal of chemical education, 2007, vol. 84, no 4, p. 709.
- [14] Butt, M.A.; Tyszkiewicz, C.; Karasiński, P.; Zięba, M.; Kaźmierczak, A.; Zdończyk, M.; Duda, Ł.; Guzik, M.; Olszewski, J.; Martynkien, T.; et al. *Optical Thin Films Fabrication Techniques—Towards a Low-Cost Solution for the Integrated Photonic Platform: A Review of the Current Status*. Materials 2022, 15, 4591. <https://doi.org/10.3390/ma15134591>
- [15] PubChem. National Library of Medicine. *Cadmium Sulfide*. (Visitado: 04/02/2024) <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/14783>
- [16] Azom.com. *Cadmium Sulfide (CdS) Semiconductors*. Publicado: 19/04/2013, Visitado: 04/02/2024. <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=8407>
- [17] PubChem. National Library of Medicine. *Lead Sulfide*. (Visitado: 05/02/2024) <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/#query=Lead%20Sulfide>
- [18] Azom.com. *Lead (II) Sulfide (PbS) Semiconductors*. Publicado: 23/08/2013, Visitado: 05/02/2024. <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=8440>
- [19] Villegas, E.; Parra, R.; Ramajo, L. Métodos de medición de espesores de películas delgadas basadas en óxidos semiconductores. Revista mexicana de física, 2018, vol. 64, no 4, p. 364-367.
- [20] De La Herrán, Agustín. *Técnicas didácticas para una enseñanza más formativa*. N. Álvarez y R. Cardoso (Coords.), Estrategias y metodologías para la formación del estudiante en la actualidad. Universidad de Camagüey, 2011, vol. 88, no 10, p. 1407-1410. ISBN: 978-959-16-1404-9.
- [21] Garcés Suárez, Emma Fernanda; Garcés Suárez, Elizabeth María; Alcívar Fajardo, Orly David. Las técnicas didácticas y su articulación en el diseño de metodologías activas: consideraciones necesarias. Revista Universidad y Sociedad, 2022, vol. 14, no 3, p. 409-416.
- [22] Murillo, J., et al. *Estudio de casos*. Universidad Autónoma de Madrid, Madrid, 2013. https://gibt3.wordpress.com/wp-content/uploads/2008/08/estcasos_trabajo1.pdf
- [23] Aramendi Jauregui, Pello, et al. *Estudio de caso y aprendizaje cooperativo en la universidad*. URL: <http://hdl.handle.net/10481/31686>. 2014, 18(1), 413-429. ISSN: 1138-414X, 1989-639X.
- [24] gamco.es. *Simulación*. (Visitado: 06/02/2024) URL: <https://gamco.es/glosario/simulacion/>.