



**CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES AVANZADOS
DEPARTAMENTO DE ESTUDIOS DE POSGRADO**

**Caracterización estructural y eléctrica de celdas
Fotovoltaicas de doble y triple capa**

**TESIS
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN NANOTECNOLOGÍA**

Presentan:

Joselyn Inguanzo Saucedo	MNA1203141
José Alberto de la Torre Moya	MNA1203130
Leobardo Gómez Morales	MNA1203042
Oscar Inguanzo Saucedo	MNA1203158

ASESOR:

Dr. Sion Federico Olive Méndez

CHIHUAHUA, CHIH.

ABRIL, 2016

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a Dios por todo, ya que él fue quien nos ayudó a culminar nuestra maestría, nos dio la esperanza de terminar y de llevar a cabo todo nuestro proceso.

A nuestros padres que nos ayudaron y nos apoyaron en todo momento, a nuestras familias que a pesar de los momentos distantes que se requirió para realizar nuestros estudios, nos apoyaron en cada momento y con su valioso tiempo, a nuestros maestros que a pesar de la distancia, nos apoyaron en todo momento.

Quiero extender un sincero agradecimiento al Dr. Sion Uribe, principal colaborador de nuestra tesis, por su paciencia, disponibilidad y generosidad para compartir su experiencia y amplio reconocimiento sobre la fabricación del material estudiado en esta tesis. Su colaboración fue de gran ayuda durante nuestro proceso de titulación. Le agradezco también por su siempre atentas y rápidas respuestas a las siguientes diferentes inquietudes durante el desarrollo de este trabajo, lo cual se ha visto también reflejado en los buenos resultados obtenidos.

RESUMEN

Durante los últimos años el desarrollo de la nanociencia y la nanotecnología se ha incrementado, gracias a innumerables investigaciones que tratan de explicar el origen de fenómenos físicos de los cuales no se tenía conocimiento. En este contexto, los materiales ofrecen nuevas características y propiedades que anteriormente no se habían descubierto, mismas que abarcan estudios sobre conductividad térmica, transporte electrónico, fotoluminiscencia entre otros. Por otro lado, la creciente necesidad humana de contar con herramientas tecnológicas que puedan proporcionar una mejor calidad de vida, hace que sea posible llevar a cabo dichos estudios y aplicar los conocimientos obtenidos en el desarrollo de nuevas tecnologías, como dispositivos sólidos luminiscentes, celdas solares más eficientes, sensores bioquímicos, filtros solares, por mencionar algunos.

Los primeros capítulos aparece una descripción de la historia de las celdas fotovoltaicas desde el descubrimiento del efecto fotovoltaico en 1839 hasta las celdas de última generación.

El trabajo sigue con una descripción teórica del funcionamiento de la celda solar, en este capítulo se sientan las bases para comprender el funcionamiento de celdas de doble y triple capa. Así mismo se comentará como al introducir átomos dopantes en un red cristalina de Ge, producimos ligeras variaciones según el átomo introducido, podemos tener áreas dopadas de tipo P (con huecos en la banda de valencia) y tipo N (con electrones en la banda de conducción). También comentaremos que dos zonas dopadas diferentemente pueden estar juntas produciendo diferentes efectos. Introduciremos este concepto de unión P-N y explicaremos su aplicación más simple. Así como la eficiencia de las celdas solares de Silicio y de Germanio, que dicho sea de

paso en la actualidad las celdas solares aún no han alcanzado la eficiencia suficiente para poder sustituir a los combustibles fósiles, ni a las energías hidráulicas, por lo que su aplicación queda limitada en éstos días. Se mencionara las diferencias del efecto fotoeléctrico y fotovoltaico; el efecto fotoeléctrico es la emisión de electrones por metales iluminados con luz de determinada frecuencia. El proceso por el cual se liberan electrones de un material por la acción de la radiación se denomina efecto fotoeléctrico o emisión fotoeléctrica; por lo que el efecto fotovoltaico en estas condiciones, si incide la luz y los fotones comunican energía a los electrones del semiconductor, algunos de estos electrones pueden atravesar la barrera de potencial, siendo expulsados fuera del semiconductor a través de un circuito exterior.

Se caracterizó la celda de triple capa mediante diferentes técnicas, por las que se mencionan Difracción Electrónica Dispersa, Difracción de Rayos X y Microscopio Electrónico de Barrido. La celda se seccionó, y se preparó con una resina en la cual, se llevó la caracterización para obtener los elementos de su composición.

Finalmente haciendo mediciones de (I-V) variando el voltaje en intervalos de 2.98 volts y 2.56 amperes, se obtuvo una curva con los puntos máximos de corriente y voltaje, se obtuvo la corriente en CC máxima y el voltaje CA máximo para así poder determinar el factor de forma que se necesita para calcular la eficiencia de las celdas.

Índice

Agradecimientos.....	i
Resumen.....	ii
Índice	iv
1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Nanociencia y Nanotecnología.....	1
1.2. Aplicaciones de Nanotecnología	2
2 JUSTIFICACIÓN.....	4
3 HIPÓTESIS.....	5
4 OBJETIVO	5
5. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	6
5.1. Efecto fotoeléctrico.....	6
5.2. Efecto fotovoltaico.....	7
5.3. Unión pn y dopaje.....	9
5.4. Eficiencia en una Celda.....	12
5.5. Diferencia entre celda de doble capa y triple capa.....	13
5.6. Tipos de celdas	14
6. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	17
6.1. Caracterización de una celda fotovoltaica de triple capa CIMAV.....	17
6.1.1. Preparación de la Muestra en cross section CIMAV.....	18
6.2. Pruebas de voltaje y corriente en corto circuito y circuito abierto UNAM.....	19
6.2.1. SEM UNAM.....	21
6.2.2. Cálculos de eficiencia de celda de doble capa y triple capa.....	21
6.2.3. Curva IV) UNAM.....	24
6.2.4. Piranometro UNAM.....	25
6.3. Procedimiento para hacer una celda por medio de una película UNAM	26
7. TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN EMPLEADAS	27
7.1. DIFRACCIÓN DE RAYOS X (XRD).....	27
7.2. MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO (SEM)	29
7.3. ESPECTROSCOPIA DE ENERGÍA DISPERSA DE RAYOS X (EDS).....	32
8. RESULTADOS	35
9. CONCLUSIONES	44
10. REFERENCIAS	45

1 INTRODUCCIÓN

1.1. Nanociencia y Nanotecnología

La nanociencia es el estudio del fenómeno y la manipulación de la materia a escala nanométrica (0.1 a 100 nm), mientras que la nanotecnología se trata del diseño, caracterización, producción y aplicación de estructuras, dispositivos y sistemas a través del control del tamaño y la forma a nano escala. Comúnmente se utiliza el término nanotecnología para referirse a ambas disciplinas.

Un nanómetro es la unidad de longitud que equivale a una millonésima parte de un metro ($1 \times 10^{-9} \text{m}$). En esta escala, las propiedades físicas, químicas y/o biológicas de los materiales, objetos, sistemas, etc., difieren de manera fundamental de las propiedades de los mismos a tamaño micro/macrocópico, por lo que la investigación y desarrollo de la nanotecnología se orienta a la comprensión y creación de materiales mejorados, dispositivos y sistemas que exploten estas nuevas propiedades. En este sentido, la nanotecnología promete una mejor comprensión de la naturaleza y de la vida misma en donde el tamaño y la forma son importantes. A su vez, la física, la química, la ciencia de los materiales, la simulación computacional y la ingeniería, convergen hacia los mismos principios teóricos y técnicas experimentales, posibilitando avances tecnológicos extraordinarios por la sinergia interdisciplinaria y las iniciativas tomadas por varios sectores y países.

1.2 Aplicaciones de Nanotecnología

Las aplicaciones de la Nanotecnología son diversas. Los científicos de diferentes áreas que participan en las investigaciones y progresos de la Nanotecnología han desarrollado nuevos métodos para la fabricación de plásticos, cerámicos, semiconductores, metales, vidrios y otros materiales.

Se pueden mencionar una gran cantidad de aplicaciones, entre las que sobresalen las siguientes: Energías alternativas, administración de medicamentos, medio ambiente, aplicaciones industriales diversas (tejidos, deportes, materiales, automóviles, cosméticos, pinturas, construcción, etc.) y Microelectrónica (semiconductores, nuevos chips).

Para las energías alternativas, se pueden incluir, entre un gran número de aplicaciones, el desarrollo de nuevas celdas solares es un claro ejemplo de la incursión de materiales nanoestructurados, las cuales tienen mayor eficiencia en la conversión fotovoltaica y otras características de interesante utilidad.

En materia de salud, la Nanotecnología ha permitido un gran número de avances, siendo uno de ellos la administración de medicamentos, como el caso de las cápsulas que navegan por la sangre y que son manipuladas controladamente a la zona dañada. Otras aplicaciones comprenden nano diagnóstico, nano bio sensores, nano medicina regenerativa, por mencionar algunas.

No menos importante es el rubro medioambientalista, el uso de novedosos nano materiales, propician la reducción del consumo de materia prima y de energía. Se desarrollan nuevas sustancias con menor daño al medio ambiente como los fertilizantes y los plaguicidas que disminuyan, incluso eviten, el daño a los cultivos y al medio ambiente, en general.

En el ámbito industrial, se tiene una amplia gama de productos, características y métodos que son útiles debido a las ventajas presentadas ante las tecnologías convencionales. Resistencia,

ligereza, repelencia (al agua, suciedad, microbios), auto-limpieza u otras superioridades existentes en los materiales nano estructurado, hacen de la Nanotecnología industrial, un importante sector para la innovación y la investigación.

Mientras tanto, la Microelectrónica, se ha convertido en una rama de la Electrónica, que se apoya en la Física, Química, Ciencia de los materiales y Nanotecnología, para el desarrollo de nuevo materiales semiconductores y circuitos de alta densidad de integración, lo que conlleva a nuevos dispositivos con sorprendentes funciones y aplicaciones, con técnicas cada vez más eficaces y de diversa utilidad. La experimentación e implementación de técnicas y materiales de nueva generación, incluye procesos como crecimiento de cristal, deposición de película, oxidación, litografía, grabado, impurificación y metalización.

La Microelectrónica permite, a su vez, el desarrollo de áreas como las siguientes:

- Componentes electrónicos
- Electrónica en Energías Renovables
- Telecomunicaciones
- Comunicaciones para la defensa
- Electrónica industrial
- Electrónica médica.

2 Justificación

A medida que una sociedad es más desarrollada, consume más energía, pero no siempre lo hace de un modo eficiente.

Para obtener volúmenes importantes de electricidad, mediante paneles solares, es necesario disponer de amplias superficies de estos.

Toda la tecnología solar fotovoltaica, para transformar la luz solar en electricidad, se basa en materiales semiconductores que resultan relativamente caros debido a sus costosos sistemas de fabricación aunque más que eso debido a su baja eficiencia.

Así, para obtener cantidades importantes de energía (volúmenes importantes de electricidad), es necesario disponer de amplias superficies de paneles fotovoltaicos

3 Hipótesis

A partir de diferentes técnicas de caracterización se demostrará que las celdas solares de triple capa tendrán una eficiencia mayor que las de capa doble de silicio, que típicamente alcanzan un valor del 12%.

4 Objetivo

Caracterizar la estructura cristalina y las propiedades eléctricas de celdas fotovoltaicas de doble capa (Si) y triple capa Ge-Ni-Sn.

4.1. Objetivos específicos

1. Medir los espesores de las capas que forman la celda de triple capa mediante microscopia electrónica de barrido (SEM).
2. Identificar la composición química de la celda de triple capa mediante energía dispersa de rayos X (EDS).
3. Identificar las fases presentes en la celda mediante difracción de rayos X (XRD).
4. Realizar pruebas de campo para determinar curva I-V, eficiencia y comparar las características de la celda de doble y triple capa.
5. Determinar el efecto del concentrador en el incremento de la eficiencia para la lente de triple capa.
6. Realizar mediciones magnéticas con el campo magnético del magnetómetro aplicado paralelo y perpendicular al plano de la muestra.

5 Fundamentos teóricos

5.1 Efecto fotoeléctrico

La emisión de electrones por metales iluminados con luz de determinada frecuencia fue observada a finales del siglo XIX por Hertz y Hallwachs. El proceso por el cual se liberan electrones de un material por la acción de la radiación se denomina efecto fotoeléctrico o emisión fotoeléctrica. Sus características esenciales son:

- Para cada sustancia hay una frecuencia mínima o umbral de la radiación electromagnética por debajo de la cual no se producen fotoelectrones por más intensa que sea la radiación.
- La emisión electrónica aumenta cuando se incrementa la intensidad de la radiación que incide sobre la superficie del metal, ya que hay más energía disponible para liberar electrones.

En los metales hay electrones que se mueven más o menos libremente a través de la red cristalina, estos electrones no escapan del metal a temperaturas normales porque no tienen energía suficiente. Calentando el metal es una manera de aumentar su energía. Los electrones "evaporados" se denominan termo electrones, este es el tipo de emisión que hay en las válvulas electrónicas. Vamos a ver que también se pueden liberar electrones (fotoelectrones) mediante la absorción por el metal de la energía de radiación electromagnética.

El objetivo de la práctica simulada es la determinación de la energía de arranque de los electrones de un metal, y el valor de la constante de Planck. Para ello, disponemos de un conjunto de lámparas que emiten luz de distintas frecuencias y placas de distintos metales que van a ser iluminadas por la luz emitida por esas lámparas especiales.

Sea ϕ la energía mínima necesaria para que un electrón escape del metal. Si el electrón absorbe una energía E , la diferencia $E-\phi$, será la energía cinética del electrón emitido.

$$E_k = E - \phi \quad \text{Ecuación 5.1}$$

Einstein explicó las características del efecto fotoeléctrico, suponiendo que cada electrón absorbía un cuanto de radiación o fotón. La energía de un fotón se obtiene multiplicando la constante h de Planck por la frecuencia f de la radiación electromagnética.

$$E=hf \quad \text{Ecuación 5.2}$$

Si la energía del fotón E , es menor que la energía de arranque ϕ , no hay emisión fotoeléctrica. En caso contrario, si hay emisión y el electrón sale del metal con una energía cinética E_k igual a $E-\phi$.

Por otra parte, cuando la placa de área S se ilumina con cierta intensidad I , absorbe una energía en la unidad de tiempo proporcional a IS , basta dividir dicha energía entre la cantidad hf para obtener el número de fotones que inciden sobre la placa en la unidad de tiempo. Como cada electrón emitido toma la energía de un único fotón, concluimos que el número de electrones emitidos en la unidad de tiempo es proporcional a la intensidad de la luz que ilumina la placa.

5.2 Efecto fotovoltaico

En estas condiciones, si incide la luz y los fotones comunican energía a los electrones del semiconductor, algunos de estos electrones pueden atravesar la barrera de potencial, siendo expulsados fuera del semiconductor a través de un circuito exterior. Se produce una corriente eléctrica. Los electrones, tras recorrer el circuito externo vuelven a entrar en el semiconductor por la cara opuesta.

Mencionaremos que la existencia de la unión p-n hace posible la presencia de un campo eléctrico en la célula, con la dirección del lado n al lado p, que separa los pares electrón-hueco: los huecos, cargas positivas, los dirige hacia el contacto del lado p, lo que provoca la extracción de un electrón desde el metal que constituye el contacto; los electrones, cargas negativas, los dirige hacia el contacto del lado n, inyectándolos en el metal. Esto hace posible el mantenimiento de una corriente eléctrica por el circuito exterior y, en definitiva, el funcionamiento de la célula como generador fotovoltaico.

Se observa que el material semiconductor en ningún momento almacena energía eléctrica como lo haría, por ejemplo, un acumulador electroquímico, sino que lo único que hace es generarla, o mejor, transformar la energía radiante únicamente cuando ésta incide sobre él.

No todos los fotones se comportan del mismo modo en la producción de electricidad por el efecto fotovoltaico. Unas frecuencias son más apropiadas que otras para producir el efecto fotovoltaico, según los tipos de materiales semiconductores utilizados.

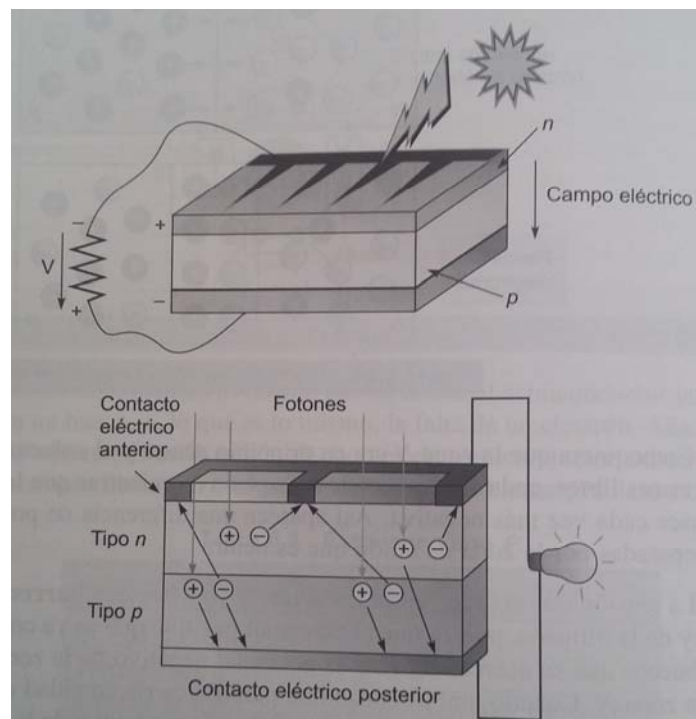


Figura 5.1 Efecto fotovoltaico

5.3 Unión pn y dopaje

El hecho de iluminar el Germanio puede liberar electrones dentro del enrejado cristalino, pero para que estos electrones sean útiles se deben separar y dirigir a un circuito eléctrico. Para separar las cargas eléctricas, la celda solar de Germanio debe tener un campo eléctrico interno incorporado. Uno de los métodos más utilizados para producir este campo eléctrico interno es la presencia de una juntura dentro de un semiconductor. Por lo general esta juntura puede ser el resultado de un semiconductor de cristal simple con una región tipo P y una región tipo N, resultantes del dopaje de un semiconductor con distintos elementos semejante a la juntura P-N de un diodo. La celda de Germanio, uno de los tipos más, comunes

De celdas solares, tiene dos regiones dentro del semiconductor, una región tipo P dopada con Galio, el cual tiene tres electrones de valencia (uno menos que el Germanio) provocando una región con alta concentración de huecos. La otra región tipo N se obtiene al dopar el Germanio con Fósforo, el cual tiene cinco electrones de valencia (uno más que el Germanio) provocando una región con alta concentración de electrones. La diferencia de concentración entre electrones y huecos, entre ambas regiones provoca UN campo eléctrico permanente que se encarga de separar los electrones y huecos adicionales que aparecen cuando la celda es iluminada con la luz del sol.

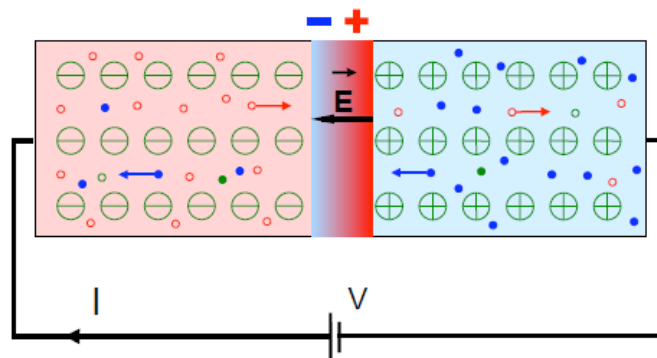


Figura 5.2 Unión de material P y N

Para el grupo IV de semiconductores (referido a la tabla periódica de elementos) tales como el silicio o el germanio, tienen en su banda de valencia 4 electrones, que están unidos con sus vecinos en forma de enlaces covalentes. La adición de impurezas del grupo V tales como el Fósforo a átomos del grupo IV resulta en un exceso de electrones, luego son donadores. Por otro lado con elementos del grupo III, tales como el Galio, conlleva a una pérdida de un electrón por parte del cristal. Algunos de los semiconductores empleados para la construcción de celdas solares son: Germanio (Ge), Silicio (Si) del grupo

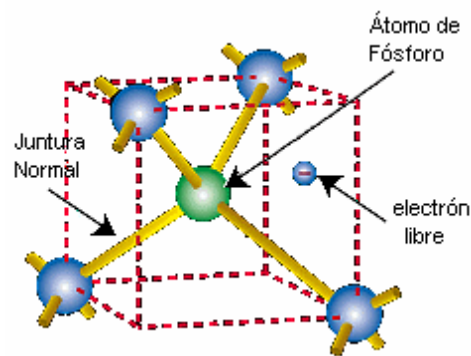


Figura 5.3 Elementos Donadores

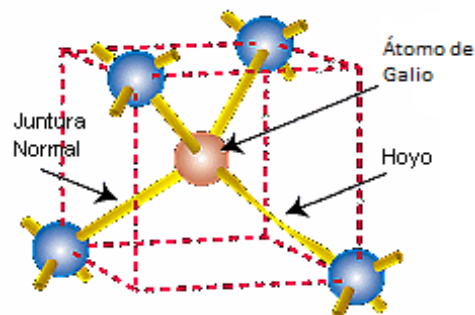


Figura 5.4 Elementos receptores

Existen muchos métodos para introducir impurezas, a un semiconductor: se puede insertar cuando el cristal ya está formado y purificado, cubriendo una lámina del semiconductor con el donante y luego calentar la superficie, esto permite que los átomos del donante se difundan al semiconductor, luego la alta temperatura se disminuye para disminuir la tasa de difusión a cero. Otro método incluye la difusión gaseosa, en el proceso se utiliza un líquido para rociar el semiconductor, y una técnica en la cual los iones de la impureza se introducen de forma muy precisa directamente en la superficie del semiconductor. El dopaje también se puede hacer en el proceso de purificado del cristal, tal como es el caso de las impurezas receptoras, o bien mediante implantación de iones a altas velocidades, estos iones impactan al cristal del semiconductor y lo penetran, a una distancia que depende de la aceleración, del semiconductor y del ión.

5.4 Eficiencia en una Celda

La eficiencia de una célula solar es el porcentaje de potencia convertida en energía eléctrica de la luz solar total absorbida por un panel, cuando una célula solar está conectada a un circuito eléctrico. Este término se calcula usando la relación del punto de potencia máxima, P_m , dividido entre la luz que llega a la celda irradiación

$$\eta(\%) = \frac{P_{cel}}{p_{sol}} \times 100 \quad \text{Ecuación 5.3}$$

Donde:

P_{cel} = Potencia de la celda

P_{sol} = Potencia del sol

En donde la potencia de la celda =Potencia máxima

Bajo condiciones estándar y el área superficial de la célula solar. La STC especifica una temperatura de 25 °C y una irradiación de 1000 W/m² con una masa de aire espectral de 1,5 (AM 1,5). Esto corresponde a la irradiación y espectro de la luz solar incidente en un día claro sobre una superficie solar inclinada con respecto al sol con un ángulo de 41,81° sobre la horizontal. Esta condición representa, aproximadamente, la posición del sol de mediodía en los equinoccios de primavera y otoño con una superficie orientada directamente al sol. De esta manera, bajo estas condiciones una célula solar típica de 1 cm², y de una eficiencia del 27%, aproximadamente, se espera que pueda llegar a producir una potencia de 2.5 volts. Factor de Forma Otro término para definir la eficacia de una célula solar es el factor de llenado o fill factor (FF), que se define como la relación entre el máximo punto de potencia dividido entre el voltaje en circuito abierto (Voc) y la corriente en cortocircuito I_{sc}.

$$P_{max} = FF * I_{sc} * V_{oc}$$

Ecuación 5.4

Donde:

FF = Factor de forma

I_{sc} = Corriente en corto circuito

V_{oc} = Voltaje en circuito abierto

5.5 Diferencia entre celda de doble capa y triple capa

Celdas de Triple capa

Estas células tienen una alta eficiencia, normalmente tienen aplicación en aeroespacial.

Cómo funcionan los paneles solares

En un semiconductor expuesto a la luz, un fotón de energía arranca un electrón, creando al pasar un «hueco». Normalmente, el electrón encuentra rápidamente un hueco para volver a llenarlo, y la energía proporcionada por el fotón, pues, se disipa

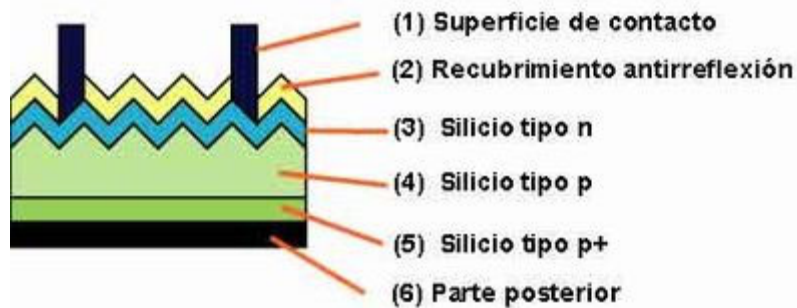


Figura 5.5 Funcionamiento de una celda solar

El principio de una célula fotovoltaica es obligar a los electrones y a los huecos a avanzar hacia el lado opuesto del material en lugar de simplemente recombinarse en él: así, se producirá una diferencia de potencial y por lo tanto tensión entre las dos partes del material, como ocurre en una pila.

5.6 Tipos de celdas

Celdas de Silicio

Las células fotovoltaicas o paneles son sólo una forma de generar electricidad a partir de energía solar. Ellos no son los más eficientes, pero son el más conveniente a utilizar en una escala pequeña y mediana.

Células monocristalinas que se cortan de un solo cristal de silicio que son efectivamente una rebanada de un cristal. En apariencia, que tendrá una textura suave y usted será capaz de ver el grosor de la rebanada.

Estos son los más eficientes y los más caros de producir. También son rígidos y deben ser montados en una estructura rígida para su protección.



Figura 5.6 Celda Monocristalina

Policristalino (o policristalino) las células son efectivamente una reducción de corte de un bloque de silicio, compuesto de un gran número de cristales. Poco menos eficiente y un poco menos costosa que las células monocristalinas y otra vez deben ser montados en un marco rígido.

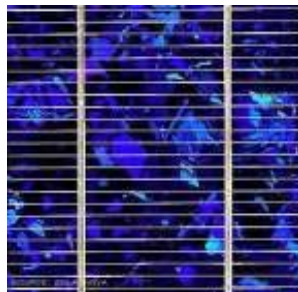


Figura 5.7 Celda Policristalina

Celdas Orgánicas

La celda solar orgánica (CSO) más simple es un semiconductor orgánico que actúa como capa activa entre dos electrodos metálicos, un ánodo y un cátodo, con diferentes funciones de trabajo (energía para sacar un electrón de un material).

Uno de los electrodos, el ánodo, que habitualmente es un TCO (óxido conductor transparente, por sus siglas en inglés), y el sustrato, habitualmente de vidrio, aunque también puede ser otro material orgánico resistente, que actúa como soporte y protección del dispositivo, y que deben ser transparentes para permitir la entrada de la luz solar hasta la capa activa. Sin embargo, esta disposición o heteroestructura no es todavía suficientemente eficiente debido a que no se logra una adecuada disociación de los excitones.

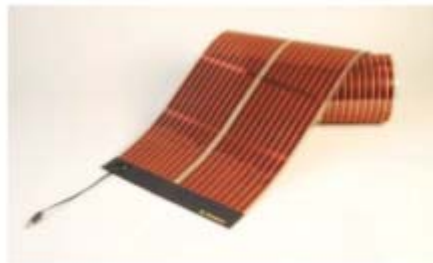


Figura 5.8 Celdas orgánicas

Celdas de telururo de Cadmio

La célula fotovoltaica de telururo de cadmio (CdTe) es una tecnología fotovoltaica que se basa en el uso de una película delgada de telururo de cadmio, una capa de semiconductor diseñada para absorber y convertir la luz solar en electricidad.[1] La célula fotovoltaica de telururo de cadmio es la primera y única tecnología fotovoltaica de película delgada en superar al silicio cristalino en precio para una significativa porción del mercado fotovoltaico, es decir, en sistemas de varios kilovatios.



Figura 5.9 Celda de Teluro de Cadmio

6 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

6.1 Caracterización de una celda fotovoltaica de triple capa CIMAV.

Caracterizar la estructura cristalina y las propiedades eléctricas de celda triple capa Ge-Ni-Sn.

La caracterización de una celda de triple capa Ge-Ni-Sn. Está es realizada a través de un equipo (SEM) microscopio electrónico de barrido, y con la ayuda de un difractómetro, llamado difracción de rayos x (XRD) por medio de ellos se puede determinar las fases de cualquier tipo de celda de dos o más capas.

La caracterización también consiste en identificar la composición química de la celda de triple capa mediante energía dispersa de rayos X (EDS). Y con la ayuda del software match, nos permite conocer la composición química de los elementos analizados, obteniendo una gráfica espectral con los porcentajes de los elementos que conforman dicha muestra.

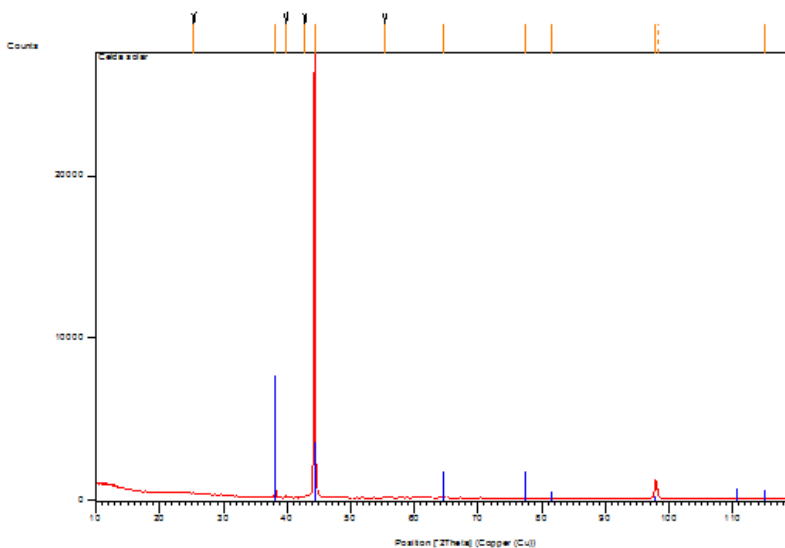


Figura 6.1 Ejemplo de un difractómetro

6.1.1 Preparación de la Muestra en cross section CIMA V

Primero se realizó el corte de la celda fotovoltaica, de triple capa, para facilitar el corte, se utiliza la cortadora de precisión (LECO. VARI/CUTTM VC-50)



Figura 6.4



Figura 6.3



Figura 6.2 Muestra de la celda solar

Segundo, se prepara resina epoxica o poliepóxido el cual es un polímero termoestable que se endurece cuando se mezcla con un agente catalizador o «endurecedor». Se mezcla en un recipiente, se introduce una parte de la celda, se deja endurecer la resina después de 3hrs.



Figura 6.5



Figura 6.6

Después se pulió la muestra, se utiliza el buehler polishing para tener la muestra lo más claro para su análisis con los equipos SEM, XRD.



Figura 6.7 Buehler Polishing



Figura 6.8 Resultado final de cross section

6.2 Pruebas de voltaje y corriente en corto circuito y circuito abierto

Se obtienen las curvas características de la corriente y de la potencia en función del voltaje de circuito abierto de arreglos con celdas fotovoltaicas de doble capa y triple capa. La aplicación del modelo se restringe a celdas fotovoltaicas sometidas a una misma radiación solar, ya que no se consideran los efectos de sombra sobre celdas en el arreglo. Tampoco se evalúan los efectos cuando cambia la temperatura.

Las mediciones de campo se llevaron a cabo para obtener resultados comparativos de las tecnologías a evaluar, Medición de corriente y voltaje.

Corriente a corto circuito I_{cc} (I_{sc}): en sus signos de inglés: Es la máxima corriente generada por la módulo solar y se mide cuando se conecta un circuito exterior a la celda con resistencia nula. La unidad de medición es el Amper. Su valor depende del área superficial y de la radiación luminosa.

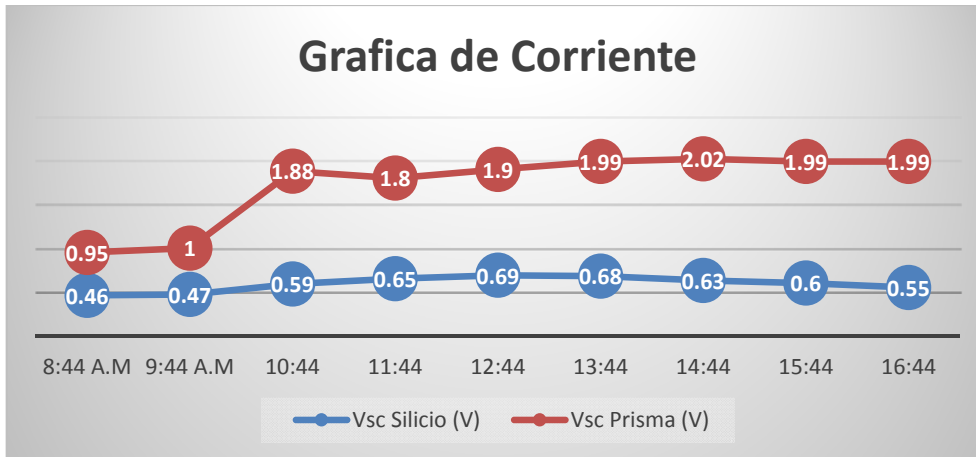


Figura 6.9 Grafica de corriente

Voltaje a circuito abierto V_{ca} (V_{oc}): Es el voltaje máximo que genera un módulo solar. Su unidad de medición es el volt. Este voltaje se mide cuando no existe un circuito externo conectado a la celda. Fig.6.10.

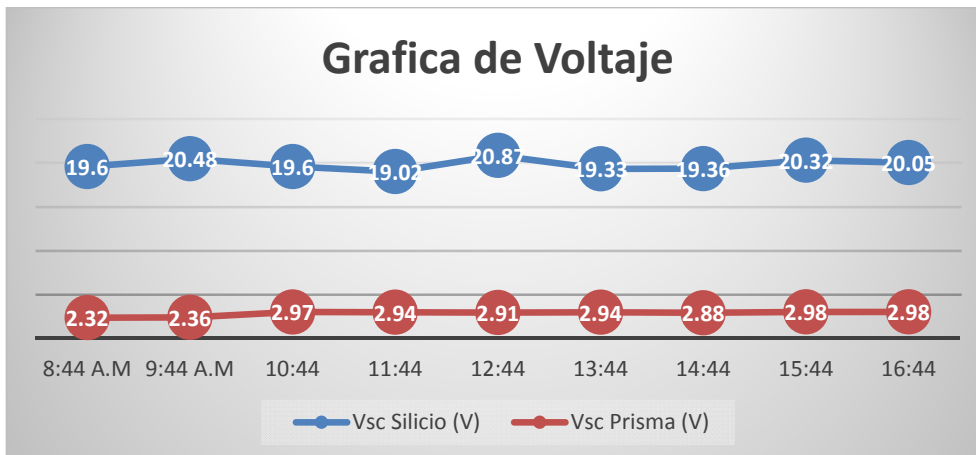


Figura 6.10 Grafica de Voltaje

6.2.1 SEM UNAM

La muestra se colocó en el espacio de trabajo del SEM, con la cara principal y perpendicular al haz de electrones del equipo SUI510 SCANNING ELECTRON MICROSCOPE HITACHI por lo cual se obtuvieron diferentes elementos. Fig.6.12



Figura 6.11 Muestra colocada en el SEM UNAM

CK	18.1	62.57
OK	1.42	3.68
SK	2.51	3.25
Ga K	0.9	0.54
Ge K	1.6	0.92
Ag L	75.47	29.05

Figura 6.12 Tabla de resultados SEM UNAM

6.2.2 Cálculos

Calculo de eficiencia de la celda solar

Los parámetros de funcionamiento de una celda solar, son los que a continuación se detallan:

La corriente de corto circuito, I_{sc} . Es la corriente que se obtiene de la celda cuando la tensión en sus bornes es de cero voltios; es la máxima corriente que se puede obtener de la celda.

La tensión de circuito abierto, V_{oc} . Es la tensión para que los procesos de recombinación igualan a los de generación y, por lo tanto la corriente que se extrae de la celda es nula; constituye la máxima tensión que se puede extraer de una celda solar.

Potencia máxima, P_{max} . La potencia P , es el producto de la corriente por la tensión tanto en cortocircuito como en circuito abierto la potencia es 0, por lo que habrá un valor entre 0 y V_{oc} para el que la potencia será máxima y vale $P_{max}=V_{max}*I_{max}$.

Factor de forma, FF . Que se relaciona con la potencia máxima, la tensión en circuito abierto y la corriente de corto circuito. El máximo valor que puede tener el $FF=1$: así,, cuánto más próximo sea este número a la unidad, mejor será la celda solar

$$P_{max} = I_{sc} * V_{oc} * F_F \quad \text{Ecuación 6.1}$$

Eficiencia, η . Expresado en %, es el parámetro por excelencia que define el funcionamiento de la celda solar. Representa la relación entre la potencia que obtenemos de la celda y la potencia de la luz que incide sobre ella.

$$\eta = \frac{I_{sc} * V_{oc} * FF}{P_{sol} * A} \quad \text{Ecuación 6.2}$$

Donde P_{sol} es la potencia luminosa por unidad de área que se recibe del sol en forma de fotones (condiciones estándar, $100 \text{ mW}/\text{cm}^2$ y A es el área de la celda.

Para calcular la eficiencia de la celda solar, los parámetros se obtuvieron a partir de las pruebas de campo. La prueba que se llevó a cabo para obtener I_{sc} fue en la que se simuló el espectro del sol con una lámpara y se le inyectó voltaje desde -0.2V hasta 2.2V , en intervalos de 0.1V , en la cual se obtuvo un valor de 12mA . Para obtener el voltaje en circuito abierto, se expuso la celda hacia el sol durante intervalos de tiempo y con un multímetro se tomaron las lecturas de

voltaje, dando como resultado 2.2V. El área de la celda se calculó a partir de las dimensiones 1cmx1cm ($1 \times 10^{-4} m^2$).

La potencia luminosa por unidad de área la medimos con un piranómetro de radiación, dando como resultado $864 W/m^2$. El piranometro tiene valores de correspondencia

En el equipo se tiene los siguientes valores de correspondencia de:

$$9.6mV \text{ le corresponde } 1000 \frac{W}{m^2} \quad \text{Ecuación 6.3}$$

En ese momento nos dio una lectura de 8.6 mV, siguiendo la regla anterior tenemos un valor $864 W/m^2$

Al aplicar los valores obtenidos en las pruebas de campo, aplicamos la fórmula de la potencia máxima y la de eficiencia de la celda de triple capa

$$P_{max} = (0.88)(12 \times 10^{-3} A)(2.43V) = 0.025W \quad \text{Ecuación 6.4}$$

$$P_{sol} = 864.58 W/m^2 \quad \text{Ecuación 6.5}$$

Entonces:

$$\eta(\%) = \frac{0.025W}{(864.58 W/m^2)(1 \times 10^{-4} m^2)} \times 100 = 28.93\% \quad \text{Ecuación 6.6}$$

Para el cálculo de la eficiencia de doble capa de silicio, se tomó del panel los datos de fabricante, y simplemente se aplicó la fórmula de la eficiencia, dando como resultado lo siguiente.

$$P_{max} = 10W$$

$$A = 0.0720m^2$$

$$P_{sol} = 1000 \text{ W/m}^2$$

Aplicando los valores, para calcular eficiencia

$$\eta(\%) = \frac{10W}{(1000 \text{ W/m}^2)(0.0720\text{m}^2)} \times 100 = 13.8\%$$

Ecuación 6.7

6.2.3 Curva IV) UNAM

Simulador solar de espectro variable para caracterización de sistemas fotovoltaicos. Permite obtener un espectro ajustado al espectro solar, tanto si éste es un espectro estándar o un espectro real ajustado a unas condiciones locales de irradiación. Se realizó una prueba en la cual se simuló el espectro del sol con una lámpara y a su vez se le inyectó voltaje de C.D en intervalos de 0.1 V desde -0.2 V hasta 2.2 V y se midió la corriente resultante para cada voltaje. Después se graficó el voltaje y corriente para cada elemento y con esta gráfica encontramos la I_{sc} (corriente en corto circuito), para el cálculo de ganancia de la celda solar de triple capa.



Figura 6.13 Cámara de simulación del espectro del Sol Unam.

6.2.4 Piranómetro UNAM

El piranómetro mide la radiación directa y difusa sobre una superficie horizontal. Consta de un pequeño disco plano con sectores pintados alternativamente de blanco y negro. Cuando el aparato es expuesto a la radiación solar, los sectores negros se vuelven más cálidos que los blancos. Esta diferencia de temperatura se puede detectar electrónicamente. Se produce un voltaje eléctrico proporcional a la radiación solar incidente. Se instala una cúpula de vidrio óptico estándar sobre el disco que es transparente a longitudes de onda que oscilan aproximadamente entre 280 y 2.800 nm. Algunos piranómetros usan una cúpula de vidrio de silicio para medir la radiación en diferentes intervalos espectrales. Presenta una relación con los valores de la ecuación 6.3.



Figura 6.14 Piranómetro utilizado en UNAM

6.3 Procedimiento para hacer una celda por medio de una película UNAM

Se utiliza la técnica de Deposito Químico o Baño químico , en este tipo de tecnica las peliculas son mas homogeneas y tienen mayor resistencia. Fig. 6.15.

Se necesito Nitrato de cadmio , nitrato de sodio, amoniaco y sulfuro de cadmio.

Aparece como fuente de lones nitrato de cadmio, como acomplejante que me va controlar la reaccion ni muy rapida ni muy lenta, nitrato de sodio y amoniaco como fuente de azufre .

Al mezclar cada una de las convinaciones todo lleva un orden en las mezclas, en este caso el orden de los factores si alteran el producto, ya realizadas toda las mezclas se utiliza un vidrio porta objeto, se colocan varios en un recipiente, se procede a ponerlos en un equipo llamado POLYSCIENCE IMMERSION CIRCULATORS Fig. 6.16. En este se realiza un baño de recirculacion el cual se mantiene a una temperatura 80° C o bien baño maria. Despues de un tiempo se saca el recipiente con los vidrios y obtenemos una reaccion en el compuesto, lo cual se optienen las peliculas delgadas.

El secreto de este proceso es saber que proporcion y que compuestos quimicos se estan usando. Lo cual puede aparecer en cualquier de los dos tipos: estrato Fig. 6.18 y super estrato Fig. 6.19

TCO vidrio conductor transparente

Sulfuro de plomo para ayudar a la absocion y grafito como electrodo y posteriormente plata. obteniendo un voltaje 80mv a la sombra y 500mv a la luz. Fig 6.19.



Figura 6.15 Preparación de una película por medio de depósito químico en UNAM



Figura 6.16 Horno para preparar la película en UNAM

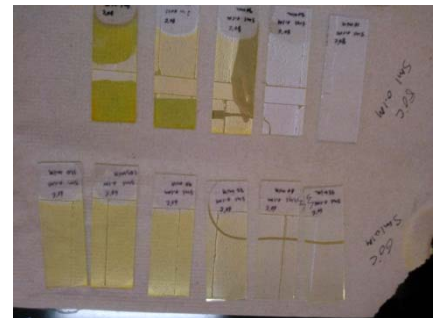


Figura 6.17 Películas ya preparadas en UNAM



Figura 6.18 Películas ya preparadas con polos UNAM

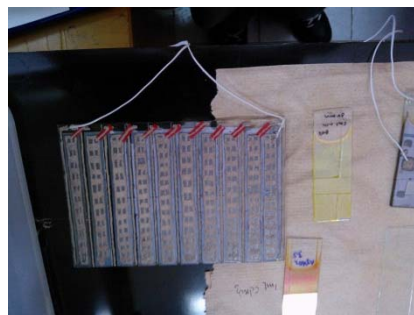


Figura 6.19 Películas ya en conjunto formando un conjunto de celdas de UNAM

7 Técnicas de caracterización empleadas

7.1 Difracción de Rayos X (XRD)

Una de las técnicas más utilizadas para estudiar sustancias es la difracción de rayos X, *XRD* (por sus siglas en inglés). Esta técnica, versátil y no destructiva, se utiliza en estructuras cristalinas, tanto de monocristalinas como policristalinas (pulverizadas).

De manera resumida, se puede decir que el funcionamiento de un sistema XRD es el siguiente:

Se hace incidir un haz de rayos X con longitudes de onda del orden de los 10^{-9} a 10^{-12} m sobre estructuras cristalinas que, al ser muy ordenadas geoméricamente, dispersan los rayos X, con lo cual se permite identificar el arreglo que tienen las redes cristalinas analizadas por la interferencia constructiva de las ondas incidentes de acuerdo con la ley de Bragg. El equipo utilizado para obtener los resultados a través de XRD se conoce como difractómetro, mismo que consiste de un tubo que produce los rayos X que se difractan en la muestra, de acuerdo a la ley de Bragg. Los rayos difractados son medidos en un detector de estado sólido, convirtiendo los rayos en pulsos de corriente eléctrica que son controlados por dispositivos, como los equipos de cómputo, para procesar los datos obtenidos. La Fig. 7.1 presenta un esquema simplificado del sistema XRD.

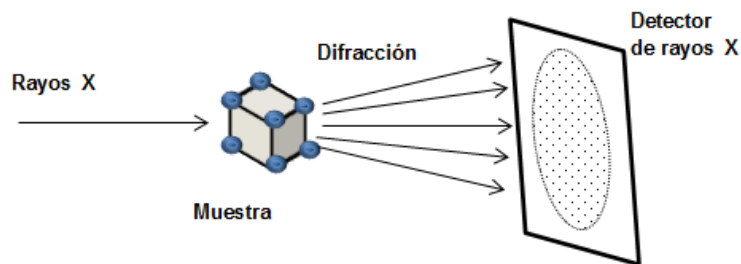


Figura 7.1 Esquema del método XRD

El fenómeno de difracción se presenta cuando un haz de luz incide sobre un material. Debido a que una estructura cristalina posee una organización muy ordenada de los átomos que la forman, funciona como una rejilla por la cual el haz. Los espaciamientos atómicos y las longitudes de onda de los rayos X son de magnitudes de orden aproximadamente similares y, al golpear los rayos X ciertos planos cristalográficos con ángulos específicos, se difracta el haz de luz incidente (Fig. 7.1)

$$2d\sin\theta = n\lambda$$

Ecuación 6.8

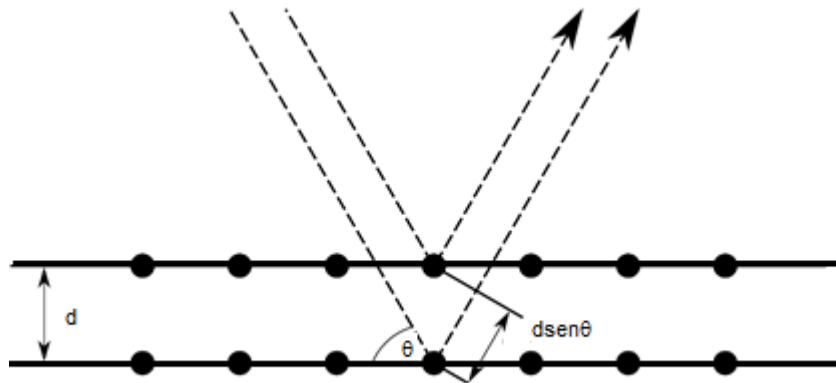


Figura 7.2 Ecuación y diagrama de la ley de Bragg.

Utilizar el método XRD permite conocer las propiedades físicas de las sustancias tras establecer cómo se encuentran organizadas las estructuras más pequeñas (moléculas o átomos). Al emplear esta técnica se logran determinar fases, estructura, textura y esfuerzos de tensión o compresión de las sustancias analizadas. La Figura 7.3 muestra un equipo DRX utilizado en CIMAV.



Figura 7.3 Equipo DRX utilizado en CIMAV

7.2 Microscopio Electrónico de Barrido (SEM)

Las técnicas de Microscopia Electrónica de Barrido (*SEM*, por sus siglas en inglés), es utilizada en el estudio y análisis de materiales microestructurales de objetos sólidos, dicha técnica nos permite observar muestras en dos y tres dimensiones según el análisis requerido, a continuación se describen la técnicas que utilizadas en las películas de Mn_3Ga .

Es un equipo electrónico que tiene la capacidad de observar objetos en tres dimensiones con una resolución de hasta 1nm, es utilizado para el análisis y estudio de objetos sólidos, a esta técnica se le denomina como microscopia electrónica de barrido. Un microscopio SEM es mostrado en la Fig. 7.4.



Figura 7.4 Microscopio Electrónico de Barrido

Su funcionamiento consiste en hacer incidir un barrido de haz de electrones acelerados con energía de hasta 50KeV que proviene de un cañón generador del haz de electrón que y que posteriormente se hace incidir sobre la muestra. Cuando la muestra es orgánica o aislante generalmente es cubierta con una capa muy fina de oro o carbón mediante la técnica de sputtering para evitar que las cargas eléctricas se queden atrapadas en la superficie de la muestra y se pierda el contraste de la imagen.

El microscopio está formado por diversos detectores, entre los que se pueden mencionar el detector de electrones secundarios, detector de electrones retro dispersados y un detector de energía dispersiva.

Detector de electrones secundarios: Son electrones de muy baja energía que resultan de la emisión de los átomos debido a la colisión con el haz de electrones que incide sobre la muestra,

esto ofrece una imagen tridimensional en blanco y negro en alta resolución de la superficie examinada. La Fig. 7.5 muestra una imagen obtenida por SEM de alta resolución.

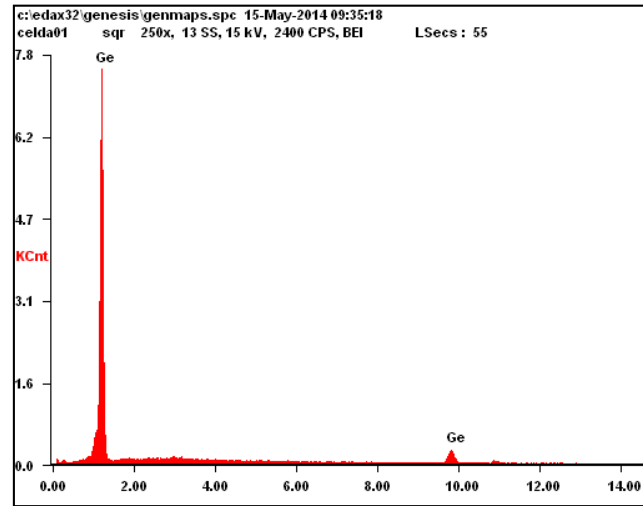


Figura 7.5 Imagen obtenida a través de microscopía SEM de alta resolución

En la Ilustración 7.6 se describen las etapas del funcionamiento del SEM.

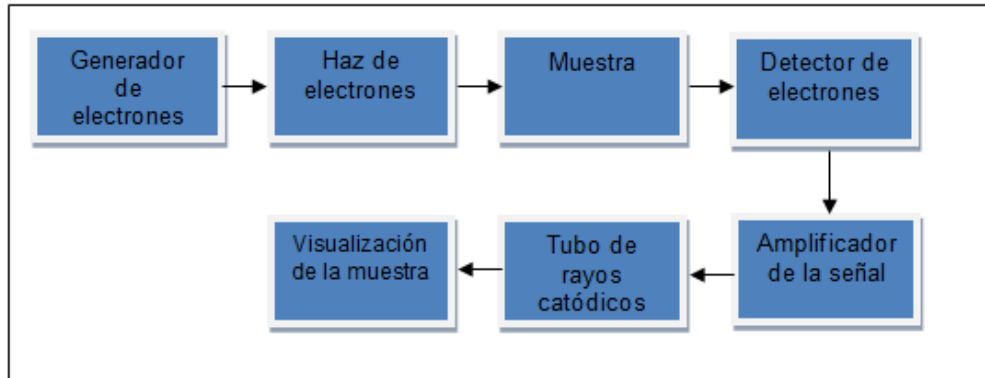


Figura 7.6 Diagrama a bloques del microscopio electrónico de barrido

Aplicaciones:

El uso de dichos equipos es muy variado en diferentes ramos, en la industria petroquímica, metalurgia, arqueología, biomedicina, etc. Algunas de las aplicaciones son: Investigación de

cristalografía, mineralogía y petrología, también caracterización de materiales, y caracterizaciones morfológicas.

7.3 Espectroscopía de energía dispersa de rayos X (EDS)

Utilizando SEM se puede emplear otra técnica de caracterización, conocida como espectroscopía de energía dispersa de rayos X o *EDS* (por sus siglas en inglés). Esta técnica permite conocer la composición química de los compuestos analizados, obteniendo una gráfica espectral con los porcentajes de los elementos que conforman dichas muestras. En la Figura 7.8 muestra una imagen EDS en pantalla de la computadora.

En esta técnica, se mide la energía de los rayos X generados por la interacción del haz de electrones del microscopio con los enlaces químicos del material. Utilizando un detector, consistente en un cristal semiconductor, en el que incide un fotón de rayos X, produciéndose una ionización de cierto número de átomos del mencionado cristal, de tal manera que entre mayor sea la energía del fotón, mayor será también la cantidad de átomos ionizados. Así, se logra registrar el conteo de fotones con determinadas las frecuencias de las energías y medir la transición del átomo al que corresponda. Con la medición realizada, el equipo genera una gráfica semicuantitativa que es mostrada. Además de indicar el tipo de átomos a los que corresponde la energía medida, también se obtiene mediante manipulación computacional de las intensidades de los picos, la información correspondiente a la concentración de dichos átomos, para así obtener los porcentajes de cada elemento que componen una sustancia. Véase una espectroscopía obtenido por la técnica EDS en la Figura 7.7.

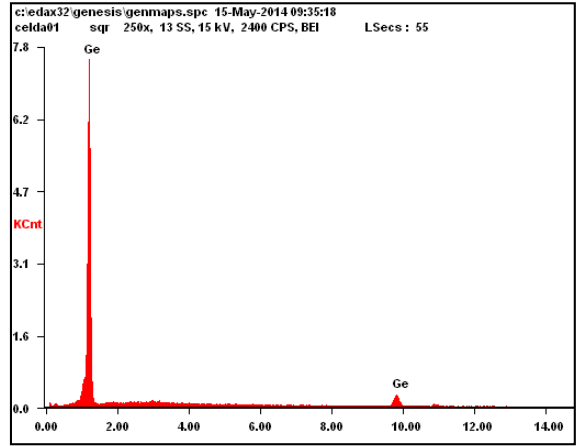


Figura 7.7 Imagen con espectro EDS

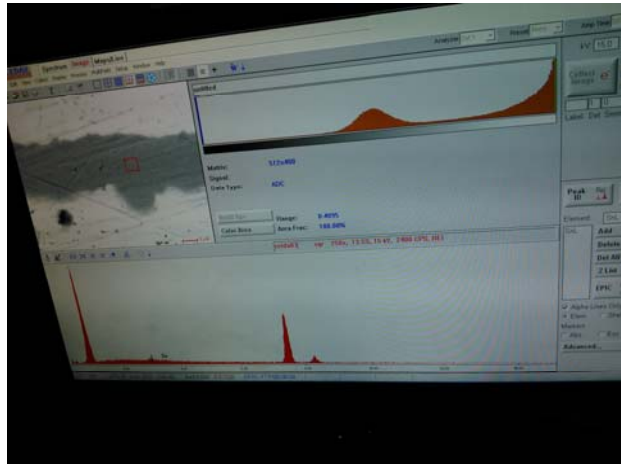


Figura 7.8 Imagen con espectro EDS y SEM

La mayoría de los equipos utilizados para la técnica EDS requieren el suministro de nitrógeno líquido para el enfriamiento del cristal. Sin embargo, recientemente se han logrado avances importantes en la fabricación de los cristales usados, que permiten llevar a cabo las mediciones a temperatura ambiente, con lo que se ha hecho más práctica esta técnica de caracterización. La Ilustración 7.8 muestra un diagrama del efecto de esta técnica.

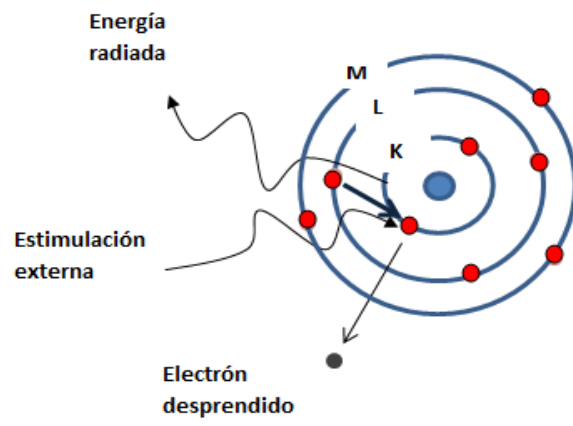


Figura 7.9 Esquema del método EDS

8 RESULTADOS

Resultados EDS CIMAV

1ra Capa

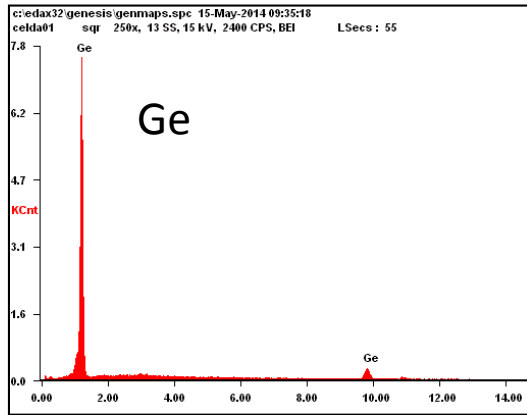


Figura 8.1 Resultado EDS Germanio (Ge)

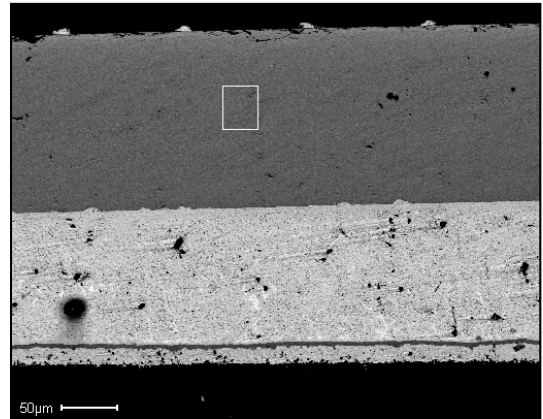


Figura 8.2 Resultado SEM de Germanio (Ge)

En esta gráfica se observa el material obtenido por medio de la prueba de SEM y EDS, en la cual en la primera fase se obtuvo el semiconductor **Germanio** (Ge), en la siguiente imagen se observa el punto donde se representó el material en el equipo.

2da Capa

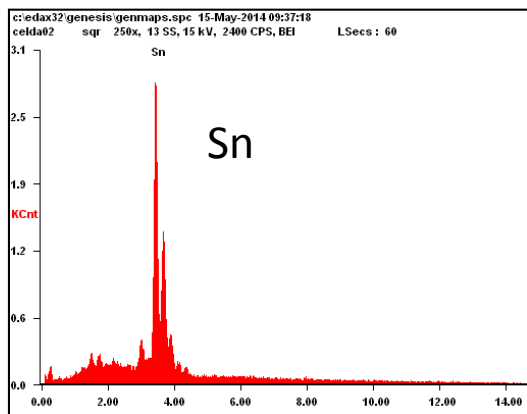


Figura 8.3 Resultado EDS Estaño (Sn)

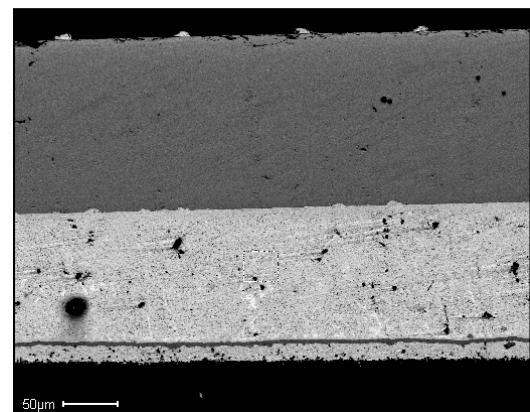


Figura 8.4 Resultado SEM Estaño (Sn)

En esta gráfica se observa el material obtenido por medio de la prueba de SEM y EDS, en la cual en la segunda fase se obtuvo el elemento **Estaño** (Sn), en la imagen 8.4 se observa el punto donde se representó el material obtenido.

3ra Capa

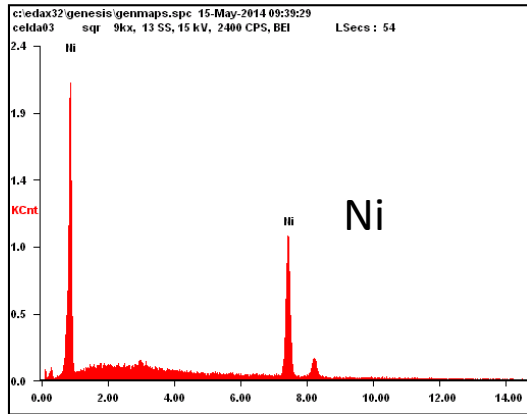


Figura 8.5 Resultado EDS Níquel (Ni)

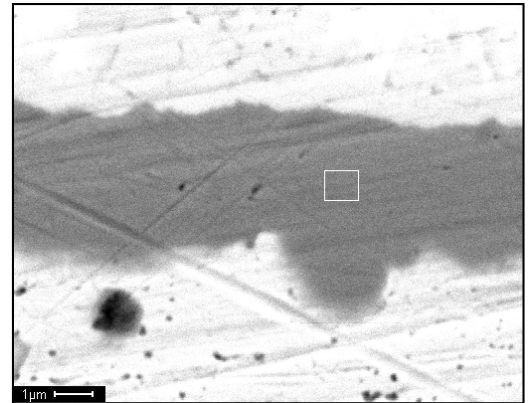


Figura 8.6 Resultados SEM Níquel (Ni)

Siguiendo con los resultados del SEM y EDS se observa el material obtenido por medio de la prueba, en la cual en la tercera fase se obtuvo el elemento **Níquel** (Ni), en las imágenes 8.5 y 8.6 respectivamente se observa el cuadro en la fase del material obtenido.

Electrodo

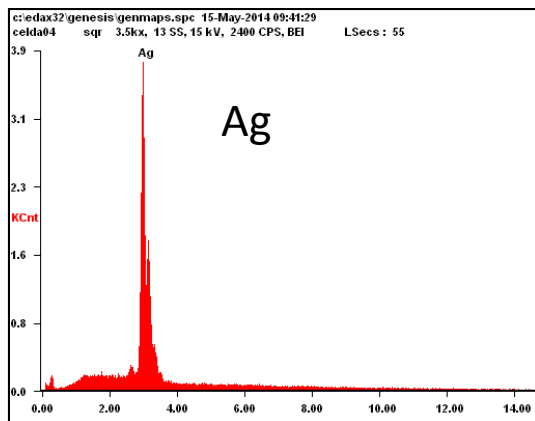


Figura 8.6 Resultados EDS Plata (Ag)

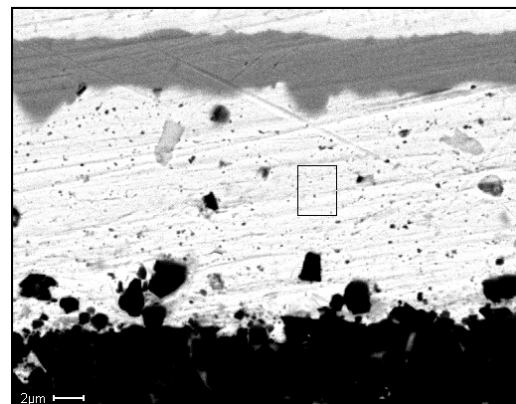


Figura 8.7 Resultados SEM Plata (Ag)

Y por último siguiendo con los resultados del SEM y EDS se observa el material obtenido por medio de la prueba, en la cual en la cuarta fase se obtuvo el elemento **Plata (Ag)**, en las imágenes 8.7 y 8.8 respectivamente se observa el cuadro en la fase del material obtenido.

Resultados XRD CIMA V

Los resultados del equipo de difracción, son analizados con el software Match, el cual nos permite encontrar las fases presentes en la muestra. El procedimiento para encontrar las fases presentes es el siguiente:

A partir de la tabla periódica que muestra el software, se elige un elemento, este elemento arroja sus valores con color rojo, y se busca que el pico más alto del difractómetro coincida exactamente a la mitad, con el elemento elegido.

En el siguiente resultado del difractómetro la gráfica muestra que es un material amorfo, por tratarse de un resultado con un pico ancho no definido. El material amorfo, del que se refiere es el condensador que va en la parte frontal de la celda.

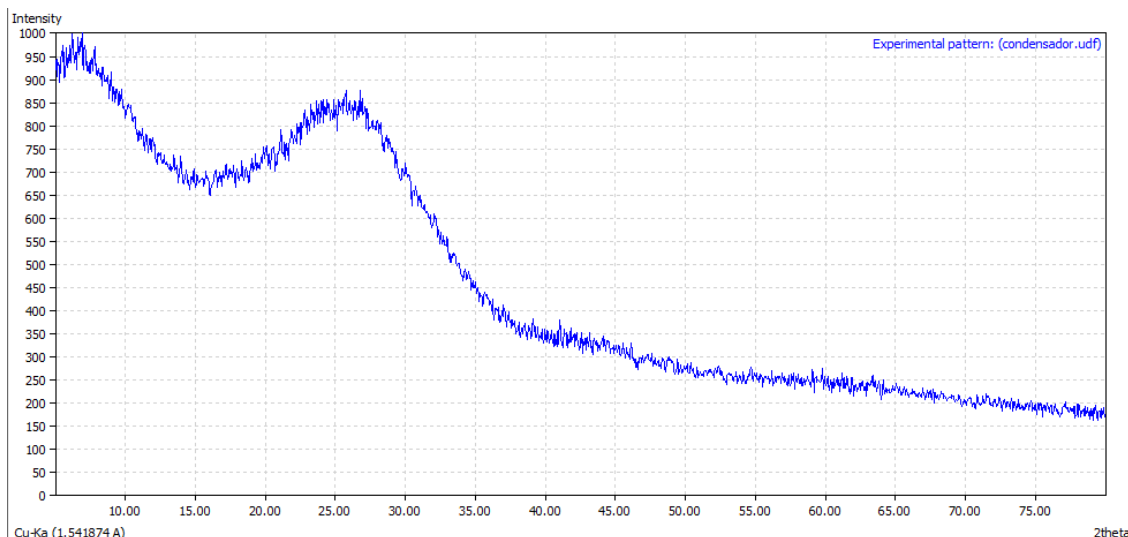


Figura 8.8 Difractograma de condensador de la celda solar

Con el procedimiento antes mencionado, en la siguiente gráfica encontramos que coincide directamente con el elemento **Plata (Ag)**.

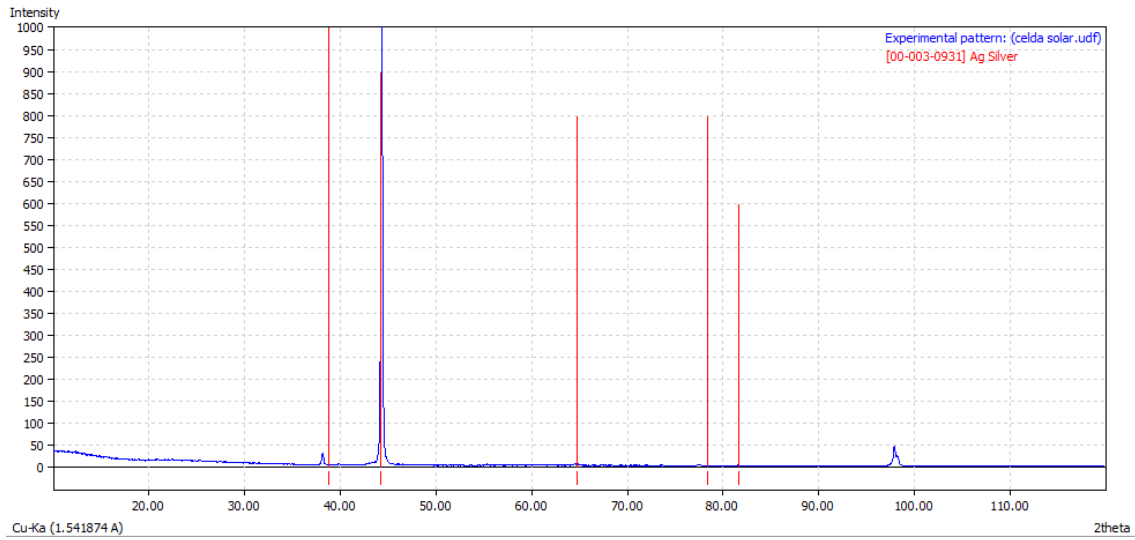


Figura 8.9 Difractograma de Plata (Ag)

En este difractograma encontramos que coincide directamente con el elemento **Níquel (Ni)**

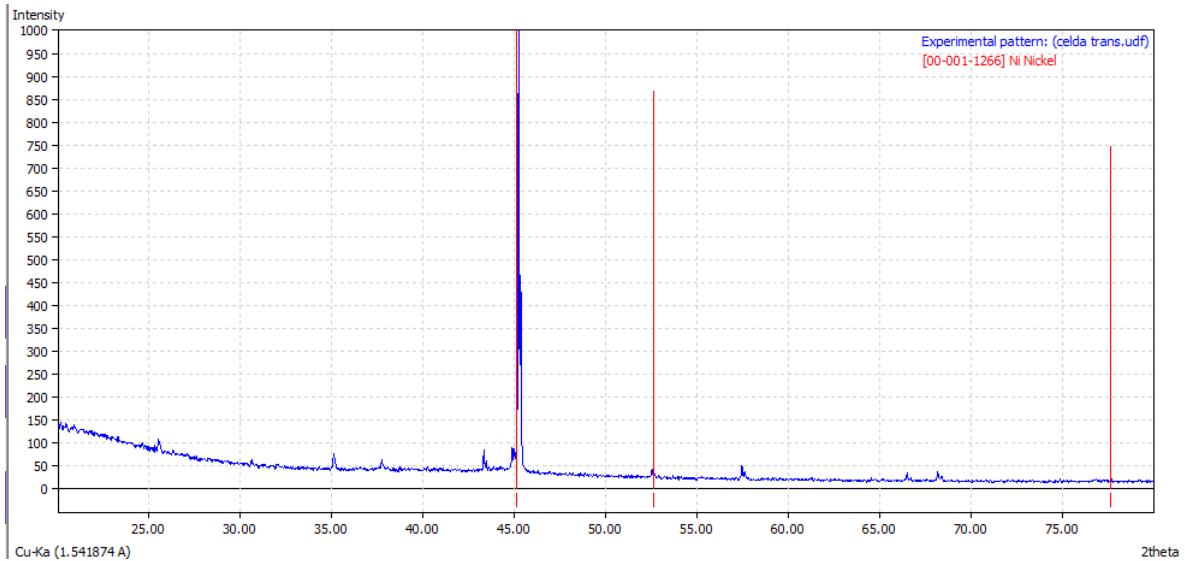


Figura 8.10 Difractograma de Níquel (Ni)

En esta gráfica, muestra que el resultado del difracción que es el elemento **Germanio (Ge)**

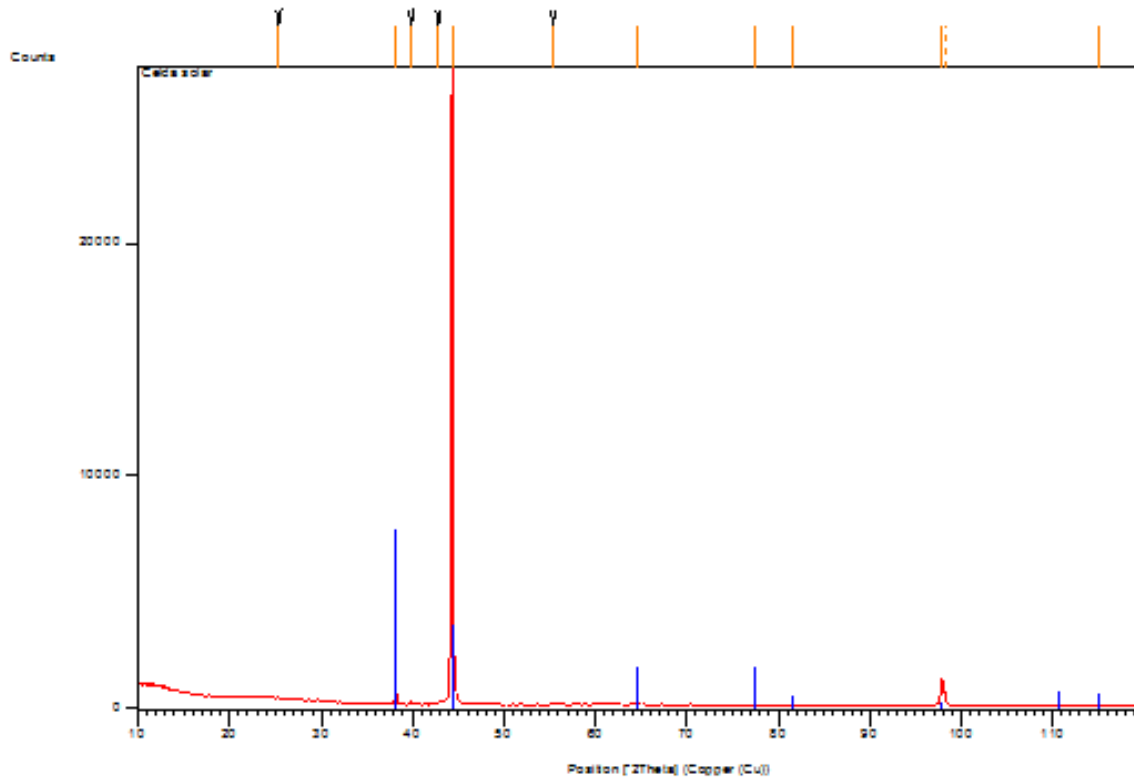


Figura 8.11 Difractograma de Germanio (Ge)

A partir del difractómetro, calcularemos el tamaño de la partícula con la ecuación de Scherrer. Los datos que se obtuvieron del difractómetro fueron:

$$2\theta = 44.54^\circ$$

$$\text{Intensidad} = 1000$$

$$\tau = \frac{K\lambda}{B \cos(\theta_B)}$$

Ecuación 6.9

Donde:

τ = Tamaño de partícula

K = Factor de forma adimensional, casi cercano a la unidad con un valor cercano a la unidad

λ = Longitud de onda de la radiación utilizada

B = Ancho a la altura media del pico de difracción en Radianes.

θ = Angulo de Bragg

Aplicando la ecuación tenemos el siguiente tamaño de partícula:

Calculo de B, a partir de la altura media del pico, donde $\theta = 22.57^\circ$ tomamos una regla de tres en la cual se hace una representación del valor total con el 100% dando un resultado de 0.2257 y este valor a su vez se convierte en radianes, $(\frac{2\pi}{360^\circ})$ dando como resultado $3.88 * 10^{-3}$

$$\tau = \frac{(0.9)(1.5418 * 10^{-10}m)}{(3.88 * 10^{-3})\text{Cos}(22.27^\circ)} \quad \text{Ecuación 6.10}$$

$$\tau = 37.15nm$$

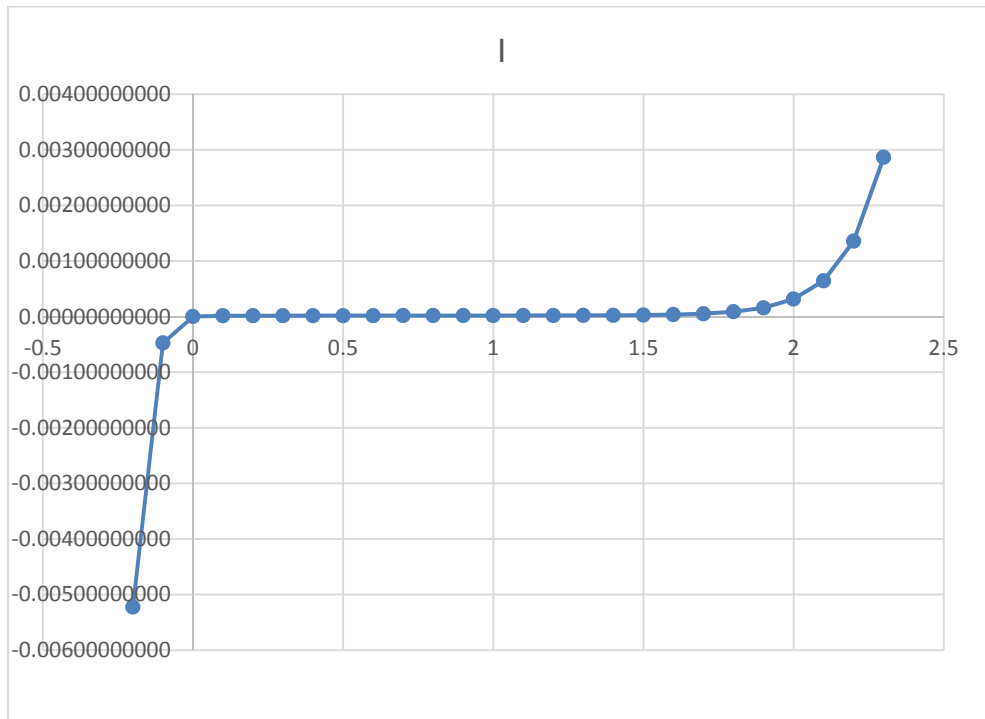
El valor de 37.15 nm, nos muestra un tamaño de partícula del Ge, que como ya lo hemos mencionado es el elemento semiconductor presente en la celda solar de triple capa.

Resultados cámara de simulación espectro Solar

Celda sin prisma sin lente

	V	I	P
-.2, -.0052257	-0.2	-0.00522570000	0.001045140000000
-.1, -.0004742	-0.1	-0.00047420000	0.000047420000000
0, 9.7984E-8	0	0.00000009798	0.000000000000000
.1, 1.41317E-5	0.1	0.00001413170	0.000001413170000
.2, 1.49696E-5	0.2	0.00001496960	0.000002993920000
.3, 1.546E-5	0.3	0.00001546000	0.000004638000000
.4, 1.58969E-5	0.4	0.00001589690	0.000006358760000
.5, 1.63104E-5	0.5	0.00001631040	0.000008155200000
.6, 1.67061E-5	0.6	0.00001670610	0.000010023660000

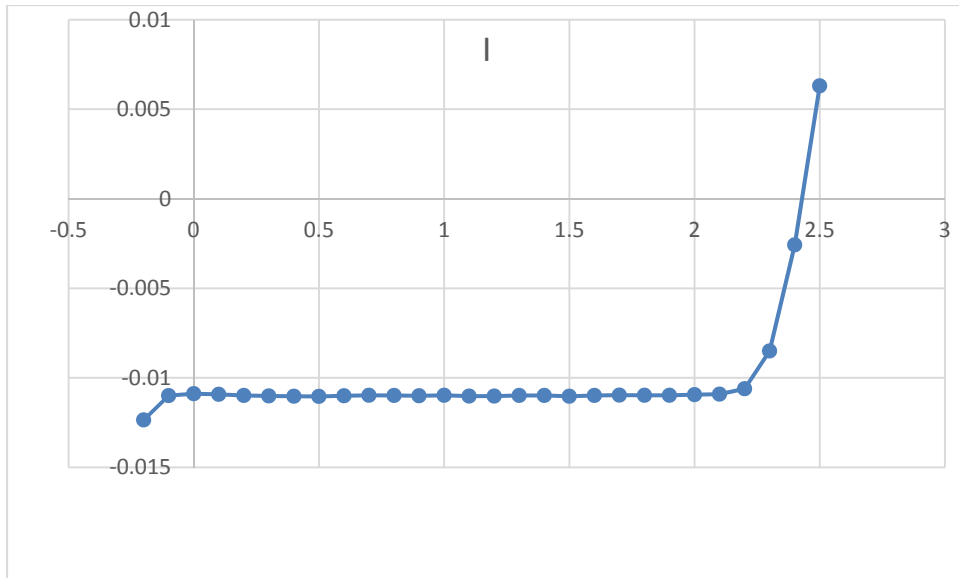
.7,	1.70804E-5		0.7	0.00001708040	0.000011956280000
.8,	1.7441E-5		0.8	0.00001744100	0.000013952800000
.9,	1.77945E-5		0.9	0.00001779450	0.000016015050000
1,	1.81761E-5		1	0.00001817610	0.000018176100000
1.1,	1.86411E-5		1.1	0.00001864110	0.000020505210000
1.2,	1.93094E-5		1.2	0.00001930940	0.000023171280000
1.3,	2.0396E-5		1.3	0.00002039600	0.000026514800000
1.4,	2.24E-5		1.4	0.00002240000	0.000031360000000
1.5,	2.6388E-5		1.5	0.00002638800	0.000039582000000
1.6,	3.4554E-5		1.6	0.00003455400	0.000055286400000
1.7,	5.1382E-5		1.7	0.00005138200	0.000087349400000
1.8,	8.5982E-5		1.8	0.00008598200	0.000154767600000
1.9,	.000157797		1.9	0.00015779700	0.000299814300000
2,	.00031531		2	0.00031531000	0.000630620000000
2.1,	.00064362		2.1	0.00064362000	0.001351602000000
2.2,	.00135739		2.2	0.00135739000	0.002986258000000
2.3,	.002865		2.3	0.00286500000	0.006589500000000



Celda sin prisma con lente

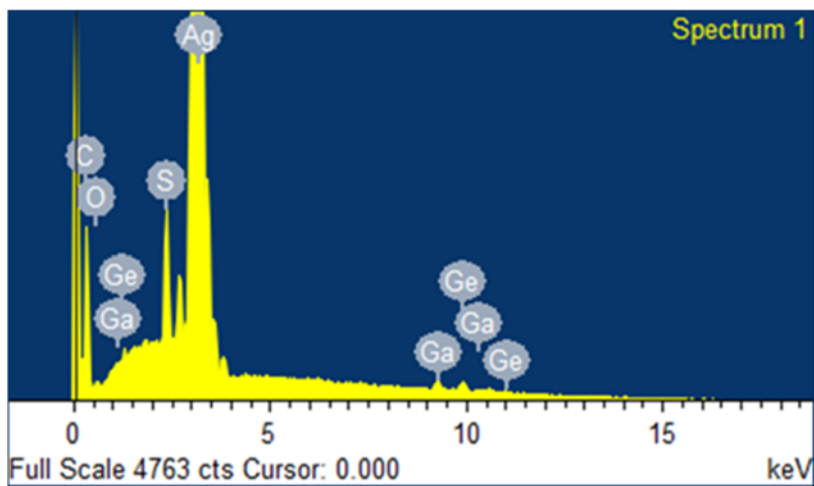
3 CAPL		
V	I	P
-0.2	-0.0123546	0.00247092

-0.1	-0.0109889	0.00109889
0	-0.0108847	0
0.1	-0.0109199	-0.00109199
0.2	-0.0109846	-0.00219692
0.3	-0.0110068	-0.00330204
0.4	-0.011026	-0.0044104
0.5	-0.0110341	-0.00551705
0.6	-0.0110024	-0.00660144
0.7	-0.0109714	-0.00767998
0.8	-0.0109806	-0.00878448
0.9	-0.0110054	-0.00990486
1	-0.0109789	-0.0109789
1.1	-0.0110203	-0.01212233
1.2	-0.0110232	-0.01322784
1.3	-0.0109843	-0.01427959
1.4	-0.0109859	-0.01538026
1.5	-0.0110267	-0.01654005
1.6	-0.0109812	-0.01756992
1.7	-0.0109642	-0.01863914
1.8	-0.0109763	-0.01975734
1.9	-0.010973	-0.0208487
2	-0.0109365	-0.021873
2.1	-0.0109136	-0.02291856
2.2	-0.0106047	-0.02333034
2.3	-0.0085036	-0.01955828
2.4	-0.0025734	-0.00617616
2.5	0.006299	0.0157475



SEM UNAM

Los resultados que se obtuvieron en el SEM UNAM, a partir de la muestra depositada en el equipo fueron los siguientes:



En la gráfica observamos que los elementos presentes en su mayoría es Plata (Ag), le sigue el Germanio (Ge), que es el semiconductor presente en la celda y algunos elementos presentes en la atmosfera como carbono y oxígeno.

9 CONCLUSIONES

- Se caracterizaron la estructura y las propiedades eléctricas de celdas fotovoltaicas de doble capa (Si) y triple capa Ge-Ni-Sn.
- Se identificaron los componentes de la celda de triple capa mediante EDS, siendo: Ge:P, Ge:Ga, Ni, Sn y Ag y cuyos espesores son: 16.28 μm , 12.30 μm , 0.52 μm y 1.56 μm .
- Se identificaron las fases presentes en la celda mediante difracción de rayos X (XRD).
- Se realizaron las pruebas de campo para determinar curva I-V, eficiencia y comparar las características de la celda de doble y triple capa. Por lo que se concluye que la celda de triple capa la más eficiente.
- Se determinó el efecto del concentrador en el incremento de la eficiencia para la celda de triple capa, obtenido 2 A a 3 V. Logrando una ganancia de 2 A.

10 REFERENCIAS

1. Francis Sears_ Mark Zemansky_ Hugh D. Young_ Roger A. Freedman Física Universitaria con Física Moderna 2 2009
2. Física para ingeniería y ciencias con física moderna Bauer Vol II
3. Tomás Perales Benito Instalación de Paneles Solares Térmicos Alfaomega
4. <http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/cuantica/fotoelectronico/fotoelectronico.htm>
5. <http://nanotecnologiacya.blogspot.mx/2013/03/diferencias-nanociencia-y-nanotecnologia.html>
6. http://www.esco-tel.com/Paneles_solares_como_funcionan.html
7. <http://www.anes.org/anes/formularios/Descargas/SistemasFV.pdf>
8. <http://www.cubasolar.cu/Biblioteca/Energia/Energia48/HTML/articulo02.htm>
9. <http://www.isolari.es/tipos-de-placas-fotovoltaicas>.
10. <http://www.isolari.es/tipos-de-placas-fotovoltaicas>.
11. <http://www.cubasolar.cu/Biblioteca/Energia/Energia48/HTML/articulo02.htm>