

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DE ESTUDIOS AVANZADOS
DEL INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**

UNIDAD QUERETARO

Caracterización de la Unión PbS/Ni-Au

Tesis que presenta

Irma Elodia Morales Fernández

para obtener el Grado de

Maestra en Ciencias

en la Especialidad de

Materiales

CINVESTAV IPN
USB INFORMACION Y DOCUMENTACION
SERVICIO DOCUMENTAL

**CINVESTAV
IPN
ADQUISICION
DE LIBROS**

Director de la Tesis: Dr. Rafael Ramírez Bon

Santiago de Querétaro, Qro.

Agosto de 2007

CLASIF:	TA404.2.M68 2007
ADQUIS:	SSI-100
FECHA:	3-VI-2008
PROCED:	DON-2008
	\$

I, D 137889-41001

Agradecimientos

Al Dr. Rafael Ramírez Bon, director del presente trabajo, por su acertada, atenta, paciente y amable conducción, por creer y confiar en mí y también por su amistad.

A los doctores Arturo Mendoza Galván y Yevgen Prokhorov por la revisión de este trabajo, por sus valiosas observaciones y sugerencias, por convidarme de su experiencia, por su amabilidad y su apoyo.

Al Centro de Investigación y Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, Unidad Querétaro, por las condiciones de estudio que me brindó; en especial a todos mis profesores, al personal de la secretaría académica y a los auxiliares de investigación que me apoyaron en el laboratorio: Ing. Pedro García Jiménez, Ing. Alfredo Muñoz Salas, Ing. Martín Adelaido Hernández Landaverde, Ing. Eleazar Urbina Sánchez, M. C. Luz Ma. Reyna Avilés Arellano y M. C. Joaquín Márquez Marín.

A mis compañeros M. C. Ramón Ochoa Landín, M. C., Myrna Guadalupe Sandoval Paz, M. C. Guadalupe Rivera Ruedas y M.C. Abel Hurtado Macías, quienes me facilitaron el trabajo compartiéndome su experiencia.

A la Universidad de Sonora por el apoyo y la licencia que se me otorgó para realizar estudios de maestría, especialmente al Departamento de Física, al Sindicato de Trabajadores Académicos y al Departamento de Desarrollo Académico.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por ser una institución que brinda un importantísimo instrumento de apoyo en la formación del recurso humano en México, la beca de estudios.

*Le dedico este trabajo a:
Irma Lucía, mi linda y buena hija,
a Ramón, mi amado esposo,
a Irma y Ramón,
mis muy queridos y respetados padres,
a Elodia, Ismael y Esperanza,
mis queridos y extrañados abuelos,
a Ramón mi fuerte y querido abuelo,
a Ana Isabel, Beatriz Eugenia, Olivia
Esperanza, Gabriela, Mónica, Ramón
Ismael y Rubén Humberto, mis
queridísimos hermanos.*

Resumen

En este trabajo de tesis, se estudia una serie de dispositivos heteroestructurales formados por una película de óxido de indio-estaño, una película de sulfuro de plomo y un contacto mecánico de níquel con oro. La diferencia entre la serie de dispositivos se tiene en el espesor de las películas de sulfuro de plomo las cuales se obtuvieron con la técnica de depósito por baño químico. Por medio de difracción de rayos X se confirmó la obtención de películas de sulfuro de plomo y los espesores de las películas se obtuvieron por espectroscopia de reflexión y transmisión.

Se determinó que la unión metal-semiconductor, formada por la película de sulfuro de plomo y el contacto de níquel y oro, constituye una barrera Schottky que opera como diodo rectificador. Mediante análisis de las características corriente-voltaje en dicha barrera, se determinó el coeficiente de idealización, la corriente de saturación, el rango del voltaje de operación y la dependencia de estos parámetros con el espesor de la película semiconductor. Con esto último se encuentran las condiciones para obtener el mejor diodo rectificador.

Se observó que el dispositivo es bastante sensible a las condiciones de iluminación y a la amplitud de los voltajes de polarización en que opera. Se encontraron interesantes propiedades no esperadas en los dispositivos, como la existencia de dos estados de resistencia eléctrica, alta y baja, correspondiendo el estado estable al de alta resistencia eléctrica. Se determinó que el estado de baja resistencia tiene capacidad de memoria y se encontró la forma de intercambiar los dos estados de resistencia. Los dos diferentes estados de resistencia del dispositivo obedecen a una modificación en el esquema de bandas de energía en la interface metal-semiconductor. Un modelo de cargas espacialmente localizadas en trampas profundas en la interface explica apropiadamente dichos efectos.

Abstract

In the present thesis work, a series of heterostructural devices formed by an indium tin oxide film, a lead sulphide thin film and a nickel with gold mechanic contact was manufactured and studied. The difference among the series of devices was the thickness of the lead sulfide films, which were obtained by means of the chemical bath deposition technique. By X rays diffraction were confirmed the obtaining of lead sulphide and the films thickness was obtained from reflection and transmittion spectroscopy measurements.

It was determined that the union metal-semiconductor, formed by the lead sulfide film and the nickel and gold contact gate, constitutes a Schottky barrier which behaves as a rectifier diode. By means of the analysis of current-voltage characteristics, the idealization coefficient, the saturation current, the operation voltage range and the dependence of these parameters with the semiconductor film thickness were found. With this latter it was determined the conditions to obtain the best rectifier diode.

It was observed that the device is very sensitive to the illumination conditions and to the bias voltage amplitude. Unexpected and very interesting device properties were found such as the existence of two electric resistance states, low and high, being the high resistance state the stable one. It was determined that the low resistance has memory capability and the way to switch between the two states. The two different resistance states of the device obey to a modification of the energy bands scheme at the metal-semiconductor interface. A located space charged model in deep traps at the interface explains properly these effects.

Tabla de Contenidos

Agradecimientos.....	i
Resumen	iii
Abstract.....	iv
Tabla de Contenidos	v
Lista de Tablas y Figuras.....	vii
1 Antecedentes.....	1
1.1 Introducción.....	1
1.2 Sulfuro de Plomo (PbS).....	2
1.3 Deposito por Baño Químico (DBQ).....	3
1.4 Oxido de Indio-estaño (ITO)	4
2 Objetivos.....	6
2.1 Objetivo General.....	6
2.2 Objetivos Particulares.....	6
3 Marco Teórico	7
3.1 Perfiles de Banda de un Metal y un Semiconductor.....	7
3.2 Perfiles de Banda de la Unión Metal-Semiconductor	8
3.3 Altura de la Barrera Schottky	9
3.4 Flujo de Corriente en una Barrera Schottky	11
3.5 Corriente de Emisión Termoiónica.....	12
3.6 Trampas de huecos y de electrones en un semiconductor.....	15
4 Desarrollo Experimental.....	17
4.1 Síntesis de PbS por DBQ.....	17
4.2 PbS sobre vidrio y sobre ITO	18
4.3 Elementos de Estudio	19
4.4 Contactos Eléctricos	19
4.5 Curva Corriente-Voltaje (I-V).....	21

4.6 Difracción de Rayos X (DRX)	21
4.7 Espectroscopia de Reflexión y Transmisión (ERT)	22
5 Resultados y Discusión.....	24
5.1 Difracción de Rayos X	24
5.2 Espectroscopia de Reflexión y Transmisión	28
5.3 Curva Corriente-Voltaje ($I-V$)	31
5.3.1 Rectificación por barrera Schottky	31
5.3.2 Dispositivo E090 en ambiente oscuro e iluminado.....	36
5.3.3 Dispositivos E210 en ambiente oscuro e iluminado.....	40
5.3.4 Dispositivo E330 en ambiente oscuro e iluminado.....	43
5.3.5 Dispositivo rectificador ideal.....	45
5.3.6 Dispositivo E090 ante diferentes intervalos de voltaje de polarización.....	48
5.3.7 Dispositivo E330 ante diferentes intervalos de voltaje de polarización.....	50
5.3.8 Dispositivo E210 en el intervalo [-5V, 5V].....	52
5.3.9 Serie E en el intervalo [0V, 5V].....	54
5.3.10 Dispositivo E210 ante barrido positivo o negativo del voltaje.....	56
5.3.11 Electrodo en Corto Circuito y a Tierra.....	62
5.3.12 Los Dos Estados de Resistencia	66
5.3.13 Diodos heteroestructurales p-n	67
5.3.14 Modelo de la Carga Espacialmente Localizada.....	68
5.3.15 Coeficiente de Idealización bastante mayor que 1	70
6 Conclusiones y Perspectivas.....	72
6.1 Conclusiones.....	72
6.2 Perspectivas	73
Bibliografía.....	74

Lista de Tablas y Figuras

Figura 3-1: Perfiles de banda de un metal y semiconductores tipo n y p	7
Figura 3-2: Perfiles de banda de la unión de barrera Schottky.....	8
Figura 3-3: Polarización directa e inversa de la unión metal-semiconductor tipo-n.....	10
Figura 3-4: Relación I-V de un Diodo de Barrera Schottky.....	15
Figura 4-1: Sistemas: A (Vidrio/PbS) y E (Vidrio/ITO/PbS)	19
Figura 4-2: Unión ITO-PbS con contacto mecánico entre los electrodos y las películas	20
Figura 4-3: Unión ITO-PbS con contactos de pintura de plata	20
Figura 4-4: Esquema de los haces incidente, reflejado y transmitido en una muestra.....	23
Figura 5-1: Patrón de difracción de rayos X de una película de ITO.....	26
Figura 5-2: Patrón de difracción de rayos X de una película de PbS	26
Figura 5-3: Patrones de difracción de rayos X de la serie E.....	27
Tabla 5-1: Constante de red a (nm), determinada en cada pico de difracción de cada película de PbS	27
Figura 5-4: Espectros de Reflexión y Transmisión de las películas de PbS de la serie A ..	28
Figura 5-5: Ajuste de la medición de Reflexión y Transmisión de la película de PbS del sistema A090	30
Figura 5-6: Espesor de las Películas de PbS de la Serie A en función del tiempo de DBQ	30
Figura 5-7: Mediciones I-V del sistema E090.....	33
Tabla 5-2: Detalles característicos del dispositivo E090.....	33
Figura 5-8: Ajuste de la medición I-V de E090 (α)	34
Figura 5-9: Relación $I-V$ en la heteroestructura Ag/PbS/ITO	35
Figura 5-10: a) Mediciones I-V del sistema E090 en ambiente	37
oscuro (a-c), iluminado (d-f) y oscuro (g-i). b) Cambio de escala en I.....	37
Tabla 5-3: Detalles característicos del sistema E090 en ambiente oscuro e iluminado	38

Figura 5-11: Ajuste de una medición I-V del sistema E090 en ambiente oscuro	39
Figura 5-12: Ajuste de una medición I-V del sistema E090, en ambiente iluminado.....	39
Tabla 5-4: Detalles característicos del sistema E210 en ambiente oscuro e iluminado	40
Figura 5-13: Mediciones I-V del sistema E210 en ambiente oscuro e iluminado. b) Cambio de escala.....	41
Figura 5-14: Ajuste de una medición I-V del sistema E210 en ambiente oscuro	42
Figura 5-15: Ajuste de una medición I-V del sistema E210 en ambiente iluminado.....	42
Figura 5-16: Mediciones I-V del sistema E330 en ambiente oscuro e iluminado.....	43
Figura 5-17: Ajuste de una de las mediciones I-V del sistema E330 en ambiente oscuro e iluminado.....	44
Tabla 5-5: Detalles característicos del sistema E330	44
Tabla 5-6: Is y m de la barrera Schottky en los sistemas E090, E210 y E330	45
Figura 5-18: Corriente de saturación de la barrera Schottky en los sistemas E090, E210 y E330.....	46
Figura 5-19: Coeficiente de idealización de la barrera Schottky en los sistemas E090, E210 y E330.....	46
Figura 5-20: Mediciones I-V con barrido positivo del voltaje en diferentes intervalos del sistema E090.....	49
Figura 5-21: Mediciones I-V con barrido positivo del voltaje en diferentes intervalos del sistema E330.....	51
Figura 5-22: I-V del sistema E210 en los intervalos [0, 5V] y.....	53
[-5V, 0] con barridos positivo y negativo, respectivamente.....	53
Figura 5-23: Mediciones I-V del sistema E210 en los intervalos [0, 5V], [5V, -5V] y [-5V, 5V].....	53
Figura 5-24: Mediciones I-V del sistema E210 en el intervalo [0, 5V].	55
Figura 5-25: Mediciones de Corriente-Voltaje del sistema E210 en el intervalo [-0.5V, 0.5V].....	56
Figura 5-26: Mediciones de Corriente-Voltaje del sistema E210 en el intervalo [-1.0V, 1.0V].....	57
Figura 5-27: Mediciones de Corriente-Voltaje del sistema E210 en el intervalo [-1.5V, 1.5V].....	57

Figura 5-28: Mediciones de Corriente-Voltaje del sistema E210 en el intervalo [-2.0V, 2.0V].....	58
Figura 5-29: Mediciones de Corriente-Voltaje del sistema E210 en el intervalo [-3.0V, 3.0V].....	58
Figura 5-30: Superposición de las mediciones de Corriente-Voltaje con barrido positivo de E210.....	60
Figura 5-31: Superposición de las mediciones de Corriente-Voltaje con barrido negativo de E210.....	60
Figura 5-32: Amplificación de las mediciones I-V no lineales con barrido positivo.....	61
Figura 5-33: Amplificación de las mediciones I-V no lineales con barrido negativo.....	61
Figura 5-34: Corto Circuito a Tierra después de voltajes de polarización suficientemente grandes.....	64
Figura 5-35: Corto Circuito a Tierra después de iluminación intensa.....	65
Figura 5-36: Curva I-V del diodo Si-p/CdS-n estudiado por Duncan y Smellie.....	67
Figura 5-37: Modelo de resistencia y diodo en serie.....	71

1 Antecedentes

1.1 Introducción

Los dispositivos electrónicos de semiconductores tienen una función muy importante en el proceso de generación y manipulación de información. Uno de los requerimientos de estos dispositivos es la respuesta no lineal que pueden brindar, por ejemplo en su conductividad; la rectificación es una respuesta no lineal importante en la cual el flujo de corriente es posible en una dirección pero no en la otra. Un semiconductor sencillo, con todo y que sus propiedades pueden modificarse ampliamente con su adulteración, no tiene ninguna dirección selectiva de esta clase; sin embargo, los semiconductores llegan a ser útiles cuando en vez de una composición química uniforme tienen composiciones espacialmente no uniformes, o bien cuando tienen uniones en ciertas regiones del espacio. Son estas uniones con otros materiales las que nos permiten la concepción y la construcción de los dispositivos que se manejan en la actualidad, pueden formarse con un conductor, con un aislante o también con otro semiconductor.

Cuando una corriente eléctrica fluye a través de la unión entre un metal y un semiconductor sobre la cual existe una diferencia de potencial, la respuesta de la corriente en función del voltaje puede ser lineal o no lineal; en el caso de la respuesta lineal, la unión se denomina contacto óhmico. Los contactos óhmicos entre un metal y un semiconductor son importantes para permitir un flujo de carga suave dentro y fuera de los semiconductores, digamos desde las baterías. Bajo condiciones apropiadas, una unión metal-semiconductor puede proporcionar una barrera de potencial para el flujo de electrones con características de rectificación, constituyendo un dispositivo activo de respuesta corriente-voltaje no lineal, denominado diodo Schottky.

Una de las razones que motivaron el presente trabajo, fue la intención de fabricar un dispositivo rectificador de corriente con la unión de un metal y un semiconductor, esto es, un diodo de barrera Schottky. Considerando el hecho de que en CINVESTAV Querétaro ya se han sintetizado y caracterizado diferentes películas semiconductoras como por ejemplo PbS y CDS, por la técnica de depósito por baño químico, se consideró la posibilidad de fabricar un diodo rectificador utilizando sulfuro de plomo en unión con algún material conductor. Se probaron algunas alternativas como oro, pintura de plata, óxido de indio-estaño, grafito, etc. Un electrodo de níquel y oro, en contacto mecánico con una película de PbS tipo-p, permitió la rectificación de la corriente. Los resultados mostraron que el fenómeno es sensible a la iluminación y al intervalo del voltaje de polarización aplicado, y el dispositivo obtenido mostró, además, un comportamiento con dos estados de resistencia, capacidad de memoria y la posibilidad de intercambiar dichos estados.

Los antecedentes del presente trabajo de tesis se encuentran en este capítulo y los objetivos en el segundo: el marco teórico, referente a la barrera Schottky se presenta en el tercer capítulo; el desarrollo experimental referente a la preparación de materiales y los métodos de caracterización, se presentan en el capítulo cuarto. En el quinto capítulo se presentan los resultados y la discusión de los mismos, y por último, en el sexto capítulo, se presentan las conclusiones y las perspectivas.

1.2 Sulfuro de Plomo (PbS)

El sulfuro de plomo es un semiconductor con múltiples aplicaciones dentro del campo de la ciencia y la tecnología tales como detectores de infrarrojo, fotorresistencias, sensores de humedad y temperatura. Este semiconductor binario es del grupo IV-VI, de gap pequeño y fotosensible; absorbe radiación infrarroja y visible. Sus películas delgadas son policristalinas, de color gris-negruzco y tienden a formar agregados [1]. La estructura cristalina que presentan es cúbica centrada en las caras, su base es de dos átomos y su constante de red es de 5.936\AA [2]; su banda prohibida fundamental es de 0.37 eV ,

aproximadamente, a 300 K, y de 0.286 eV a 4.2 K; su constante dieléctrica es de 170 y su movilidad a temperatura ambiente es de $550 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ para los electrones y de $600 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ para los huecos. Su masa molecular es de 239.26 uma, su densidad de 7.61 g/cm^3 y su punto de fusión es de 1390 K [3]. Es insoluble en el agua y en ácidos diluidos y soluble en HCl. Es posible crecer películas delgadas de PbS por medio Baño Químico. En años recientes se ha reportado el uso de películas de PbS como parte activa de algunos dispositivos y se han hecho estudios para mejorar su fotoconductividad por medio de campos ferroeléctricos [4].

1.3 Deposito por Baño Químico (DBQ)

El baño químico es una técnica para depositar y crecer películas sobre un sustrato sólido a partir de una reacción que ocurre en una solución [5]. Se requiere que el compuesto a depositar sea relativamente insoluble y químicamente estable en la solución precipitación simple en una reacción iónica. Es una técnica de muy bajo costo con la que se pueden obtener depósitos de buena calidad sobre áreas grandes y formas irregulares.

Los elementos necesarios para implementarla son un reactor, un controlador de temperatura, los reactivos y el sustrato sobre el que se depositará la película. El reactor puede ser un vaso de precipitados, el controlador de temperaturas puede ser un baño María y los reactivos son básicamente cuatro tipos de sustancias, éstas son: un compuesto que sea la fuente de los iones metálicos necesarios, un compuesto que sea la fuente de los iones no metálicos, un agente acomplejante y un compuesto suministrador de OH para regular el pH [6]. El agente acomplejante es para evitar una precipitación espontánea durante la reacción del baño químico, pues uno de los iones debe generarse suficientemente despacio para permitir su difusión, su adherencia al sustrato y el crecimiento de la película. La velocidad de la reacción puede controlarse con pocos parámetros como la concentración del precursor de la formación del anión, la temperatura de la solución y su pH.

La sintetización de la película se realiza en cuatro etapas denominadas: incubación, nucleación, crecimiento y final. En la fase de incubación, los reactivos participantes en la solución se ponen en contacto y llegan a un equilibrio químico. En la segunda fase, núcleos de hidróxido metálico recubren la superficie del sustrato activándolo; estos hidróxidos metálicos se internan en la estructura del sustrato y forman parte del mismo. Los hidróxidos son después removidos por una capa de iones no metálicos. En la fase de crecimiento, el espesor de la película aumenta con el depósito gradual de los iones metálicos y no metálicos sobre la capa primaria formada en la etapa anterior. En la fase final, se detiene el crecimiento de la película por agotamiento de los iones en la solución y se forma un polvo fino que se deposita sobre la película recién creada [6].

1.4 Oxido de Indio-estaño (ITO)

El oxido de indio-estaño ($\text{In}_2\text{O}_3:\text{Sn}$) es un oxido metálico al cual se le conoce como ITO por sus siglas en inglés (Indium Tin Oxide). Es ampliamente utilizado en la fabricación de dispositivos heteroestructurales debido a su alta transmitancia en el espectro de la luz visible y su muy alta conductividad [7]. Es el óxido conductor transparente más usado en la mayoría de paneles exhibidores, cuya función básica es la de un electrodo transparente. Es un elemento clave de las celdas solares ya que puede ser la capa superior que permita el paso de luz en la celda para que sea generado un flujo de corriente eléctrica a la salida.

Presenta las dos estructuras cristalinas del Oxido de Indio (In_2O_3) pero con constante de red usualmente más grande. Este incremento se debe a la incorporación sustitucional de estaño (Sn^{4+}) en sitios de indio (In^{3+}), o a la incorporación de iones de estaño (Sn) en sitios intersticiales. El valor de la constante de red en estructura bixbita varía entre $a = 10.12$ y 10.31 \AA , mientras que para la estructura corindón dichos valores oscilan alrededor de $a = 5.49 \text{ \AA}$ y $c = 14.53 \text{ \AA}$. Su índice de refracción es de 1.8 a 2.1 [8]. La resistividad del ITO se incrementa con la temperatura lo que da lugar a un coeficiente de

resistividad de temperatura positivo, señal de comportamiento metálico, ésta depende del método de sintetización y de la concentración del agente adulterante (Sn) [9].

La unión ITO-PbS presentó características I-V lineales, según se observó en mediciones I-V, por lo que se utilizaron películas de ITO para depositar PbS con el propósito de que jugara el papel de contacto eléctrico hacia el exterior del dispositivo rectificador.

2 Objetivos

2.1 Objetivo General

Construir un diodo rectificador de barrera Schottky con la unión PbS/Ni-Au y determinar su coeficiente de idealización y su corriente de saturación.

2.2 Objetivos Particulares

- Depositar películas de PbS, por baño químico, de diferentes espesores sobre una película de material conductor.
- Analizar las características I-V a través de la unión PbS/Ni-Au.
- Analizar la influencia del espesor de la película de PbS sobre las características I-V.
- Determinar el intervalo de operación en el voltaje de polarización del dispositivo.
- Analizar la influencia de la iluminación en el comportamiento del dispositivo.

3 Marco Teórico

3.1 Perfiles de Banda de un Metal y un Semiconductor

Para comprender las propiedades de la unión de barrera Schottky, es conveniente examinar los perfiles de banda de un metal y un semiconductor. El nivel de Fermi en los metales, E_{Fm} , se encuentra en el interior de una banda permitida, mientras que en los semiconductores, E_{Fs} , generalmente se encuentra dentro de la banda prohibida. Si el semiconductor es tipo n , el nivel de Fermi se encuentra cercano al borde de la banda de conducción, E_c ; si el semiconductor es tipo p , se encuentra cercano al borde de la banda de valencia, E_v , [2]. En la Figura 3-1 se muestran los perfiles de banda, así como las funciones de trabajo del metal, $e\phi_m$, y de semiconductores tipo n y p , $e\phi_s$, además de la afinidad electrónica de los semiconductores, $e\chi_s$.

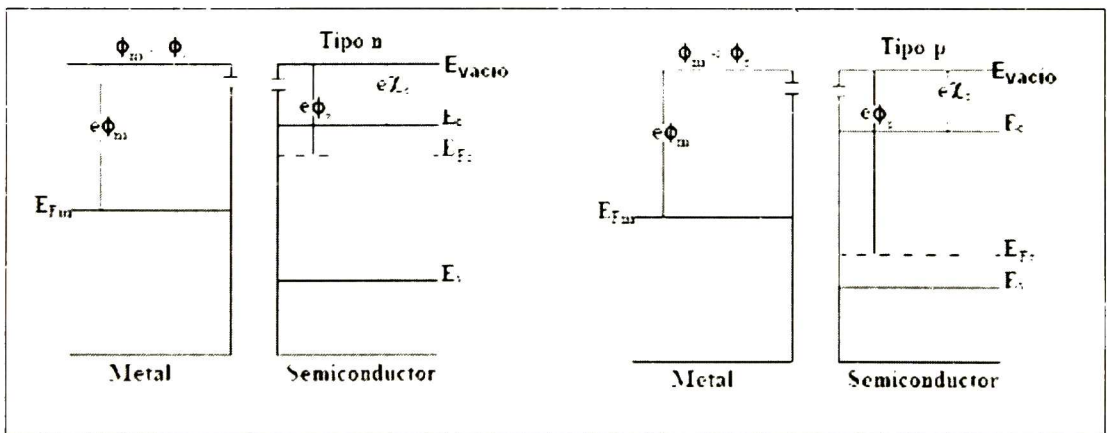


Figura 3-1: Perfiles de banda de un metal y semiconductores tipo n y p

3.2 Perfiles de Banda de la Unión Metal-Semiconductor

Cuando se forma la unión metal-semiconductor, los niveles de Fermi se alinean en la unión y permanecen planos en ausencia de cualquier corriente pues los niveles de energía vacíos en ambos lados deben ser los mismos [10]. Para asegurar la continuidad del nivel vacío y conservar plano el nivel de Fermi éste debe moverse dentro de la banda de separación del semiconductor en la región de interfaz, lo que involucra migración de electrones desde el material con mayor nivel de Fermi hacia el de menor. En la Figura 3-2 se muestran los perfiles de banda para dos uniones metal-semiconductor; la primera con un semiconductor tipo n cuya función de trabajo es menor que la del metal, la segunda con un semiconductor tipo p cuya función de trabajo es mayor que la del metal.

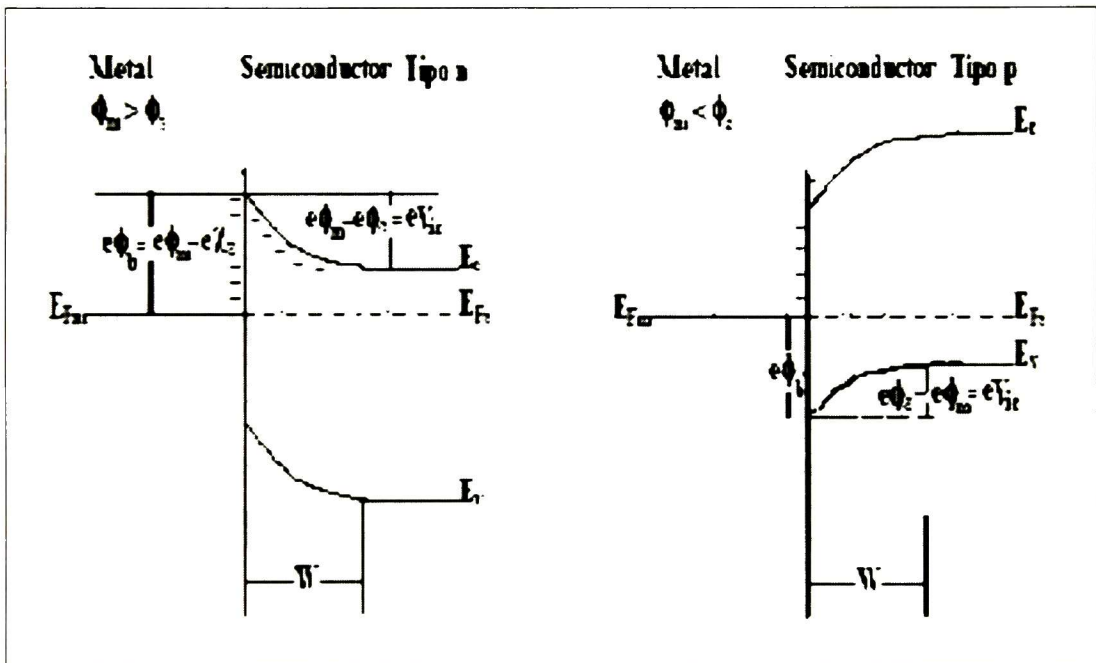


Figura 3-2: Perfiles de banda de la unión de barrera Schottky

Nótese que puesto que el lado del metal tiene una enorme densidad electrónica, el nivel de Fermi del metal o perfil de la banda no cambia cuando una pequeña fracción de electrones es agregada o extraída. A medida que los electrones se mueven de un material

al otro, dejan detrás centros fijos positivamente cargados, y se produce una región de dipolo. El campo eléctrico se opone al flujo de más electrones y en equilibrio la flexión de las bandas de energía es tal que el nivel de Fermi es plano. Esta flexión es hacia arriba o hacia abajo según si el semiconductor se enriquece de huecos o de electrones, respectivamente [11]. Cuando el semiconductor se enriquece del portador de carga minoritario, como es el caso cuando la función de trabajo del metal es mayor que la de un semiconductor tipo-n, o bien cuando la función de trabajo del metal es menor que la de un semiconductor tipo-p, se reduce la conductividad, la capa de conducción reducida es una capa de barrera, y la unión metal-semiconductor se denomina barrera Schottky. Cuando el semiconductor se enriquece del portador de carga mayoritario en la región de contacto con el metal, como es el caso cuando la función de trabajo del metal es menor que la de un semiconductor tipo-n, o bien cuando la función de trabajo del metal es mayor que la de un semiconductor tipo-p, aumenta la conductividad, la capa de conducción elevada se denomina antibarrera y la unión metal-semiconductor es un contacto óhmico.

3.3 Altura de la Barrera Schottky

Si el semiconductor es tipo-n y su función de trabajo es menor que la del metal, por ejemplo, los electrones en el metal enfrentan una barrera para migrar hacia el semiconductor. En la barrera Schottky ideal, la altura de la barrera en la unión metal-semiconductor, es la diferencia entre la banda de conducción del semiconductor en la unión y el nivel de Fermi del metal:

$$e\phi_h = e\phi_m - e\chi, \quad (1)$$

Desde el semiconductor hacia el metal, los electrones también enfrentan una barrera denotada por eV_{ic} como se ilustra en la Figura 3-2. El potencial eV_{ic} se denomina potencial intrerconstruido de la unión, y está dado por:

$$eV_{ic} = e\phi_m - e\phi, \quad (2)$$

La relación entre la barrera Schottky y la barrera debido al potencial interconstruido es:

$$e\phi_b - eV_{ic} = e\phi_s - e\chi_s = E_{F_s} - E_c \quad (3)$$

La altura de la barrera de potencial que enfrentan los electrones que van del semiconductor hacia el metal puede alterarse mediante la aplicación de una polarización externa, como puede observarse en la Figura 3-3, y la unión puede utilizarse para rectificación.

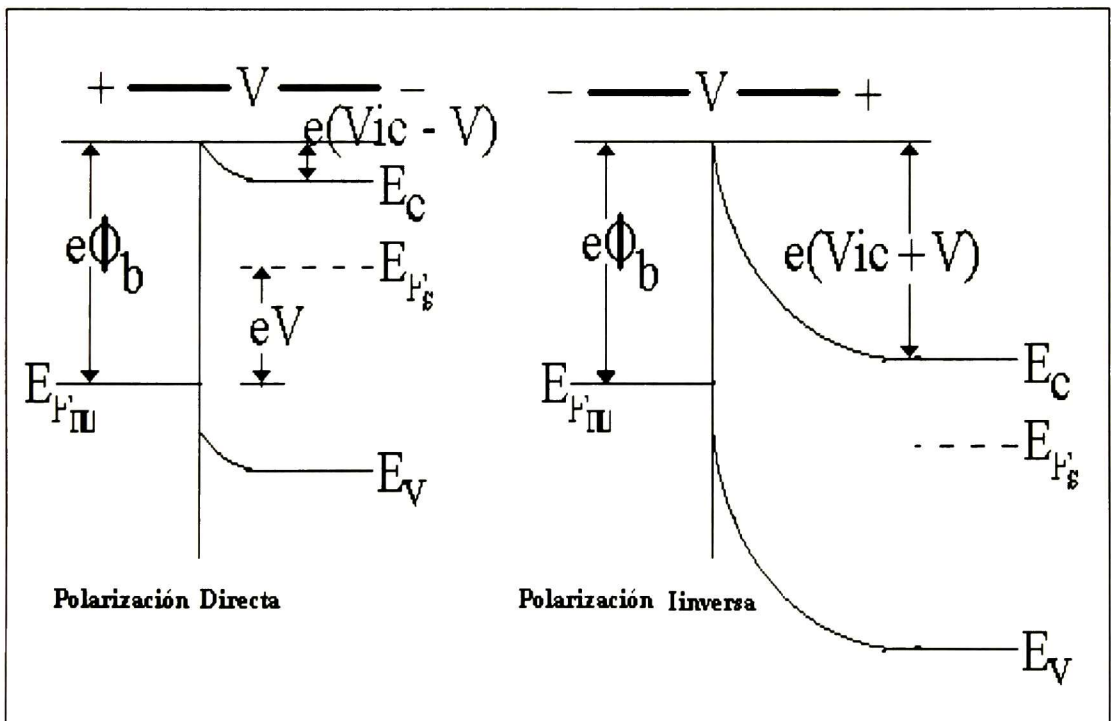


Figura 3-3: Polarización directa e inversa de la unión metal-semiconductor tipo-n

En la discusión anterior, la altura de la barrera Schottky no debe tener dependencia del voltaje de polarización V aplicado, puesto que solo depende de las propiedades del

semiconductor y del metal. Sin embargo, la altura real de la barrera es algo reducida de los valores discutidos debido a un fenómeno llamado la fuerza de la imagen. La fuerza de la imagen resulta de consideraciones electrostáticas de un electrón a una cierta distancia enfrente del metal. El electrón induce una carga opuesta sobre el metal y así siente una interacción atractiva con el metal. Esta fuerza puede calcularse si se supone que existe una carga opuesta a la misma distancia detrás de la superficie del metal. Debido a esta fuerza de la imagen, la barrera vista por el electrón es disminuida. El efecto sin embargo, es muy pequeño.

3.4 Flujo de Corriente en una Barrera Schottky

El flujo de corriente a través de una barrera Schottky puede involucrar un número de mecanismos diferentes. El mecanismo más importante y más deseable es el de emisión termoiónica, en el que los electrones con una energía mayor que la altura de la barrera $e(V_{ic}-V)$ pueden superar la barrera y pasar a través de la unión. A medida que la polarización cambia, la barrera a ser superada por los electrones cambia y la corriente de electrones inyectada se altera de este modo. Esto se muestra esquemáticamente en la Figura 3-3, donde la polarización directa de una unión metal-semiconductor (tipo n) permite a los electrones fluir desde el lado del semiconductor hasta el del metal, incrementando la corriente, o bien, la polarización inversa suprime el flujo de electrones desde el lado del semiconductor mientras el flujo desde el lado del metal no es afectado.

Además de la emisión termoiónica, los electrones pueden también filtrarse cuánticamente por efecto túnel a través de la barrera para generar corriente. Esto puede ser importante si el semiconductor se encuentra fuertemente adulterado de modo que la anchura de agotamiento sea pequeña. Otros mecanismos de corriente que son menos importantes en barrera Schottky de alta calidad pueden involucrar inyección de portador minoritario, trampas relacionadas con la recombinación, etc. Examinaremos la emisión termoiónica dominante relacionada con la corriente.

3.5 Corriente de Emisión Termoiónica

Si suponemos que la corriente por efecto túnel es despreciable, los electrones que cruzan la unión metal-semiconductor deben tener energías mayores que la altura de la barrera en la unión. A medida que un electrón se introduce al semiconductor a través de un contacto y viaja hacia la unión, su trayectoria en la unión neutral se determina simplemente mediante los procesos de deriva-difusión. En la unión deben pasar sobre la barrera y solamente aquellos electrones que tengan energías mayores que la barrera pasarán. La corriente se limita así por la barrera de unión y no la región neutral de deriva-difusión en semiconductores de alta calidad. Supongamos que los electrones en la región del semiconductor están distribuidos de acuerdo con la estadística de Boltzmann. De este modo la fracción de electrones con energía mayor que la barrera de $(V_{ic} - V)$ es:

$$n_h = n_o \cdot \exp\left[-e \frac{(V_{ic} - V)}{k_b T}\right] \quad (4)$$

donde n_o es la densidad electrónica en la región neutral, V es positiva para el diodo polarizado directamente y negativa para el caso inversamente polarizado [10].

Considerando la ecuación 3 y que n_o es:

$$n_o = 2 \left(\frac{m_e^* k_B T}{2\pi\hbar^2} \right)^3 \cdot \exp\left[-\frac{(E_c - E_{f,n})}{k_b T}\right] \quad (5)$$

Se tiene:

$$n_h = 2 \left(\frac{m_e^* k_B T}{2\pi\hbar^2} \right)^3 \cdot \exp\left[-\frac{(e\phi_b - eV)}{k_b T}\right] \quad (6)$$

Para una distribución de Maxwell-Boltzmann de los electrones, la velocidad promedio está relacionada con la temperatura de la forma:

$$\langle v \rangle = \left(\frac{8k_b T}{\pi m_c^*} \right)^{1/2} \quad (7)$$

Si los electrones son considerados como de movimiento aleatorio, el flujo promedio de electrones que incide sobre la barrera metal-semiconductor es $\langle v \rangle n_b / 4$. Si A es el área del dispositivo, la corriente correspondiente es entonces:

$$I_m = \frac{eA}{2} \left(\frac{8k_b T}{\pi m_c^*} \right)^{1/2} \left(m_c^* k_b T \right)^{3/2} \exp \left[\frac{-e(\phi_b - V)}{k_b T} \right] \quad (8)$$

Cuando el voltaje V de la polarización aplicado es cero, el flujo de corriente del metal hacia el semiconductor I_s debe balancear el flujo de corriente desde el semiconductor hacia el metal. De este modo:

$$I_s = I_m(V = 0) = \frac{eA}{2} \left(\frac{8k_b T}{\pi m_c^*} \right)^{1/2} \left(m_c^* k_b T \right)^{3/2} \exp \left[\frac{-e(\phi_b)}{k_b T} \right] \quad (9)$$

Cuando se aplica un potencial V , la barrera vista por los electrones que provienen desde el lado del metal queda sin cambios y la I_s permanece constante.

Así, la corriente neta para un voltaje de polarización aplicada, considerando las ecuaciones 8 y 9, es:

$$I = I_{sm} - I_m = I_s \left[\exp \left(\frac{eV}{k_b T} \right) - 1 \right] \quad (10)$$

Con I_s denominada corriente de saturación:

$$I_s = A \left(\frac{m_c^* e k_b^2}{2\pi^2 \hbar^3} \right) T^2 \exp \left(\frac{-e\phi_b}{k_b T} \right) \quad (11)$$

En la Figura 3-3, se muestran las configuraciones de banda en polarización directa e inversa. Es importante advertir que los electrones en el lado del semiconductor ven una barrera de potencial variable a medida que cambia la polarización aplicada, mientras la corriente desde el lado del metal permanece sin cambios.

Si la altura de la barrera es pequeña, en comparación con alguna k_bT , se tiene que preocupar acerca de una corriente de saturación I_s muy alta. Puesto que esto debe evitarse, se buscan barreras Schottky, con una gran altura de barrera. Para muchos semiconductores de banda de separación estrecha, es difícil obtener barreras Schottky grandes y por consiguiente no se puede emplear este modo de fabricación de diodos.

En una estructura de dispositivo real, las características I - V tienen la forma:

$$I = I_s \left[\exp\left(\frac{eV}{mk_bT}\right) - 1 \right] \quad (12)$$

como en el caso del diodo real. El factor m es el factor idealizado y está muy cercano a la unidad para el diodo Schottky puesto que el dispositivo tiene muy poca participación de portador minoritario y la corriente de recombinación es baja. Este factor idealizado, sin embargo, puede desviarse de la unidad incrementándose gradualmente debido a dos efectos: alta resistencia en serie y alta inyección de corriente [12]. La Figura 3-4 muestra la relación I - V de la barrera Schottky.

Un voltaje de polarización de magnitud muy grande puede desviar del comportamiento ideal de un dispositivo real en la respuesta I - V , por lo que es conveniente determinar un intervalo de ajuste [13]. Si consideramos corrientes mucho mayores que la corriente de saturación, esto es $I \gg I_s$, la ecuación 12 puede transformarse en una relación entre el logaritmo natural de la corriente y el voltaje de polarización de la siguiente forma:

$$\ln I = \left(\frac{e}{mk_bT} \right) V + \ln I_s; \quad (I \gg I_s) \quad (13)$$

En dicho intervalo, esta relación presenta un comportamiento lineal. Además del intervalo de ajuste para la curva I-V, es posible determinar la corriente de saturación de la ordenada en el origen de la recta y el valor de la constante de idealización m de la pendiente.

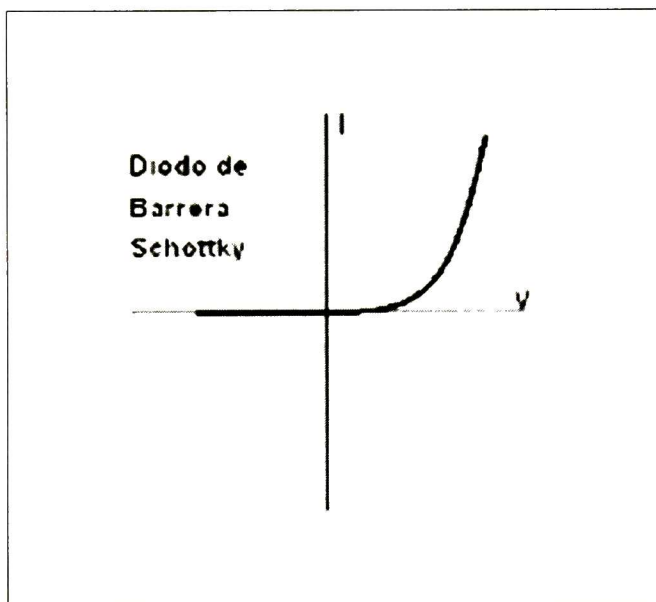


Figura 3-4: Relación I-V de un Diodo de Barrera Schottky

3.6 Trampas de huecos y de electrones en un semiconductor.

Algunos fenómenos fotoeléctricos son describibles en términos de la actividad de los electrones dentro de un semiconductor como la creación de portadores libres por absorción óptica para que contribuyan en la conductividad del material, o la captura de estos portadores libres que conducen a la recombinación o el atrapamiento de carga. En un semiconductor, un electrón libre o un hueco libre pueden ser capturados desde la banda de conducción o desde la banda de valencia, respectivamente, hacia niveles intermedios por algunas imperfecciones. Si estos portadores de carga capturados pueden reexcitarse

térmicamente hacia la banda de energía mas cercana antes de participar en un proceso de recombinación hueco-electrón, las imperfecciones se denominan trampas [14], el proceso de captura se denomina atrapamiento y el proceso inverso desatrapamiento. La tasa de atrapamiento, R_c , es proporcional a la densidad de portadores libres, n , y a la densidad de trampas, N . Esto es:

$$R_c = \beta n N \quad (14)$$

en donde β , se denomina el coeficiente de captura. El coeficiente de captura, es expresado, con frecuencia, como el producto de la sección de atrapamiento, S , por la velocidad térmica promedio del portador libre, u :

$$\beta = S u \quad (15)$$

La tasa de desatrapamiento, R_d , esta dada por:

$$R_d = n_t \nu \left[\exp\left(\frac{-\Delta E}{k_B T}\right) \right] \quad (16)$$

donde n_t es la densidad de portadores atrapados, ν es la frecuencia característica de intento de escape, y ΔE la energía de activación para el desatrapamiento.

Las dislocaciones de materiales cristalinos, las fronteras de grano de los policristalinos y las interfaces con otros materiales son lugares propios para albergar trampas como vacancias e impurezas, capaces de capturar electrones o huecos durante el flujo de corriente eléctrica a través del semiconductor, creando regiones espacialmente cargadas en el semiconductor.

4 Desarrollo Experimental

4.1 Síntesis de PbS por DBQ

En el presente trabajo, los reactivos que se utilizan para depositar películas delgadas de sulfuro de plomo por baño químico son los siguientes compuestos [1]:

- Acetato de Plomo $(\text{CH}_3\text{COO})_2\text{Pb}$ (Fuente de ion metálico)
- Hidróxido de Sodio NaOH (Suministrador de OH y Regulador del pH)
- Tiourea $(\text{NH}_2)_2\text{CS}$ (Fuente de ion no metálico)
- Trietanolamina $(\text{HOCH}_2\text{CH}_2)_3\text{N}$ (Agente Acomplejante)

Los sustratos se lavan con agua y jabón, se enjugan con agua desionizada y se dejan secar en posición vertical protegiéndolos del polvo.

Se preparan las siguientes disoluciones con agua desionizada: Acetato de Plomo (0.5M), Hidróxido de Sodio (2.0M), Tiourea (1.0M) y Trietanolamina (1.0M).

En el reactor se mezclan 100 unidades de volumen de agua desionizada, 5 unidades de Acetato de Plomo (0.5M), 5 unidades de Hidróxido de Sodio (2.0M), 6 unidades de Tiourea (1.0M) y 2 unidades de Trietanolamina (1.0M) en el orden enlistado y de manera inmediata; revolviendo vigorosamente la mezcla con un agitador.

Se colocan los sustratos en posición vertical, con la cara principal hacia las paredes del reactor, ligeramente inclinada hacia abajo.

Se coloca el reactor en el baño María a la temperatura seleccionada para la reacción.

Transcurrido el tiempo de depósito se retira el sustrato del reactor, se enjuaga el sustrato con agua corriente limpiando la superficie con ayuda de un algodón, se enjuaga de nuevo con agua desionizada y se deja secar en posición vertical.

4.2 PbS sobre vidrio y sobre ITO

En el presente trabajo se mezcló en cada uno de dos vasos de precipitados: 50 ml de agua desionizada, 2.5 ml de Acetato de Plomo (0.5M), 2.5 ml de Hidróxido de Sodio (2.0M), 3.0 ml de Tiourea (1.0M) y 1 ml de Trietanolamina (1.0M).

Las películas de ITO se obtuvieron comercialmente de la empresa Delta Technologies Limited con una resistencia nominal de hoja de 8-12 Ω .

Se colocaron los sustratos en posición vertical con las películas de ITO, en su caso, hacia las paredes del reactor, ligeramente inclinados hacia abajo.

Se colocaron los dos reactores en un baño María a 25 °C.

Se retiraron los 5 sustratos de cada reactor en tiempos diferidos: 90, 150, 210, 270 y 330 minutos.

Se limpió con ácido clorhídrico, y posteriormente con agua, la película de PbS depositada en la cara del sustrato que quedó ligeramente inclinada hacia arriba, esto es, la que no quedo directamente frente a las paredes del reactor.

Se obtuvieron así dos series: una de 5 sustratos de vidrio con una película de PbS, la serie A; otra de 5 sustratos de vidrio con una película de ITO y una película de PbS sobre una de sus caras, la serie E.

4.3 Elementos de Estudio

Se denominaron A090, A150, A210, A270 y A330 a las películas de PbS depositadas sobre sustratos de vidrio; y E090, E150, E210, E270 y E330 a las depositadas sobre sustratos de vidrio con ITO, de manera correspondiente a los tiempos de depósito de PbS por baño químico, que fueron 90, 150, 210, 270 y 330 minutos, respectivamente, en ambas series. En la Figura 4-1 se muestran los sistemas tipo A y tipo E que se obtuvieron.

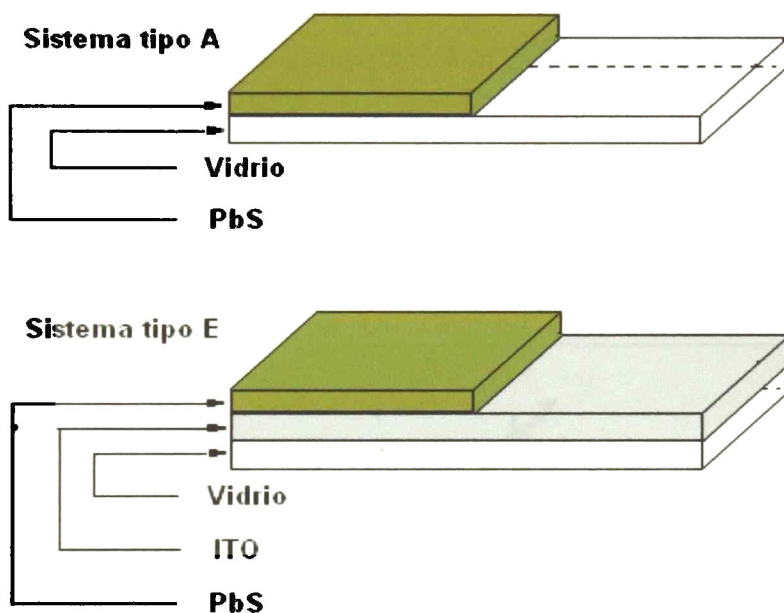


Figura 4-1: Sistemas: A (Vidrio/PbS) y E (Vidrio/ITO/PbS)

4.4 Contactos Eléctricos

Se colocaron contactos de dos tipos en los sistemas E para realizarles estudios de Corriente-Voltaje. Por un lado se utilizaron contactos mecánicos con electrodos de níquel y oro sobre las películas de ITO y PbS, como se muestra en la Figura 4-2; por otro lado se colocaron contactos con pintura de plata de la marca Circuit Works, de aproximadamente 1 mm² de superficie, entre los electrodos y las respectivas películas, como se muestra en la Figura 4-3.

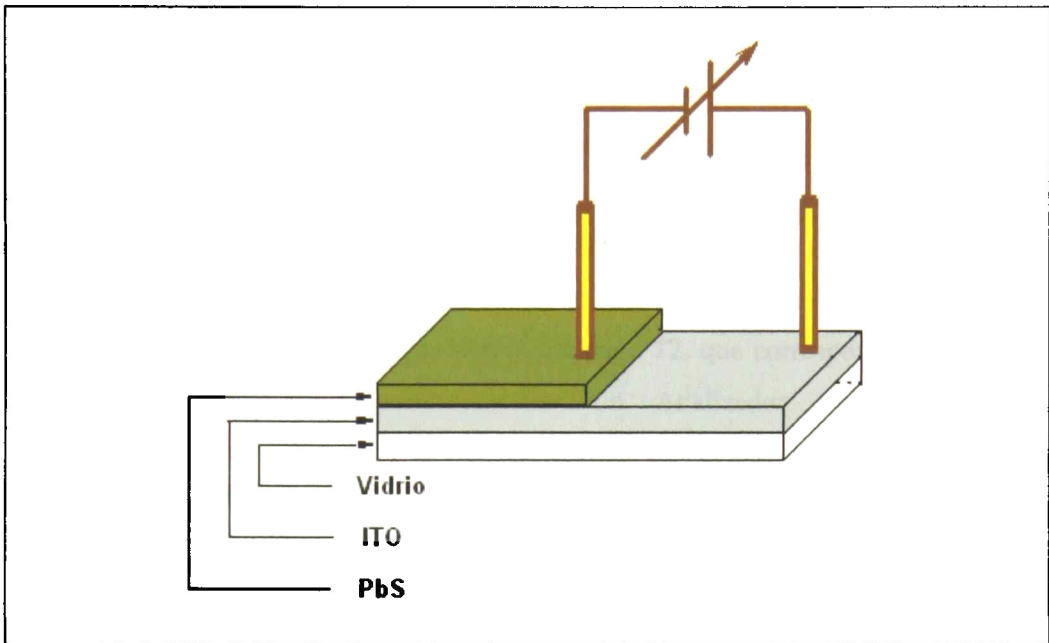


Figura 4-2: Unión ITO-PbS con contacto mecánico entre los electrodos y las películas

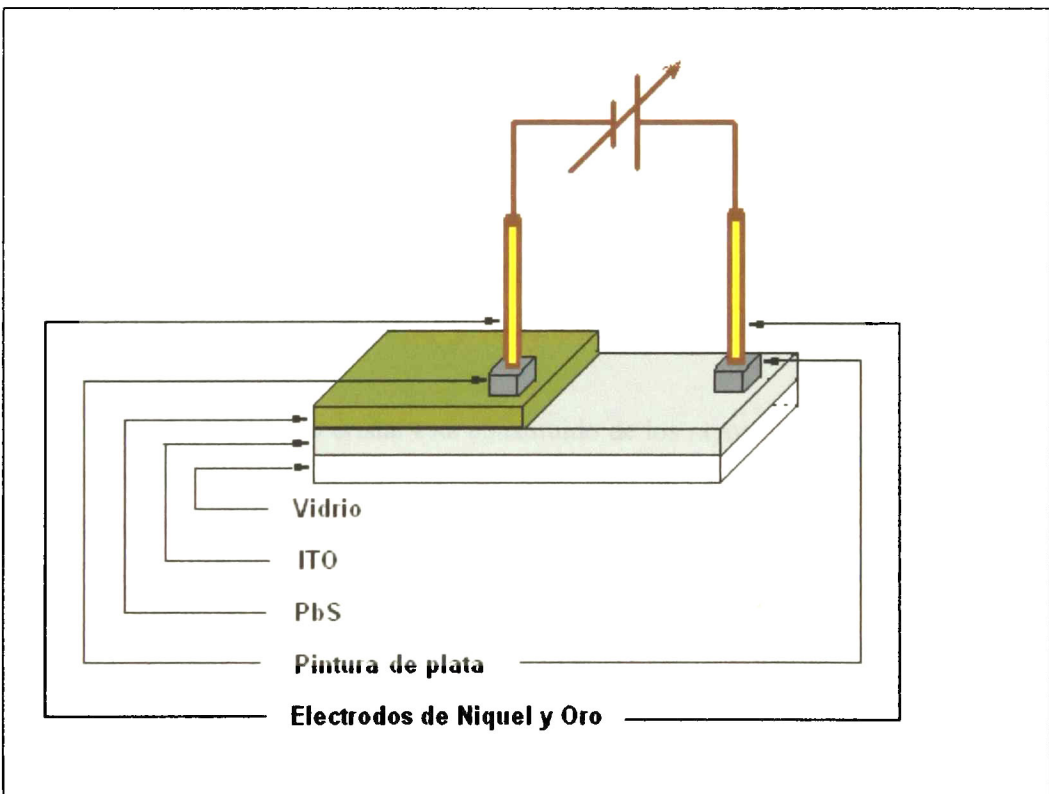


Figura 4-3: Unión ITO-PbS con contactos de pintura de plata

4.5 Curva Corriente-Voltaje (I-V)

Al polarizar una unión metal-semiconductor por medio de una diferencia de potencial V , puede circular sobre ella una corriente eléctrica I que es función del voltaje aplicado. Si la unión es un contacto óhmico, es posible determinar la resistencia del sistema de la relación I-V, la cual es lineal, por medio de la ley de Ohm. Si la unión es una barrera Schottky, es posible determinar el coeficiente de idealización y la corriente de saturación de la curva I-V, de acuerdo con la ecuación 12, que corresponde a la corriente como función del voltaje de un diodo rectificador. Un Analizador de Parámetros de Semiconductores Agilent 4155C se utiliza para obtener la corriente eléctrica como función del voltaje de polarización, y determinar con ella la corriente de saturación I_s y el factor idealizado m del sistema Ni-Au/ITO/PbS/Ni-Au, para diferentes intervalos del voltaje de polarización y a temperatura ambiental de alrededor de 25 °C. Estas mediciones, a su vez, se realizan en ambiente oscuro o intensamente iluminado con una lámpara de tungsteno-halógeno de 50 W a una distancia de 40 cm.

4.6 Difracción de Rayos X (DRX)

Las longitudes de onda de los rayos X son del orden de las distancias interatómicas de los sólidos cristalinos, por lo que cuando un haz monocromático de esta radiación incide en un cristal, aparece un patrón de difracción cuyos picos permiten determinar características estructurales e identificar la composición de las fases cristalinas.

El haz que difracta un cristal está constituido de los rayos dispersados por todos los átomos del cristal que están en el camino del haz incidente. La difracción tiene lugar sólo para los ángulos de incidencia que satisfacen la Ley de Bragg:

$$n \lambda = 2d \sin \theta \quad (17)$$

donde n es un número entero positivo, λ es la longitud de onda de la radiación incidente, d es la separación interplanar, y θ es el ángulo de incidencia de la radiación. Las direcciones

de difracción determinadas por la ley de Bragg sólo dependen de la estructura cristalina y del tamaño de la celda unitaria del cristal.

Para una celda cúbica, por ejemplo, se tiene que la separación interplanar es:

$$d = \frac{a}{h^2 + k^2 + l^2} \quad (18)$$

donde a es la constante de red y $(h k l)$ son los índices de Miller asociados a los planos de difracción.

Un Difractómetro de Rayos X Rigaku, D-MAX-2100 con radiación de frecuencia espacial igual a 1.5406 Å, se utiliza para obtener los patrones de difracción de las películas de ITO, y los sistemas de estudio A (PbS) y E (ITO/PbS).

4.7 Espectroscopia de Reflexión y Transmisión (ERT)

Cuando una onda electromagnética incide sobre la superficie de un material, una parte de ella puede reflejarse en la superficie, otra puede transmitirse a través del material y otra más puede absorberse por el material. Las fracciones de energía que se reflejan, se transmiten o se absorben dependen de las propiedades del material y de la frecuencia de la onda incidente.

Los espectros de reflexión y transmisión permiten determinar propiedades ópticas de películas depositadas sobre sustratos transparentes de manera no destructiva. Un modelo óptico representa la muestra, generalmente como un sistema de capas múltiples, en el modelo aparecen parámetros como el espesor y las constantes ópticas de las capas, los cuales pueden determinarse cuando los espectros de reflexión y transmisión modelados describen adecuadamente los espectros de reflexión y transmisión experimentales.

La Figura 4-4 muestra un esquema de los haces incidentes, reflejado y transmitido de una muestra compuesta de dos capas de materiales distintos.

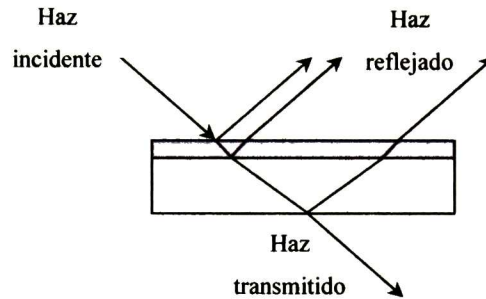


Figura4-4: Esquema de los haces incidente, reflejado y transmitido en una muestra

Un Espectrofotómetro de Reflexión y Transmisión Film TecTM 3000 (SCI, Inc.) se utiliza para determinar los espesores de las películas de PbS depositadas, así como los porcentajes aproximados de reflexión y transmisión en el intervalo [240, 840 nm], que comprende la parte visible del espectro y las regiones cercanas a él del infrarrojo y el ultravioleta.

5 Resultados y Discusión

5.1 Difracción de Rayos X

Se obtuvieron los patrones de difracción de las películas de PbS, depositadas sobre ITO, de la serie E para verificar su naturaleza y su estructura cristalina; para ello, se determinó la constante de red de las películas de PbS a partir de la localización de los picos de difracción y la longitud de onda de los rayos X. Previo a lo anterior, se obtuvieron, los patrones de difracción de una película de PbS sobre vidrio y de una película de ITO para distinguir particularidades de uno y otro, y considerar la influencia del ITO en la estructura cristalina de las películas de PbS.

En la Figura 5-1 se muestra el difractograma de una película de ITO similar a las que se utilizaron para depositar PbS en la serie E. El intervalo de medición para 2Θ es $[5^\circ, 80^\circ]$ y pueden observarse 8 picos de difracción localizados en $2\Theta = 21^\circ, 30^\circ, 35^\circ, 37^\circ, 46^\circ, 51^\circ$ y 60° , correspondientes a los planos de difracción (211), (222), (400), (411), (431), (440), (611) y (622), respectivamente. Los planos de difracción asociados a cada pico se obtuvieron de la ficha PDF#00-006-0416 del óxido de indio. En la Figura 5-2 se muestra el difractograma de la película de PbS depositada sobre sustrato de vidrio durante 210 minutos. El intervalo de medición para 2Θ es $[20^\circ, 80^\circ]$ y pueden observarse 4 picos de difracción localizados en $2\Theta = 26^\circ, 30^\circ, 43^\circ$ y 51° , que corresponden a los planos de difracción (1,1,1), (2,0,0), (2,2,0) y (3,1,1), respectivamente. Los planos de difracción asociados a cada pico se obtuvieron de la ficha PDF#00-005-0592 del sulfuro de plomo.

En la Figura 5-3 se muestran los difractogramas de las cinco películas de PbS de la serie E. El intervalo de medición para 2Θ es $[5^\circ, 80^\circ]$ y la superposición de los patrones de difracción se evitó desplazándolos verticalmente 1000 unidades arbitrarias entre ellos. A simple vista, pueden observarse 7 picos de difracción de los cuales, los localizados en

$2\Theta = 21^\circ, 35^\circ$ y 60° corresponden a los planos de difracción con índices de Miller (2,1,1), (4,0,0) y (6,2,2) de las películas de ITO, respectivamente; los localizados en $2\Theta = 26^\circ$ y 43° corresponden a los planos (1,1,1) y (2,2,0) de las películas de PbS, respectivamente; y los localizados en $2\Theta = 30^\circ$ y 51° corresponden tanto a los planos (2,0,0) y (3,1,1) de las películas de PbS, como a los planos (2,2,2) y (4,4,0) de las películas de ITO, respectivamente. Se tiene entonces un total de 9 picos de difracción, 4 correspondientes al PbS y 5 correspondientes al ITO, con un par de los picos del PbS coincidiendo con otro par de los picos de difracción del ITO. Al aumentar el tiempo de depósito por baño químico del PbS se espera que la película incremente su espesor y puede observarse que la intensidad relativa de los picos de difracción asociados solamente al PbS aumentan con dicho espesor mientras que la intensidad relativa de los picos de difracción asociados exclusivamente al ITO, disminuyen.

Las mediciones de la localización de los 4 picos de difracción correspondientes a las películas de PbS junto con los índices de Miller (h, k, l) de los planos de difracción permiten obtener los valores de la distancia interplanar d y la constante de red a mediante las ecuaciones (14) y (15), respectivamente. Los valores promedio obtenidos para la constante de red, se muestran en la Tabla 5-1 y puede observarse que coinciden con el valor reportado para el PbS en volumen, 5.936 \AA [2] con una diferencia porcentual menor de 0.5 %. No se observan diferencias significativas en los valores encontrados debido al sustrato sobre el que se depositó la película, por lo que se concluye que el ITO no influye en la estructura cristalina del PbS. Tampoco se observan diferencias significativas debido al espesor de la película de PbS.

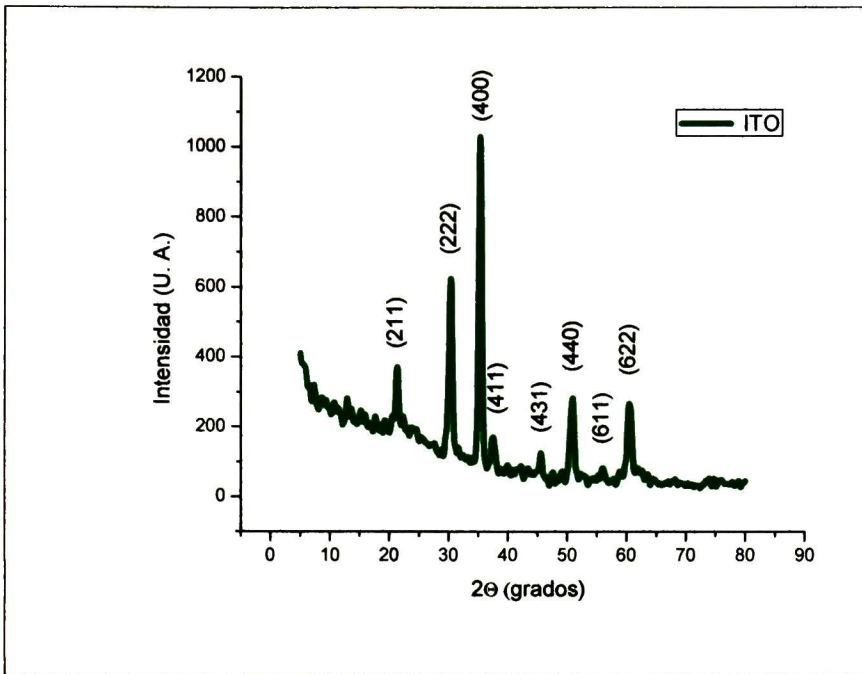


Figura 5-1: Patrón de difracción de rayos X de una película de ITO

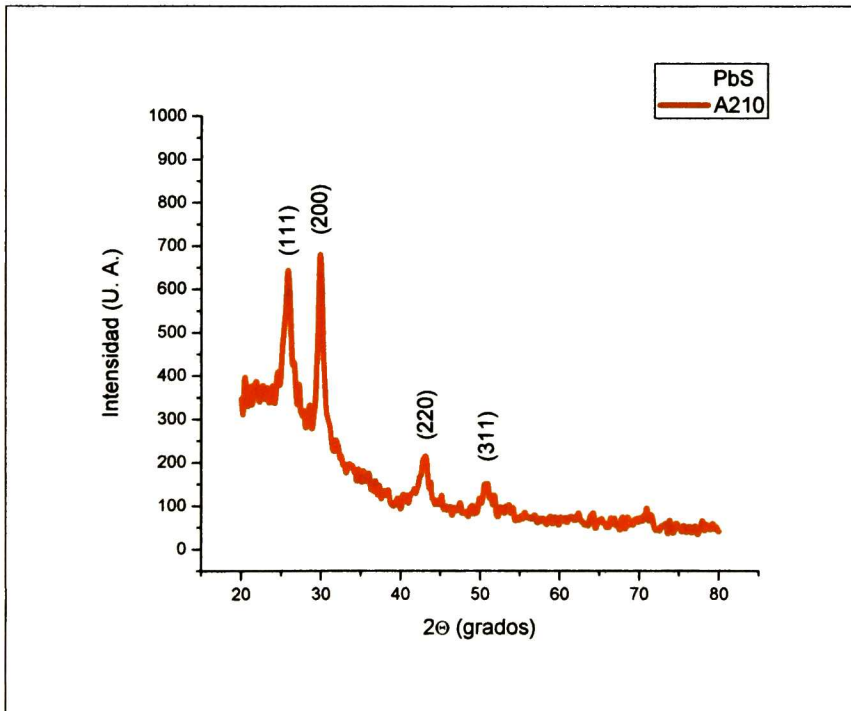


Figura 5-2: Patrón de difracción de rayos X de una película de PbS

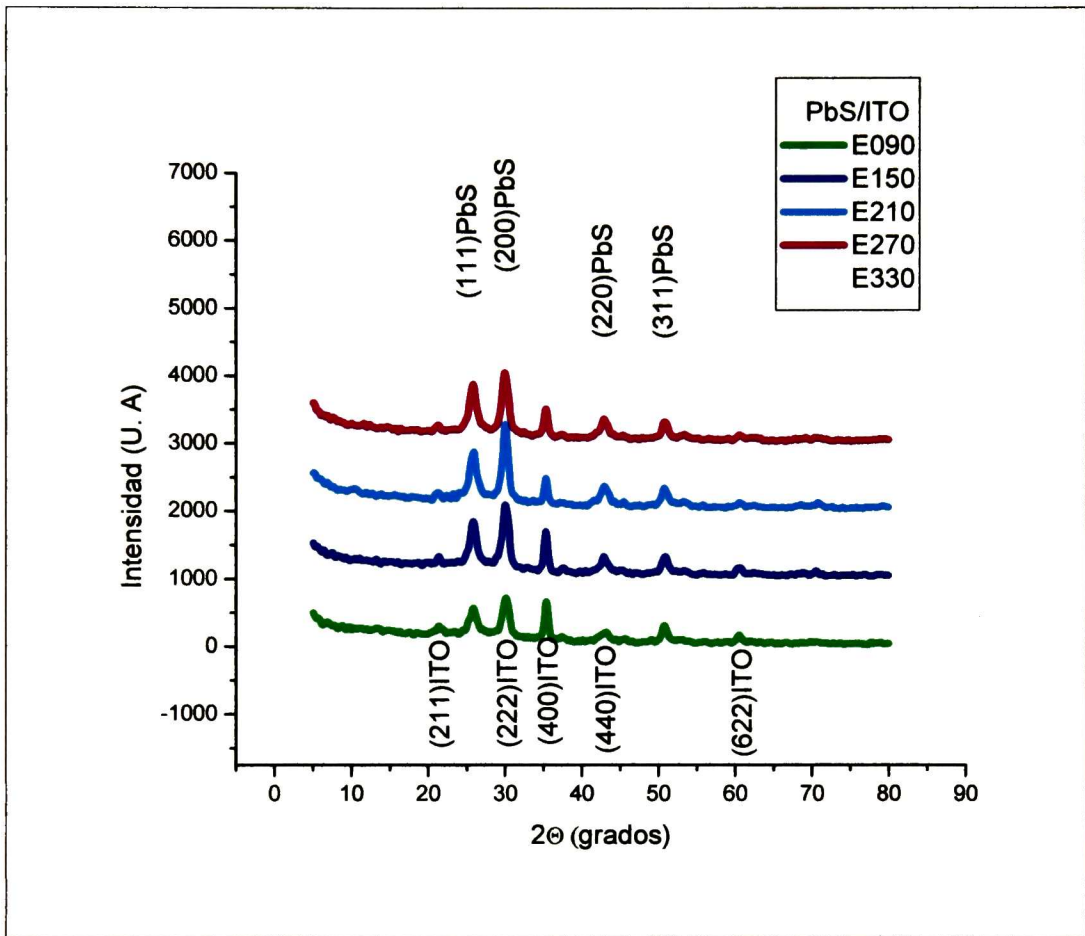


Figura 5-3: Patrones de difracción de rayos X de la serie E

Tabla 5-1: Constante de red a (nm), determinada en cada pico de difracción de cada película de PbS

Pico #	E090	E150	E210	E270	E330	A210
1	5.97	5.98	5.96	5.98	5.96	5.95
2	5.94	5.95	5.95	5.96	5.97	5.94
3	5.92	5.97	5.95	5.96	5.96	5.97
4	5.96	5.93	5.85	5.84	5.86	5.93
Promedio	5.95	5.96	5.93	5.94	5.94	5.95

5.2 Espectroscopia de Reflexión y Transmisión

Se obtuvieron los espectros de reflexión y transmisión de la serie A, en el intervalo (240nm, 840nm), para determinar los espesores de las películas de PbS con diferentes tiempos de depósito. Estos espectros se muestran en la Figura 5-4; los de color verde corresponden a la película de PbS con 90 minutos de depósito; los de color azul rey, a la de 150 minutos; los de color azul cielo, a la de 210 minutos; los de color magenta, a la de 270 minutos y los de color amarillo, a la de 330 minutos.

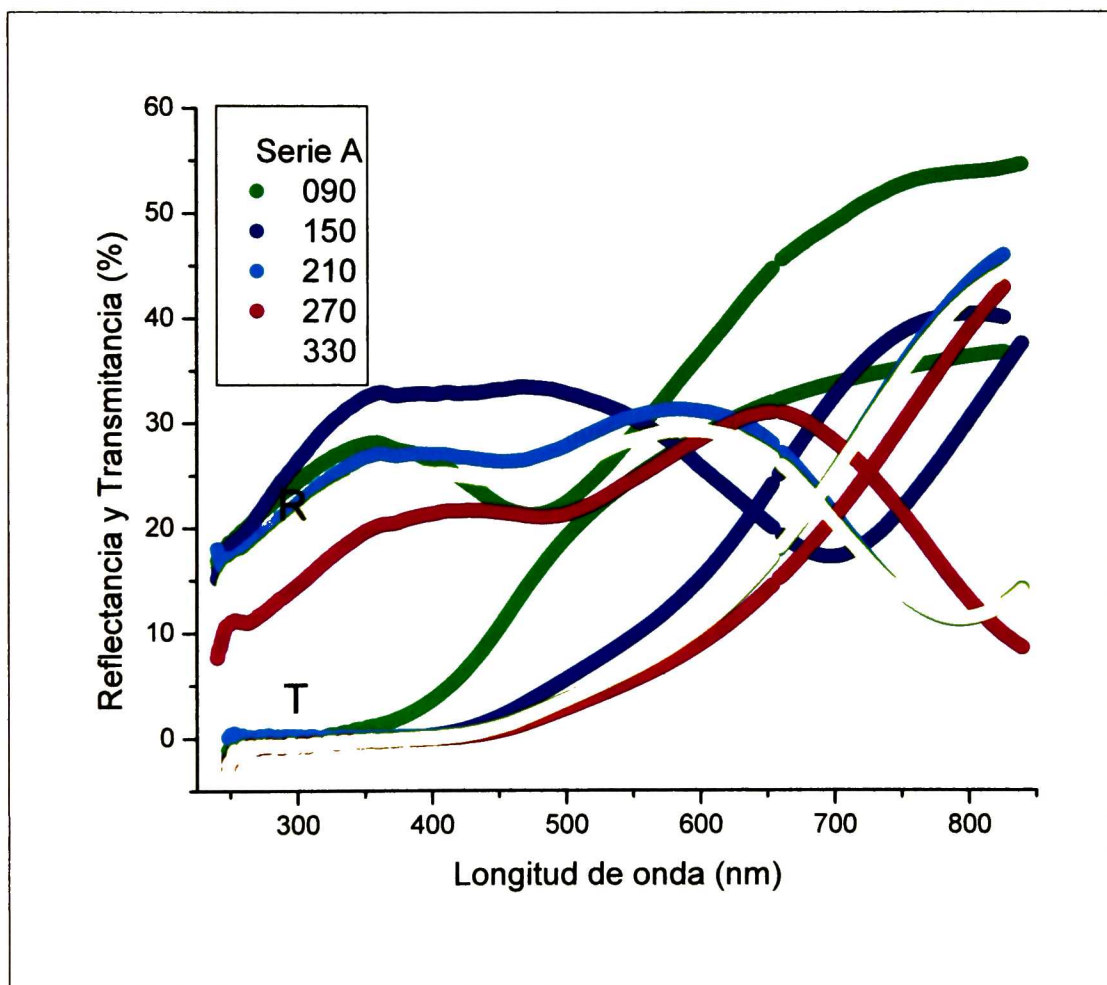


Figura 5-4: Espectros de Reflexión y Transmisión de las películas de PbS de la serie A

Para todas las películas, puede observarse como el porcentaje de reflexión está entre 5% y 35%, el de transmisión es prácticamente nulo, y el de absorción está entre 65% y 95% en el intervalo (240 nm, 400 nm) de la región ultravioleta. En la parte visible del espectro y en el cercano del infrarrojo, en el intervalo [400 nm, 840 nm], el porcentaje de reflexión varía entre 5% y 35% y el porcentaje de transmisión se incrementa desde 0 hasta aproximadamente 45%; en este último intervalo, para una longitud de onda dada, el porcentaje de transmisión tiende a disminuir ligeramente a medida que aumenta el tiempo de depósito lo cual es explicable si el espesor de la película crece con el tiempo de depósito. En ninguna región del intervalo de medición, los porcentajes de reflexión y transmisión suman 100%; como el porcentaje de absorción puede estimarse de $1 - R - T$, podemos concluir que en todo el intervalo de medición el porcentaje de absorción es diferente de cero. Es por ello que no se detecta borde de absorción; como era de esperarse considerando el valor de la banda de separación en el PbS que es $E_g = 0.37$ eV y que corresponden a una longitud de onda $\lambda = 3 \times 10^3$ nm.

En la Figura 5-5, se muestra uno de los ajustes típicos realizados a las curvas de reflexión y de transmisión, con el modelo SCI [6] [15]. De dichos ajustes se obtuvo el espesor de las películas. Estos resultados se muestran en la Figura 5-6. El espesor de la película de PbS, como se esperaba, aumenta con el tiempo de depósito, aunque no en forma lineal, sino más bien desaceleradamente y tendiendo a un valor de saturación. Considerando las 4 etapas del depósito por baño químico, puede comentarse que la incubación y la nucleación suceden antes de los primeros 90 minutos ya que para entonces la película alcanza un espesor de 58 nm; la etapa del crecimiento continúa durante las siguientes 4 horas sin interrupción y a los 330 minutos de iniciado el baño químico, cuando el espesor alcanza un valor de 127 nm, ya casi se ha detenido el crecimiento. Cabe señalar, sin embargo, que a medida que aumenta el tiempo de depósito, más polvo fino es removible de la película cuando esta se retira del baño (etapa final).

Los valores del espesor de las películas de PbS depositadas sobre ITO, se estimarán de los valores obtenidos con las películas depositadas sobre sustrato de vidrio.

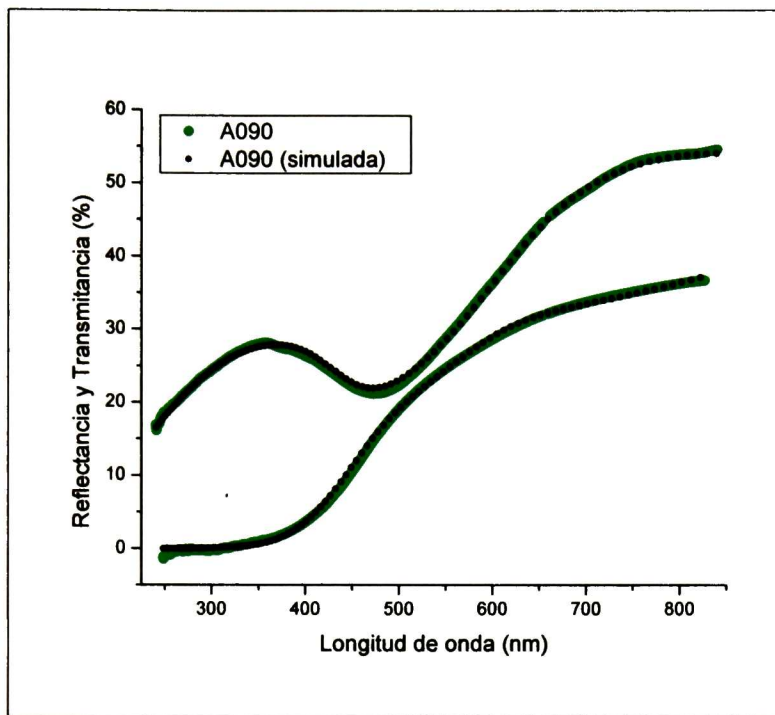


Figura 5-5: Ajuste de la medición de Reflexión y Transmisión de la película de PbS del sistema A090

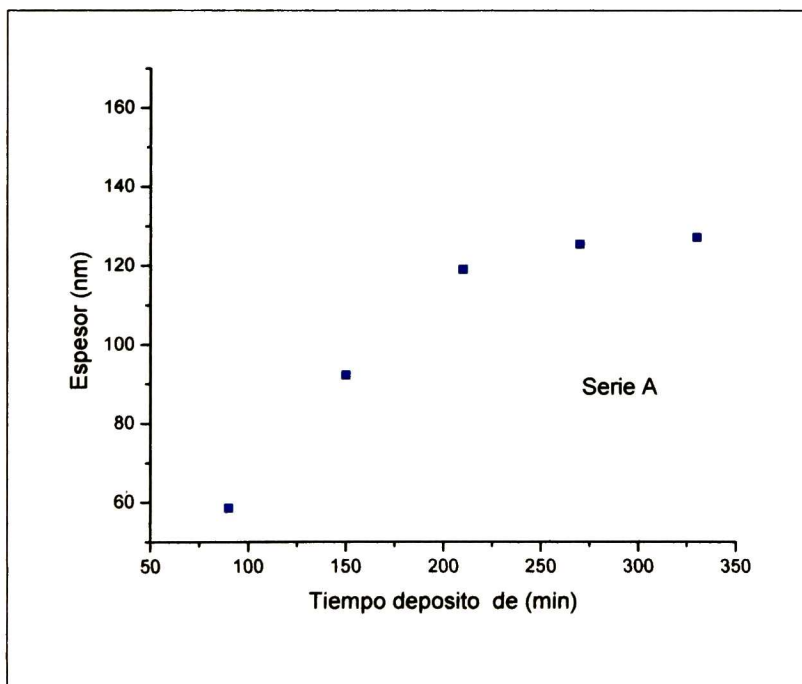


Figura 5-6: Espesor de las Películas de PbS de la Serie A en función del tiempo de DBQ

5.3 Curva Corriente-Voltaje ($I-V$)

Se realizaron mediciones de $I-V$ en la serie E, según el sistema mostrado en la Figura 4-2, para determinar el tipo de unión entre la película semiconductor de PbS con el contacto metálico de níquel y oro. Como el PbS es un material bastante fotosensible, estas mediciones se realizaron bajo diferentes condiciones de iluminación esperando que dicha iluminación tuviera alguna influencia en las mediciones y la caracterización de la unión metal-semiconductor. Por otro lado, en la búsqueda del mejor intervalo de operación de un dispositivo rectificador, las mediciones $I-V$ se realizaron variando la amplitud del voltaje de polarización. Tanto al cambiar la intensidad de la iluminación como al ampliar el intervalo del voltaje aplicado sobre los sistemas, se encontró un resultado muy interesante: la manifestación de dos estados resistivos. Algunas publicaciones [16] [17] [18] ya han reportado comportamientos semejantes en algunas heteroestructuras p-n ante la aplicación de ciertos voltajes particulares, aunque las condiciones requeridas para obtener dicho comportamiento son algo diferentes. Los resultados aquí obtenidos sobre las características $I-V$ de la unión PbS/Ni-Au se describen a continuación, empezando por una caracterización básica de la unión mecánica entre el semiconductor y el electrodo metálico.

5.3.1 Rectificación por barrera Schottky

En la Figura 5-7 se muestran las curvas $I-V$ de 6 mediciones repetidas en una misma región del sistema E090, realizadas en el intervalo de $[-1V, 1V]$, denominadas: E090(α), E090(β), E090(γ), E090(δ), E090(ϵ) y E090(ϕ). Puede observarse que todas las curvas son similares, lo que nos indica que la medición es reproducible, y que se presenta una relación no lineal entre la corriente y el voltaje, lo cual implica que la unión metal-semiconductor no es un contacto óhmico, sino que, por el contrario, existe un efecto de barrera entre la unión de la película de PbS y el contacto metálico de Ni y Au; luego entonces, esta unión metal-semiconductor forma un dispositivo semiconductor.

En la Tabla 5-2 se muestran algunos parámetros de las curvas $I-V$ de cada medición del dispositivo E090: en la tercera columna se tienen las corrientes correspondientes al voltaje de polarización máximo del intervalo, $I(+1V)$, y en la cuarta columna, las corrientes

correspondientes al voltaje de polarización mínimo, $I(-1V)$. Si comparamos los promedios de las corrientes correspondientes a los voltajes de polarización máximo y mínimo, $\langle I(+1V) \rangle = 35.9$ y $\langle I(-1V) \rangle = -7.3$, podemos observar que la corriente correspondiente a +1 V es aproximadamente 5 veces la magnitud de la corriente correspondiente a -1 V, por lo que podemos considerar que tenemos un dispositivo rectificador de corriente evidenciando la formación de una barrera Schottky en la unión del semiconductor de PbS y el electrodo metálico de Ni y Au.

Como ya es sabido, una barrera Schottky con semiconductor tipo-p, puede construirse si se cuenta con un metal cuya función de trabajo sea menor que la del semiconductor: luego entonces, si la unión entre el PbS y el electrodo de Ni y Au es una barrera Schottky, la función de trabajo del electrodo metálico es menor que la del PbS-p. Otras relaciones I-V con la forma de las curvas mostradas en la Figura 5-8 han sido reportadas para barreras formadas por otros tipos de unión metal-semiconductor como, por ejemplo, el diodo de GaN/Au [13].

Estas relaciones pueden ser ajustadas por la ecuación 12 que describe la corriente como función del voltaje de polarización para una barrera Schottky:

$$I = I_s \left[\exp\left(\frac{-eV}{mk_B T}\right) - 1 \right] \quad (12)$$

En la que I_s , m , e , k_B y T son la corriente de saturación, el coeficiente de idealización del dispositivo, la carga del electrón, la constante de Boltzmann y la temperatura del sistema, respectivamente.

Ajustando las curvas I-V experimentales de la Figura 5-8 con dicha ecuación 12, es posible determinar el coeficiente de idealización, m , y la corriente de saturación, I_s , que caracterizan al diodo rectificador E090, ya que en el intervalo en el que se hicieron las mediciones, la corriente no toma valores demasiado grandes como para desviar al dispositivo del comportamiento ideal.

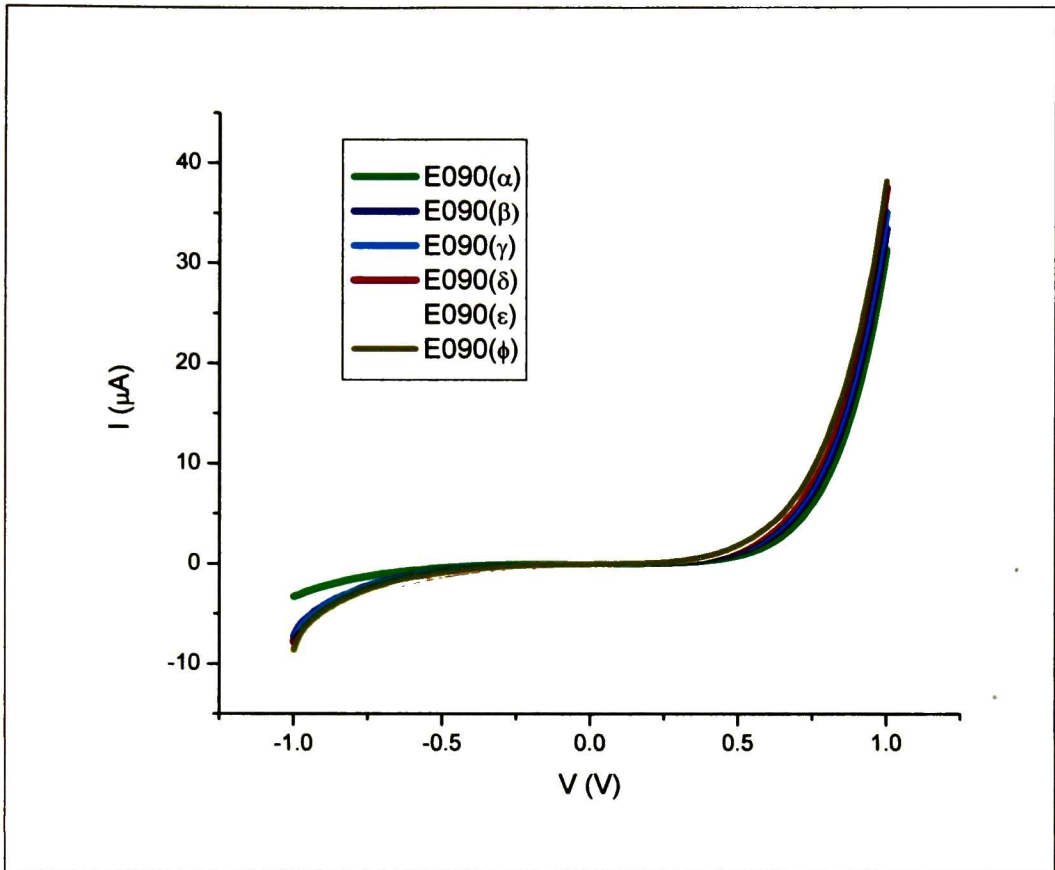


Figura 5-7: Mediciones I-V del sistema E090

Tabla 5-2: Detalles característicos del dispositivo E090

Medición	Curva	I(+1V) [μA]	I(-1V) [μA]	I _s [nA]	m
1	E090(α)	31.4	-3.3	42	5.8
2	E090(β)	33.5	-7.3	68	6.2
3	E090(γ)	35.2	-7.6	79	6.3
4	E090(δ)	37.6	-7.8	92	6.4
5	E090(ε)	39.2	-8.9	121	6.6
6	E090(φ)	38.3	-8.9	681	6.8
Promedios		35.9	-7.3	180.5	6.4

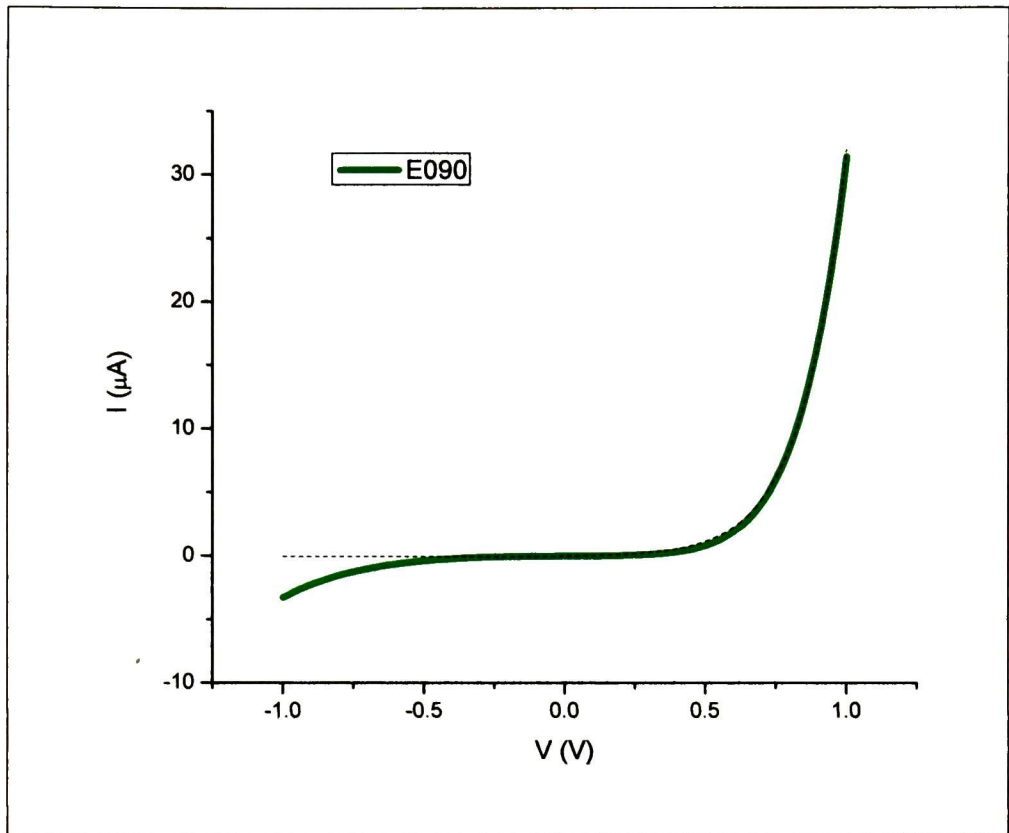


Figura 5-8: Ajuste de la medición I-V de E090 (α)

En la Figura 5-8 se muestra uno de los ajustes típicos de los datos experimentales de las mediciones efectuadas; la curva con línea de color verde continua corresponde a los datos experimentales, mientras que la línea negra discontinua representan el mejor ajuste. Los ajustes se realizaron utilizando el programa Origin 7.0. Puede observarse una muy buena concordancia entre los datos experimentales y el modelo teórico lo que nos permite confirmar que el comportamiento no lineal de las relaciones $I-V$ es consecuencia de la formación de una barrera Schottky entre el contacto metálico y el material semiconductor. Los parámetros I_s y m obtenidos para cada una de las mediciones, se presentan en la quinta y sexta columnas de la Tabla 5-2. Aquí podemos ver que la corriente de saturación tiene un valor promedio de 180.5 nA mientras que el valor promedio del coeficiente de idealización es de 6.4 para esta unión metal-semiconductor.

Cabe la posibilidad de considerar que la barrera Schottky se presenta en la unión entre las películas de ITO y PbS, sin embargo, cuando se cubre el electrodo de níquel y oro con pintura de plata, o bien, cuando se coloca un contacto de la misma pintura sobre la película de sulfuro de plomo, según el sistema de la Figura 4-3, el fenómeno de rectificación desaparece y la curva I - V es una relación lineal; luego entonces, la unión ITO/PbS es un contacto óhmico. En la Figura 5-9 se muestra una curva I - V para una heteroestructura del tipo Ag/PbS/ITO.

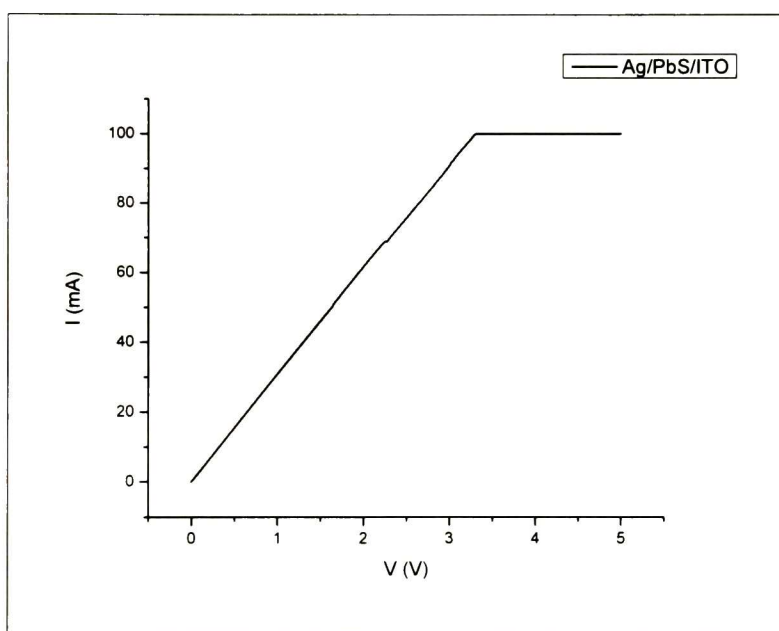


Figura 5-9: Relación I - V en la heteroestructura Ag/PbS/ITO

5.3.2 Dispositivo E090 en ambiente oscuro e iluminado.

En la Figura 5-10(a) se muestran las curvas I-V de 9 mediciones repetidas en una segunda región del dispositivo E090 en el intervalo de $[-0.75\text{V}, 0.75\text{V}]$. Las tres primeras mediciones, presentadas en color verde y denominadas: E090(a), E090(b) y E090(c), se realizaron en ambiente oscuro, bloqueando la iluminación por medio de una caja de cartón y una cortina negra; las siguientes tres mediciones, presentadas en color azul y denominadas: E090(d), E090(e) y E090(f), se realizaron iluminando el sistema por medio de una lámpara de 50 W a una distancia de 40 cm; las últimas tres mediciones, presentadas en color rosa y denominadas: E090(g), E090(h) y E090(i), se volvieron a realizar en ambiente oscuro.

En una curva I-V, la resistencia eléctrica del sistema puede evaluarse del inverso de la pendiente de la recta tangente y puede observarse que el sistema presenta dos tipos de comportamiento notablemente diferentes. En las primeras tres mediciones, realizadas en ambiente oscuro, se manifiesta un estado de alta resistencia; en las siguientes tres mediciones, realizadas con iluminación intensa, se manifiesta un estado de baja resistencia; en las siguientes tres mediciones, realizadas nuevamente en ambiente oscuro, se mantiene el estado de baja resistencia que se observó con el sistema intensamente iluminado. Un cambio en la escala de esta gráfica se muestra en la Figura 5-10(b), donde puede observarse que en el estado de alta resistencia se manifiesta una relación no lineal entre la corriente eléctrica y el voltaje de polarización, propia de las uniones metal-semiconductor en las que se forma una barrera Schottky; mientras que en el estado de baja resistencia se manifiesta una relación lineal, propia de las uniones metal-semiconductor en las que se forma un contacto óhmico. El estado de alta resistencia se manifiesta inicialmente, con tal de que el voltaje de polarización se suministre en ambiente oscuro o de luz tenue, mientras que el estado de baja resistencia se manifiesta ante un ambiente de iluminación intensa. Cabe mencionar que una vez alcanzado el estado de baja resistencia, no se recupera el estado de alta resistencia aunque el voltaje de polarización vuelva a suministrarse en ambiente oscuro o se realice la medición 20 días después.

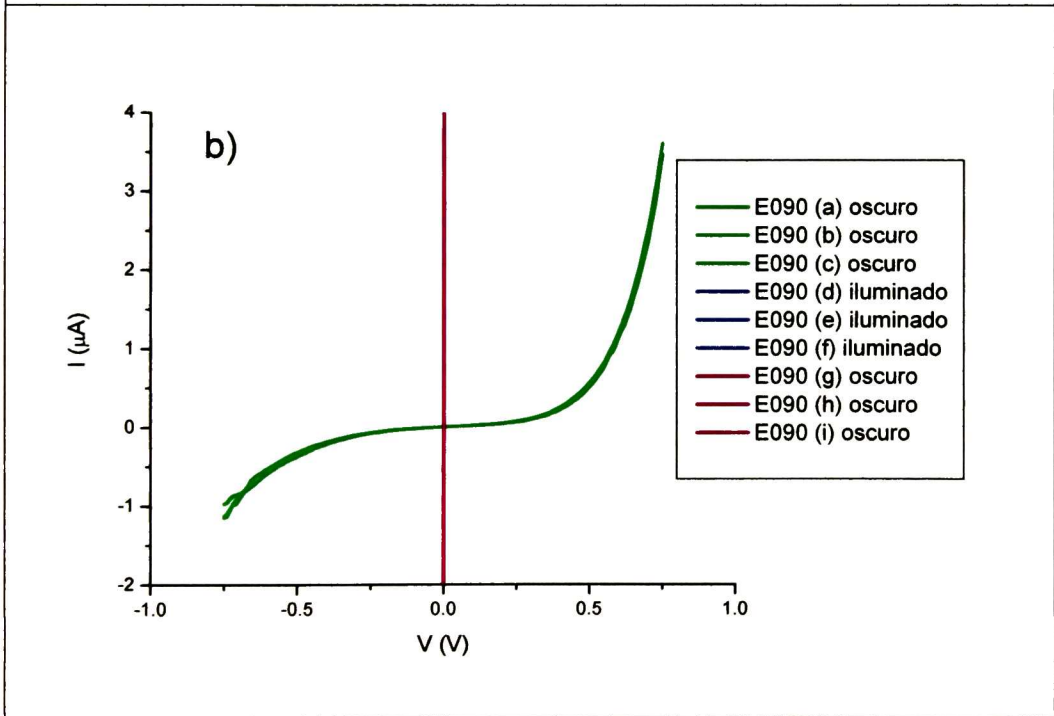
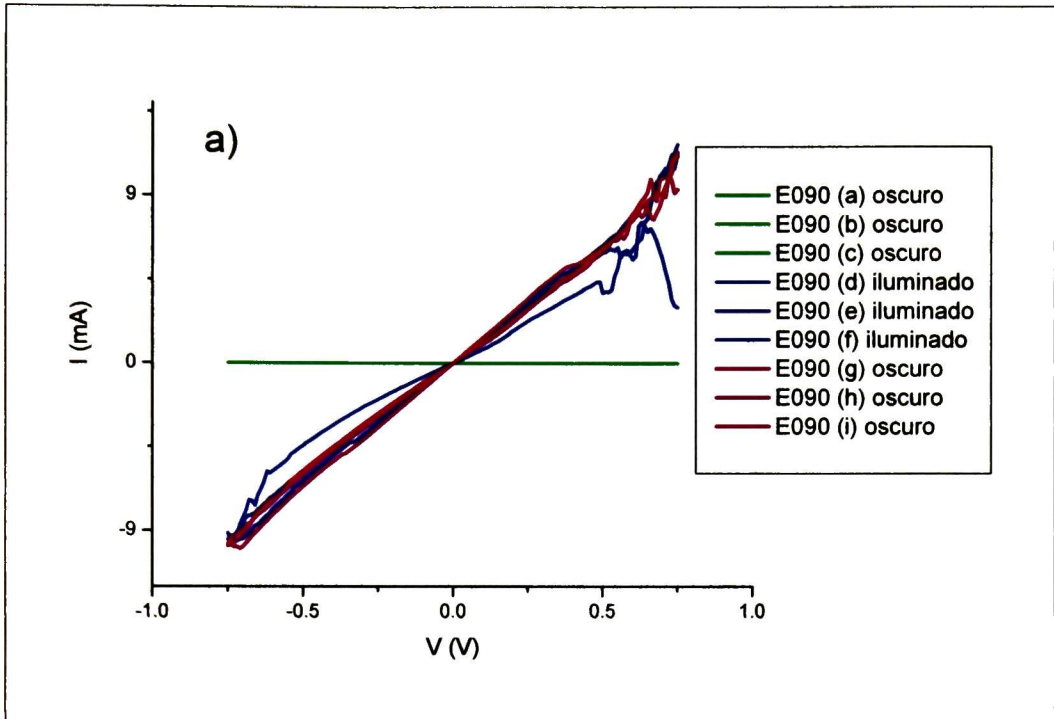


Figura 5-10: a) Mediciones I-V del sistema E090 en ambiente oscuro (a-c), iluminado (d-f) y oscuro (g-i). b) Cambio de escala en I.

Uno de los ajustes realizados para determinar el coeficiente de idealización y la corriente de saturación cuando se presenta una barrera Schottky en la heterounión puede observarse en la Figura 5-11 y uno de los ajustes realizados para determinar la resistencia eléctrica del sistema cuando se presenta la relación lineal, de acuerdo con la ley de Ohm, puede observarse en la Figura 5-12; de nuevo, las curvas con líneas de color continuas corresponden a los datos experimentales, mientras que las líneas negras y discontinuas representan el mejor ajuste. Puede observarse, también aquí, muy buena concordancia entre los datos experimentales y el modelo teórico. Los parámetros que caracterizan el dispositivo, que incluyen los valores de la corriente de saturación, I_s , y el coeficiente de idealización, m , del estado de alta resistencia, y la resistencia eléctrica, R , del estado de baja resistencia, obtenidos mediante los ajustes para cada una de las mediciones, se presentan en la Tabla 5-3. Podemos ver que, en el estado de alta resistencia, la corriente de saturación y el coeficiente de idealización tienen un valor promedio de 13.8 nA y 5.2 unidades adimensionales, respectivamente, y que la resistencia eléctrica promedio, en el estado bajo, es igual a 87 Ω .

Tabla 5-3: Detalles característicos del sistema E090 en ambiente oscuro e iluminado

Medición	Curva	Ambiente	Edo. Resist.	Union	I_s [nA]	m	R [Ω]
1	E090(a)	oscuro	alta	B. Schottky	12.3	5.1	-
2	E090(b)	oscuro	alta	B. Schottky	14.4	5.2	-
3	E090(c)	oscuro	alta	B. Schottky	14.8	5.2	-
4	E090(d)	iluminado	baja	C. Ohmico	-	-	116
5	E090(e)	iluminado	baja	C. Ohmico	-	-	84
6	E090(f)	iluminado	baja	C. Ohmico	-	-	78
7	E090(g)	oscuro	baja	C. Ohmico	-	-	86
8	E090(h)	oscuro	baja	C. Ohmico	-	-	85
9	E090(i)	oscuro	baja	C. Ohmico	-	-	75
promedio					13.8	5.2	87

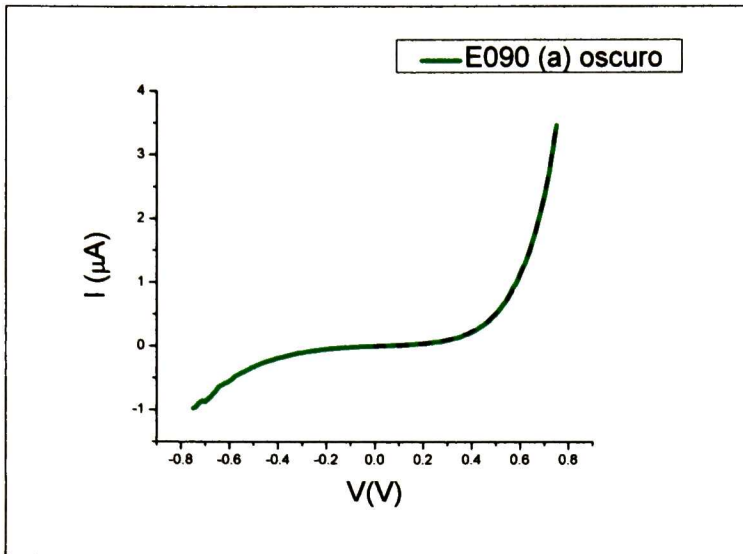


Figura 5-11: Ajuste de una medición I-V del sistema E090 en ambiente oscuro

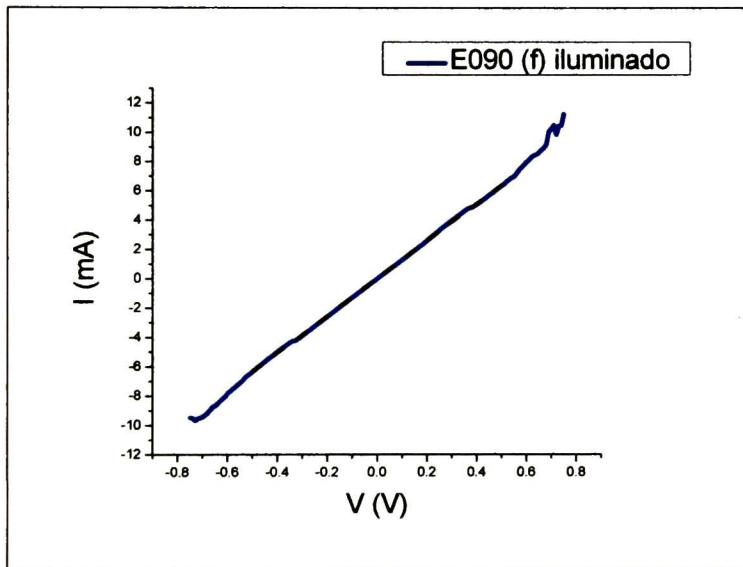


Figura 5-12: Ajuste de una medición I-V del sistema E090, en ambiente iluminado

Luego entonces, cabe acentuar que el sistema E090 constituye un dispositivo rectificador de barrera Schottky que opera como tal en ambiente oscuro, pero que la iluminación intensa produce sobre el mismo un notable cambio que reduce en varios ordenes su estado de resistencia y elimina sus propiedades rectificadoras.

5.3.3 Dispositivos E210 en ambiente oscuro e iluminado.

En la Figura 5-13 se muestran las curvas I-V de 6 mediciones repetidas en una misma región del sistema E210 en el intervalo de $[-1.5V, 1.5V]$. Las tres primeras mediciones, presentadas en color verde y denominadas: E210(a), E210(b) y E210(c), se realizaron en ambiente oscuro y las últimas tres, presentadas en color azul y denominadas: E210(d), E210(f) y E210(g), se realizaron en ambiente iluminado. De nuevo puede observarse el hecho de que el sistema presenta dos estados de resistencia, uno alto y otro bajo. En el estado de alta resistencia se manifiesta la relación no lineal propia de las uniones en las que se forma una barrera Schottky, en el estado de baja resistencia se manifiesta una relación lineal propia de las uniones en las que se forma un contacto óhmico. Uno de los ajustes realizados para determinar el coeficiente de idealización y la corriente de saturación cuando se presenta una barrera Schottky en la heterounión puede observarse en la Figura 5-14; uno de los ajustes realizados para determinar la resistencia eléctrica del sistema cuando se presenta un contacto óhmico puede observarse en la Figura 5-15. En ambos casos, hay buena concordancia entre las mediciones y las curvas ajustadas.

Tabla 5-4: Detalles característicos del sistema E210 en ambiente oscuro e iluminado

Medición	Curva	Ambiente	Estado Resistencia	Union	Is [nA]	m	R [Ω]
1	E210(a)	oscuro	alta	B. Schottky	123	7.5	
2	E210(b)	oscuro	alta	B. Schottky	272	8.2	-
3	E210(c)	oscuro	alta	B. Schottky	410	8.7	-
4	E210(d)	iluminado	baja	C. Ohmico	-	-	47
5	E210(e)	iluminado	baja	C. Ohmico	-	-	46
6	E210(f)	iluminado	baja	C. Ohmico	-	-	46
Promedio					268	8.1	46

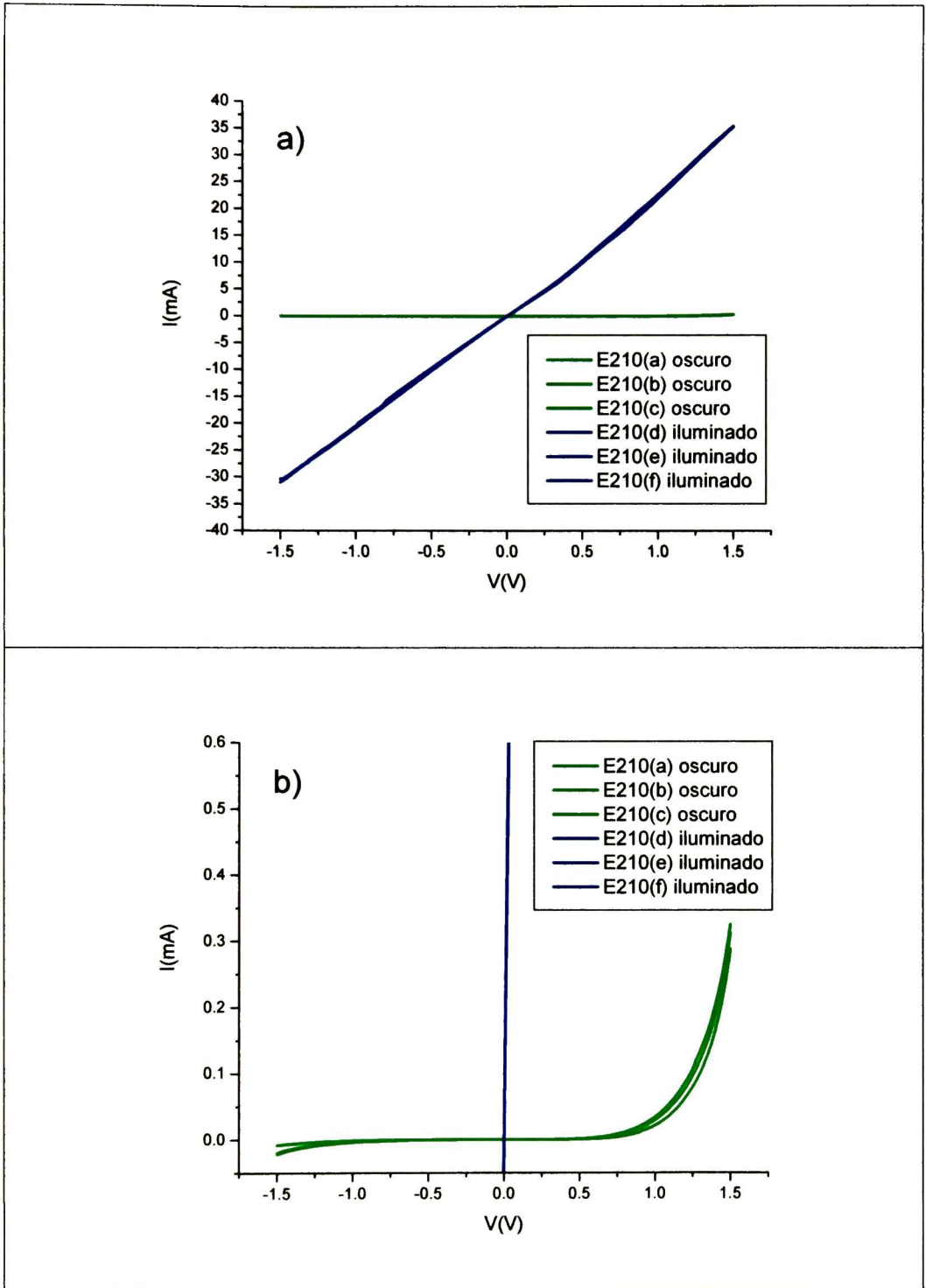


Figura 5-13: Mediciones I-V del sistema E210 en ambiente oscuro e iluminado. b) Cambio de escala.

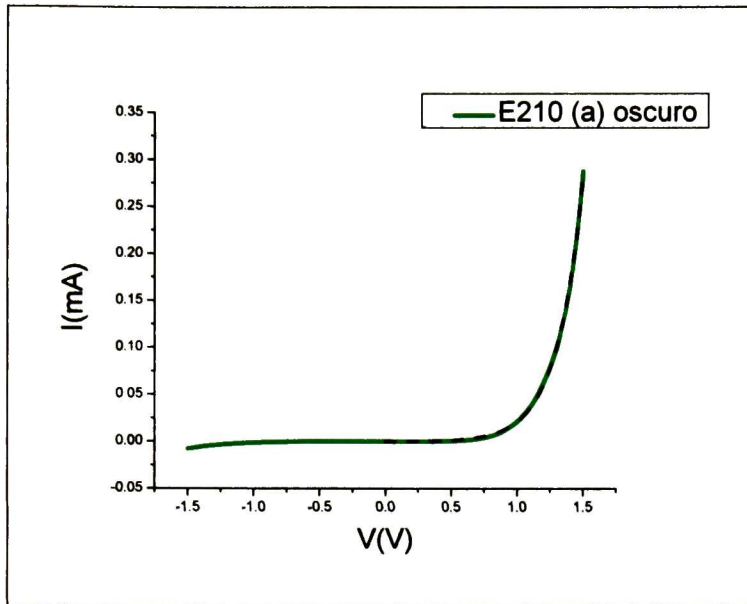


Figura 5-14: Ajuste de una medición I-V del sistema E210 en ambiente oscuro

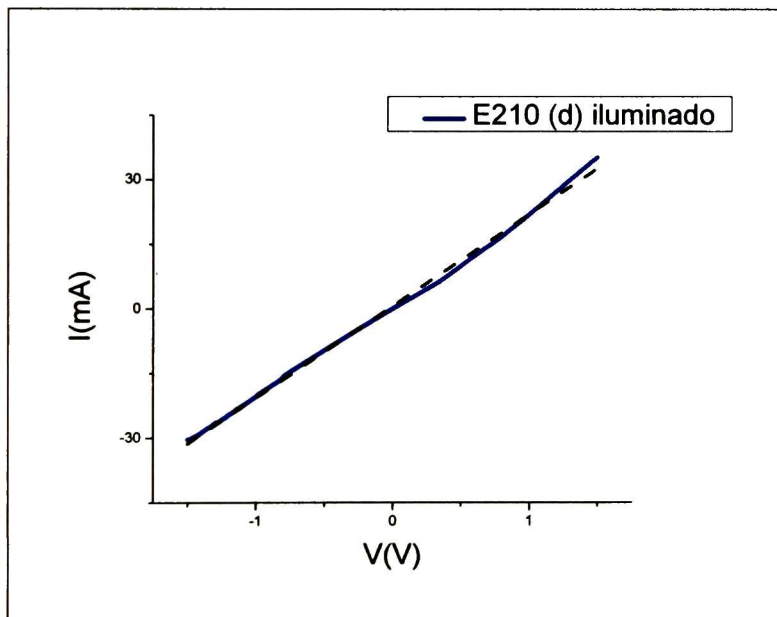


Figura 5-15: Ajuste de una medición I-V del sistema E210 en ambiente iluminado

Los detalles que caracterizan al dispositivo, se presentan en la Tabla 5-4. Podemos ver que, en el estado de alta resistencia, la corriente de saturación y el coeficiente de idealización tienen un valor promedio de 268 nA y 8.1, respectivamente, y que la resistencia eléctrica promedio, en el estado bajo, es igual a 46 Ω .

5.3.4 Dispositivo E330 en ambiente oscuro e iluminado.

En la Figura 5-16 se muestran las curvas I-V de 6 mediciones repetidas en una misma región del sistema E330, en el intervalo $[-1.5V, 1.5V]$. Las tres primeras mediciones, denominadas E330(a), E330(b) y E330(c), se realizaron en ambiente oscuro y las últimas tres mediciones, denominadas E330(d), E330(e) y E330(f), se realizaron en ambiente iluminando. En todas estas mediciones, independientemente de que se realizaran en ambiente oscuro o con iluminación intensa, se observa un estado de alta resistencia con una relación no lineal entre la corriente y el voltaje de polarización, asociada a las uniones en las que se forma una barrera Schottky.

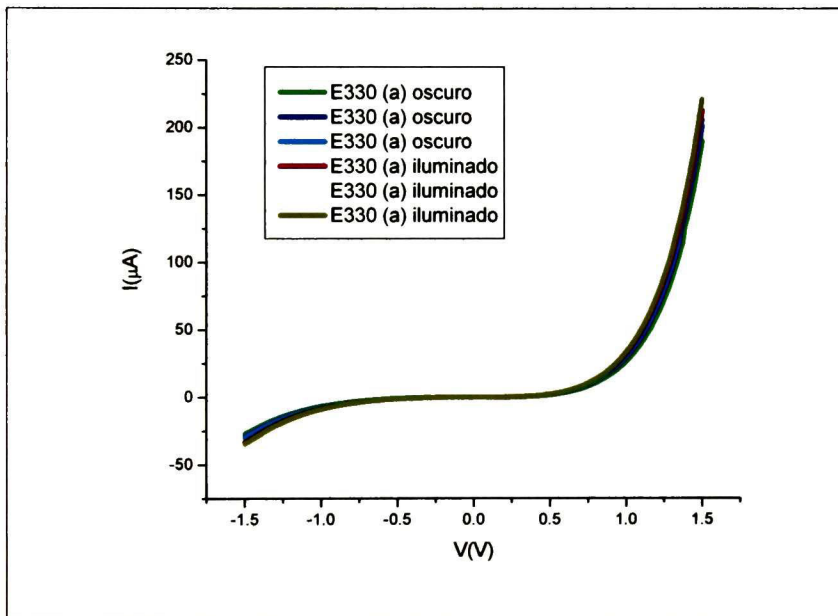


Figura 5-16: Mediciones I-V del sistema E330 en ambiente oscuro e iluminado

Uno de los ajustes realizados para determinar el coeficiente de idealización y la corriente de saturación puede observarse en la Figura 5-17; los resultados, a su vez, se concentran en la Tabla 5-5. La corriente de saturación de este dispositivo tiene un valor promedio de 713 nA y el coeficiente de idealización, un promedio de 10.1 unidades adimensionales. No sucede el cambio en el estado de resistencia, de alta a baja, cuando se ilumina el dispositivo E330 como sucedió con E090 y E210, lo cual puede explicarse

considerando que la iluminación de la región cercana a la interfase metal-semiconductor en el sistema E330 es la menos intensa, ya que ésta llega después reflejarse en el resto de las interfaces de la heteroestructura y de atravesar dos veces la película de PbS, que en este sistema es la más gruesa (127 nm). Esto evidencia que el cambio de estado de resistencia observado en los dispositivos anteriores es un efecto en la interface de la unión metal-semiconductor.

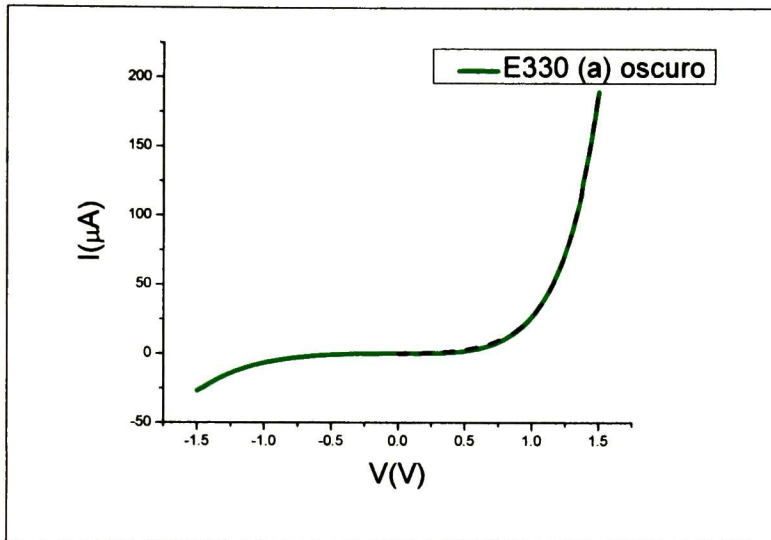


Figura 5-17: Ajuste de una de las mediciones I-V del sistema E330 en ambiente oscuro e iluminado

Tabla 5-5: Detalles característicos del sistema E330

Medición	Curva	Ambiente	Estado Resistencia	Union	Is [nA]	m
1	E330(a)	oscuro	alta	B. Schottky	534	9.8
2	E330(b)	oscuro	alta	B. Schottky	626	10.0
3	E330(c)	oscuro	alta	B. Schottky	709	10.1
4	E330(d)	iluminado	alta	B. Schottky	805	10.3
5	E330(e)	iluminado	alta	B. Schottky	819	10.3
6	E330(f)	iluminado	alta	B. Schottky	803	10.2
Promedio					713	10.1

5.3.5 Dispositivo rectificador ideal.

En la Tabla 5-6 se concentran los resultados obtenidos de los valores de la corriente de saturación, I_s , y la constante de idealización, m , en la caracterización de los dispositivos E090, E210 y E330 en ambiente oscuro. Estos sistemas difieren solo en el espesor de película semiconductor, PbS. En las Figuras 5-18 y 5-19 pueden observarse la corriente de saturación, I_s , y el coeficiente de idealización, m , como funciones de tal espesor.

Tabla 5-6: I_s y m de la barrera Schottky en los sistemas E090, E210 y E330

Sistema	t [min.]	Espesor [nm]	I_s [nm]	m
E090(a)	90	58.5	12.3	5.1
E090(b)	90	58.5	14.4	5.2
E090(c)	90	58.5	14.8	5.2
E210(a)	210	119	123	7.5
E210(b)	210	119	272	8.2
E210(c)	210	119	410	8.7
E330(a)	330	127.1	534	9.8
E330(b)	330	127.1	626	10.0
E330(c)	330	127.1	709	10.1

Tanto la corriente de saturación, como el coeficiente de idealización tienden a crecer con el aumento del espesor de la película semiconductor. Considerando que la corriente eléctrica fluye desde un electrodo hacia el semiconductor, desde el semiconductor al contacto de ITO y del ITO al otro electrodo, Figura 4-2, que la longitud de la trayectoria a través del semiconductor es el espesor de la película y que la resistencia al paso de la corriente eléctrica es directamente proporcional a la longitud de la trayectoria, podemos considerar que la tendencia a crecer, con el espesor de la película, del coeficiente de idealización y de la corriente de saturación está relacionada con el aumento de la resistencia eléctrica transversal del dispositivo.

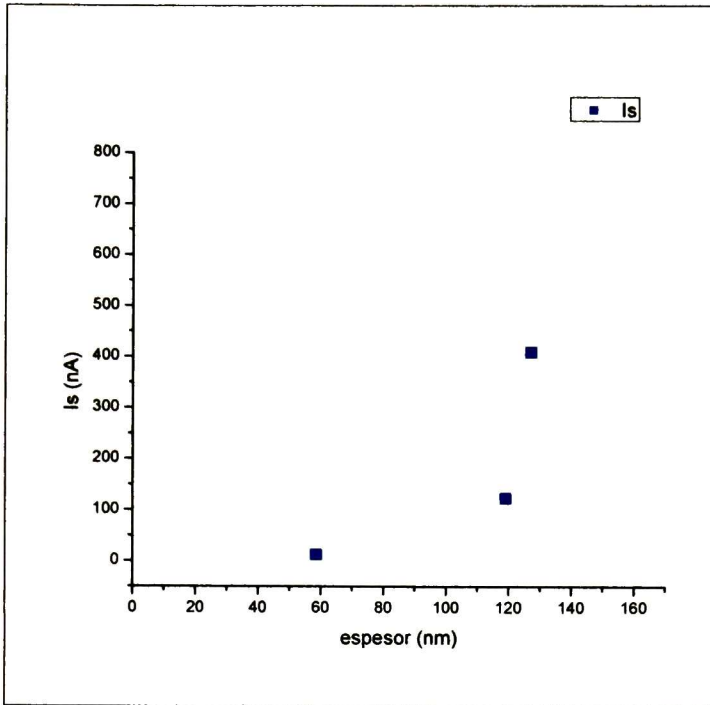


Figura 5-18: Corriente de saturación de la barrera Schottky en los sistemas E090, E210 y E330

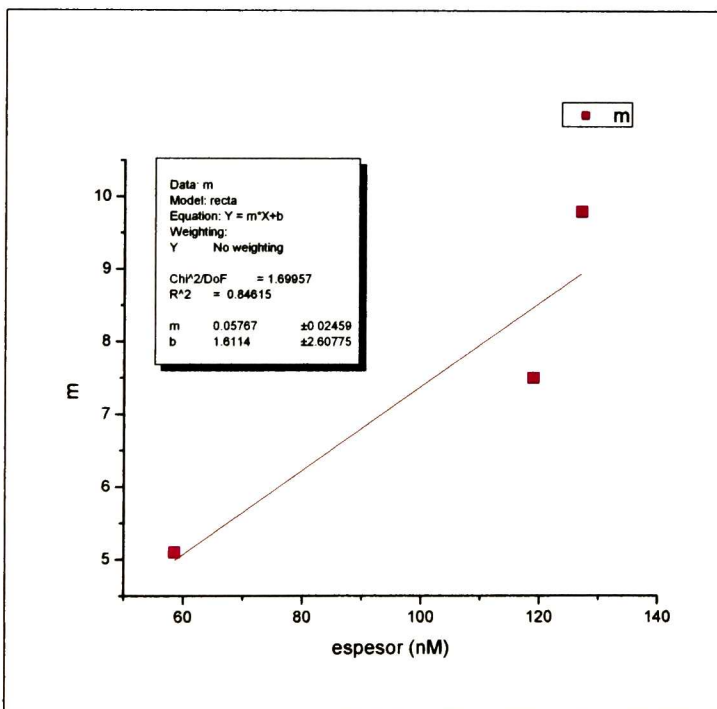


Figura 5-19: Coeficiente de idealización de la barrera Schottky en los sistemas E090, E210 y E330

La corriente de saturación de un dispositivo rectificador es el valor teórico al que tiende la magnitud de la corriente de un diodo, cuando el voltaje de polarización inversa es grande [19] [10]. Considerando que para fines de rectificación una corriente de saturación pequeña es mejor que una grande, que el coeficiente de idealización igual a la unidad es el idóneo y que la barrera Schottky es un fenómeno de interface, podemos concluir que el menor tiempo de DBQ para el cual se puede obtener películas de PbS (con el menor espesor y con la menor resistencia transversal) es el que produce el mejor dispositivo rectificador. Cabe señalar que un diodo con mejores características de las obtenidas podría intentarse con un tiempo de DBQ de PbS menor; la tendencia del coeficiente de idealización, por ejemplo, en el límite cuanto el espesor del sulfuro de plomo tiende a cero, es muy cercano a la unidad como puede observarse en el ajuste lineal realizado a esta variable, Figura 5-19.

5.3.6 Dispositivo E090 ante diferentes intervalos de voltaje de polarización

En la Figura 5-20 se muestran las curvas I-V de 18 mediciones repetidas en una tercera región del sistema E090 en ambiente oscuro. Las primeras tres mediciones, presentadas en color verde y denominadas E090(1), E090(2) y E090(3), se realizaron en el intervalo $[-0.5V, 0.5V]$; las siguientes tres mediciones, presentadas en color azul rey y denominadas E090(4), E090(5) y E090(6), se realizaron en el intervalo $[-0.75V, 0.75V]$; las siguientes tres mediciones, presentadas en color azul cielo y denominadas E090(7), E090(8) y E090(9), se realizaron en el intervalo $[-1.0V, 1.0V]$; las siguientes tres mediciones, presentadas en color rosa y denominadas E090(10), E090(11) y E090(12), se realizaron en el intervalo $[-1.25V, 1.25V]$; las siguientes tres mediciones, presentadas en color amarillo y denominadas E090(13), E090(14) y E090(15), se realizaron en el intervalo $[-1.5V, 1.5V]$; las últimas tres mediciones, presentadas en color café y denominadas E090(16), E090(17) y E090(18), se realizaron en el intervalo $[-1.75V, 1.75V]$. Estas mediciones se presentan en la figura en orden invertido porque los intervalos de medición de las últimas curvas son más amplios e incluyen los intervalos de medición de las primeras, debido a la superposición, las últimas mediciones ocultarían a las primeras si se presentaran en el orden en que se realizaron.

Puede observarse que en las primeras 10 mediciones existe una relación no lineal entre la corriente y el voltaje de polarización con un estado de alta resistencia, correspondiente a una unión metal-semiconductor de barrera Schottky; mientras que las últimas 8 mediciones presentan una relación más bien lineal, con un estado de baja resistencia, propia de los contactos óhmicos. La transición del estado de alta resistencia al de baja resistencia sucedió entre la undécima y la duodécima medición, en el intervalo $[-1.25 V, 1.25 V]$. Luego entonces, ante voltajes de polarización suficientemente grandes, aparece de nuevo la relación I-V lineal, semejante a la que se manifestó ante iluminación intensa en los sistemas E090 y E210. Cualquier medición posterior, sin importar que el intervalo de medición para el voltaje de polarización sea grande o pequeño, muestra una relación I-V lineal.

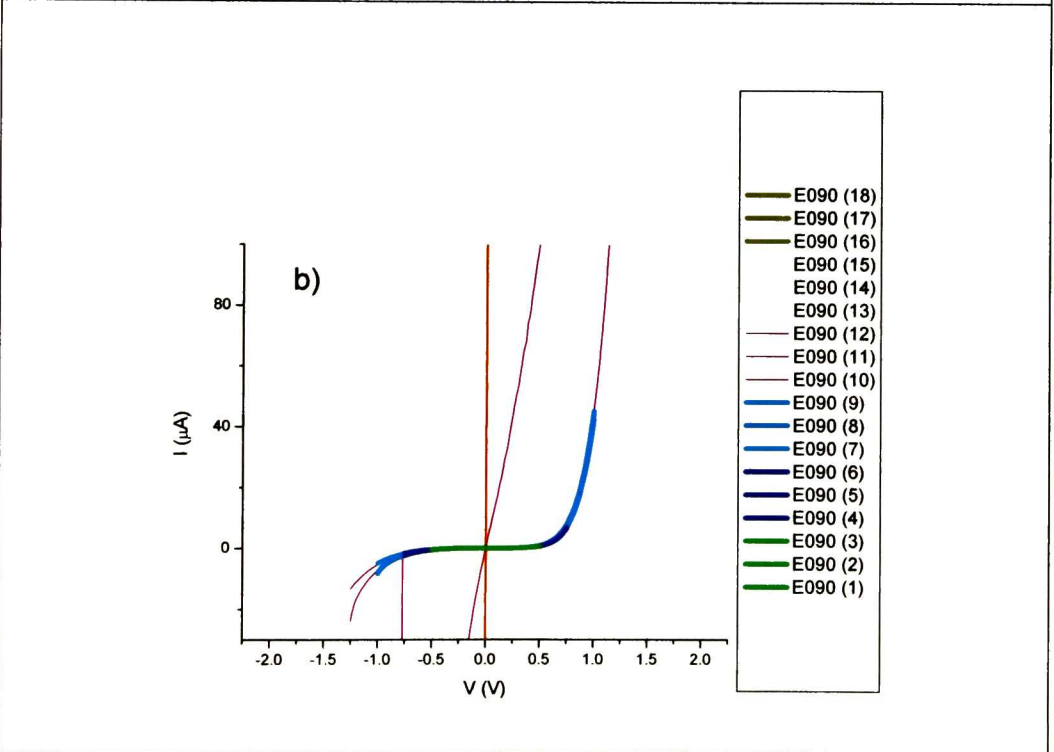
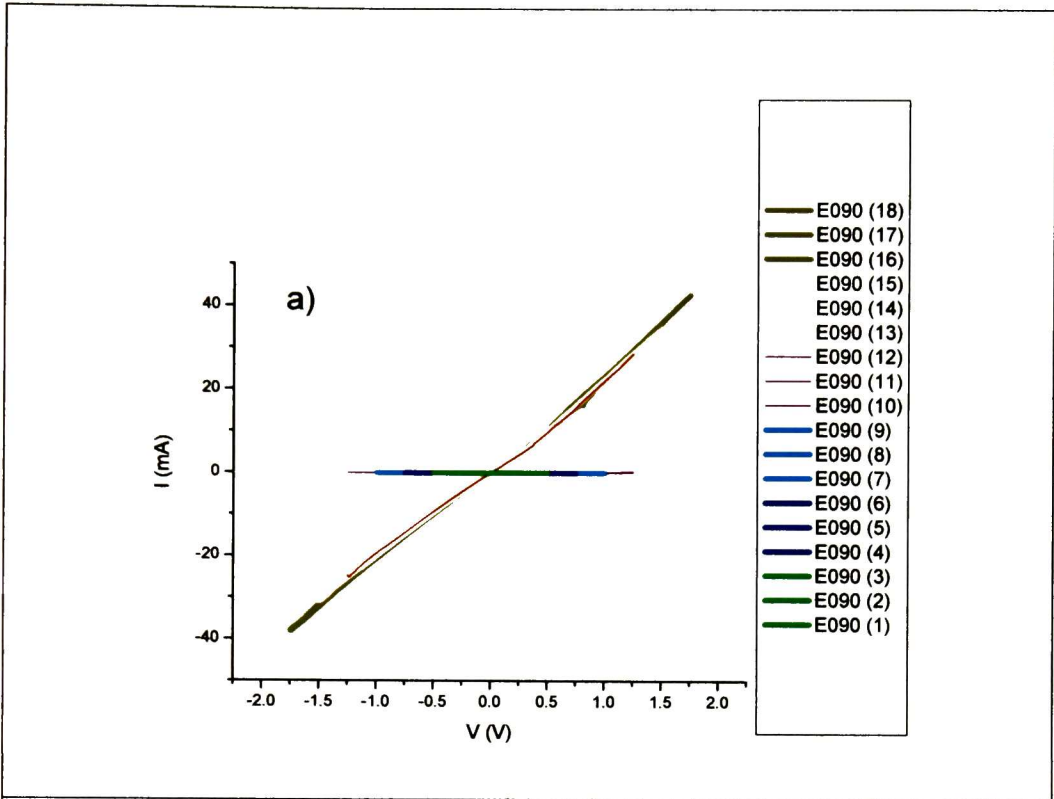


Figura 5-20: Mediciones I-V con barrido positivo del voltaje en diferentes intervalos del sistema E090

5.3.7 Dispositivo E330 ante diferentes intervalos de voltaje de polarización

En la Figura 5-21 se muestran las curvas I-V de 18 mediciones repetidas en una segunda región del sistema E330 en ambiente oscuro. Las primeras tres mediciones, presentadas en color verde y denominadas E330(1), E330(2) y E330(3), se realizaron en el intervalo $[-0.5V, 0.5V]$; las siguientes tres mediciones, presentadas en color azul rey y denominadas E330(4), E330(5) y E330(6), se realizaron en el intervalo $[-0.75V, 0.75V]$; las siguientes tres mediciones, presentadas en color azul cielo y denominadas E330(7), E330(8) y E330(9), se realizaron en el intervalo $[-1.0V, 1.0V]$; las siguientes tres mediciones, presentadas en color rosa y denominadas E330(10), E330(11) y E330(12), se realizaron en el intervalo $[-1.25V, 1.25V]$; las siguientes tres mediciones, presentadas en color amarillo y denominadas E330(13), E330(14) y E330(15), se realizaron en el intervalo $[-1.5V, 1.5V]$; las últimas tres mediciones, presentadas en color café y denominadas E330(16), E330(17) y E330(18), se realizaron en el intervalo $[-1.75V, 1.75V]$. Como en el caso anterior, las curvas se presentan en orden invertido para que las últimas no ocultaran a las primeras. Puede observarse que en todas las mediciones se manifiesta una relación no lineal entre la corriente y el voltaje de polarización, correspondiente a una unión metal-semiconductor de barrera Schottky, excepto la última medición. En esta última medición que se realizó en ambiente oscuro como las otras 17, se manifiesta la relación I-V lineal, semejante al dispositivo E090 ante un voltaje de polarización suficientemente grande. Sin embargo, este voltaje umbral para el cual sucede la transición del estado de resistencia, no es el mismo; se tiene un voltaje de 1.25V para el dispositivo E090 y uno de 1.75 para el dispositivo E330.

Luego entonces, de acuerdo con las últimas mediciones analizadas, el estado de baja resistencia que se manifestó ante condiciones de iluminación intensa, también lo hace en ambiente oscuro si la amplitud del intervalo del voltaje de polarización en el que se mide I-V es suficientemente amplia.

Cualquier medición posterior, sin importar que el intervalo de medición para el voltaje de polarización sea grande o pequeño, muestra una relación I-V lineal.

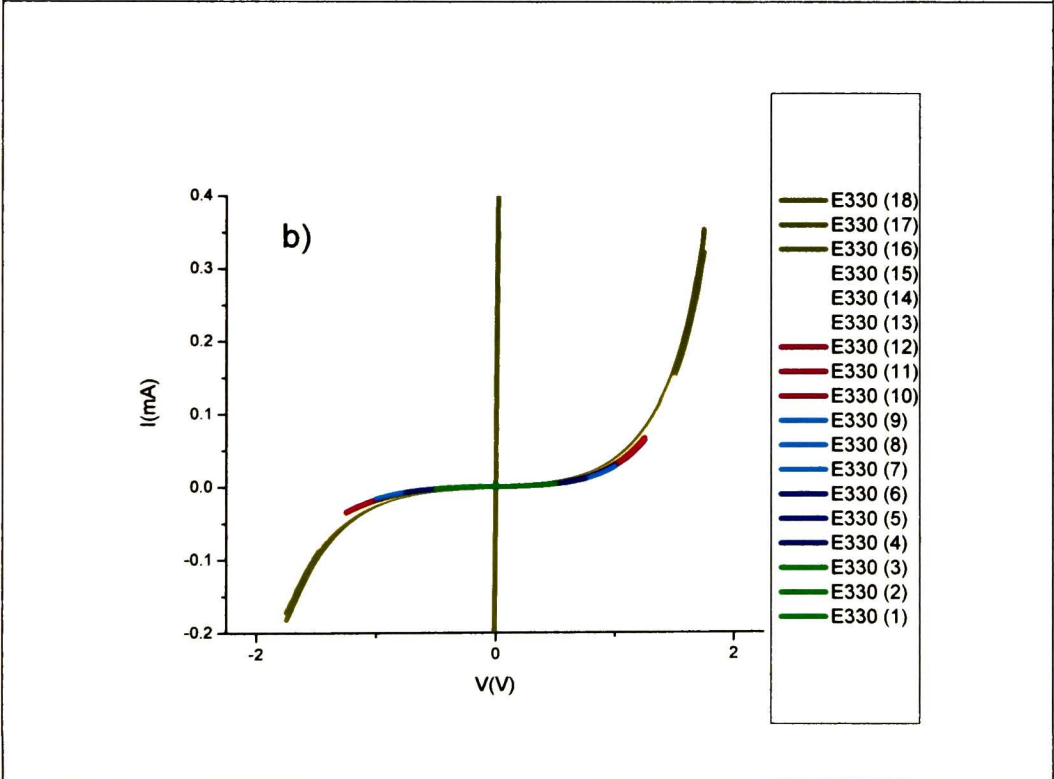
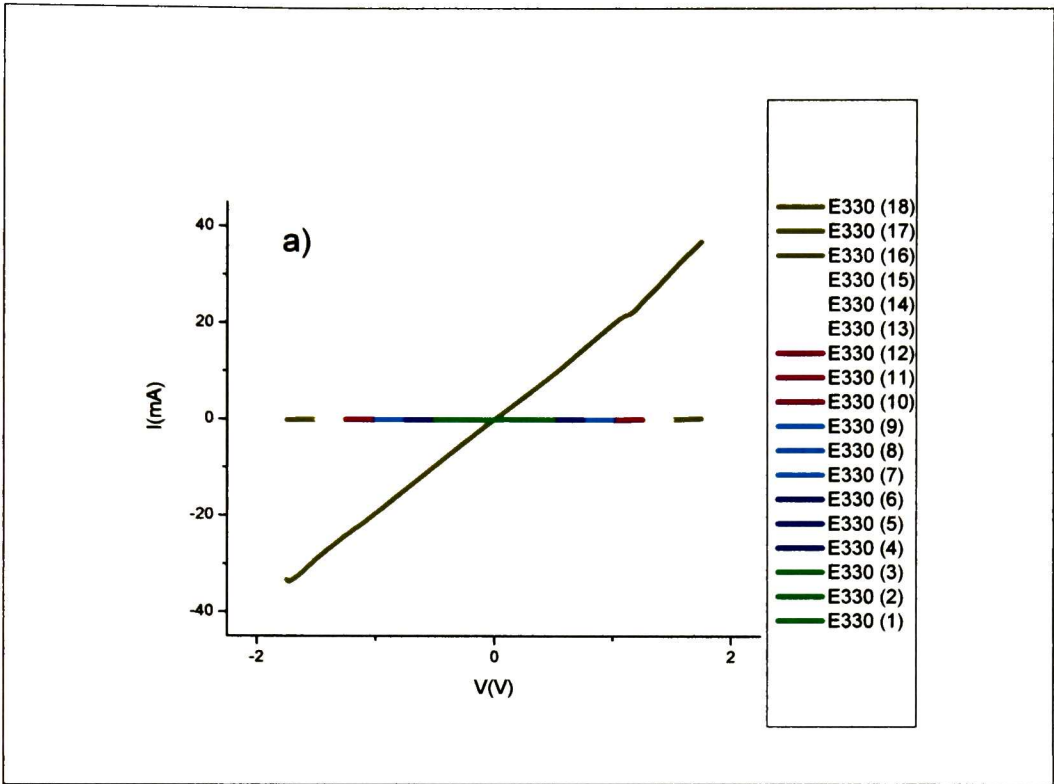


Figura 5-21: Mediciones I-V con barrido positivo del voltaje en diferentes intervalos del sistema E330

5.3.8 Dispositivo E210 en el intervalo [-5V, 5V]

En la Figura 5-22 se muestran dos mediciones consecutivas de I-V, en el intervalo [0.0V, 5.0V] y otras dos también consecutivas en el intervalo [-5V, 0V]; estas dos últimas mediciones se realizaron en otra región del dispositivo E210 barriendo el voltaje negativamente, partiendo desde 0V y terminando en -5 V. En la primera de las mediciones con barrido positivo en el intervalo [0V, 5V], que se presenta en línea continua de color azul, la curva I-V tiene un comportamiento no lineal, regular hasta un poco antes de los 3V, donde la corriente da un salto brusco y tiene a partir de ahí un comportamiento irregular, hasta alcanzar el máximo valor que detecta el equipo que es de 100 mA, un poco antes de los 5 V. En una segunda medición, que se presenta en línea discontinua de color azul, y que se realizó en las mismas condiciones que la primera, la curva I-V manifiesta un comportamiento lineal que prevalece en cualquier medición posterior, sin importar ya el intervalo del voltaje de polarización en el cual se realiza la medición.

Por otro lado, en la primera medición con barrido negativo, que se presenta en línea continua de color rosa, se observa una corriente muy pequeña, de magnitud entre 0 y -2 mA para voltajes entre 0 V y -3 V; fuera de ese intervalo, se presenta un cambio en el comportamiento de la corriente la cual aumenta en magnitud en forma aproximadamente lineal hasta llegar casi a -5.0 V, donde da un salto brusco. En la segunda medición con barrido negativo, que se presenta en línea discontinua de color rosa, se observa un comportamiento lineal en todo el intervalo, aunque se realiza con las mismas condiciones que la primera; de nueva cuenta, este comportamiento lineal prevalecerá sin importar ahora el intervalo en el que se realice la medición.

En la Figura 5-23 se muestran tres mediciones consecutivas de I-V en el dispositivo E210. La primera medición se realiza en el intervalo [0V, 5V] partiendo desde 0V. La segunda medición se realiza en el intervalo [-5V, 5V] partiendo de 5V y terminando en -5V; esto es, barriendo el intervalo negativamente. La tercera medición se realiza de nuevo en el intervalo [-5V, 5V], pero comenzando en -5V y terminando en 5V; se realiza así una medición cuasicontinua que va de 0V a +5V, de 5V a -5V y de -5V a +5V.

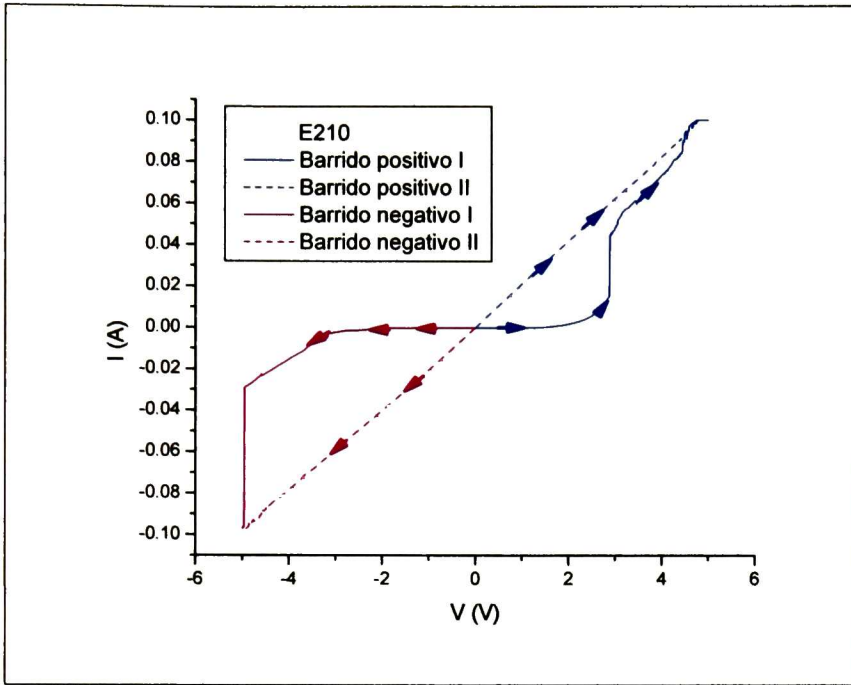


Figura 5-22: I-V del sistema E210 en los intervalos [0, 5V] y [-5V, 0] con barridos positivo y negativo, respectivamente

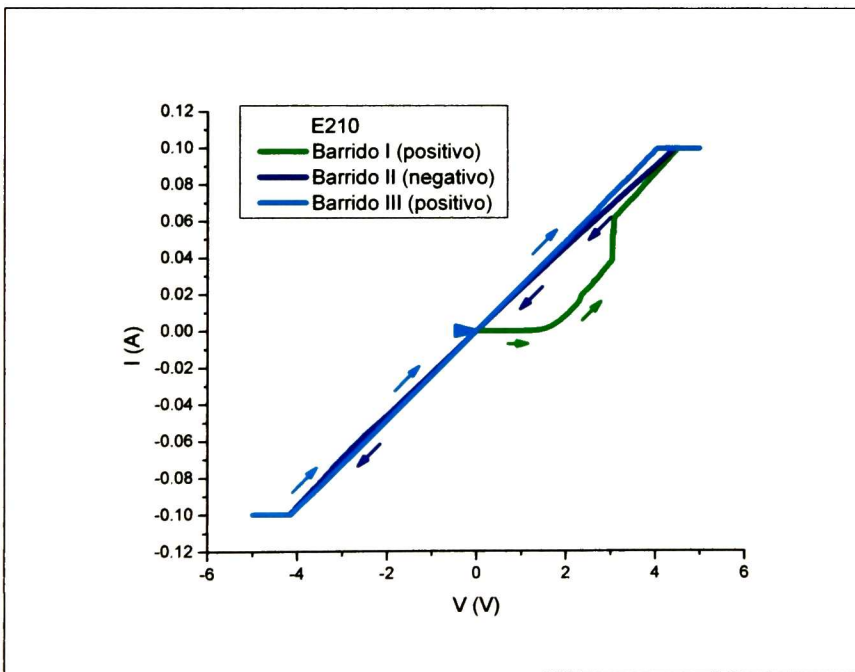


Figura 5-23: Mediciones I-V del sistema E210 en los intervalos [0, 5V], [5V, -5V] y [-5V, 5V]

En la primera medición, que se presenta en color verde, puede observarse que de 0V a 2 V el dispositivo tiene un estado de resistencia bajo y un comportamiento I-V no lineal; en el valor crítico de 3 V, la corriente sufre un cambio brusco en su magnitud y alrededor de ese voltaje el estado de resistencia es alto; de los 3V a los 5V se manifiesta un comportamiento lineal. En la segunda medición, de los 5V a los -5V, que se presenta en color azul rey, continúa el comportamiento lineal y permanece el estado de alta resistencia. En la tercera medición, de -5V a 5V, que se presenta en azul cielo, el estado de resistencia se mantiene de igual modo, sin recuperar el estado de alta resistencia, ni el comportamiento no lineal.

5.3.9 Serie E en el intervalo [0V, 5V]

En la Figura 5-24 se muestran 3 mediciones repetidas en el intervalo [0, 5 V] para cada uno de los 5 sistemas de la serie E. En todos los casos, al principio del intervalo se puede observar un comportamiento no lineal, propio de las uniones metal-semiconductor con barrera Schottky, y al final del intervalo se puede observar un comportamiento aproximadamente lineal, propio de los contactos óhmicos.

Con respecto al estado de resistencia de los dispositivos, puede observarse que es muy bajo hasta alrededor de 1.5 V, pero después de ello se torna alto, sin cambio brusco en la transición entre el comportamiento de barrera y el de contacto óhmico; sin embargo, ya en el estado de resistencia alto, en cierto voltaje crítico se presenta un aumento brusco en el valor de la corriente eléctrica. Para el dispositivo E090, una transición sucede a los 4 V y las otras dos poco antes de los 3 V, para el dispositivo E150, las tres transiciones suceden alrededor de los 2.5 V; para el dispositivo E210, una transición sucede a los 2.5 V y las otras dos a los 3 V; para el dispositivo E270, las transiciones suceden entre 2 V y 3 V, y para el dispositivo E330, dos transiciones suceden entre 2V y 2.5 V y una alrededor de 4 V. Considerando que la diferencia entre los cinco sistemas de la serie E es únicamente el espesor de la película de PbS, puede observarse que el voltaje umbral para el cual sucede el cambio brusco en el valor de la corriente no depende de tal espesor, sino que más bien es independiente del mismo. Luego entonces el voltaje crítico para todos los dispositivos, en

general, se encuentra alrededor de 2.5 V cuando el voltaje de polarización se recorre desde 0V hasta 5V.

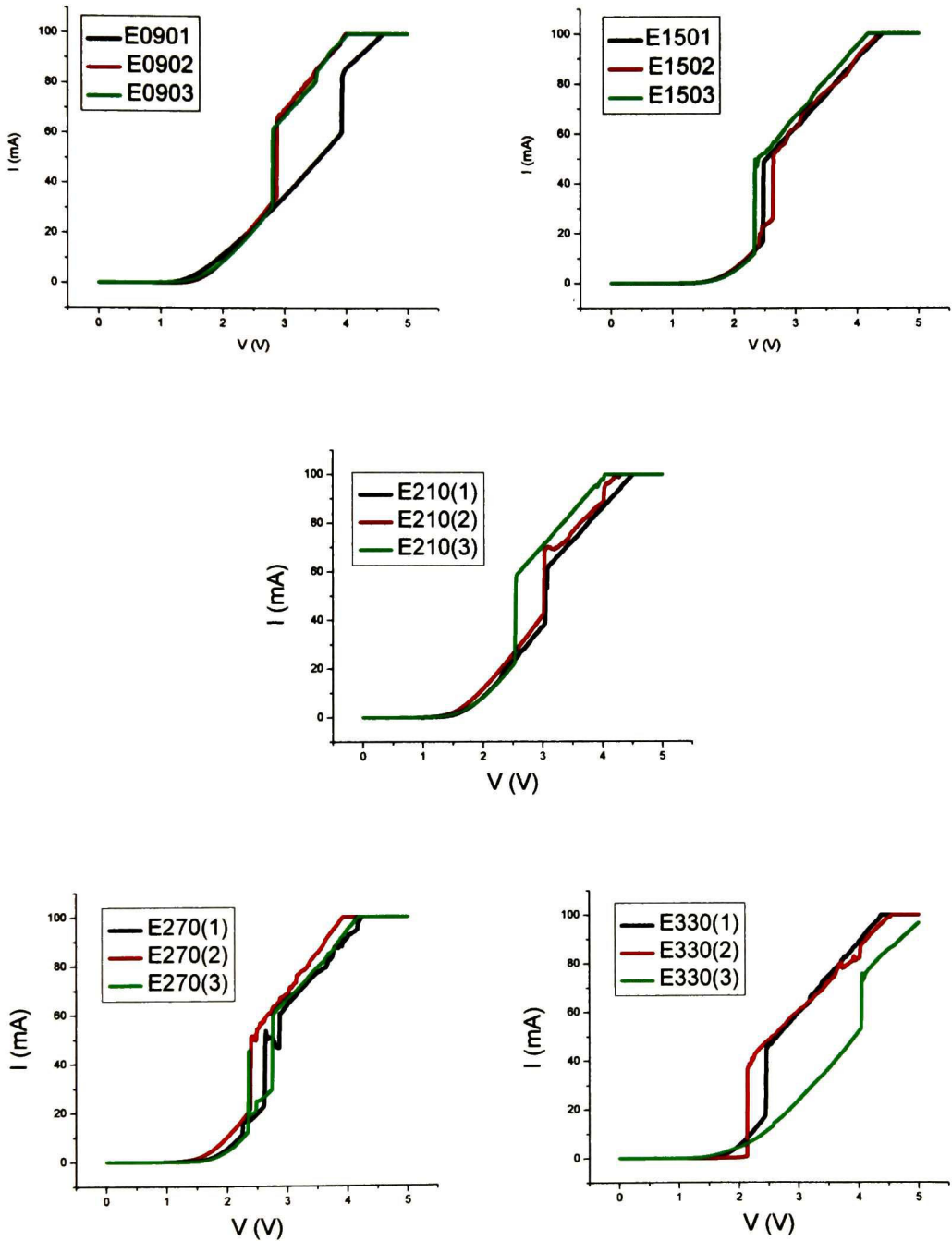


Figura 5-24: Mediciones I-V del sistema E210 en el intervalo [0, 5V].

5.3.10 Dispositivo E210 ante barrido positivo o negativo del voltaje.

En la Figura 5-25 se muestran las curvas I-V de 5 mediciones repetidas en una región del sistema E210 realizadas con iluminación moderada, la luz del día, en el intervalo $[-0.5V, 0.5V]$. Las primeras dos mediciones se realizaron barriendo el voltaje de polarización en sentido positivo y las siguientes tres en sentido negativo. No se aprecian diferencias significativas entre las mediciones. En las Figuras 5-26 y 5-27 se muestran las curvas I-V de 6 mediciones repetidas en las que se manifiesta una relación no lineal, en cada uno de los intervalos $[-1.0V, 1.0V]$ y $[-1.5V, 1.5V]$. Las tres primeras mediciones se hicieron con barrido positivo y las tres últimas con barrido negativo. Puede observarse una pequeña diferencia en el valor de la corriente para voltajes correspondientes en ambos intervalos, según si el barrido se realizó positiva o negativamente: La corriente correspondiente al voltaje máximo de cada intervalo es apreciablemente mayor, alrededor del 30%, cuando el barrido del voltaje se realiza en sentido positivo.

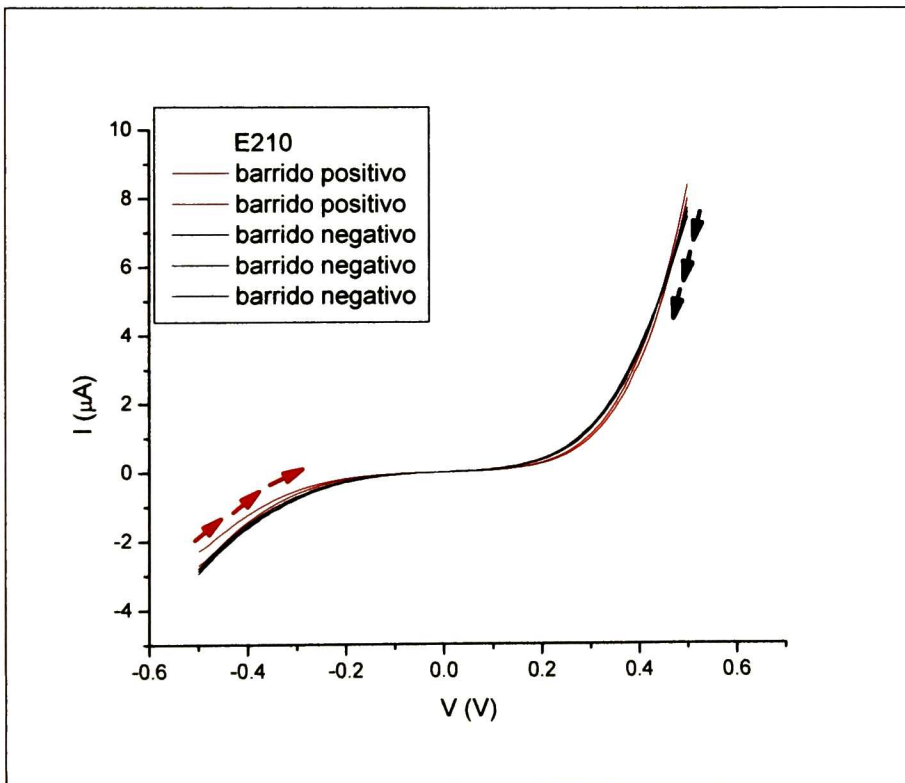


Figura 5-25: Mediciones de Corriente-Voltaje del sistema E210 en el intervalo $[-0.5V, 0.5V]$

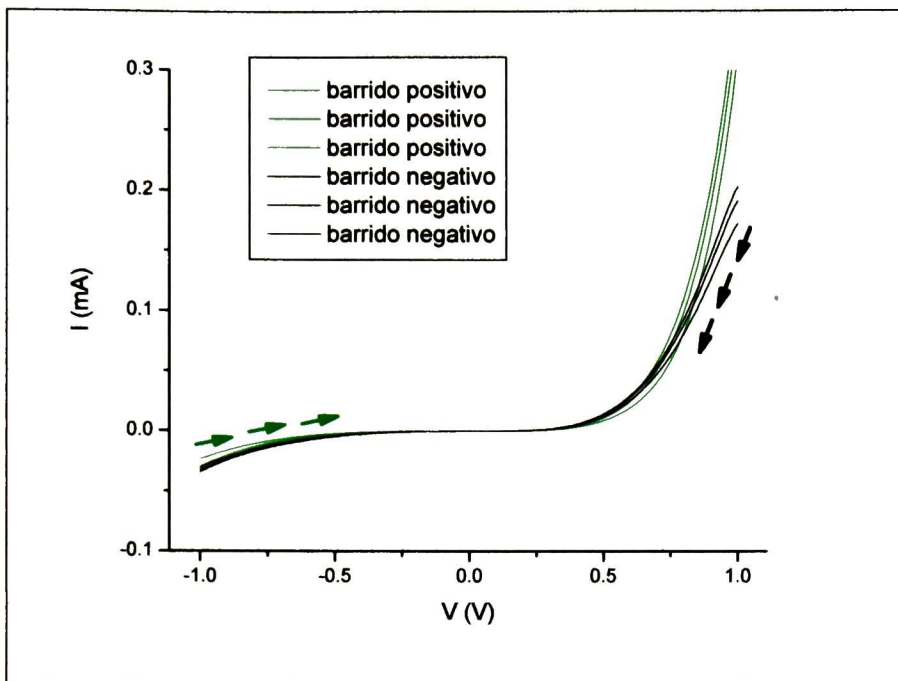


Figura 5-26: Mediciones de Corriente-Voltaje del sistema E210 en el intervalo [-1.0V, 1.0V]

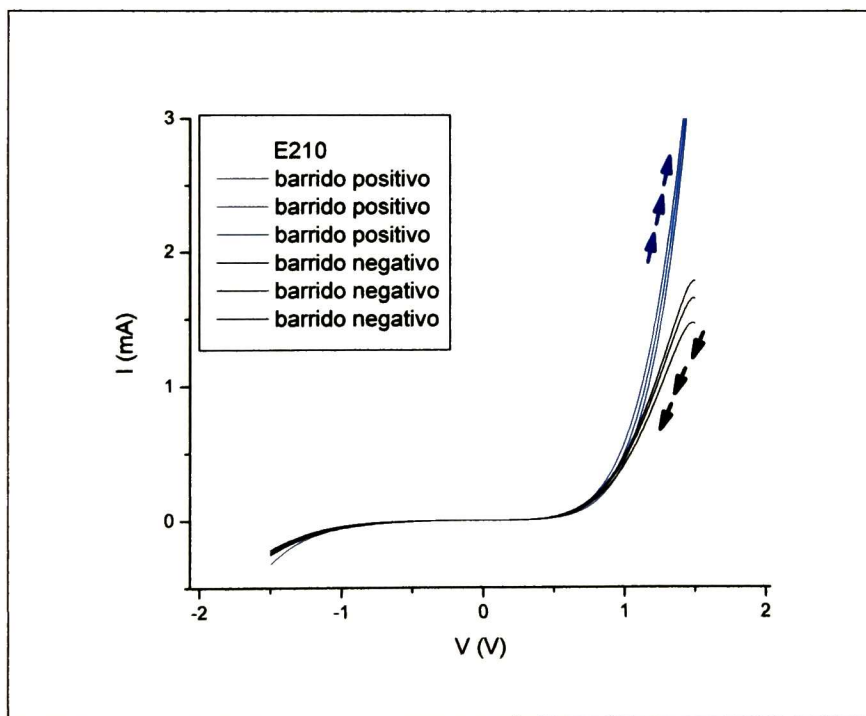


Figura 5-27: Mediciones de Corriente-Voltaje del sistema E210 en el intervalo [-1.5V, 1.5V]

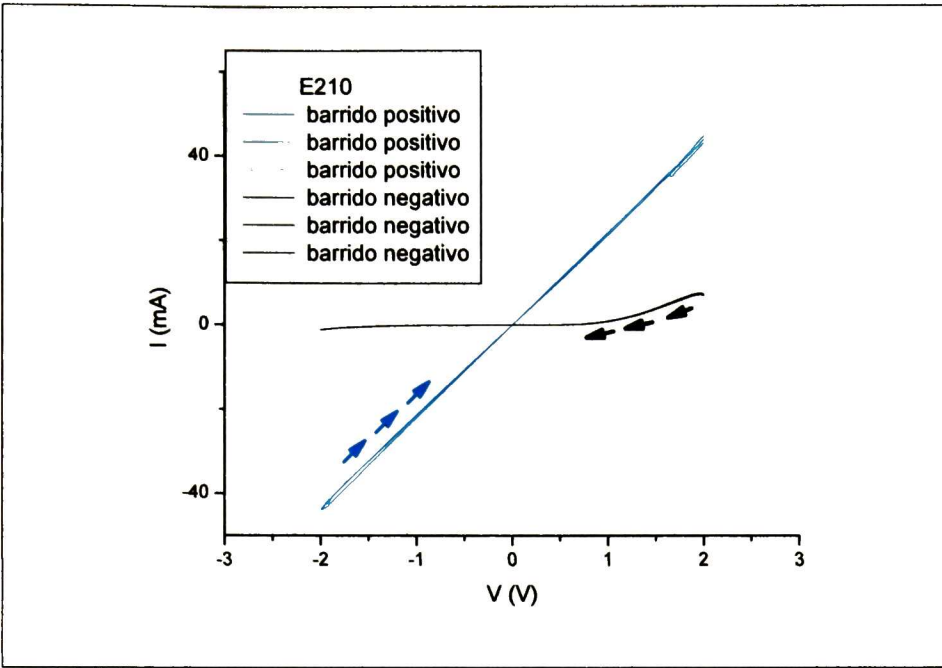


Figura 5-28: Mediciones de Corriente-Voltaje del sistema E210 en el intervalo [-2.0V, 2.0V]

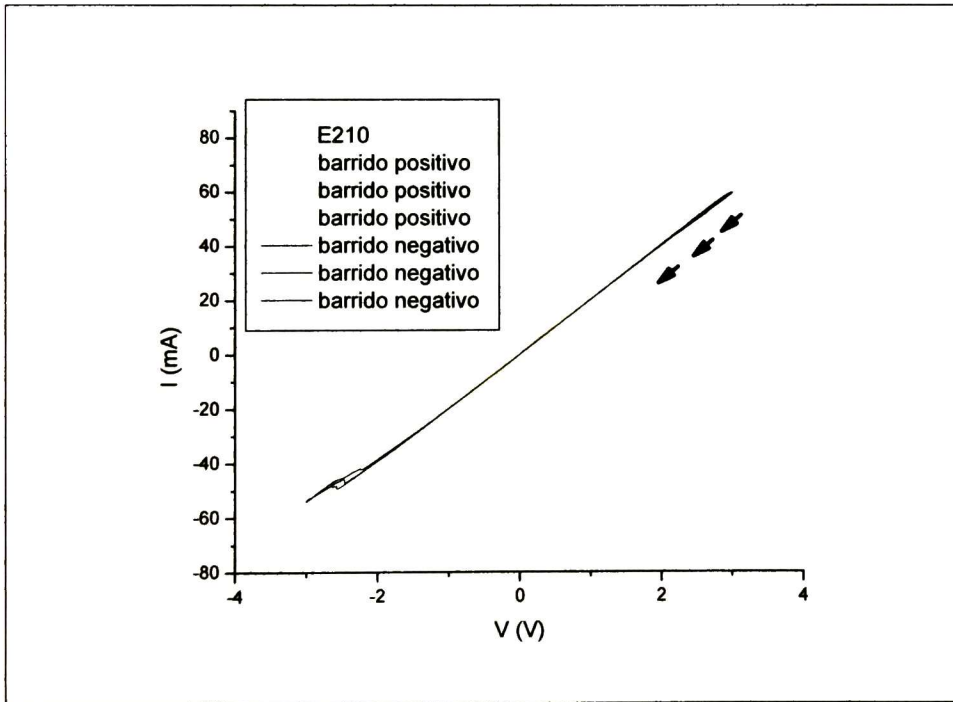


Figura 5-29: Mediciones de Corriente-Voltaje del sistema E210 en el intervalo [-3.0V, 3.0V]

En la Figura 5-28 se muestran las curvas I-V de 6 mediciones en el intervalo $[-2.0V, 2.0V]$, tres en sentido positivo y tres en sentido negativo. Puede observarse una diferencia más significativa que en los casos anteriores del sistema E210: la relación I-V para el barrido positivo es una relación lineal y manifiesta un estado de resistencia eléctrica alta, sin embargo, para el barrido negativo en el mismo intervalo, se observa una relación no lineal como a la observada en los demás casos en los que el intervalo de medición del voltaje de polarización era menor. Por otro lado, en la Figura 5-29 se manifiesta una relación lineal en la curva I-V en el intervalo $[-3.0V, 3.0V]$, tanto si el barrido se ha hecho positiva o negativamente.

En las Figuras 5-30 y 5-31 se muestra la superposición de las curvas I-V para todas las mediciones realizadas al sistema con barrido positivo o con barrido negativo, respectivamente. Puede observarse que para ambos barridos, cuando el dominio del voltaje de polarización es suficientemente pequeño, la corriente es una función no lineal y el estado de resistencia del sistema es alto; y que cuando el dominio es suficientemente grande, la corriente es una función lineal de dicho voltaje y el estado de resistencia del sistema es bajo. El límite a partir del cual el voltaje es suficientemente grande o pequeño, sin embargo, es diferente para un barrido o para el otro, pues el comportamiento lineal se presenta desde el intervalo $[-2V, 2V]$ para el barrido positivo, y hasta el intervalo $[-3V, 3V]$ para el negativo.

Existe otra diferencia destacada para ambos barridos, si se observan los comportamientos no lineales de ambos, puede notarse que las corrientes correspondientes a mismos voltajes son muy similares en los barridos positivos, como puede verse en las Figura 5-32; por el contrario, en los barridos negativos las corrientes correspondientes a mismos voltajes son algo diferentes, lo cual puede observarse en las Figuras 5-33. Esta pequeña diferencia sugiere la posibilidad de que el semiconductor adquiera carga ante la aplicación de campo eléctrico o ante la inyección de corriente, lo cual podría explicar el cambio en el estado de resistencia del dispositivo ante la aplicación de voltajes grandes o iluminación intensa.

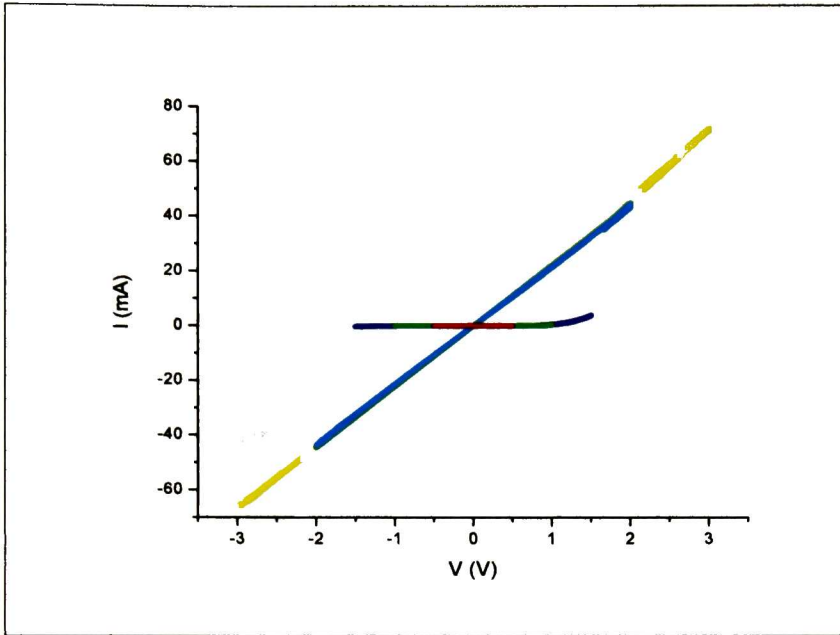


Figura 5-30: Superposición de las mediciones de Corriente-Voltaje con barrido positivo de E210

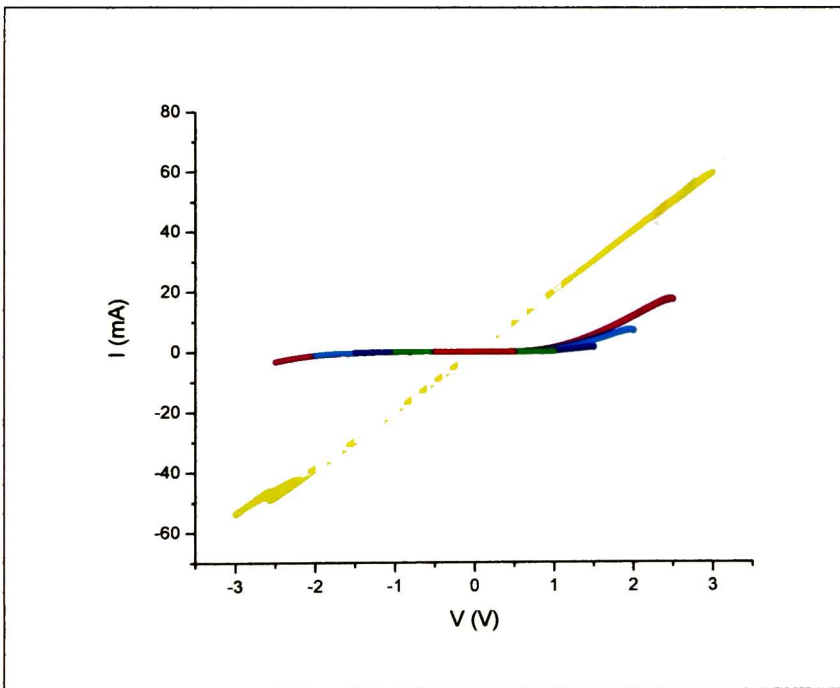


Figura 5-31: Superposición de las mediciones de Corriente-Voltaje con barrido negativo de E210

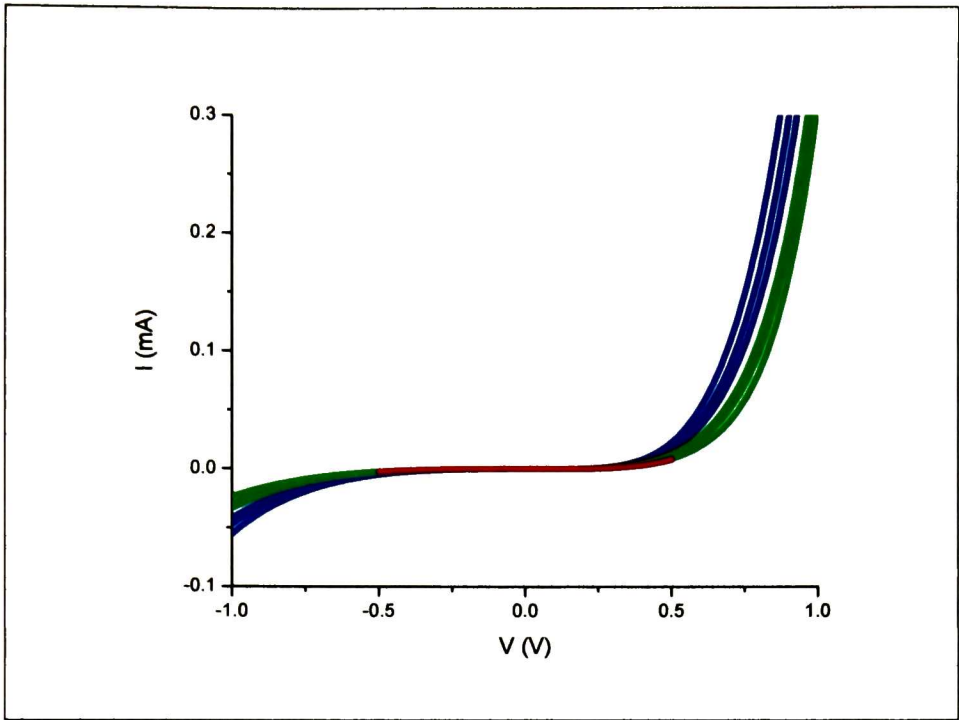


Figura 5-32: Amplificación de las mediciones I-V no lineales con barrido positivo

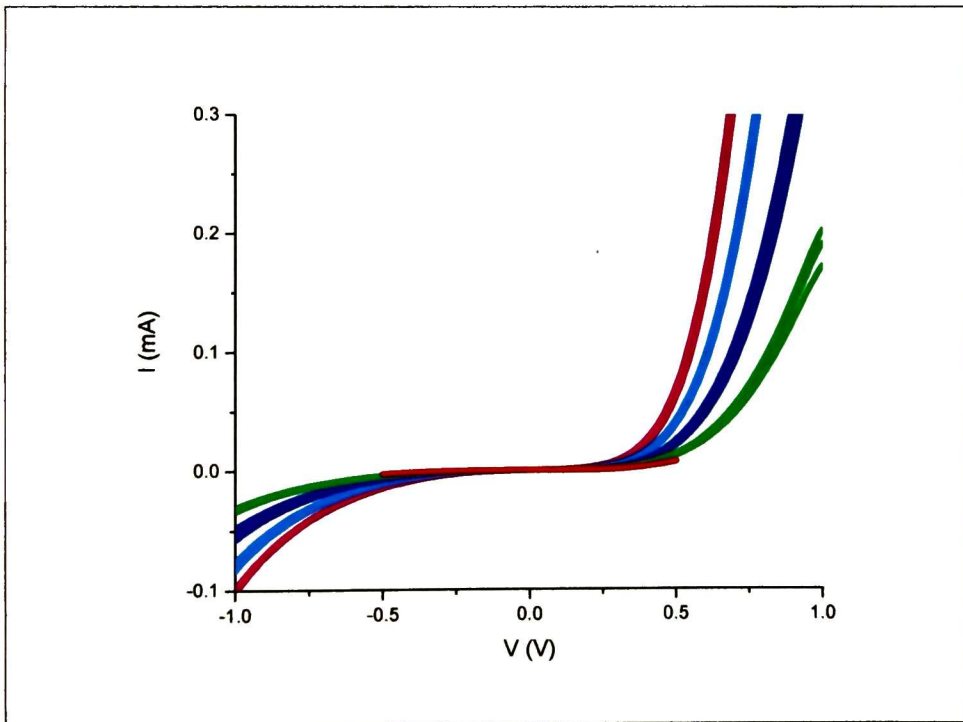


Figura 5-33: Amplificación de las mediciones I-V no lineales con barrido negativo

5.3.11 Electrodo en Corto Circuito y a Tierra

En la Figura 5-34 se presenta una serie de 9 mediciones repetidas, en ambiente oscuro, sobre el sistema E090. Las primeras tres, presentadas en color verde y denominadas E090(Oa), E090(Ob) y E090(Oc), se realizaron en el intervalo [-0.5 V y 0.5 V] y muestran un estado de resistencia alto, del orden de $10^6 \Omega$. Enseguida se realizaron las siguientes tres mediciones en el intervalo [-3 V, 3 V], escogido suficientemente amplio para cambiar el estado de resistencia del sistema de alto a bajo; estas mediciones se presentan en color azul cielo y se denominan E090(Od), E090(Oe) y E090(Of). Puede notarse que aunque en E090(Od) se manifiesta la presencia de un contacto de barrera Schottky con un estado de alta resistencia, en E090(Oe) se manifiesta la presencia de un contacto óhmico con un estado de baja resistencia, alrededor de 60Ω . Después de las primeras 6 mediciones, los electrodos metálicos en contacto con PbS e ITO se conectaron en corto circuito a tierra y luego se realizaron las últimas tres mediciones, presentadas en línea discontinua de color negro y denominadas E090(Og), E090(Oh) y E090(Oi), en las que puede observarse que el dispositivo retornó a su estado de resistencia alto, en el que se manifiesta la presencia de una barrera Schottky.

Luego entonces, el paso del estado de resistencia de alto a bajo debido a la aplicación de un voltaje de polarización suficientemente alto puede revertirse, para recuperar el estado de resistencia alto, mediante la conexión en corto circuito y a tierra de las dos terminales del dispositivo.

Por otro lado, en la Figura 5-35 se presentan 5 mediciones de I-V en otra región del sistema E090. La primera de ellas, presentada en color verde, se realizó en ambiente oscuro; puede observarse que el dispositivo se encontraba en estado de resistencia alta. La segunda medición, presentada en azul rey, se realizó en ambiente de iluminación intensa; puede observarse el aumento en la conductividad del sistema al pasar del estado de alta resistencia al de baja, alrededor de 70Ω . La tercera medición, presentada en color azul cielo, se realizó en ambiente oscuro nuevamente; puede observarse que el estado de baja resistencia se mantuvo sin necesidad de iluminar el sistema al realizar la medición. Entre la tercera medición y la cuarta se conectó la unión metal-semiconductor en corto circuito y a

tierra durante 3 minutos. La cuarta medición, presentada en rosa, se realizó en ambiente oscuro; puede observarse una reducción en la conductividad del sistema aunque éste permanece en estado de resistencia baja. Entre la cuarta y la quinta medición se conectó el sistema de nuevo en corto circuito y a tierra. La quinta medición, presentada en amarillo, se realizó en ambiente oscuro; como puede observarse, la conductividad del sistema se redujo de nuevo, aumentando un poco más el estado de resistencia. El revertimiento total del estado de baja resistencia, obtenido por iluminación, hacia el de alta, se obtiene mediante un corto circuito a tierra del dispositivo durante algunas horas en oscuridad, o bien, durante algunos segundos en ambiente intensamente iluminado. Luego entonces, el aumento en el estado de resistencia del sistema, después de que esta bajó violentamente debido a la aplicación de iluminación intensa, también puede conseguirse mediante la conexión en corto circuito y a tierra de las dos terminales del dispositivo.

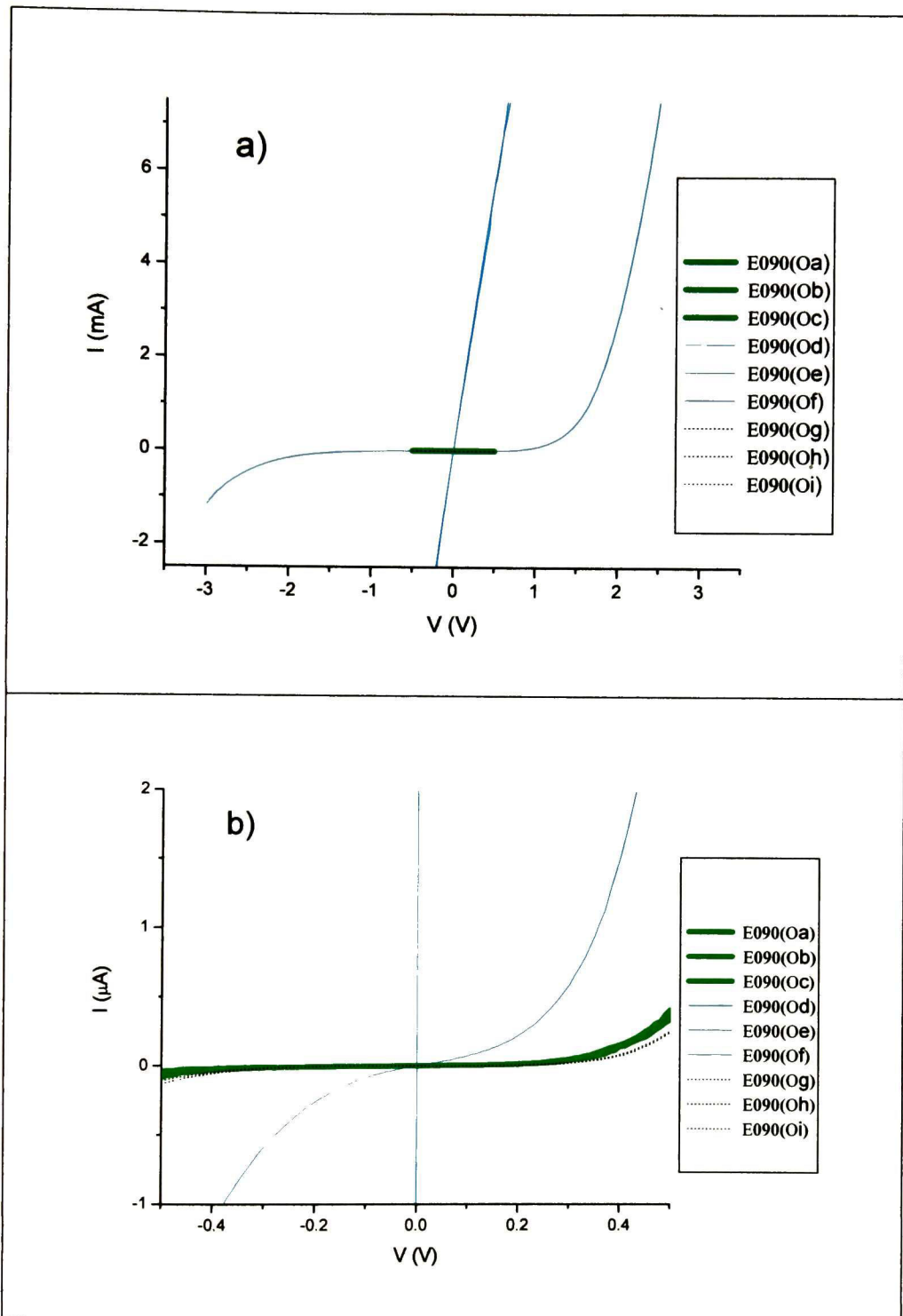


Figura 5-34: Corto Circuito a Tierra después de voltajes de polarización suficientemente grandes

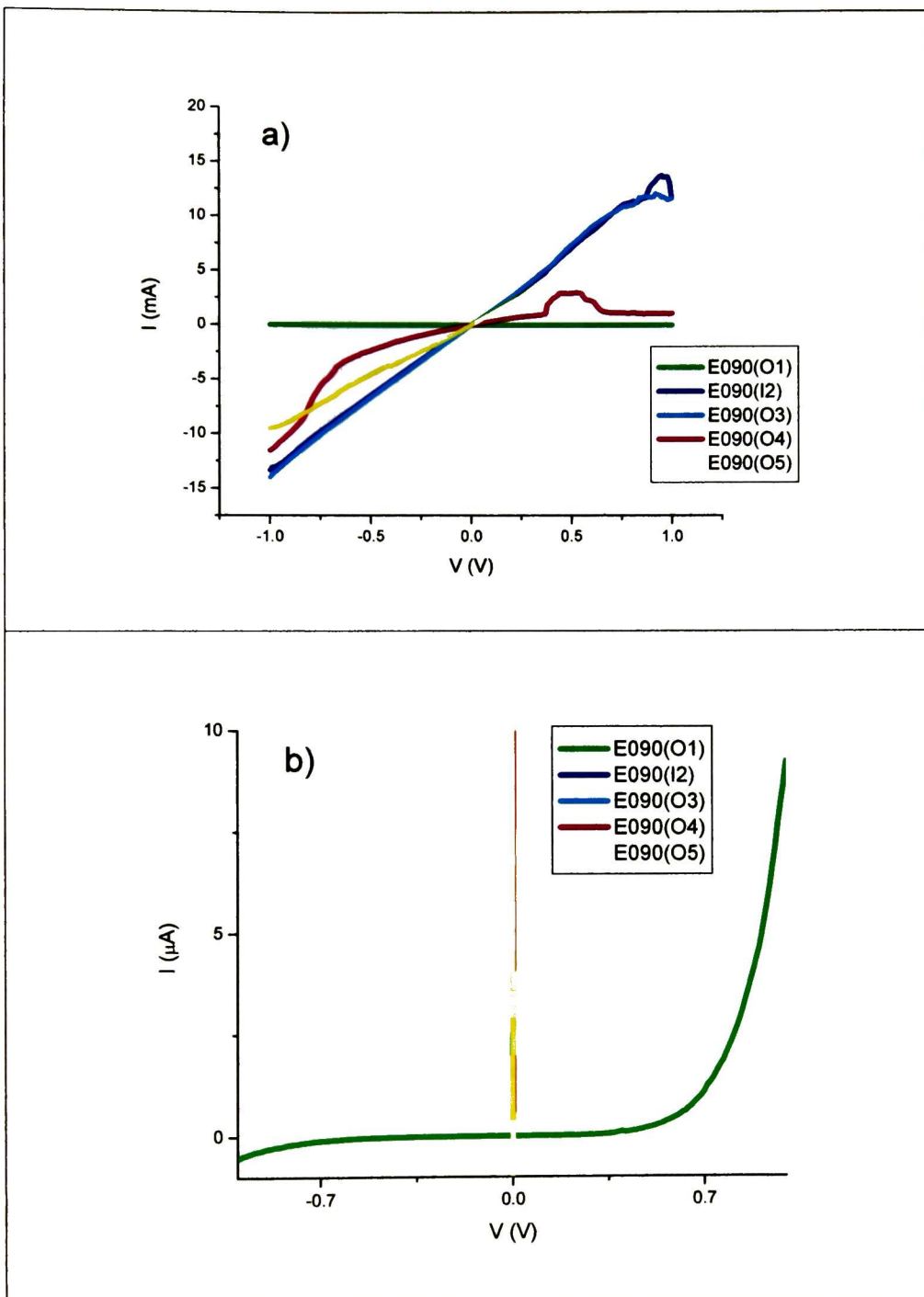


Figura 5-35: Corto Circuito a Tierra después de iluminación intensa

5.3.12 Los Dos Estados de Resistencia

De acuerdo con los resultados anteriores, la unión metal-semiconductor entre el electrodo de níquel con oro y la película de PbS presenta dos estados de resistencia: un estado de alta resistencia que se manifiesta cuando se mide la corriente ante un voltaje de polarización pequeño en ambiente oscuro o con luz tenue, como la iluminación ordinaria que hay en un laboratorio, y otro de baja resistencia que se manifiesta cuando se mide la corriente ante voltaje de polarización grande o en ambiente de iluminación intensa. Una vez que la unión metal-semiconductor alcanza su estado de resistencia bajo debido a iluminación intensa o a voltajes de polarización grandes, no revierte su estado aunque se oscurezca el ambiente y se apliquen voltajes de polarización pequeños, sino hasta que se conectan sus terminales en corto circuito a tierra, exhibiendo capacidad de memoria. En el estado de alta resistencia, la relación I-V es no lineal, de forma exponencial, correspondiente a un contacto de barrera Schottky, lo que implica que la función de trabajo del electrodo metálico es menor que la del PbS, el cual es tipo p. En el estado de baja resistencia, la relación I-V es lineal, correspondiente a un contacto óhmico.

Mientras que la función de trabajo de un conductor es una constante que lo caracteriza, la función de trabajo de un semiconductor es un parámetro que depende de su adulteración [20]; sin embargo, si la adulteración del PbS-p no cambia con iluminación o con campos intensos, y por lo tanto la relación entre las funciones de trabajo del electrodo metálico y de la película semiconductor permanezca igual, esto es, la función de trabajo del metal no es mayor que la del semiconductor, ¿Por qué, entonces, la relación I-V obtenida ante iluminación intensa o ante voltajes grandes resulta lineal y correspondiente a un contacto óhmico, tal y como si la función de trabajo del metal fuera mayor que la del semiconductor? El hecho de que el estado de baja resistencia pueda revertirse al de alta resistencia mediante una conexión en corto circuito a tierra de las terminales del dispositivo evidencia la presencia de carga espacialmente localizada en la unión metal semiconductor cuando este se encuentra en el estado de baja resistencia. Un modelo de carga espacialmente localizada justifica la estabilidad del estado de baja resistencia y la capacidad de memoria que el dispositivo exhibe, puesto que mientras el semiconductor permanezca cargado, el estado de baja resistencia prevalecerá.

5.3.13 Diodos heteroestructurales p-n

El fenómeno de dos estados de resistencia y la capacidad de memoria, ya ha sido observado en diodos p-n heteroestructurales como el de Ge-p/ZnSe-n, de H. Hovel y J. Urgell; el de Ge-p/CdS-n, de W. Duncan, J. Lamb, K. McIntosh y A. Smellie; y Si-p/CdS-n, de W. Duncan y A. Smellie. Sin embargo, las condiciones en las que se manifiesta dicho comportamiento son algo diferentes y ajenas al estado de iluminación de los sistemas; en todo caso, están relacionadas con algunas condiciones en el proceso de fabricación de dichas heterouniones y la aplicación de ciertas polarizaciones positivas o negativas. En estos dispositivos, el estado de equilibrio es el estado de alta resistencia; es posible pasar del estado de alta resistencia al de baja resistencia y viceversa, aplicando al dispositivo un pulso de cierto voltaje inverso, en el primer caso, o cierto voltaje directo, en el segundo caso. Además, un estado u otro puede permanecer durante varias semanas, si la polarización aplicada sobre los dispositivos es nula. En la Figura 5-3.36 se muestra la curva I-V del diodo Si-p/CdS-n estudiado por Duncan y Smellie.

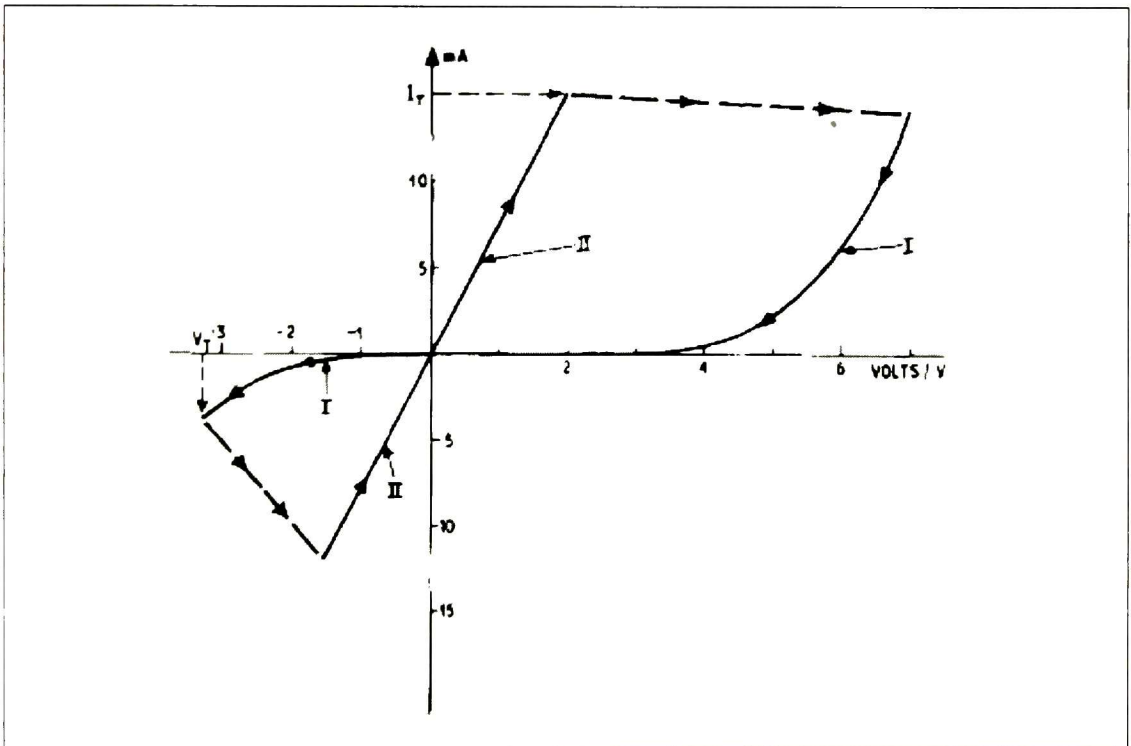


Figura 5-36: Curva I-V del diodo Si-p/CdS-n estudiado por Duncan y Smellie

Los autores atribuyen los efectos de los dos estados de resistencia, el intercambio entre ellos y la capacidad de memoria a la presencia de defectos trampa en el interior del uno de los semiconductores. Proponen un modelo que consiste en trampas vaciándose mediante ionización por impacto, la formación de filamentos de corriente y el rellenado de las trampas por inyección de electrones. Según los autores, la conducción en el estado de baja resistencia parece tomar lugar a través de uno o más filamentos de corriente pues en este estado la resistencia es independiente del área de contacto mientras que el estado de alta resistencia es proporcional al inverso del cubo del área.

La presencia de los dos estados de resistencia observado en el presente trabajo de tesis es bastante similar a lo observado en los diodos p-n heteroestructurales.

5.3.14 Modelo de la Carga Espacialmente Localizada

De acuerdo con lo anteriormente visto, existen dispositivos de semiconductores que presentan dos estados de resistencia, uno alto y otro bajo. Estos dispositivos pueden ser diodos p-n heteroestructurales o diodos de barrera Schottky formados por la unión de un metal y un semiconductor. En los diodos p-n de semiconductores diferentes, el cambio de un estado a otro se consigue con una apropiada polarización, negativa para pasar desde el estado alto al bajo, y positiva para pasar desde el estado bajo al alto. En el diodo de barrera formado por PbS/Ni-Au, el paso desde el estado alto al bajo puede conseguirse mediante iluminación intensa o bien mediante aplicación de voltaje de polarización suficientemente grande, aunque a diferencia de las uniones p-n, la polarización puede ser negativa o positiva; además, se revierte el proceso únicamente si se conecta en corto circuito y a tierra las terminales del dispositivo, y puede acelerarse este proceso, si la conexión en corto y a tierra se realiza en ambiente iluminado. En cualquiera de los casos, este comportamiento de doble estado de resistencia y la capacidad de memoria de los dispositivos se puede adjudicar a la existencia de defectos trampa en la película semiconductor que se vacían o se rellenan para pasar de un estado a otro.

En particular, la unión metal-semiconductor entre el PbS-p y el electrodo metálico de níquel y oro es, originalmente, una barrera Schottky, según se mostró en la sección 5.3.1, de tal manera que la función de trabajo del semiconductor debe ser mayor que la del semiconductor que es tipo p. El semiconductor posee defectos trampas que pueden atrapar carga, según lo observado en la sección 5.3.12. Si estas trampas atrapan huecos, enriquecen el semiconductor del portador mayoritario desvaneciendo la barrera de potencial en la interface y aumentando su conductividad. Con el aumento de la conductividad en la interface el estado de resistencia del sistema cambia de alta a baja y prevalece así mientras el sistema se mantiene cargado. Cuando el sistema se descarga por medio de un corto circuito a tierra y desaparecen los huecos atrapados, la unión retorna a su estado inicial de alta resistencia, ya que la barrera Schottky es restituida.

Los parámetros de los que depende el atrapamiento de los portadores de carga, según las ecuaciones 14 y 15, son la densidad de carga libre, la densidad de trampas, la sección de atrapamiento y la velocidad de los portadores. La iluminación sobre el semiconductor durante la medición crea pares hueco-electrón lo cual aumenta la densidad de portadores libres y con ello la tasa de atrapamiento, R_d . La velocidad de los portadores de carga, por otro lado, es proporcional a la corriente eléctrica que fluye por el semiconductor, la cual aumenta cuando lo hace el voltaje de polarización, luego entonces al aumentar el voltaje de polarización, también lo hace la tasa de atrapamiento. El hecho de que la carga atrapada tenga una duración de varias semanas nos indica que el tiempo de desatrapamiento es bastante grande y por lo tanto estas trampas deben ser bastante profundas. Como la banda prohibida del sulfuro de plomo es muy pequeña el lugar de dichas trampas debe ser, entonces, la frontera de grano del mismo.

Los estados intermedios mostrados en la Figura 5-13, también pueden explicarse con el modelo de carga espacialmente atrapada, pues a medida que se amplía el intervalo del voltaje de polarización, y con ello la corriente a través del semiconductor, la velocidad de los portadores libres, u , aumenta y con ello lo hace también la tasa de atrapamiento, R_d , por lo que la resistencia del dispositivo perfila su bajada.

Cuando en la unión metal-semiconductor se manifiesta la barrera Schottky, el perfil de bandas del semiconductor tipo-p se encorva hacia abajo, debido al enriquecimiento de portador minoritario que crea un dipolo en la unión. Cuando en la unión metal-semiconductor se manifiesta el contacto Ohmico, el perfil de bandas del semiconductor tipo-p se encorva hacia arriba por el enriquecimiento de portador mayoritario debido a los huecos atrapados.

5.3.15 Coeficiente de Idealización bastante mayor que 1

El coeficiente de idealización m para un diodo en general es igual a 1 cuando la corriente de difusión ideal domina o es igual a 2 cuando la corriente de recombinación domina. Cuando ambas corrientes son comparables, m tiene valores entre 1 y 2 [12]. Para un diodo Schottky, debe estar muy cercano a la unidad puesto que el dispositivo tiene muy poca participación de portador minoritario y la corriente de recombinación es baja [10]. Sin embargo, de acuerdo con los resultados mostrados en la tabla 5-6, los valores obtenidos en el presente trabajo van desde 5 unidades para el dispositivo con la película de PbS más delgada, hasta 10 unidades para el de la más gruesa. Estos valores además de estar fuera del intervalo [1, 2] antes mencionado, se incrementan notoriamente con el espesor de la película, esto es con su resistencia. Una resistencia en serie con el diodo rectificador es una condición que puede incrementar considerablemente el valor de m para valores de corriente muy grandes [12].

Una estimación del valor que podría tener m para dispositivos con películas de sulfuro de plomo suficientemente delgadas puede observarse en el ajuste lineal realizado en la Figura 5-19. Esto sugiere proponer un modelo que consiste en un dispositivo formado por una conexión en serie de una resistencia, formada por el volumen de la película semiconductor de PbS, y un diodo Schottky, formado por la región de contacto de la unión metal-semiconductor, como se muestra en la Figura 5-37; o bien, considerando el atrapamiento de carga anteriormente discutido, un diodo en serie con un circuito RC en paralelo. En cualquiera de los casos, el voltaje aplicado al dispositivo no corresponde a la

región del diodo sino que se distribuye entre la resistencia, o el circuito RC en paralelo, y el diodo, de tal manera que:

$$V_D = V - V_R \quad (19)$$

donde V_D es la caída de potencial en el diodo, V es la diferencia de potencial aplicada al dispositivo y $V_R = IR$ es la caída de potencial en la resistencia.

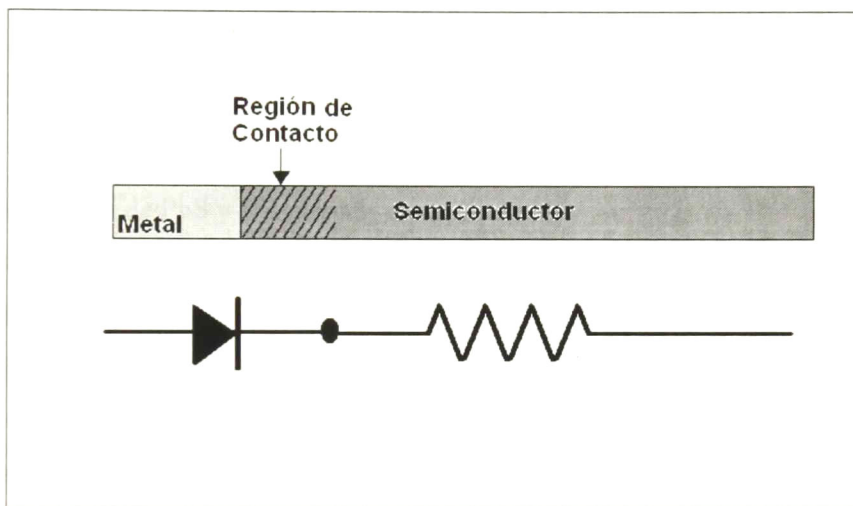


Figura 5-37: Modelo de resistencia y diodo en serie

6 Conclusiones y Perspectivas

6.1 Conclusiones

- Se construyeron 5 dispositivos de semiconductor integrados de la unión ITO/PbS/Ni-Au, cuya variante fue el espesor de la película de PbS.
 - El estudio de las características I-V mostró que dichos dispositivos presentan dos estados de resistencia.
 - El estado base de los dispositivos es de alta resistencia. La relación I-V en este estado es no lineal, debido a la presencia de una barrera Schottky entre la película semiconductora de PbS y el electrodo metálico de Ni y Au.
 - En el intervalo [+1 V, -1 V], cada dispositivo constituye un diodo rectificador.
 - El coeficiente de idealización más cercano a la unidad y la corriente de saturación más pequeña se obtuvieron en el dispositivo con la película de PbS más delgada. Dichos valores fueron $m = 5$ y $I_s = 14$ nA.
 - En condiciones de iluminación intensa o ante voltajes de polarización muy grandes se manifiesta un estado de resistencia baja.
 - En este segundo estado, la relación I-V es lineal y la unión metal-semiconductor se comporta como contacto óhmico.
 - Tal comportamiento se atribuye a la existencia de trampas de huecos en el interior del semiconductor.
 - Dichas trampas se vacían en condiciones de iluminación intensa o ante voltajes de polarización muy grandes, enriqueciendo de huecos el semiconductor para aumentar su conductividad y transformando la unión metal-semiconductor en un contacto óhmico.
- Al conectar los electrodos del dispositivo en corto circuito a tierra, la heteroestructura recupera su estado de alta resistencia, la relación I-V no lineal, y sus propiedades de rectificación, manifestando de nuevo la presencia de una barrera Schottky.

6.2 Perspectivas


- Considerando que el mejor dispositivo rectificador se obtuvo con la película semiconductor más delgada, podría intentarse tiempos de depósito más cortos, para obtener películas más delgadas y observar el comportamiento de los valores de la constante de idealización y de la corriente de saturación.
- Otros conductores como cobalto, níquel, aluminio y cobre, en unión con PbS, pueden estudiarse.
- Otro semiconductor como CdS, puede formar parte de la unión metal semiconductor.
- Una capa de óxido, como SiO₂, puede colocarse entre el metal y el semiconductor para constituir una heteroestructura MOS.
- Los estudios I-V podrían complementarse con estudios C-V y de Impedancia.
- Un filtrado de la luz blanca podría realizarse para observar la influencia de la misma en función de la longitud de onda o el color.

Bibliografía

1. J. Valenzuela, *Tesis de Maestría*, CINVESTAV Querétaro, (2001).
2. C. Kittel. *Introducción a la Física del Estado Sólido*. (Reverté, España, 1993).
3. D. Lide. *Handbook of Chemistry and Physics 86th edition 2006*, (Taylor & Francis Group. USA, 2006).
4. I. Pentillie, L. Pentillie, V. Dragoi, D. Petre and T. Botila, *Appl. Phys. Lett.*, 71(1997), 1104.
5. G. Hodes, *Chemical Solution Deposition of Semiconductor Films*, (Marcel Dekker, USA, 2003).
6. M. Ortuño, *Tesis de Maestría*, CINVESTAV Querétaro, (2000).
7. E. Terzini, P. Thilakan and C. Minarini, *Material Science and Engineering* B77(2000), 110.
8. J. Valenzuela, *Tesis de Doctorado*, CINVESTAV Querétaro, (2005).
9. C. Trejo, *Tesis de Maestría*, CINVESTAV Querétaro, (2005).
10. J. Sprit, *Dispositivos Semiconductores*, (Mc Graw-Hill, México, 1997).
11. K. Shalimova, *Física de los Semiconductores*, (MIR, Moscú, 1975).
12. S. Sze, *Semiconductor Devices, Physics and Technology*, (Wiley, USA, 1985).
13. B. Akkal, Z. Benamara, H. Abid, A. Talbi and B. Gruzza, *Materials, Chemistry and Physics* 85(2004), 27.
14. R. Bube. *Photoelectronic Properties of Semiconductors*, (Cambridge University Press, Gran Bretaña, 1992).
15. E. Zawaideh, *US Patent No. 5889592*, (1999).
16. H. Hovel and J. Urgell, *J. Appl. Phys.*, 42 (1971), 5076.
17. W. Duncan, J. Lamb, K. Mcintosh and A. Smellie, *Appl. Phys. Lett.*, 23 (1973), 330.
18. W. Duncan and A. Smellie, *J. Appl. Phys.*, 49 (1978), 4098.
19. R. Boylestead, *Electrónica: Teoría de Circuitos*, (Pearson, México, 1997).

20. S. Dimitrijević, *Principles of Semiconductor Devices*, (Oxford University Press, USA, 2006).

EL JURADO DESIGNADO POR LA UNIDAD QUERÉTARO DEL CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DE ESTUDIOS AVANZADOS DEL INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL, APROBÓ LA TESIS DE LA C. IRMA ELODIA MORALES FERNÁNDEZ TITULADA: CARACTERIZACIÓN DE LA UNIÓN PbS/Ni-Au, FIRMAN AL CALCE DE COMÚN ACUERDO LOS INTEGRANTES DE DICHO JURADO, EN LA CIUDAD DE QUERÉTARO, QRO., A LOS TREINTA DÍAS DEL MES DE JULIO DE DOS MIL SIETE.



DR. ARTURO MENDOZA GALVÁN



DR. YEVGEN PROKHOROV



DR. RAFAEL RAMÍREZ BON



CINVESTAV
BIBLIOTECA CENTRAL



SSIT000006240