



Universidad Autónoma del Estado de México

Centro Universitario UAEM Ecatepec

***“DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UN CIRCUITO
DETECTOR DE TEMPERATURA BASADO EN
DIODOS SCHOTTKY”***

T E S I S

Para obtener el grado de
MAESTRO EN CIENCIAS DE LA COMPUTACIÓN

Presenta:

ING. ANDRÉS RODRÍGUEZ LÓPEZ

Asesor Académico:

Dr. en C. RODOLFO ZOLÁ GARCÍA LOZANO

Asesores Adjuntos:

M. en I.S.C. ALEJANDRA MORALES RAMÍREZ

Dr. ISMAEL DÍAZ RANGEL

ECATEPEC DE MORELOS, ESTADO DE MÉXICO, AGOSTO 2017

AGRADECIMIENTOS

A mi familia, **ANDRÉS RODRÍGUEZ B., GUADALUPE LÓPEZ P., KAREN RÓDRIGUEZ L.**, por todo el apoyo que me han brindado durante esta y todas las etapas de mi vida, por todos los sacrificios que han hecho para que pueda superarme más cada día y por tener la disposición de seguir apoyándome en mi futuro.

A mi novia, **OSDALÍ BOJÓRQUEZ I.**, por todo el apoyo que me brindaste a lo largo de este proyecto y principalmente por alentarme a seguir adelante y enfrentar nuevos retos.

A mi asesor, **DR. RODOLFO ZOLÁ GARCÍA L.**, por haber confiado en mí para desarrollar este proyecto de investigación, así como tener la paciencia suficiente para compartir su conocimiento conmigo.

Al **Centro de Nanociencias y Micro y Nanotecnologías del Instituto Politécnico Nacional (CNMN-IPN)** y en especial al **DR. NORBERTO HERNÁNDEZ COMO**, por las facilidades y el apoyo brindado durante las estancias de investigación.

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología** por el apoyo económico, el cual fue de gran importancia durante el desarrollo de este proyecto. No. CVU/Becario: 633973/570345.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1 – MARCO TEÓRICO	4
1.1 INTRODUCCIÓN	5
1.2 OBJETIVO GENERAL	7
1.3 OBJETIVOS PARTICULARES	7
1.4 MATERIALES SEMICONDUCTORES	8
1.5 MATERIALES SEMICONDUCTORES TIPO N Y TIPO P	10
1.6 ÓXIDO DE ZINC	11
1.7 DIODO SEMICONDUCTOR	12
1.7.1 POLARIZACIÓN DIRECTA	13
1.7.2 POLARIZACIÓN INVERSA	14
1.8 DIODOS DE BARRERA SCHOTTKY	14
1.9 MODELO ELÉCTRICO DEL DIODO SCHOTTKY	16
1.10 MÉTODOS DE EXTRACCIÓN DE PARÁMETROS	16
1.10.1 MÉTODO 1 – EMISIÓN TERMOIÓNICA	16
1.10.2 MÉTODO 2 - MÉTODO DE S. K. CHEUNG BASADO EN EL MODELO DE SHOCKLEY	22
CAPÍTULO 2 – FABRICACIÓN DE DIODOS SCHOTTKY	27
2.1 PROCESO DE FABRICACIÓN DE DIODOS SCHOTTKY	28
2.1.1 PREPARACIÓN DE SUSTRATOS	29
2.1.2 DEPÓSITO DE LA CAPA DELGADA DE ZNO POR MEDIO DE SPUTTERING	29
2.1.3 DEPÓSITO DE LA CAPA DELGADA DE PEDOT:PSS POR MEDIO DE MICRO GOTEÓ	32
2.1.4 DEPÓSITO DE LA CAPA DELGADA DE ORO POR MEDIO DE SPUTTERING PARA DEFINIR CONTACTOS	33
CAPÍTULO 3 – CARACTERIZACIÓN ELÉCTRICA	35
3.1 CARACTERIZACIÓN DE DISPOSITIVOS	36
3.1.1 DISPOSITIVO A2X2Y2	39
3.1.2 DISPOSITIVO B1X3Y4	40
3.1.3 DISPOSITIVO B2X3Y3	41
CAPÍTULO 4 – CARACTERIZACIÓN DEL CIRCUITO PROPUESTO	49
4.1 ANÁLISIS DE I_s	50
4.2 DEFINICIÓN DEL CIRCUITO DETECTOR DE TEMPERATURA	52
4.3 SIMULACIÓN DE LA ETAPA DE AMPLIFICACIÓN	53
4.4 SIMULACIÓN DE LA ETAPA DE COMPARACIÓN	56
4.5 SIMULACIÓN DEL CIRCUITO COMPLETO	57
4.6 DESARROLLO DEL CIRCUITO FÍSICO	59
4.6.1 PRIMERA ETAPA DEL CIRCUITO FÍSICO	60
4.6.2 SEGUNDA ETAPA DEL CIRCUITO FÍSICO	61
CONCLUSIONES	63
TRABAJOS A FUTURO	66
PRODUCTO ACADÉMICO	68
REFERENCIAS	82

Capítulo 1

Marco Teórico

1.1 Introducción

Los dispositivos semiconductores han cambiado drásticamente a la humanidad en menos de un siglo. Sin lugar a dudas, la mayoría de las personas no conciben su estilo de vida sin el uso de dispositivos electrónicos. Es evidente que en la mayoría de los dispositivos, la electrónica del silicio se ha enfocado a la miniaturización de los mismos, así como al desarrollo de dispositivos cada vez más veloces, potentes y de menor consumo. Como ejemplo de esta tendencia es posible mencionar el desarrollo de los microprocesadores. Sin embargo, de forma paralela se ha desarrollado un área de la electrónica enfocada a la fabricación de pantallas para computadoras y dispositivos móviles. Esta parte de la electrónica se conoce como “Electrónica de área amplia” y es probablemente uno de los mercados más recientes. Algunas de las características más importantes de esta tecnología son:

- El desarrollo de circuitos en superficies grandes, como por ejemplo pantallas de cristal líquido y celdas solares.
- Requiere técnicas de fabricación que permitan el uso de sustratos económicos.
- Es deseable la capacidad de fabricación de circuitos sobre sustratos flexibles.
- Los dispositivos obtenidos tienen frecuencias de operación baja en comparación con el silicio.

Esta tecnología no pretende sustituir a la tecnología del silicio, por el contrario, tiene un campo de aplicación complementario.

Respecto a la fabricación de dispositivos y circuitos de área amplia existen diferentes materiales que van desde semiconductores orgánicos hasta semiconductores inorgánicos alternativos al silicio. Ejemplos de estos materiales son el PEDOT:PSS y el óxido de zinc (ZnO), los cuales son utilizados en el presente trabajo.

Aun cuando el PEDOT:PSS es un semiconductor orgánico, actualmente el uso de este material no está limitado solo a dispositivos orgánicos, por el contrario también se ha utilizado en la fabricación de dispositivos semiconductores híbridos. El PEDOT:PSS ha sido utilizado satisfactoriamente como una capa de unión con diferentes

semiconductores inorgánicos como por ejemplo; MgZnO, CdS, CdSe, Si, Ge, InP, GZO, IZO y ZnO.

Por otro lado, el Óxido de Zinc cuenta con propiedades que resultan atractivas para la fabricación de dispositivos de capa delgada: su depósito se realiza a bajas temperaturas, es un material transparente, tiene buena estabilidad y alta conductividad eléctrica [1, 2].

En los últimos años se han realizado diferentes estudios con dispositivos que son compatibles con la electrónica de área amplia. Un ejemplo de estos dispositivos son los diodos Schottky basados en la unión de PEDOT:PSS/ZnO.

El diodo Schottky de unión PEDOT:PSS/ZnO tiene diferentes ventajas: bajo costo, bajo consumo de energía, sistema estándar de procesamiento de señal [3, 4, 5, 7].

Donde, el PEDOT:PSS es un polímero conductor a base de agua, el cual tiene una función de trabajo de 5.1 eV y alta transparencia óptica. Este material es comúnmente utilizado como capa de contacto en diversos dispositivos orgánicos como; las celdas solares y los diodos emisores de luz.

Por tal motivo, el diseño y desarrollo de circuitos para la aplicación de medición de variables físicas (temperatura, humedad, presión, nivel de radiación, entre otras) es una de las aplicaciones de interés para el desarrollo de este trabajo de investigación, el cual está enfocado en la fabricación y caracterización eléctrica de diodos Schottky de unión PEDOT:PSS/ZnO para analizar su comportamiento bajo diferentes condiciones de temperatura. De igual forma se realiza la propuesta de un circuito detector de temperatura basado en la sensibilidad de los diodos.

En tal sentido los objetivos del trabajo son:

1.2 Objetivo general.

Diseñar un circuito detector de temperatura basado en diodos Schottky de ZnO. El circuito deberá generar una señal digital cuando la temperatura del circuito sea mayor que el nivel de referencia definido por el usuario.

1.3 Objetivos particulares.

- Utilizar material y circuitos compatibles con tecnología de área amplia.
- Como sensor de temperatura se utilizarán diodos Schottky de ZnO.
- El nivel de voltaje de referencia deberá ser definido por el usuario.

1.4 Materiales Semiconductores

Para comprender el concepto de materiales semiconductores, es necesario conocer a cerca de los materiales conductores y aislantes.

Un conductor es un material que opone poca resistencia al flujo de corriente, es decir que los electrones que se encuentran libres pueden moverse a través del material. Por el contrario, un material aislante opone una gran resistencia al flujo de corriente. Los materiales semiconductores se pueden comportar como conductores o como aislantes, dependiendo del ambiente en el que se encuentren y de las condiciones de dopado del material.

La conducción de los materiales se puede analizar por medio de diagramas de bandas, en los cuales se representa la banda de valencia, la banda prohibida y la banda de conducción. La banda de valencia es aquella en la que se encuentran los electrones cuando están formando parte de los enlaces covalentes de sus átomos, estos electrones no pueden moverse hasta que tengan la energía suficiente para romper los enlaces. La banda prohibida es el nivel de energía que los electrones tienen que superar para ser liberados de un enlace y participar en la conducción de corriente, es decir saltar de la banda de valencia y llegar a la banda de conducción. En la banda de conducción se encuentran los electrones libres, es decir estos electrones pueden moverse en la banda de conducción y participar en el flujo de corriente.

En el caso de los materiales conductores, la banda de valencia y la banda de conducción se encuentran traslapadas, lo cual facilita que los electrones que se encuentran en la banda de valencia se muevan a ocupar los estados vacíos de la banda de conducción permitiendo que muchas cargas fluyan a través del material. Por el contrario, los materiales aislantes, cuentan con una banda prohibida suficientemente grande para impedir el paso de electrones a la banda de conducción. De este modo los electrones no pueden superar la banda prohibida haciendo casi imposible que exista un flujo de corriente. Por otra parte, en los materiales semiconductores, la banda prohibida es menor que en los aislantes, por lo cual, es posible que los electrones alcancen la

energía suficiente para romper sus enlaces y llegar a la banda de conducción. [8] En la Figura 1.1 se muestran los diagramas de bandas para los tres tipos de materiales mencionados.



Figura 1.1 Diagramas de bandas

Un ejemplo de materiales semiconductores son el Silicio (Si) y el Germanio (Ge). Estos materiales son considerados como átomos tetravalentes, ya que cada uno de ellos tiene cuatro electrones de valencia. Por ejemplo, el átomo de Germanio tiene 32 electrones en órbita y 4 de ellos se encuentran en la órbita exterior o de valencia, mientras que el Silicio solo cuenta con 14 electrones de los cuales 4 se encuentran en la órbita de valencia. En ambos casos estos electrones son los que requieren menor energía para ser liberados para participar en el flujo de corriente.

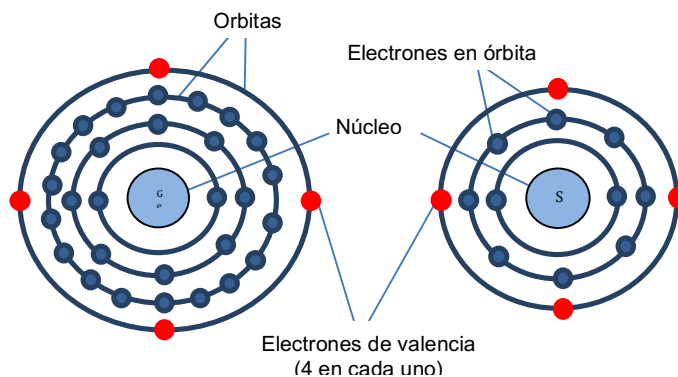


Figura 1.2 Estructura atómica del germanio y silicio

Aún cuando el Si y Ge son materiales semiconductores que pueden ser obtenidos en altos grados de pureza y con controles de impurificación muy precisos que permiten controlar la conductividad, el Silicio tiene la ventaja de que al ser sometido a altas temperaturas en ambientes ricos en oxígeno se forma óxido de silicio, el cual se comporta como un dieléctrico (aislante). Esta característica simplifica la fabricación de transistores de efecto de campo como los MOSFET los cuales son la base de la electrónica actual.

1.5 Materiales semiconductores tipo N y tipo P

Los materiales semiconductores pueden ser contaminados intencionalmente con la finalidad de cambiar sus propiedades eléctricas. Esta contaminación intencional es conocida como dopado y consiste en agregar al semiconductor átomos de otros materiales. Los semiconductores que han sido dopados pueden clasificarse de dos formas:

- Semiconductores tipo N: Son dopados con materiales que se comportan como átomos donadores dentro de la red formada por los átomos semiconductores. Tomando el caso específico del silicio (que es un átomo tetravalente), los semiconductores tipo N se obtienen al dopar el silicio con materiales que cuenten con 5 electrones de valencia (donadores) como por ejemplo, Antimonio, Arsénico y Fósforo.
- Semiconductores tipo P: En este caso el silicio se dopa con átomos aceptores, es decir, el silicio debe ser contaminado con materiales que cuenten con 3 electrones de valencia como el Boro, Galio e Indio.

En los diagramas de bandas para los materiales semiconductores, además de contar con la banda de valencia, la banda prohibida y la banda de conducción, existe un nivel de energía adicional, el cual para los semiconductores tipo N es conocido como energía del átomo donador (E_D) y para los tipo P, energía del átomo aceptor (E_A). Este nivel de energía crea estados vacíos que pueden ser ocupados por los electrones. Para el caso

de los semiconductores tipo N, el E_D se localiza muy cercano a la banda de conducción, lo cual provoca que, a temperatura ambiente, los electrones alcancen la energía suficiente para participar en el flujo de corriente [8]. En el caso de los materiales tipo P, el E_A se encuentra muy cercano a la banda de valencia, por lo cual los estados permitidos de este nivel son ocupados más fácilmente por los electrones que se han liberado de la banda de valencia dejando mayor cantidad de huecos. De esta forma se dice que en los semiconductores tipo N los portadores mayoritarios son los electrones y en los tipo P los portadores mayoritarios son los huecos. En la Figura 1.3, se muestran los diagramas de bandas para los dos tipos de semiconductores.

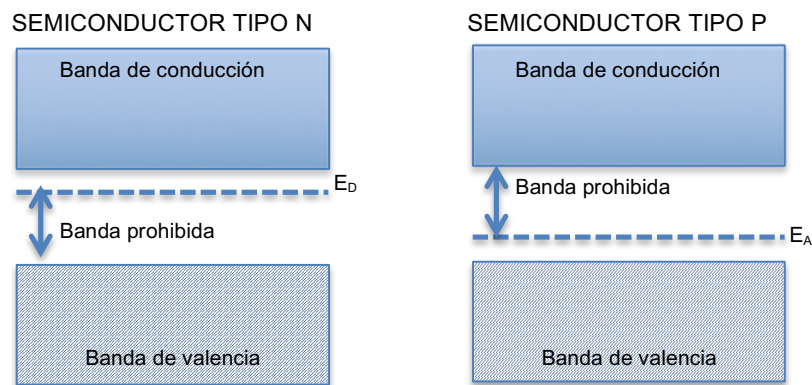


Figura 1.3 Diagrama de bandas de semiconductores

1.6 Óxido de Zinc (ZnO)

El Óxido de Zinc es un semiconductor transparente, lo cual lo hace muy atractivo para el desarrollo de aplicaciones novedosas en circuitos integrados de electrónica. De acuerdo a diversas investigaciones este material cuenta con cualidades muy importantes para ser utilizado en numerosas aplicaciones tecnológicas, por ejemplo; sensores de gas en forma de películas delgadas, láseres de luz ultravioleta y luz visible, y componentes de celdas solares.

El ZnO puede cristalizar de tres formas diferentes:

- Wurzita hexagonal, la cual se presenta en condiciones ambientales normales.
- Blenda de zinc, que puede ser obtenida al crecer el ZnO sobre sustratos con una estructura cristalina cúbica.

- Sal de roca (NaCl), que se obtienen al someter el material a presiones relativamente altas.

Este material semiconductor cuenta con una banda prohibida directa de 3.37 eV a temperatura ambiente y alta conductividad eléctrica. Adicionalmente presenta una buena estabilidad térmica y química, tiene una alta transmisión óptica en el espectro visible y alta reflectancia en el infrarrojo.

1.7 Diodo Semiconductor

Uno de los dispositivos comúnmente fabricado con el uso de materiales semiconductores es el diodo. Un diodo se forma al unir un material tipo N y otro tipo P, esto quiere decir que de un lado de la unión el material estará contaminado con átomos donadores (electrones) y del otro lado el material estará contaminado con átomos aceptores (huecos).

Con la unión de estos dos materiales, comienza un proceso de difusión, es decir que, los electrones que se encuentran en el material tipo N se mueven hacia el material tipo P, al mismo tiempo que los huecos del material tipo P se difunden hacia el material tipo N. Este movimiento crea una región de carga espacial o de agotamiento la cual puede aumentar o disminuir dependiendo de las condiciones en que el dispositivo sea polarizado. Cuando los electrones del material tipo N se difunden, provocan que los átomos donadores queden cargados positivamente, mientras que en el material tipo P sucede algo parecido, pero en este caso el átomo pierde una carga positiva (difusión del hueco), lo que provoca que existan más electrones, dejando átomos cargados negativamente. Los átomos que han perdido o ganado un electrón son llamados "iones" [8].

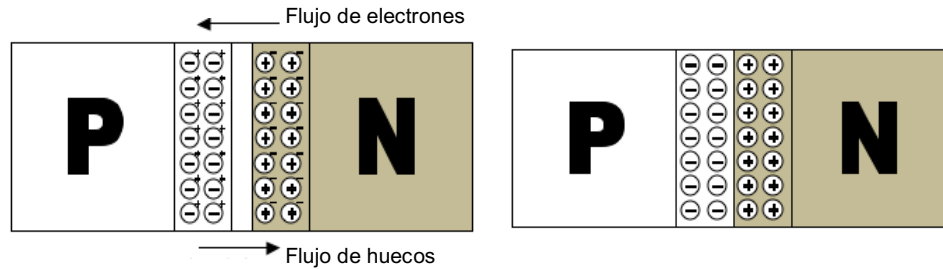


Figura 1.4 Difusión y ionización

Los iones que han quedado en la frontera entre el material tipo P y el tipo N, provocan la formación de un campo eléctrico, el cual solo abarca la región de carga espacial.

En la siguiente figura se muestra el diagrama del diodo con sus respectivas terminales, siendo el ánodo la terminal positiva y el cátodo la terminal negativa.

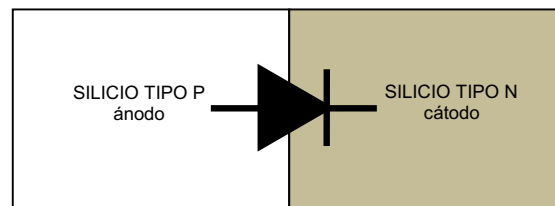


Figura 1.5 Estructura del diodo

Los diodos pueden ser polarizados en:

- Polarización Directa $V_D > 0$ Volts.
- Polarización Inversa $V_D < 0$ Volts.

1.7.1 Polarización Directa

En este tipo de polarización, la terminal positiva de la fuente se conecta al material tipo P (ánodo) y la terminal negativa se conecta al material tipo N (cátodo). Cuando se aplica una diferencia de potencial en estas condiciones, la barrera de potencial del diodo se reduce, lo cual permitirá un flujo de portadores mayoritarios sobre la unión. Conforme se incremente la diferencia de potencial, la región de agotamiento continuara disminuyendo, incrementando el flujo de corriente.

La curva característica para esta condición de polarización se muestra en la siguiente Figura 1.6.

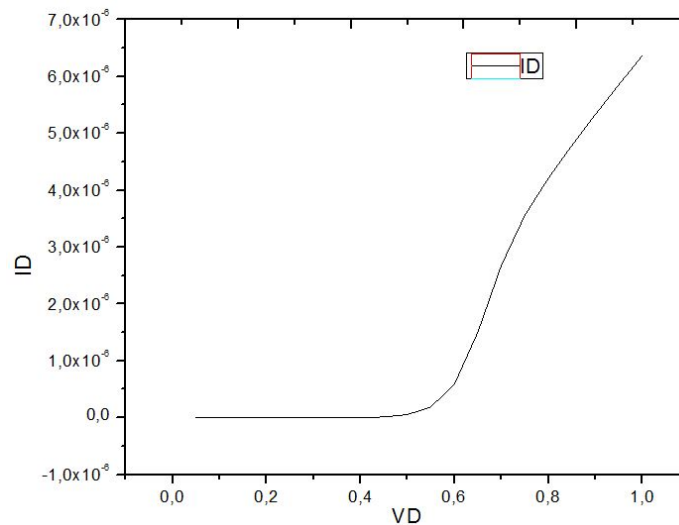


Figura 1.6 Curva del diodo en polarización directa

1.7.2 Polarización Inversa

En este tipo de polarización, la terminal positiva de la fuente se conecta al material tipo N (ánodo) y la terminal negativa se conecta al material tipo P (cátodo). Cuando se incrementa el potencial en inversa se incrementa la barrera de potencial por lo que no existirá conducción de corriente eléctrica debida a los portadores mayoritarios. En la práctica en polarización inversa no es cero, pero que es despreciable. Esta corriente se conoce como corriente inversa de saturación (I_s). Dicha corriente rara vez es mayor a unos cuantos micro amperes.

1.8 Diodos de Barrera Schottky

A diferencia del diodo semiconductor, el diodo Schottky se crea mediante la unión de un metal con un semiconductor. Estos dispositivos tienen una región de unión más uniforme debido a que en ambos materiales el electrón es el portador mayoritario. Una de las características principales del diodo Schottky es que cuenta con mayor capacidad de respuesta, ya que cuando los materiales se unen, los electrones que se encuentran en el semiconductor fluyen inmediatamente hacia el metal provocando un

flujo intenso de portadores mayoritarios. Estos electrones son llamados “portadores calientes” debido a que cuentan con un nivel de energía más alto que los electrones que se encuentran en el metal.

En un diodo Schottky, el flujo de electrones se da de manera instantánea, ya que la barrera de unión entre los materiales es relativamente pequeña. Esto quiere decir que este diodo cuenta con niveles de V_T (Voltaje de Umbral) menores comparado con el diodo de unión PN. En estos dispositivos, el V_T puede ser controlado por el metal empleado. Existe una relación muy fuerte entre el rango de temperatura y el nivel de V_T , ya que al incrementar uno de estos factores tiene como resultado un incremento directo en el otro. El valor de V_T para algunas unidades de bajo nivel, puede suponerse como igual a cero, mientras que, para el rango medio y alto, el valor de V_T se considera entre 0 Volts y 0.3 Volts. El valor de corriente máxima de este dispositivo se encuentra limitado a cerca de 75 A.

Inicialmente las áreas de aplicación para este diodo fueron limitadas a rangos de frecuencias muy altas debido a su tiempo de respuesta y a su bajo factor de ruido. Este dispositivo se presenta de manera cada vez más frecuente en fuentes de alimentación de alto y bajo voltaje, y en convertidores AC-DC, sistemas de radar, lógica TTL para computadoras, mezcladores y detectores para equipo de comunicaciones, instrumentación y convertidores analógico-digitales.

1.9 Modelo eléctrico del diodo Schottky.

El comportamiento eléctrico de la corriente de un diodo Schottky está definido por el modelo de Shockley:

$$I = A_{eff} A^* T^2 \exp\left(\frac{-q\Phi_B}{kT}\right) \left[\exp - \frac{q(V-IR)}{nkT} \right] \dots\dots\dots(1)$$

Donde, A_{eff} es el área efectiva del diodo, A^* es la constante de Richardson ($32\text{cm}^{-2}\text{k}^{-2}$), T es la temperatura ($^{\circ}\text{K}$), q es el valor de la carga del electrón ($1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$), Φ_B es la altura de la barrera (eV), k es la constante de Boltzmann ($1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$), V es el voltaje del diodo (V) y n es el factor de idealidad.

Tomando en cuenta que $I_s = A_{eff} A^* T^2 \exp\left(\frac{-q\Phi_B}{kT}\right)$, la ecuación anterior puede ser reducida de la siguiente manera:

$$I = I_s \left[\exp \frac{q(V-IR_s)}{nkT} \right] \dots\dots\dots(2)$$

1.10 Métodos de extracción de parámetros

Para realizar el proceso de extracción de parámetros a partir de la curva I-V del diodo en el presente trabajo se analizarón los siguientes métodos: Método de emisión termoiónica y el método descrito por S. K. Cheung [10].

1.10.1 Método 1 – Emisión Termoiónica

Este método permite calcular los siguientes parámetros: la corriente inversa de saturación (I_s), el factor de idealidad (n) y la altura de la barrera (Φ_B). Una característica de este método es que se asume que en el diodo se presenta una resistencia serie despreciable (esto es, $R_s=0$ ohms). Por lo que se considera que este parámetro no afecta significativamente el comportamiento eléctrico del dispositivo.

Bajo estas condiciones, la (ecu. 2) se simplifica y puede ser expresada de la siguiente manera:

$$I = I_s \left[\exp \frac{qV}{nkT} \right] \dots\dots\dots(3)$$

Con el objetivo de obtener una función lineal a partir de la cual sea fácil extraer los parámetros eléctricos de interés, se calcula el logaritmo natural de la corriente del diodo (ecu. 3), obteniendo el siguiente resultado.

$$\ln I = \frac{q}{nKT} V + \ln I_s \dots\dots\dots(4)$$

$$y = mx + b \dots\dots\dots(5)$$

Como se puede observar en la ecu. 4, la expresión del logaritmo natural de la corriente tiene un comportamiento lineal. En donde:

$$m = \frac{q}{nKT} \dots\dots\dots(6)$$

$$b = \ln I_s \dots\dots\dots(7)$$

Con base a lo anterior el factor de idealidad puede ser obtenido a partir de la pendiente del logaritmo de la corriente del diodo, mientras que la corriente inversa de saturación se obtendrá a partir del intercepto con el eje de las ordenadas:

$$n = \frac{q}{mKT} \dots\dots\dots(8)$$

$$I_s = e^b \dots\dots\dots(9)$$

La altura de la barrera del diodo, se calcula a partir de la expresión de la corriente de saturación $I_s = A_{eff} A^* T^2 \exp(\frac{-q\Phi_B}{kT})$. De esta forma Φ_B estará dada por:

$$\Phi_B = \frac{-KT}{q} \ln \frac{I_s}{A_{eff} A^* T^2} \dots\dots\dots(10)$$

En la Figura 1.7 se presenta la curva I-V de un diodo de silicio, obtenida mediante simulación en AIM-Spice. En el recuadro se observa el comportamiento de la corriente en una escala lineal, mientras que en la gráfica principal se presenta el logaritmo natural de la corriente del diodo. Como se puede observar, para estas condiciones ideales, la gráfica del $\ln(I)$ muestra un comportamiento lineal tal como se esperaba.

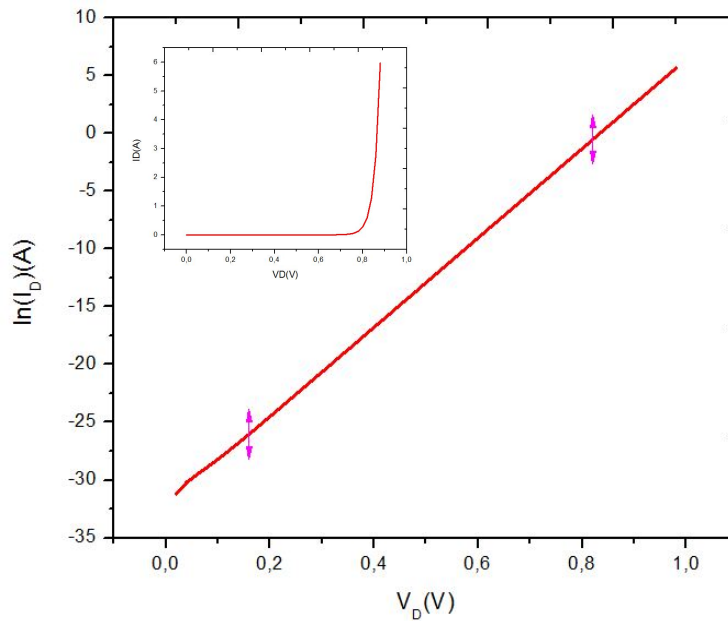


Figura 1.7 Ejemplo de comportamiento lineal del diodo

Para ejemplificar la aplicación del método de extracción de parámetros se utilizó una simulación de un diodo comercial (1N4001). En la figura 1.8 se observa la gráfica I-V para este dispositivo.

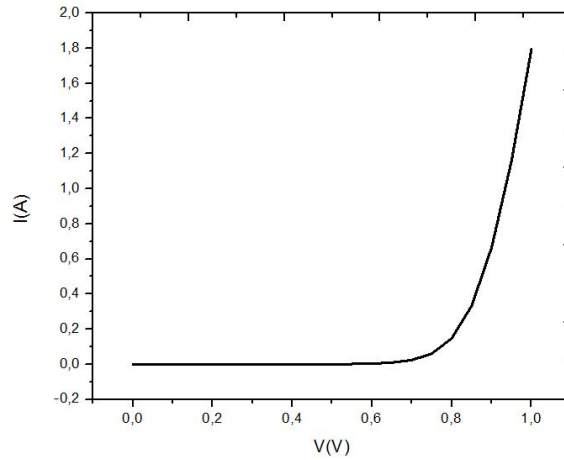


Figura 1.8 Gráfica I vs V del diodo 1N4001

Para comenzar a extraer los parámetros, es necesario graficar el logaritmo natural de la corriente con respecto del voltaje aplicado (Figura 1.9). De esta manera la pendiente y el intercepto de la recta pueden ser calculados, ya sea manualmente o mediante la utilización de algún programa informático.

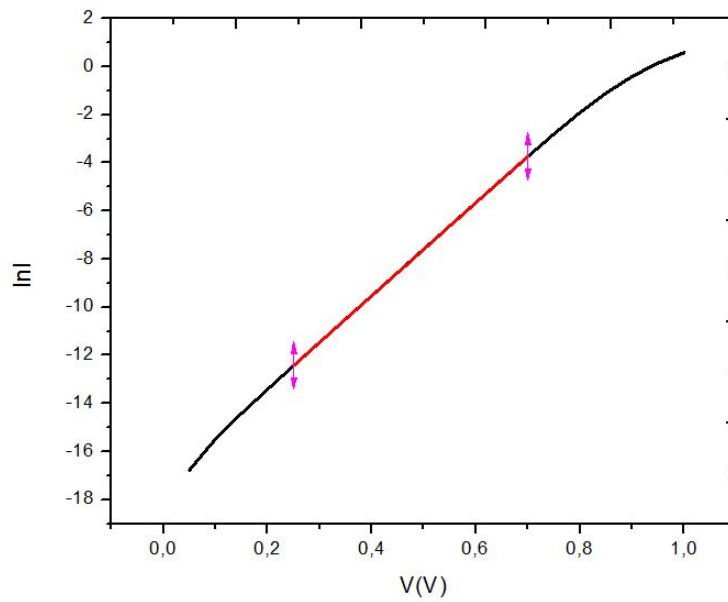


Figura 1.9 Gráfica ln| vs V del diodo 1N4001

En este ejemplo se obtuvo que $m = 19.31$ con unidades de $\ln(A)/V$ y $b = -17.25$ cuyas unidades son volts.

Se sustituye el valor de m en la ecu. 8 para calcular el factor de idealidad.

$$n = \frac{1.6 \times 10^{-19} C}{(19.31)(1.38 \times 10^{-23} \frac{J}{K})(300K)} = 2$$

El siguiente parámetro (I_s), se extrae por medio de la ecu. 9.

$$I_s = e^{-17.25} = 3.22 \times 10^{-8} A$$

Por último, se utiliza la ecu. 10 para calcular la altura de la barrera (Φ_B).

$$\Phi_B = \frac{-(1.38 \times 10^{-23} \frac{J}{K})(300K)}{1.6 \times 10^{-19} C} \ln \frac{3.22 \times 10^{-8} A}{(1)(8.6 cm^2 K^2)(300^2 K)} = 0.79 eV$$

En la Tabla 1.1 se muestra la comparación entre los parámetros utilizados para realizar la simulación y los parámetros extraídos. Como se puede observar, bajo estas condiciones ideales, este método de extracción funciona adecuadamente porque los porcentajes de error obtenidos para los parámetros extraídos son razonablemente bajos.

Tabla 1.1 Comparación de parámetros

Parámetro	Simulado	Extraído
n	2	2
I_s	3.19x10 ⁻⁸ A	3.22x10 ⁻⁸ A
Φ_B	0.78 eV	0.79 eV

Como se mencionó anteriormente, este método de extracción, asume que la resistencia serie del dispositivo es despreciable. Con el objetivo de analizar el efecto de este parámetro en el comportamiento eléctrico del diodo, en la Figura 1.10 se presenta un conjunto de curvas I-V simuladas para condiciones de resistencia serie que van desde 0

ohms hasta 10Kohms. Como se puede observar, para valores bajos de polarización, la curva I-V de todas las simulaciones tiene prácticamente el mismo comportamiento. El efecto de la resistencia serie se presenta para condiciones de conducción de corriente alta, esto es para $V_D > 0.5V$.

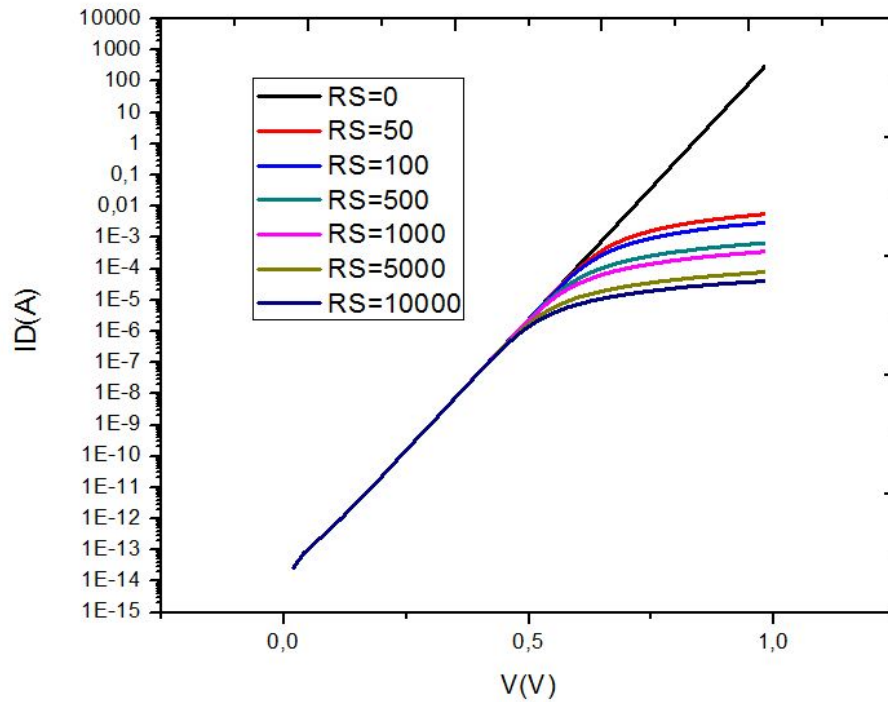


Figura 1.10 Gráfica del diodo variando R_s

De acuerdo a los resultados obtenidos de momento, se puede concluir que este método de extracción es adecuado para obtener los parámetros en condiciones ideales o en dispositivos con resistencias serie altas pero aplicando el método en regiones de polarización suficientemente bajas para que el efecto de la resistencia serie pueda ser despreciable.

1.10.2 Método 2 – Método de S. K. Cheung basado en el modelo de Shockley

Con el fin de analizar el efecto de la resistencia serie sobre las características eléctricas del dispositivo se aplica el método descrito por S. K. Cheung en [10], el cual parte de la ecuación 2, en la que toma en cuenta la resistencia serie del dispositivo para calcular la corriente I_{DS} . Este método permite extraer la resistencia serie (R_s), el factor de idealidad (n) y la altura de la barrera (Φ_B).

Partiendo de la ecu. 2 es necesario despejar el voltaje aplicado a las terminales externas del diodo (V).

$$V = \left(\ln \frac{I}{I_s} \right) \left(\frac{nkT}{q} \right) + IR_s \dots \dots \dots (11)$$

Una vez realizado el despeje, la ecu. 11 se expresa en términos de densidad de corriente $J = \frac{I}{A_{eff}}$, donde A_{eff} es el área efectiva del diodo.

$$V = \left(\ln \frac{JA_{eff}}{I_s} \right) \left(\frac{nkT}{q} \right) + JA_{eff}R_s \dots \dots \dots (12)$$

Sustituyendo $I_s = A_{eff}A^*T^2 \exp\left(\frac{-q\Phi_B}{kT}\right)$ en la ecu. 12.

$$V = \left(\ln \frac{JA_{eff}}{A_{eff}A^*T^2 \exp\left(\frac{-q\Phi_B}{kT}\right)} \right) \left(\frac{nkT}{q} \right) + JA_{eff}R_s \dots \dots \dots (13)$$

Simplificando y aplicando las propiedades de los logaritmos.

$$V = \left(\frac{nkT}{q} \right) \left(\ln \frac{J}{A^*T^2} \right) + n\Phi_B + JA_{eff}R_s \dots \dots \dots (14)$$

Tomando en cuenta que $\beta = \frac{q}{kT}$ la ecu. 14 queda:

$$V = \frac{n}{\beta} \left(\ln \frac{J}{A^* T^2} \right) + n\Phi_B + JA_{eff}R_s \dots \dots \dots (15)$$

Se calcula la derivada de V con respecto de $\ln J$.

$$\frac{dv}{d \ln J} = \frac{d}{d \ln J} \left[\frac{n}{\beta} \left(\ln \frac{J}{A^* T^2} \right) + n\Phi_B + JA_{eff}R_s \right] \dots \dots \dots (16)$$

De la ecu. 16 obtenemos que:

$$\frac{dV}{d \ln I} = R_s A_{eff} J + \frac{n}{\beta} \dots \dots \dots (17)$$

En la ecu. 17 se puede observar un comportamiento lineal, por lo tanto, los parámetros pueden ser calculados de la gráfica de $\frac{dV}{d \ln I}$ vs J .

De esta forma se puede definir que:

$$m = R_s \dots \dots \dots (18)$$

$$b = \frac{n}{\beta} \dots \dots \dots (19)$$

Por lo tanto.

$$n = b(\beta) \dots \dots \dots (20)$$

Para calcular la altura de la barrera, este método plantea una función ($H(J)$) basada en la ecu. 15.

$$H(J) = V - \frac{n}{\beta} \left(\ln \frac{J}{A^* T^2} \right) \dots \dots \dots (21)$$

Por lo tanto se tiene que:

$$V - \frac{n}{\beta} \left(\ln \frac{J}{A^* T^2} \right) = R_s A_{eff} J + n \Phi_B \dots \dots \dots (22)$$

$$H(J) = R_s A_{eff} J + n \Phi_B \dots \dots \dots (23)$$

Como se observa en la ecu. 23 también se trata de un comportamiento lineal del cual se obtiene otro valor de R_s que debe ser parecido al obtenido de la ecu. 18, y Φ_B se define de la siguiente manera.

$$b = n \Phi_B \dots \dots \dots (24)$$

$$\Phi_B = \frac{b}{n} \dots \dots \dots (25)$$

Para ejemplificar la extracción de parámetros utilizando el método de S. K. Cheung se utilizarán los datos de la simulación descrita en el método anterior.

Tomando en cuenta la ecu. 17, se realiza la gráfica de $\frac{dV}{d \ln J}$, de la cual se obtienen los valores de pendiente e intercepto con el eje de las ordenadas mediante un ajuste lineal.

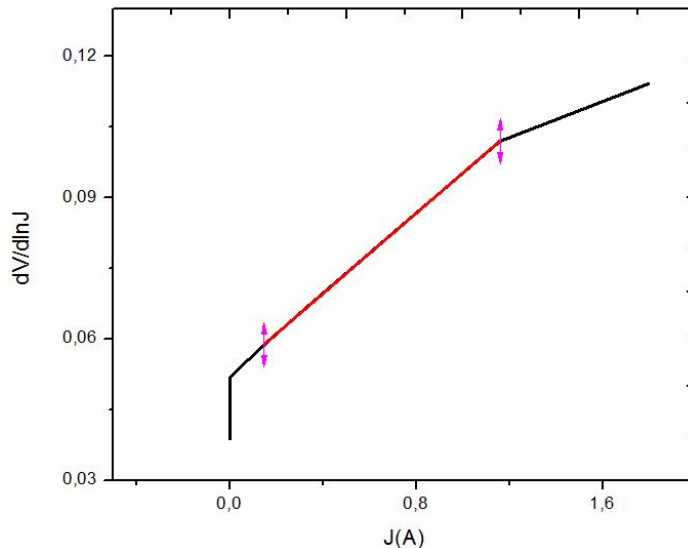


Figura. 1.11 Gráfica de $dV/d \ln J$ vs J

De esta forma se obtiene que $b=0.052$ y $m=0.042$. Utilizando la ecu. 18 es posible saber que $R_s=0.042 \Omega$ y con el valor de intercepto se calcula el factor de idealidad por medio de la ecu. 20, donde $\beta = 38.7$. Por lo tanto:

$$n = b(\beta)$$

$$n = 0.052 (38.7)$$

$$n = 2$$

La altura de la barrera se calcula mediante la función $H(J)$, por tal motivo se realiza la gráfica de $H(J)$ vs J en la cual se observa una línea recta de donde será posible obtener nuevos valores para m y b .

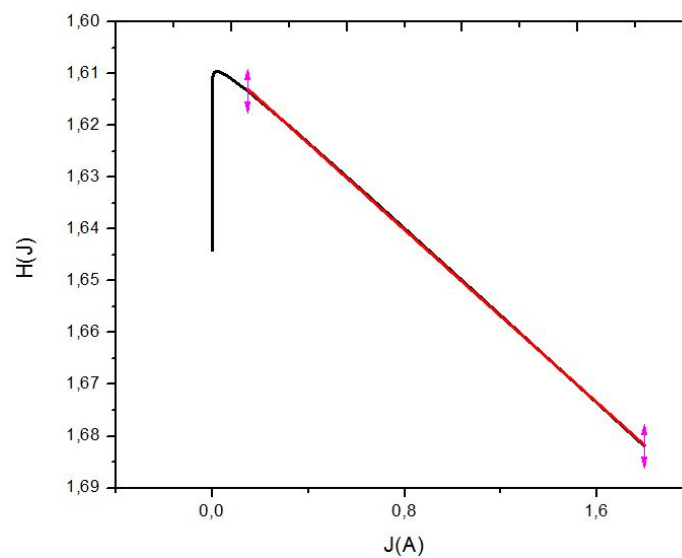


Figura 1.12 Ajuste lineal de la gráfica $H(J)$ vs J

Para este caso $b=1.6$ y $m=0.041$. Comparando los valores de pendiente obtenidos, se puede observar que ambos son similares tal como lo plantea el método de extracción. Utilizando la ecu. 25, es posible calcular la altura de la barrera del diodo.

$$\Phi_B = \frac{b}{n}$$

$$\Phi_B = \frac{1.6}{2} = 0.8 \text{ eV}$$

Una vez realizada la extracción, se puede concluir que este método es adecuado para calcular los parámetros en diodos que son afectados por la resistencia serie.

La siguiente tabla muestra una comparación entre ambos métodos de extracción y los valores simulados.

Tabla 1.2 Comparación de parámetros

Parámetro	Simulado	Emisión Term.	Cheung
n	2	2	2
I_s	3.19x10 ⁻⁸ A	3.22x10 ⁻⁸ A	No aplica
Φ_B	0.78 eV	0.79 eV	0.8 eV
R_s	0.042 Ω	No aplica	0.042

Capítulo 2

Fabricación de diodos Schottky

La fabricación de los dispositivos utilizados en este trabajo de investigación, se realizó en el Centro de Nanociencias y Micro y Nanotecnologías del Instituto Politécnico Nacional (CNMN-IPN). Este centro de investigación cuenta con salas limpias de clase 1000, lo cual significa que dentro del espacio de trabajo se cuenta con un ambiente controlado de partículas, es decir, puede haber 1000 partículas o menos con un diámetro mayor o igual a 0.5 micras por cada pie cúbico.

2.1 Proceso de fabricación de diodos Schottky.

A continuación se listan los pasos del proceso utilizado para la fabricación de los diodos Schottky formados por la unión de los materiales semiconductores ZnO-PEDOT:PSS [11, 12]:

- Preparación de sustratos.
- Depósito de la capa delgada de ZnO por medio de Sputtering.
- Depósito de la capa delgada de PEDOT:PSS por medio de micro goteo
- Depósito de la capa delgada de oro por medio de Sputtering para definir contactos.

En la tabla 2.1, se presentan las características eléctricas más importantes de los materiales semiconductores utilizados en la fabricación del diodo.

Tabla 2.1 Características eléctricas del ZnO y PEDOT:PSS

Material	ZnO	PEDOT:PSS
Tipo de semiconductor	Tipo-N	Tipo-P
Ancho de banda	3.3 eV	1.4 – 2.5 eV
Constante dieléctrica	8.5	3
Resistividad	$10 \times 10^{-3} - 10 \times 10^7$ ohm-cm	$10 \times 10^{-3} - 10 \times 10^3$ ohm-cm

Otra de las características de interés del PEDOT:PSS es que este es un polímero que cuenta con propiedades altamente conductivas semejantes a las de un metal.

2.1.1 Preparación de sustratos

Para comenzar con el proceso, se toma un vidrio que en una de las caras tiene una capa de delgada de óxido de Indio y Estaño (ITO). El propósito del ITO es formar uno de los contactos del dispositivo. El vidrio se corta de acuerdo a las necesidades de los dispositivos, para este caso se utilizaron sustratos de una pulgada cuadrada. En la figura 2.1 se observan, sobre el contenedor amarillo, los sustratos previamente cortados.

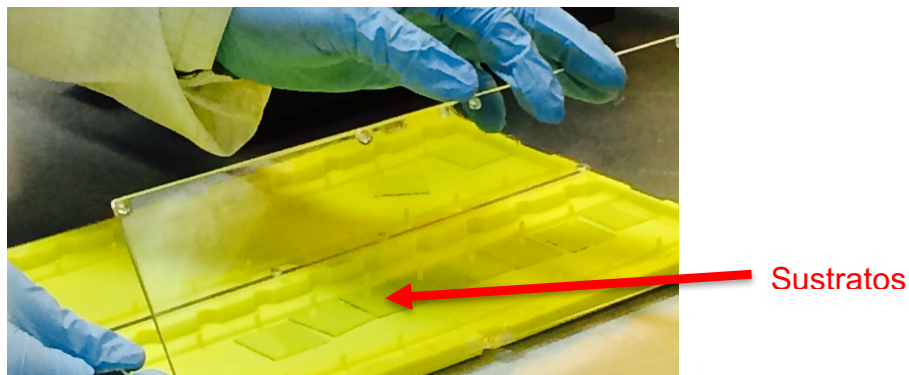


Figura 2.1 Sustratos de 1 pulgada cuadrada

Los sustratos son sometidos a un proceso de limpieza en el cual se utiliza acetona y alcohol isopropílico debido a que son materiales de rápida evaporación y que no dejan marcas. De esta manera se eliminan las partículas de polvo de la superficie y la suciedad provocada por el contacto con las manos o las herramientas de trabajo. Los sustratos se colocan dentro del recipiente del equipo de ultrasonido para que por medio de vibración se realice la limpieza.

2.1.2 Depósito de la capa delgada de ZnO por medio de Sputtering

Después de preparar los sustratos se realiza el depósito de ZnO por medio de sputtering. Este proceso se realiza al interior de una cámara de alto vacío, la cual cuenta con dos electrodos. El ánodo se encuentra en la parte superior de la cámara y

es donde se coloca el sustrato, por el contrario, el cátodo se encuentra en la parte inferior y es donde se coloca el blanco del material a depositar. La cámara se vacía hasta alcanzar una presión con valores mínimos entre 10×10^{-2} a 10×10^{-6} Torr. Se libera un gas inerte dentro de ésta, en este caso se utilizó Argón y se crea un campo eléctrico mediante la diferencia de potencial aplicada a los electrodos. De esta manera los electrones dentro de la cámara se aceleran y se impactan con los átomos de Argón. Esto provoca un proceso de ionización en el cual átomos de Argón pierden uno de los electrones que se encuentran en la órbita exterior. A falta de un electrón, los átomos de Argón quedan cargados de manera positiva por lo que son atraídos (acelerados) hacia el electrodo negativo. El impacto de dichos átomos con el blanco de ZnO provoca la erosión y desprendimiento de partículas del material que viajan en diferentes direcciones.

Las partículas de ZnO se depositarán al interior de la cámara formando una película delgada sobre el sustrato. Como se mencionó anteriormente el ITO se utiliza como contacto del cátodo para el dispositivo; por lo tanto, es necesario cubrir una parte de la capa de ITO durante el depósito de ZnO para evitar el depósito de este material sobre una región para que sea posible acceder al contacto inferior del diodo durante la medición.

En la Figura 2.2 se muestra un esquema del depósito por sputtering dividido en tres pasos: el paso 1) representa el impacto de electrones con los átomos de Argón, el paso 2) representa a los átomos de Argón ionizados siendo atraídos por el electrodo negativo y el paso 3) representa el desprendimiento de las partículas de ZnO.

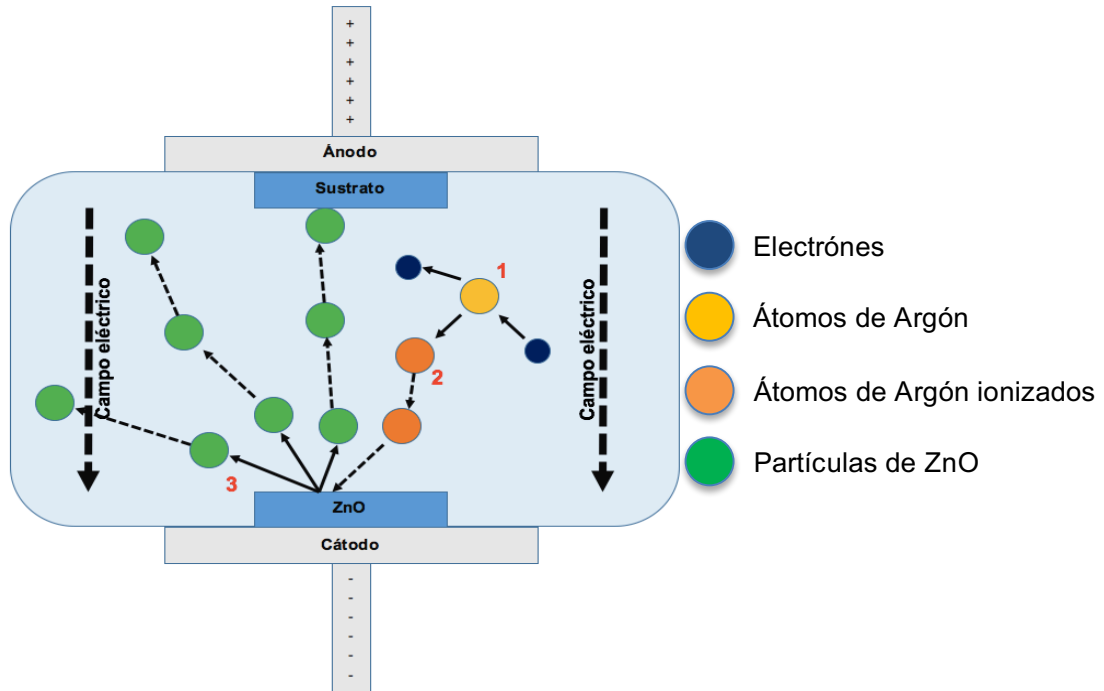


Figura 2.2 Proceso del depósito por sputtering

En la figura 2.3 se observa de lado izquierdo una imagen de la cámara de vacío durante el depósito de ZnO y de lado derecho se muestra una imagen del plasma creado durante el depósito.

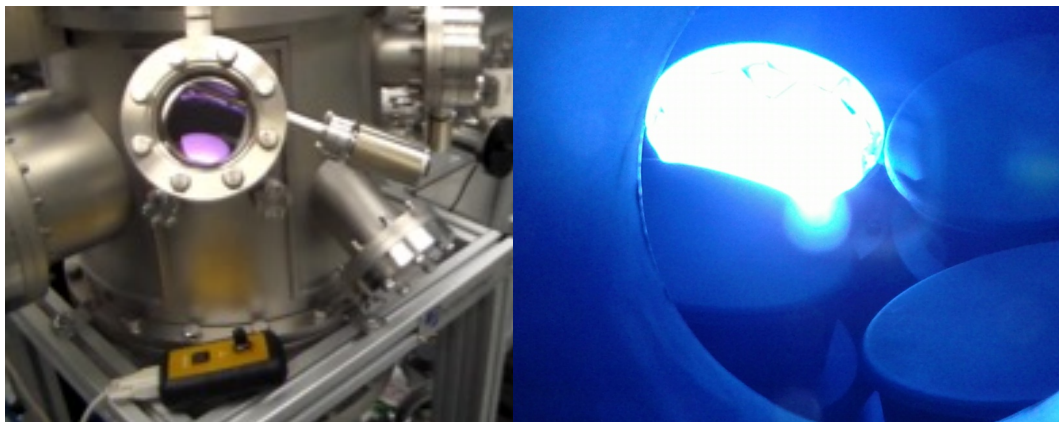


Figura 2.3 Depósito de ZnO

2.1.3 Depósito de la capa delgada de PEDOT:PSS por medio de micro goteo

Se realiza el depósito de PEDOT:PSS utilizando la técnica de micro goteo. Es importante tomar en cuenta que la unión de ZnO/PEDOT:PSS es la que hace posible que se forme el diodo. El micro goteo es una técnica de depósito que consiste en “gotear” el material a depositar sobre el sustrato, el goteo debe realizarse de manera continua y sin tocar el sustrato, se distribuye uniformemente sobre la capa de ZnO hasta agotar el material tomado con la micro pipeta. Debido a que los materiales que se depositan con esta técnica son a base de agua, es necesario secar el sustrato para evaporar el exceso de agua y formar la capa de PEDOT:PSS. Para secar los sustratos, se utilizó un agitador digital (Thermo Scientific Cimarec) en el cual se puede controlar la temperatura de su superficie también llamada plato caliente. Los sustratos fueron secados a 80°C.

Es importante mencionar que en ésta técnica no es sencillo tener control del espesor de la capa depositada; por lo tanto, el material sobre el sustrato no queda de manera uniforme. Uno de los principales problemas con esta técnica de depósito es que el secado del sustrato puede ser afectado por el ángulo de la superficie en donde se coloca el sustrato, la cantidad de agua que se agrega al material, la distribución sobre la superficie e incluso por la cantidad de material que se deposita sobre el sustrato. La Figura 2.4 muestra el depósito por micro goteo y un ejemplo de los sustratos después de secarse.

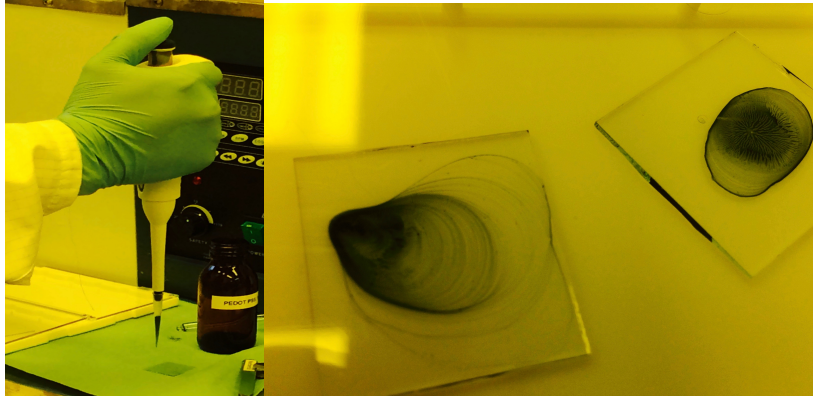


Figura 2.4 Depósito por micro goteo

2.1.4 Depósito de la capa delgada de oro por medio de Sputtering para definir contactos.

Se realiza el depósito de Oro por medio de sputtering para definir el área que servirá como segundo contacto del dispositivo. El proceso es el mismo que se utilizó en el depósito del ZnO, con la diferencia de que en este caso se utiliza una mascarilla con perforaciones formando una matriz de puntos, de esta manera se definen los contactos y se cubre el área en donde no deberá de existir la película delgada de Oro. En la siguiente imagen se observa la mascarilla de metal que se utiliza para definir los contactos.



Figura 2.5 Definición de los contactos

Al finalizar el proceso de fabricación, cada una de las muestras pueden tener entre 16 y 25 diodos los cuales deben ser caracterizados eléctricamente para observar su comportamiento.



Figura 2.6 Diodos fabricados y su estructura

Una de las principales características de estos diodos es que debido al proceso de fabricación, todos los dispositivos tienen en común el ITO, el ZnO y el PEDOT:PSS. Es importante mencionar que la capa de PEDOT:PSS no es uniforme, lo cual provoca cierta rugosidad en los dispositivos.

En la Figura 2.7 se muestra la superficie de un diodo vista desde un microscopio con un zoom de 10x. Esta imagen sirve para demostrar cómo es que la capa de PEDOT:PSS afecta a la capa de oro.

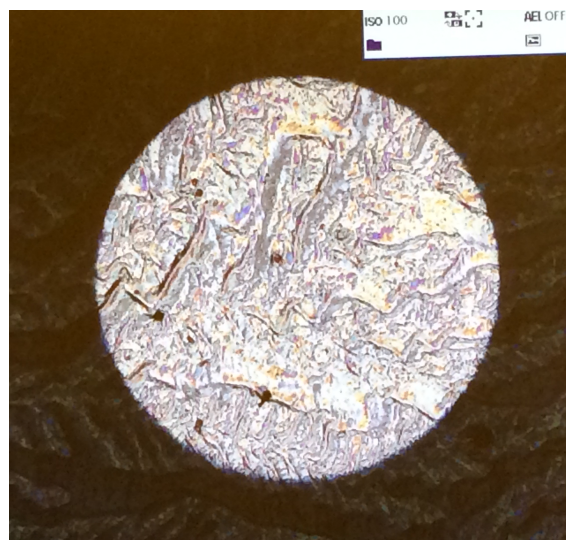


Figura 2.7 Diodo Schottky zoom 10x

Capítulo 3

Caracterización eléctrica

3.1 Caracterización de dispositivos.

La caracterización eléctrica de los diodos Schottky de ZnO fabricados, permite estudiar su comportamiento eléctrico con el objetivo de aplicarlo en el desarrollo de circuitos [13]. El proceso de caracterización eléctrica que se describirá a continuación fue realizado en el laboratorio de mediciones del Centro Universitario UAEM Ecatepec.

El estudio se realizó por medio de un proceso de medición I-V a diferente temperatura. En este proceso se utilizó un sistema de puntas SIGNATONE H-100 PROBE STATION. Las puntas están conectadas a una unidad fuente-medidor Keithley 2400 y se utilizan para acceder a los contactos del dispositivo y realizar las mediciones requeridas. En la Figura 3.1a se observa el sistema de puntas utilizado y en la Figura 3.1b se observan las fuentes Keithley 2400.

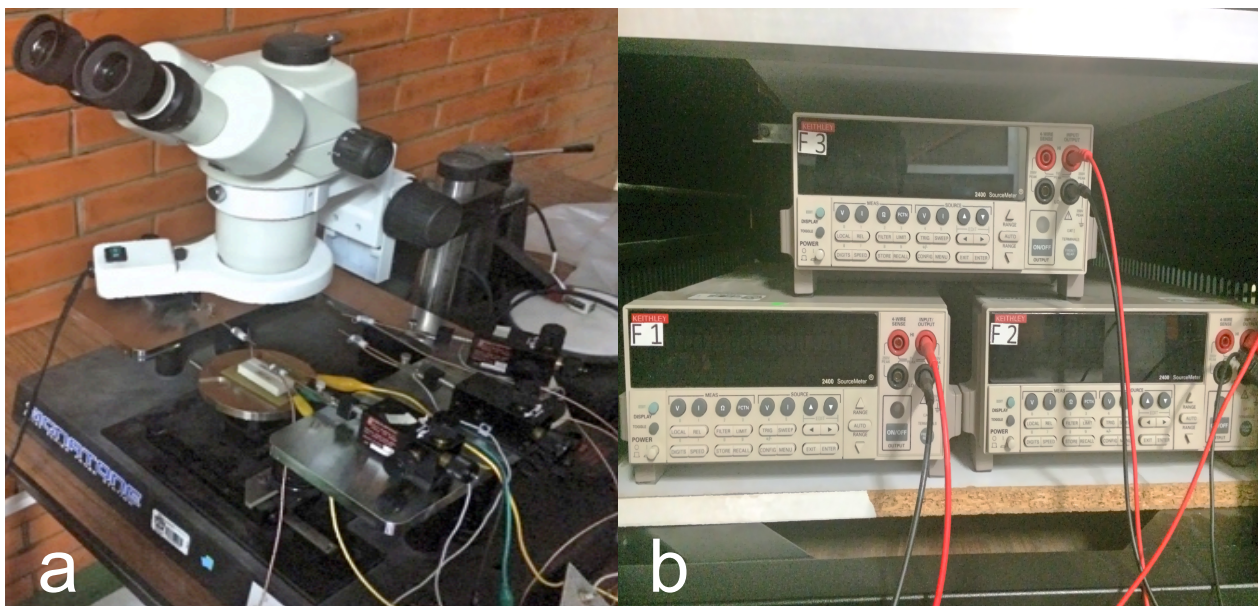


Figura 3.1 a) Sistema de puntas, b) Fuentes Keithley 2400

Durante la medición de la curva I-V del diodo, la punta que hace contacto con el cátodo (contacto de ITO) se conserva con un voltaje fijo de 0V. En esta fuente es donde se realiza la medición de la corriente del diodo ya que al estar fija con un potencial de 0V reduce el efecto de las corrientes parásitas. Por otro lado, mediante la punta que hace contacto con el ánodo (contacto de oro) se realizan dos barridos de voltaje. El primero va desde 0V hasta 1V con pasos de 0.02V para polarización directa, mientras que el

segundo va de 0V hasta -1V con pasos de -0.02V para polarización inversa. En la Figura 3.2 se observa el diagrama de las fuentes conectadas al diodo, la fuente que aparece como F1 es la que se encuentra fija a 0V y F2 es la fuente que realiza los barridos de voltaje.

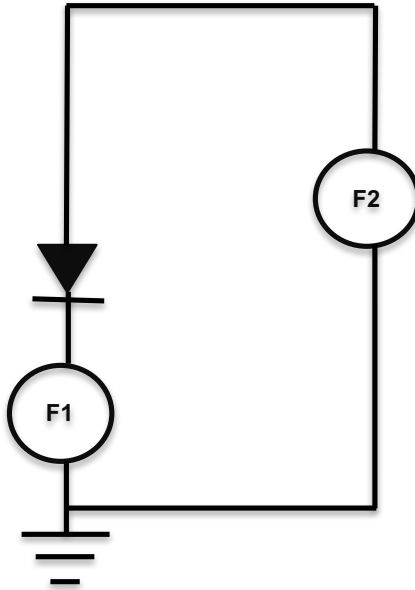


Figura 3.2 Diagrama del circuito para realizar la medición I-V

Para poder realizar las mediciones I-V a diferente temperatura, se utilizó un circuito basado en dos resistencias de 10Ω conectadas a una fuente de voltaje [14]. La temperatura de medición se modifica mediante el control de la corriente que circula a través de las resistencias. Para conocer la temperatura de medición, se utilizó un sensor de temperatura LM35 [DatasheetLM35]. Este dispositivo es un sensor de alta precisión y bajo costo, permite leer la temperatura mediante una salida de voltaje de 10mV por grado centígrado. Debido a que la salida se encuentra en $^{\circ}\text{C}$ no es necesario realizar conversión alguna. Es posible controlar el sensor fácilmente dentro de los circuitos eléctricos gracias a sus propiedades. Tiene un rango de operación de -50°C a 150°C .

Para realizar las mediciones I-V, los diodos se colocan sobre las resistencias y se regula el voltaje hasta alcanzar la temperatura deseada. En la Figura 3.3, se muestra el circuito descrito en este párrafo.

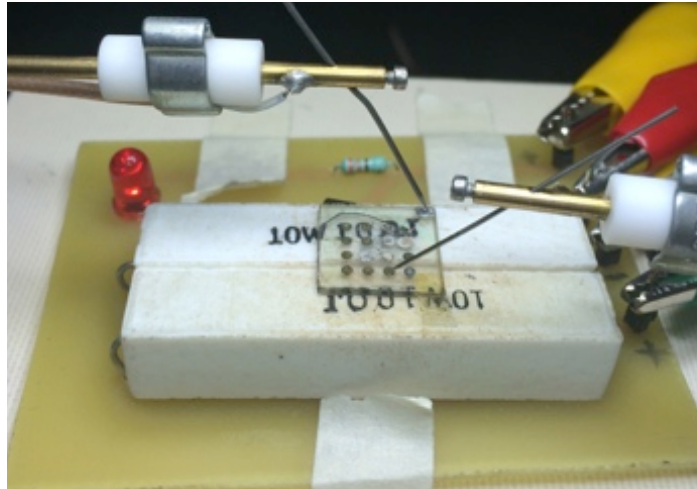


Figura 3.3 Circuito regulador de temperatura

Cuando las resistencias se encuentran a la temperatura deseada, se realiza la medición I-V del dispositivo en las condiciones requeridas.

Mediante el proceso de caracterización I-V descrito anteriormente, se realizó la caracterización eléctrica de diferentes dispositivos, los cuales fueron fabricados bajo las siguientes características.

Tabla 3.1 Características de las muestras fabricadas

Muestra	Resistividad del ZnO ($\Omega\text{-cm}$)	Espesor del ZnO (nm)	Solución de PEDOT:PSS/H ₂ O (ml/ml)
A2	420×10^{-3}	85	2/10
B1	148.6×10^{-3}	50	1/10
B2	148.6×10^{-3}	50	2/10

Se realizó la caracterización I-V con temperatura de cada muestra, y se seleccionaron los diodos que tuvieron mejor respuesta al cambio de temperatura. El nombre o identificador de cada diodo fue asignado de acuerdo a la muestra y a la ubicación de los diodos dentro de esta tomando en cuenta una matriz de puntos. En las Figuras 3.4, 3.5 y 3.6 se muestran las curvas I-V de la caracterización con temperatura de los diodos con su respectiva tabla de parámetros extraídos.

3.1.1 CARACTERIZACIÓN DEL DISPOSITIVO A2X2Y2

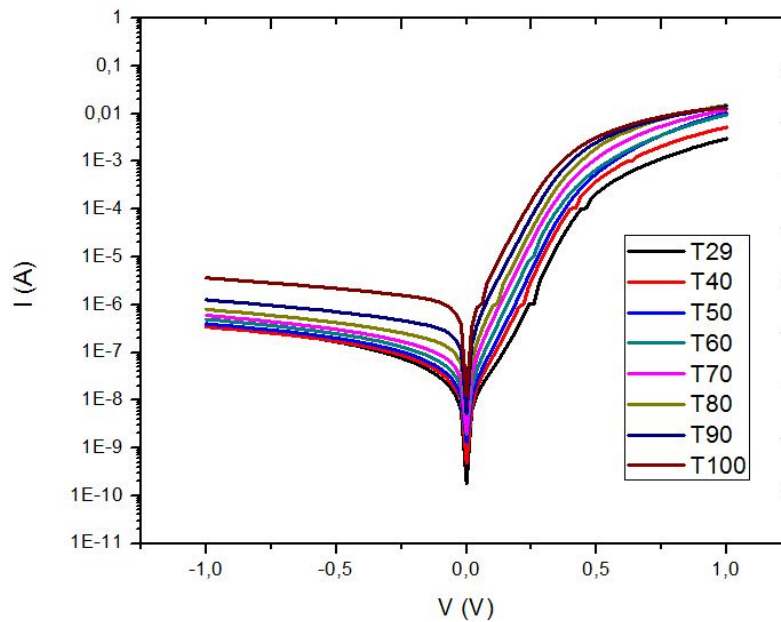


Figura 3.4 Caracterización con temperatura del dispositivo A2X2Y2

Tabla 3.2 Parámetros del dispositivo A2X2Y2

Temperatura °C	n	I_s A	ϕ_B eV	R_s Ω
29	1.85	5.23×10^{-9}	0.76	63.42
40	1.53	7.99×10^{-9}	0.87	43.51
50	1.4	9.09×10^{-9}	0.89	18.74
60	1.82	1.15×10^{-7}	0.85	23
70	1.41	5.03×10^{-8}	0.90	27.06
80	1.45	1.26×10^{-7}	0.90	27.60
90	1.41	2.41×10^{-7}	0.91	36.71
100	1.4	5.88×10^{-7}	0.91	43.16

3.1.2 CARACTERIZACIÓN DEL DISPOSITIVO B1X3Y4

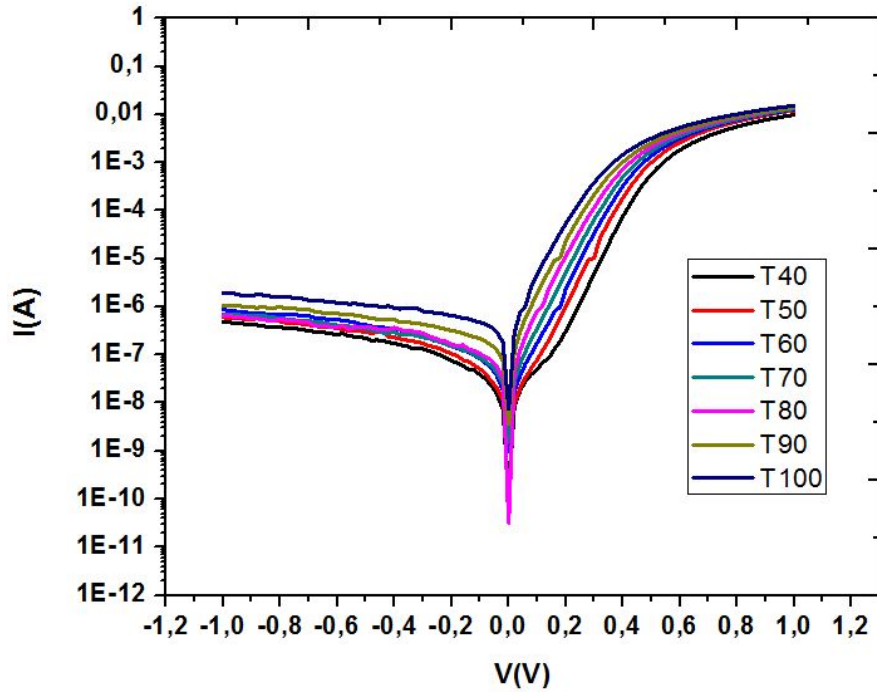


Figura 3.5 Caracterización con temperatura del dispositivo B1X3Y4

Tabla 3.3 Parámetros del dispositivo B1X3Y4

Temperatura °C	n	I_s A	ϕ_B eV	R_s Ω
40	1.35	1.31×10^{-9}	0.92	40.11
50	1.53	1.59×10^{-8}	0.88	34.75
60	1.30	1.15×10^{-8}	0.92	35.29
70	1.33	3.23×10^{-8}	0.91	36.97
80	1.38	9.62×10^{-8}	0.91	35.36
90	1.45	2.99×10^{-7}	0.90	35.92
100	1.43	6.60×10^{-7}	0.90	37.18

3.1.3 CARACTERIZACIÓN DEL DISPOSITIVO B2X3Y3

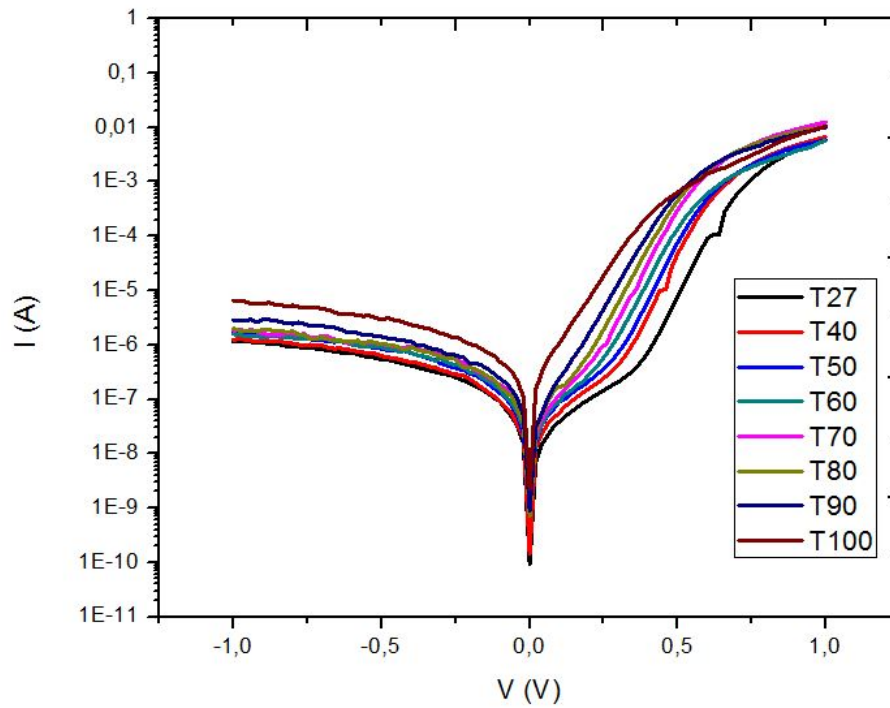


Figura 3.6 Caracterización con temperatura del dispositivo B2X3Y3

Tabla 3.4 Parámetros del dispositivo B2X3Y3

Temperatura °C	n	I_s A	ϕ_B eV	R_s Ω
27	1.52	2.44×10^{-11}	0.98	34.63
40	1.56	3.23×10^{-10}	0.95	41.86
50	1.49	4.44×10^{-10}	0.98	47.97
60	1.47	1.22×10^{-9}	0.98	38.26
70	1.49	3.69×10^{-9}	0.98	27.34
80	1.41	5.83×10^{-9}	1	32.42
90	1.53	2.62×10^{-8}	0.98	33.41
100	1.63	1.58×10^{-7}	0.95	33.36

Al medir los dispositivos, fue posible observar que en polarización directa la corriente está definida por tres mecanismos de conducción diferentes. Para valores de voltaje bajos ($0V - 0.4V$) la pendiente de la curva indica que el mecanismo de conducción es recombinación de portadores en la zona de carga espacial. En el caso de la curva de corriente medida a $27^\circ C$, para valores de voltaje $0.4V - 0.7V$, la conducción en el diodo se da por medio de emisión termiónica, dicho mecanismo de conducción presenta un comportamiento cercano al de un diodo ideal. Para valores de voltaje altos ($V_D > 0.7V$), el efecto de la resistencia serie limita la conducción de la corriente [14]. Como se puede observar en la Figura 3.6, conforme se incrementa la temperatura de medición, el mecanismo de conducción de emisión termiónica se hace presente a valores de voltaje menores. Esto se debe a que el incremento de la temperatura incrementa la temperatura promedio de los portadores de carga por lo se requiere de menores voltajes aplicados para que los portadores tengan suficiente energía para superar la barrera de potencial.

Con el fin de analizar y comparar el comportamiento de los parámetros eléctricos de los diodos respecto al cambio de temperatura, en las Figuras 3.7, 3.8, 3.9 y 3.10 se presentan la constante de idealidad, altura de la barrera, resistencia serie y la corriente inversa de saturación de los dispositivos, respectivamente.

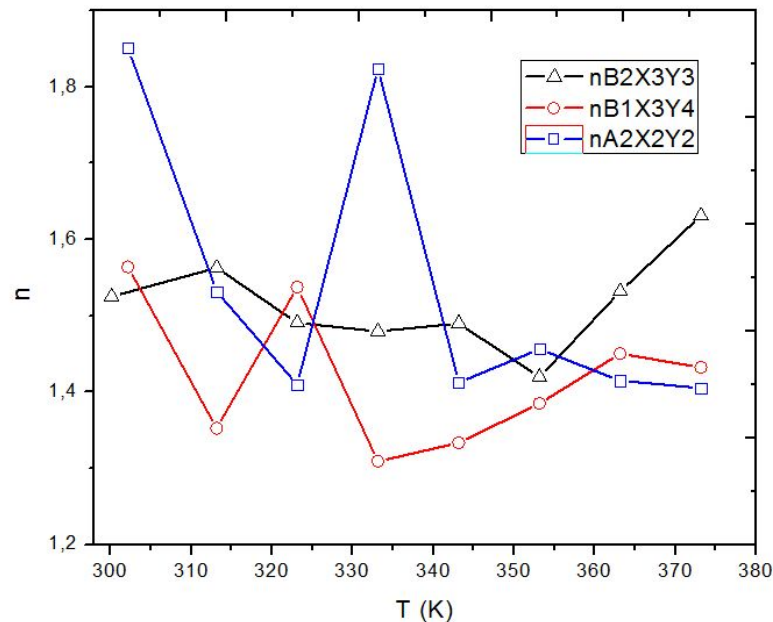


Figura 3.7 Gráfica de factor de idealidad contra temperatura

En la Figura 3.7 se puede observar que el factor de idealidad se reduce conforme la temperatura de medición aumenta. Este efecto se debe a que a bajas temperaturas el dispositivo presenta un mecanismo de conducción debido a la recombinación de portadores, en el cual el factor de idealidad es muy alto. Por el contrario, cuando la temperatura aumenta, el mecanismo de conducción cambia a emisión termoiónica, siendo esta región la que presenta valores del factor de idealidad más bajos. [Mayimele2015]

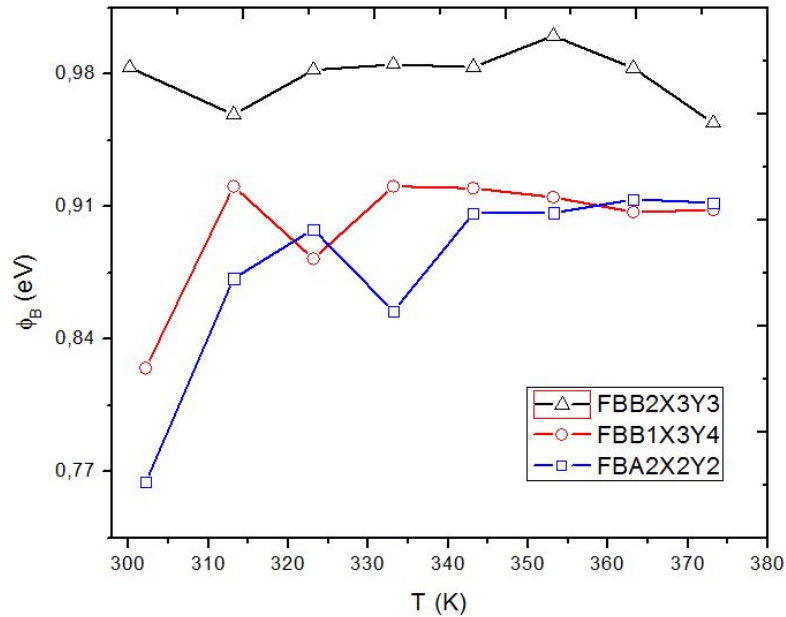


Figura 3.8 Gráfica de altura de la barrera contra temperatura

En la Figura 3.8 se observa que la altura de la barrera incrementa cuando la temperatura aumenta. Algunos investigadores explican que este efecto posiblemente está relacionado con la activación, por temperatura, del transporte por emisión termiónica de los portadores a través de la unión metal-semiconductor. A bajas temperaturas, estos portadores son capaces de tunear la barrera a niveles energéticos menores que la altura de la barrera de potencial. Por esta razón, en estas condiciones de extracción, el valor de la barrera de potencial es menor al esperado por emisión termiónica. Cuando la temperatura aumenta los electrones ganan suficiente energía para sobrepasar la altura de la barrera, haciendo que el efecto de la corriente debida al tunelamiento no sea significativo y por lo tanto el valor de la barrera de potencial extraído sea el esperado [Mayimele2015].

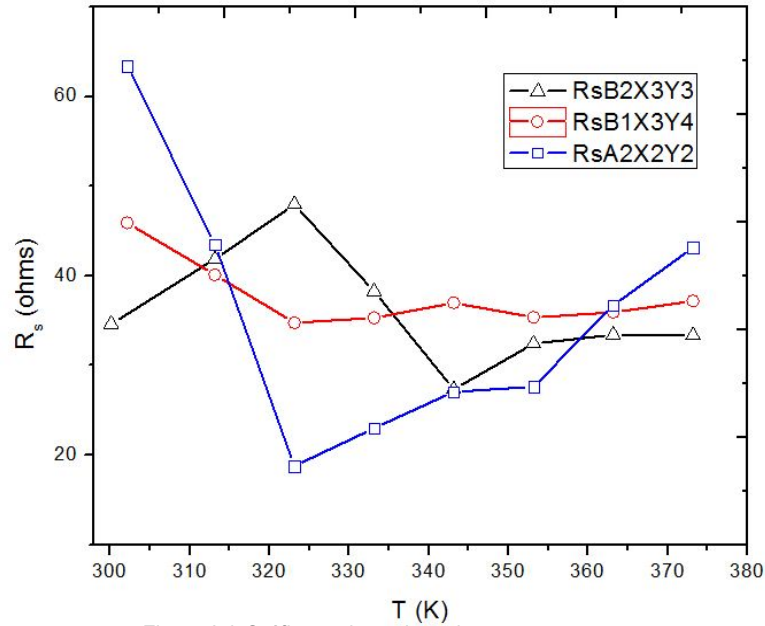


Figura 3.9 Gráfica resistencia serie contra temperatura

En la Figura 3.9 se puede observar una reducción de la resistencia serie del diodo cuando la temperatura de medición aumenta. Como es de esperar, esto sucede debido a que, al aumentar la temperatura, una mayor cantidad de pares electrón-hueco son generados térmicamente (los electrones ganan energía suficiente para pasar de la banda de valencia a la banda de conducción). De esta manera, el incremento en la temperatura aumenta la concentración de portadores en la banda de conducción, por lo que el diodo podrá conducir una corriente mayor, lo que significa la reducción de la resistencia serie del dispositivo.

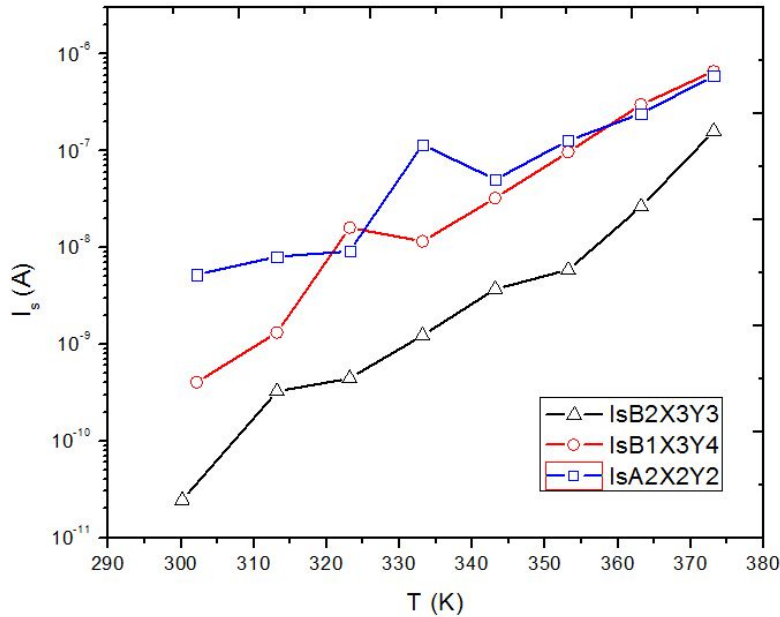


Figura 3.10 Gráfica de corriente inversa de saturación contra temperatura

En la figura 3.10 se observa que la corriente inversa de saturación extraída se incrementa de manera exponencial con el incremento de la temperatura. Este comportamiento se puede explicar considerando que la corriente inversa de saturación se debe a los portadores minoritarios que son generados térmicamente. Por lo tanto, si la temperatura aumenta, se generarán más portadores minoritarios y existirá un flujo mayor de I_s .

Con el objetivo de tener una expresión semi-empírica de la corriente inversa como función de la temperatura, se iguala el $\ln I_s$ con la expresión de la recta, lo cual corresponde con lo observado en la Figura 3.10.

$$\ln I_s = mx + b \dots\dots\dots(26)$$

Calculando el exponencial de ambos miembros, y aplicando las leyes de los logaritmos naturales.

$$e^{\ln I_s} = e^{mx+b} \dots\dots\dots(27)$$

$$I_s = e^{mx}(e^b) \dots \dots \dots (28)$$

En este caso $x = T$ debido a que la temperatura es la variable independiente.

$$I_s = e^{mT}(e^b) \dots \dots \dots (29)$$

En la tabla 3.5 se presentan los parámetros extraídos mediante la ecu. 29 para los dispositivos A2, B1 y B2.

Tabla 3.5 Parámetros extraídos para los tres dispositivos

Dispositivo	Pendiente m	Intercepto b	Rango
A2	0.0649	-27.029	302.15°K – 323.15°K
	0.0802	-44.301	323.15°K – 373.15°K
B1	0.1085	-54.470	302.15°K – 373.15°K
B2	0.1059	-55.787	302.15°K – 373.15°K

En la figura 3.11 se observa el ajuste realizado con los valores de I_s extraídos para los dispositivos B1 y B2.

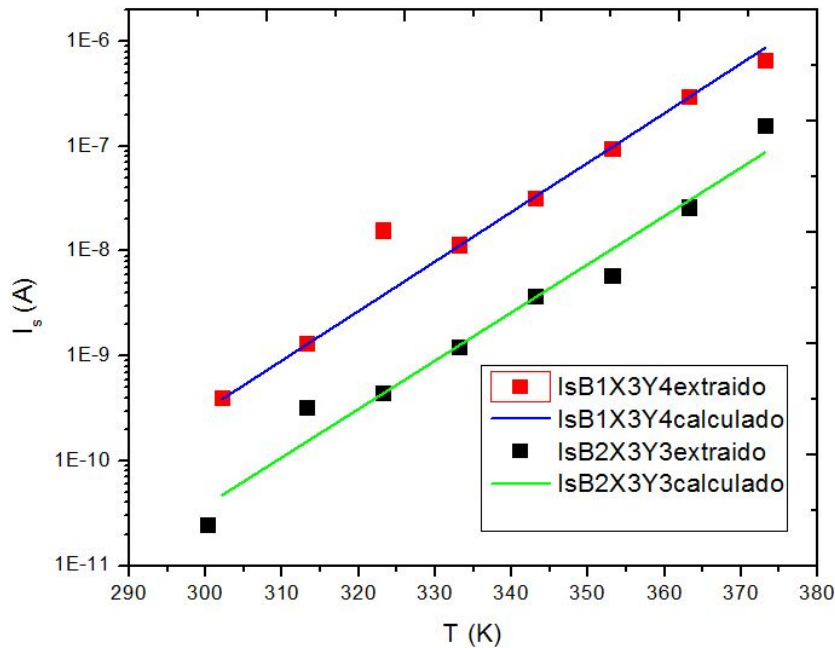


Figura 3.11 Gráfica de I_s vs T con los parámetros obtenidos en la tabla 3.5

Debido al comportamiento obtenido de I_s , se consideró que este parámetro es el adecuado para utilizarlo en el diseño del sensor de temperatura.

Capítulo 4

Caracterización del circuito propuesto

En este capítulo se realiza la propuesta de un circuito comparador de voltaje con el objetivo de implementar un sistema que emita una alerta cuando el sensor detecte temperaturas superiores a las indicadas por el valor de referencia. Por practicidad, en las siguientes secciones se definirá como temperatura límite el valor de la temperatura del cuerpo humano (37°C). De esta manera, el circuito deberá detectar y emitir una señal de voltaje en “alto” cuando la temperatura este por encima de lo normal, es decir; lo que se conoce como fiebre. Cabe resaltar que el valor de referencia podrá ser modificado según las necesidades del usuario.

4.1 Análisis de I_s

Como se mencionó en el capítulo anterior, el sensor funcionará con la corriente inversa del diodo, por lo tanto, es necesario utilizar un diodo polarizado en inversa. Debido a esto, se realizó un estudio para observar el cambio de la corriente inversa del diodo (I_s) con respecto del cambio de temperatura. Se extrajeron los valores de I_s para los siguientes voltajes: -0.26V , -0.5V , -0.76V , -1V . Los resultados de las mediciones de I_s para las diferentes condiciones de polarización se presentan en las 4 gráficas que se muestran en la Figura 4.1.

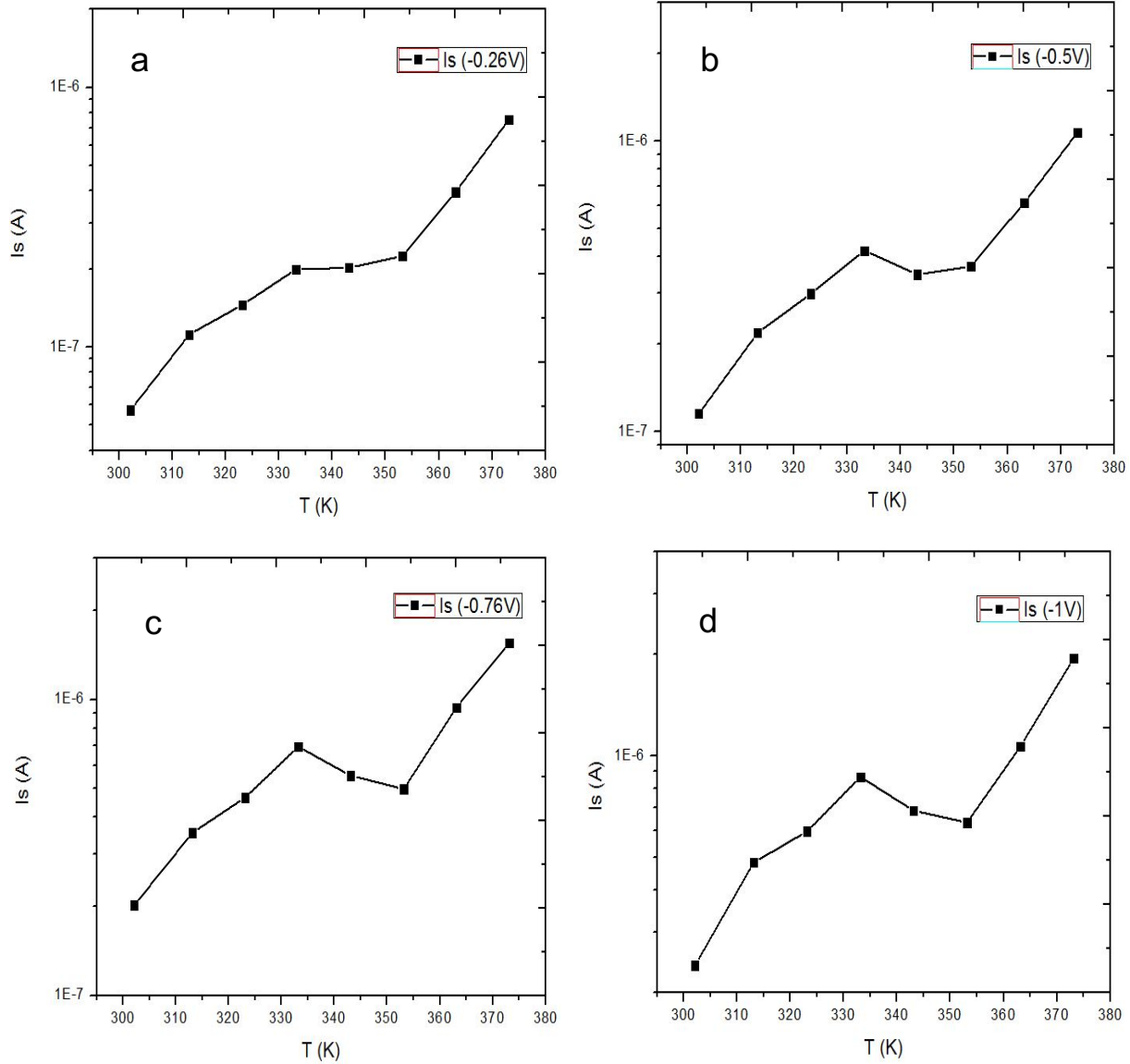


Figura 4.1 Graficas de la corriente inversa del diodo B1X3Y4 respecto a la temperatura de medidas para: a) $V_n = -0.26V$, b) $V_n = -0.5V$, c) $V_n = -0.76V$, d) $V_n = -1V$

Como se puede observar existe un cambio en la corriente inversa en función de la polarización a la que se realiza la medición, sin embargo, en términos prácticos para todas las condiciones, el cambio de la corriente en función de la temperatura es de aproximadamente un orden de magnitud.

4.2 Definición del circuito detector de temperatura.

Debido a que la magnitud de la corriente inversa del diodo a medir es muy pequeña, el circuito propuesto será dividido en dos etapas: la primera etapa se encargará de convertir la señal de corriente en voltaje y amplificarla; la segunda etapa realizará una comparación del voltaje de salida de la primera etapa, que es una función de la temperatura, contra un voltaje de referencia, el cual definirá el valor a partir del cual se dispara la alarma. Para la primera etapa se plantea utilizar un amplificador operacional 741 en configuración de transimpedancia. Esta configuración permite convertir la señal de corriente a la entrada del circuito en una señal de voltaje, a la salida del amplificador. La salida tendrá una ganancia determinada por una etapa de retroalimentación negativa que se implementa con una resistencia. De esta manera el voltaje de salida está dado por la siguiente expresión:

$$V_{out} = I_{in}(R).....(30)$$

En la Figura 4.2 se muestra el diagrama de la primera etapa del circuito, en donde se utiliza un diodo polarizado en inversa para inducir una corriente y una resistencia de $5M\Omega$ en la etapa de retroalimentación.

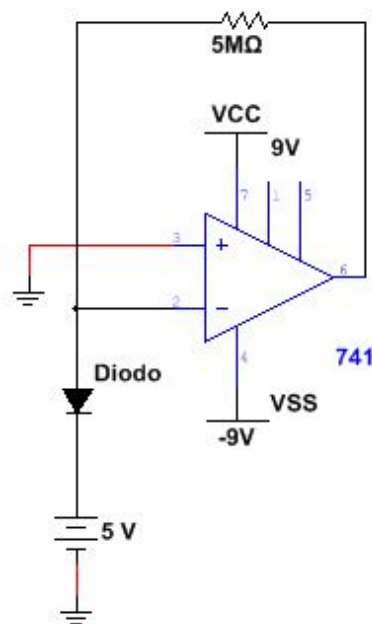


Figura 4.2 Primera etapa del circuito detector de temperatura

4.3 Simulación de la etapa de amplificación

Para probar el comportamiento del circuito, inicialmente se realizó la simulación del mismo en el programa Multisim ver. 12. En esta simulación, para emular el comportamiento del sensor de temperatura se utilizó una fuente de corriente para definir la corriente de entrada de la etapa amplificadora. Los valores de la corriente de entrada se variaron desde 1×10^{-7} A hasta 5×10^{-6} A, debido a que es el rango de valores que proporcionaría el diodo para un cambio de temperatura comprendido entre 0°C y 100°C .

En la tabla 4.1 se muestran los valores de voltaje de salida obtenidos en la simulación del circuito amplificado para cada condición de corriente de entrada y en la Figura 4.3 se observa la gráfica correspondiente.

Tabla 4.1 Valores de V_{out} con respecto de I_s .

I_s (A)	V_{out} (V)
1×10^{-7}	-0.11
2×10^{-7}	-0.61
3×10^{-7}	-1.11
4×10^{-7}	-1.61
5×10^{-7}	-2.11
6×10^{-7}	-2.61
7×10^{-7}	-3.11
8×10^{-7}	-3.61
9×10^{-7}	-4.11
1×10^{-6}	-4.61
2×10^{-6}	-5.11
3×10^{-6}	-5.61
4×10^{-6}	-6.11
5×10^{-6}	-6.61

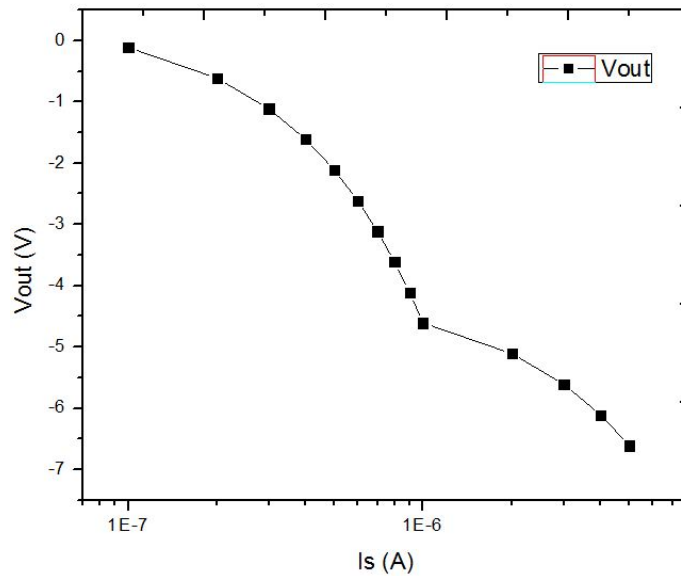


Figura 4.3 Gráfica de Vout vs Is

La Figura 4.3 permite observar que, aunque la variación del voltaje de salida respecto a la corriente de entrada no es lineal, el comportamiento puede ser utilizado para detectar el instante en el que el sensor está indicando que la temperatura está por arriba (o por abajo) de un valor definido por el usuario.

Después de realizar la caracterización con valores de I_s lineales, se realizó el mismo proceso de simulación pero utilizando valores de I_s que se midieron en el diodo para las diferentes temperaturas. Los valores de la corriente utilizados fueron tomados de la gráfica de conducción del diodo B1X3Y4. Los valores de I_s tomados son los correspondientes a $V_D = -1V$ en la gráfica I-V. Se utilizaron resistencias de $1M\Omega$ y de $5M\Omega$ en la etapa de retroalimentación para analizar el comportamiento del circuito.

Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 4.2 y en la Figura 4.4.

Tabla 4.2 Valores de Vout con respecto de Is reales.

T (°K)	Is (A)	Vout (V)	
		R=1MΩ	R=5MΩ
302.15	2.4×10^{-7}	-0.16	-0.81
313.15	4.8×10^{-7}	-0.4	-2
323.15	5.9×10^{-7}	-0.51	-2.5
333.15	8.6×10^{-7}	-0.78	-3.9
343.15	6.8×10^{-7}	-0.6	-3
353.15	6.3×10^{-7}	0-.55	-2.7
363.15	1×10^{-6}	-0.92	-4.6
373.15	1.9×10^{-6}	-1.8	-8.1

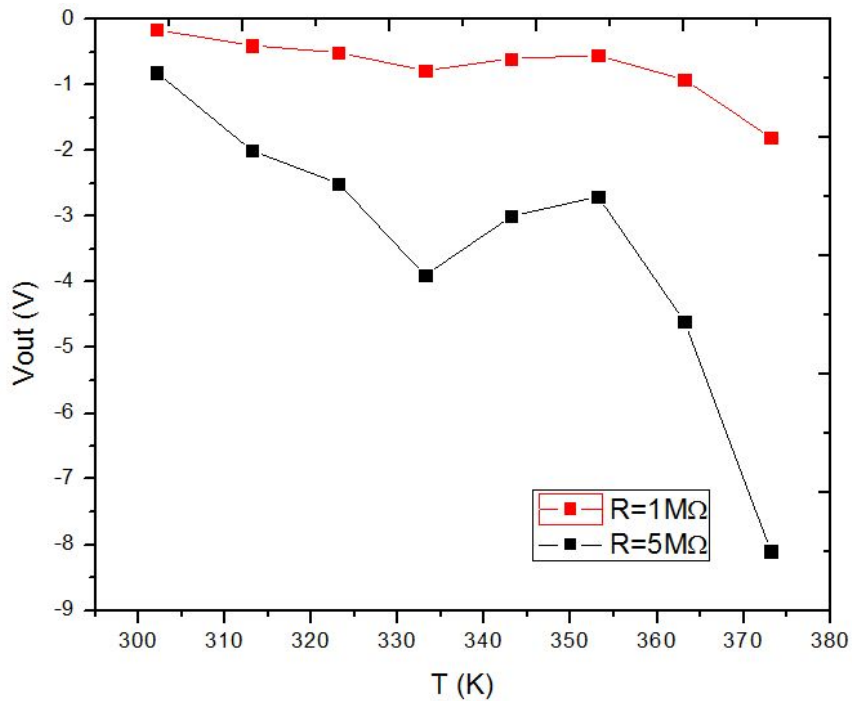


Figura 4.4 Gráfica de Vout vs T

La Figura 4.4 permite observar como la ganancia es determinada por la resistencia de retroalimentación. De esta manera cuando aumenta el valor de la resistencia de retroalimentación utilizada, la ganancia es mayor.

4.4 Simulación de la etapa de comparación

En la siguiente etapa del circuito se utilizó el amplificador operacional 741 como comparador. De esta manera se toma la salida de voltaje de la etapa anterior y se coloca en la entrada inversora del comparador. De esta forma, la señal de voltaje de la etapa amplificación se comparará con un voltaje de referencia fijo en la entrada no inversora el cual define el valor que disparará la señal de alarma. El funcionamiento de esta etapa del circuito se da de la siguiente manera:

- Cuando el voltaje de salida de la etapa anterior es menor al voltaje de referencia, a la salida de esta etapa se tendrá un voltaje de salida negativo ($-V_{DD}$), es decir un 0 lógico (la alarma no se activa).

$$V_{out} < V_{ref} = 0 \text{ lógico}$$

- Cuando el voltaje de salida de la etapa anterior es mayor al voltaje de referencia, a la salida de esta etapa se tendrá un voltaje de salida positivo ($+V_{DD}$), es decir un 1 lógico (la alarma se activa).

$$V_{out} > V_{ref} = 1 \text{ lógico}$$

En la Figura 4.5 se muestra el circuito de alarma completo.

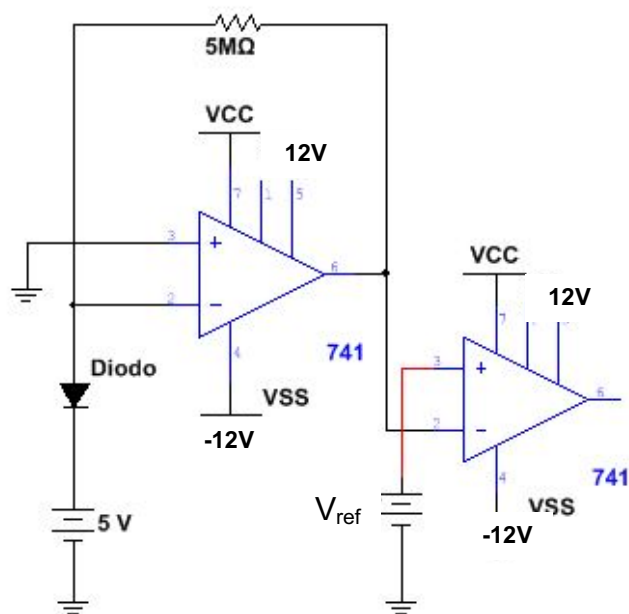


Figura 4.5 Circuito detector de temperatura

4.5 Simulación del circuito completo

Una vez completas las dos etapas se realizó la simulación con valores controlados para verificar el funcionamiento del circuito. Se utilizó una corriente de entrada que va desde 0mA hasta 1mA con incrementos de 0.1mA, un voltaje de referencia de -5V y una resistencia de 10kΩ. Los valores utilizados se muestran en la tabla 4.3.

Tabla 4.3 Valores obtenidos mediante la simulación del circuito.

I_{in} (mA)	V_{out1} (V)	V_{ref} (V)	V_{out2} (V)
0	0	-5	-12
0.1	-1	-5	-12
0.2	-2	-5	-12
0.3	-3	-5	-12
0.4	-4	-5	-12
0.5	-5	-5	12
0.6	-6	-5	12
0.7	-7	-5	12
0.8	-8	-5	12
0.9	-9	-5	12
1	-10	-5	12

En la Figura 4.6 se observa la gráfica correspondiente a la tabla 4.3.

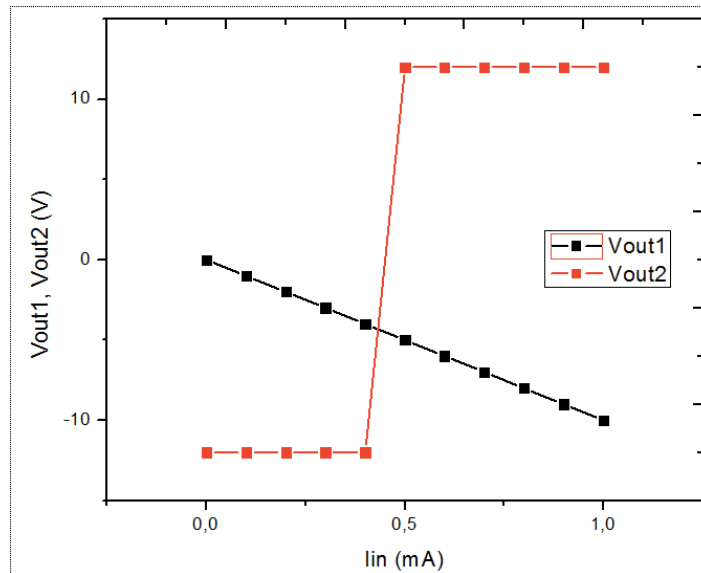


Figura 4.6 Gráfica del circuito detector de temperatura

Como se puede observar en la Figura 4.6, V_{out2} se mantiene en nivel bajo (-12V) mientras la magnitud del voltaje V_{out1} es menor al voltaje de referencia (5V). Una vez que V_{out1} alcanza los -5V, es decir $|V_{out1}| \geq 5V$, la señal de V_{out2} se va a un nivel alto, lo cual se interpretará como el encendido de la alarma.

4.6 Desarrollo del circuito físico

Después de comprobar mediante la simulación que el circuito propuesto funciona correctamente, se realizó el circuito físico de manera que permita utilizar los diodos fabricados anteriormente. Antes de comenzar con el armado del circuito, es necesario conocer la composición interna de un amplificador operacional 741 para saber como se debe de conectar. Este amplificador consta de 8 pines distribuidos como se muestra en la Figura 4.7 [15].

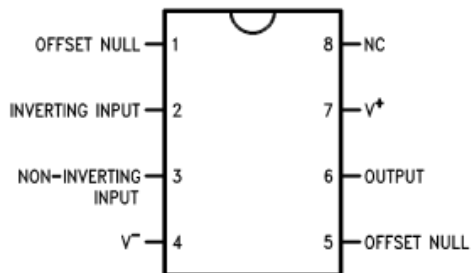


Figura 4.7 Amplificador operacional 741

Los pines que se utilizarán para el desarrollo del circuito son los siguientes:

- Pin 2: Corresponde a la entrada inversora del amplificador y será utilizada de la siguiente manera; en la primera etapa sirve para inducir la corriente del diodo polarizado en inversa. En la segunda etapa sirve para introducir el voltaje de salida de la etapa anterior (V_{out1}).
- Pin 3: Corresponde a la entrada no inversora del amplificador y será utilizada de la siguiente manera; en la primera etapa este pin se conecta a tierra ya que es necesaria la configuración de transimpedancia. En la segunda etapa sirve para inducir el voltaje de referencia y realizar la función de comparación.

- Pines 4 y 7: Son utilizados para alimentar el amplificador; -12V y +12V respectivamente.
- Pin 6: Corresponde a la salida de voltaje, de este pin se obtiene V_{out1} para la primera etapa y V_{out2} para la segunda etapa.

Una vez descritos los pines, el circuito se conectará de la siguiente manera:

4.6.1 Primera etapa del circuito físico

Se alimenta el amplificador utilizando los pines 4 y 7, se coloca el diodo sobre el circuito regulador de temperatura y se conecta a la estación de puntas (ambos descritos en el capítulo 3). El diodo debe estar polarizado en inversa por lo cual se induce un voltaje de 0.5V por medio del cátodo y la salida del ánodo es conectada al pin 2 para inducir la corriente al amplificador.

Se utiliza una resistencia de $100k\Omega$ debido a que permite obtener una ganancia adecuada para poder realizar la comparación con el voltaje de referencia. Dicha resistencia se conectará a los pines 2 y 6 para definir la ganancia. El pin 3 durante esta etapa estará conectado a tierra.

Se realizaron las pruebas para obtener V_{out1} . En la tabla 4.4 se muestran los resultados obtenidos para la primera etapa del circuito.

Tabla 4.4 Valores obtenidos en la primera etapa del circuito.

T (°C)	I_{in} (mA)	V_{out1} (V)
21	0.011	-0.99
28	0.012	-1
38	0.014	-1.3
40	0.015	-1.5
60	0.018	-1.7
80	0.021	-1.8
100	0.021	-1.8

4.6.2 Segunda etapa del circuito físico

Ya que se obtuvieron los valores de V_{out1} , es necesario determinar el voltaje de referencia. Para esto se utilizaron los datos presentados en la tabla 4.4. Debido a que la alarma del circuito deberá activarse cuando la temperatura sea de 38 °C (311.15 °K), fue posible definir que V_{ref} será de -1.2V, ya que en el momento en que $V_{out1}=-1.3V$, la temperatura deberá ser de 38°C; es decir que la alarma deberá encenderse.

V_{ref} debe ser inducido por el pin 3 del amplificador 741 que corresponde a la entrada no inversora. Como se mencionó anteriormente V_{out1} será inducido en esta etapa por medio del pin 2.

Se alimenta el amplificador utilizando los pines 4 y 7 y se observa la salida de la comparación de voltaje por medio del pin 6.

En la tabla 4.5 se observan los valores obtenidos con el funcionamiento del circuito completo y en la Figura 4.8 es posible observar el momento en que la alarma se enciende.

Tabla 4.5 Valores obtenidos para el circuito sensor de temperatura.

T (°C)	I_{in} (mA)	V_{out1} (V)	V_{out2} (V)
21	0.011	-0.99	-9.9
28	0.012	-1	-9.9
38	0.014	-1.3	-11.3
40	0.015	-1.5	-11.3
60	0.018	-1.7	-11.3
80	0.021	-1.8	-11.3
100	0.021	-1.8	-11.3

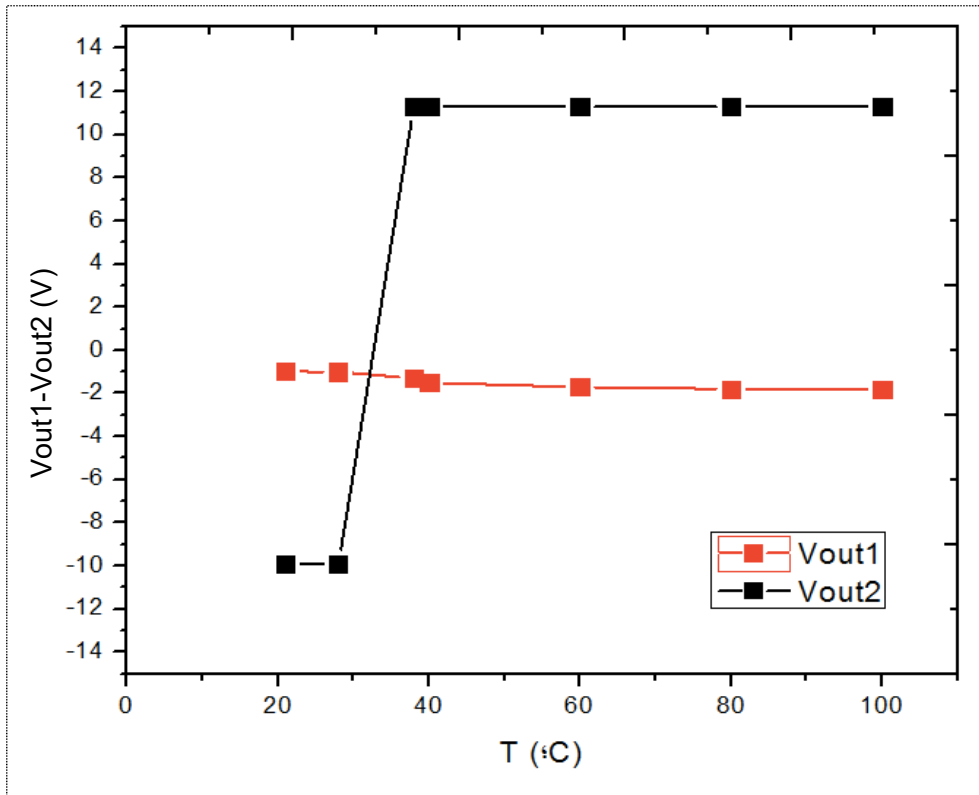


Figura 4.8 Gráfica del circuito sensor de temperatura

Conclusiones

- Se cumplió el objetivo general de este proyecto que fue diseñar y probar un circuito electrónico que permite obtener una señal de salida digital cuando la temperatura detectada es superior a un valor definido por el usuario. En este circuito, el sensor de temperatura utilizado es un diodo Schottky de ZnO/PEDOT:PSS de película delgada fabricado en el Centro de Nanociencias Micro y Nanotecnologías de Instituto Politécnico Nacional (CNMN-IPN). La etapa de amplificación y comparación se implementa con circuitos de amplificadores operacionales.
- Se caracterizó el efecto de la temperatura sobre el comportamiento eléctrico de diodos Schottky de ZnO/PEDOT:PSS fabricados bajo diferentes condiciones. Esta caracterización eléctrica permitió analizar el comportamiento de los diodos para definir las condiciones más adecuadas para el uso de estos dispositivos como sensores de temperatura.
- La etapa de extracción de parámetros fue de gran ayuda para seleccionar los diodos con un mejor desempeño eléctrico.
- Las simulaciones realizadas permitieron analizar el comportamiento del amplificador operacional 741 como amplificador y como comparador, sirviendo como referencia para el diseño del circuito físico.
- El voltaje de referencia que define el nivel límite de temperatura puede ser determinado por el usuario dependiendo de las necesidades y/o condiciones en las que el sensor de temperatura deberá operar.
- Aún cuando el circuito propuesto fue fabricado a partir de circuitos integrados, es posible en etapas futuras integrar los componentes discretos con los sensores en un prototipo diseñado para propósitos específicos.

- Es posible cambiar la modalidad de funcionamiento del sensor, es decir; que la alarma del sensor se active cuando a la salida se tiene un voltaje bajo. Para esto se deberán invertir las señales de voltaje a la entrada del amplificador 741. De esta manera, el voltaje de referencia debe conectarse en la entrada inversora mientras que V_{out1} se conecta en la entrada no inversora.

Trabajos a futuro

- Utilizar un diodo Schottky de ZnO fabricado sobre un sustrato flexible para probar el sensor de temperatura.
- Integrar los diodos a una tarjeta PCB con circuitos discretos.
- Desarrollar la circuitería necesaria para aplicaciones de uso específico del sensor de temperatura.

Producto Académico

- Artículo publicado en revista internacional *Semiconductor Science and Technology* con el tema: “*Current–voltage–temperature characteristics of PEDOT:PSS/ZnO thin film-based Schottky barrier diodes*”. **(Ver Anexo 1)**.
- Participación como ponente en el *XXV International Materials Research Congress 2016* con el tema: “*Temperature sensitivity of Schottky barrier diodes made of ZnO/PEDOT:PSS junction*”. **(Ver Anexo 2)**.
- Estancia de investigación en el Centro de Nanociencias y Micro y Nanotecnologías del Instituto Politécnico Nacional, 24 de Agosto al 24 de Noviembre de 2015. **(Ver Anexo 3)**.
- Estancia de investigación en el Centro de Nanociencias y Micro y Nanotecnologías del Instituto Politécnico Nacional, 18 de Enero al 30 de Junio de 2016. **(Ver Anexo 4)**.
- Participación con la ponencia: “*Diseño y fabricación de un circuito detector de temperatura basado en diodos Schottky*”. **(Ver Anexo 5)**.
- Participación como jurado en la primera etapa del concurso de aparatos y experimentos de física. **(Ver Anexo 6)**.
- Participación como ponente en el taller de electrónica para niños. **(Ver Anexo 7)**.
- Participación con la conferencia del tema: “*Pon a prueba tus sentidos*”. **(Ver Anexo 8)**.

Current–voltage–temperature characteristics of PEDOT:PSS/ZnO thin film-based Schottky barrier diodes

N Hernandez-Como¹, A Rodriguez-Lopez², F J Hernandez-Cuevas¹,
J Munguia¹, R Garcia², R Baca-Arroyo³ and M Aleman¹

¹ Centro de Nanociencias y Micro y Nanotecnologías, Instituto Politécnico Nacional, Mexico

² Centro Universitario Ecatepec, Universidad Autónoma del Estado de México, Mexico

³ Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Zacatenco, Instituto Politécnico Nacional, Mexico

E-mail: nohemandezc@ipn.mx

Received 16 March 2016, revised 10 August 2016

Accepted for publication 10 August 2016

Published 27 September 2016



CrossMark

Abstract

In this work, we report the temperature dependence of the electrical parameters of PEDOT:PSS/ZnO Schottky barrier diodes (SBDs) grown on glass substrates. To understand the current conduction mechanism, the current–voltage–temperature characteristics of PEDOT:PSS/ZnO thin film SBDs were studied. The electrical parameters were extracted with both thermionic emission and Cheung models. The obtained Richardson constant and effective barrier height were $5 \text{ A cm}^{-2} \text{ K}^{-2}$ and 0.74 eV , respectively. The diode ideality factor was 1.5 and the series resistance was 36Ω . All these electrical parameters turned out to be temperature independent which was associated with the dominant transport mechanisms of thermionic emission. The Richardson constant slightly deviates from theoretical values due to the presence of interfacial defects created by the preparation and deposition of PEDOT:PSS and the ZnO film crystallinity. The conductive polymer PEDOT:PSS, as a Schottky contact to ZnO, arises as an alternative to the expensive noble metals: Pt, Pd, Ag and metal oxides: IrOx, PdOx, PtOx.

Keywords: zinc oxide, PEDOT:PSS, Schottky barrier diodes, thermionic emission

(Some figures may appear in colour only in the online journal)

1. Introduction

Poly(3,4-ethylenedioxythiophene) polystyrene sulfonate (PEDOT:PSS) is a water-based conductive polymer (300 S cm^{-1}), with a large work function (5.1 eV) and high optical transparency. PEDOT:PSS is widely used as an electrode or hole transport layer in several organic electronic devices such as solar cells and light emitting diodes [1]. Nowadays, PEDOT:PSS applications are not limited to organic devices but extended to hybrid semiconductor devices. In the fabrication of solar cells and photodetectors PEDOT:PSS has been successfully applied as a Schottky contact or interlayer to several inorganic semiconductors such as MgZnO, CdS, CdSe, Si, Ge, InP, GZO, IZO, ZnO [2–13]. Despite the spreading of hybrid devices based on PEDOT:PSS, most of the literature does not fully analyze the dark

electrical characteristics of the fabricated devices, and to the best of our knowledge none of them have analyzed the current–voltage–temperature (I – V – T) characteristics. Our work is focused to analyze and understand the hybrid device characteristics for further application in reliable transparent and flexible electronics. For this purpose, as the inorganic semiconductor, we have chosen ZnO due to its wide band gap of 3.37 eV and an exciton binding energy of 60 meV [14]. The proposed Schottky contact, PEDOT:PSS, emerges as an alternative to the commonly used: Pt, Pd, Ag, IrOx, PdOx, PtOx [15, 16]. Normally, because of the high work function and high vacuum deposition technique, the electrical device performance with those inorganic Schottky contacts is very high. Additionally, the use of high quality single crystal ZnO substrates increases the device performance. Unfortunately, the use of highly oriented ZnO substrates makes the device

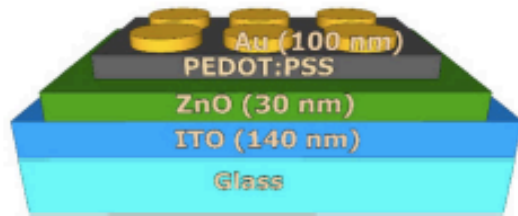


Figure 1. Device structure.

costly and inappropriate for emerging technologies such as flexible electronics. The glass substrates used in this work are coated with indium tin oxide (ITO) which is expensive but can be easily replaced with aluminum-doped zinc oxide (AZO) [17]. Recently, we have demonstrated high performance Schottky barrier diodes (SBDs) with the structure Au/PEDOT:PSS/ZnO/ITO/glass [18]. Our results demonstrated superior performance against previous reports with similar device structures and thin film materials [11–13].

The present study focused on the current–voltage–temperature characteristics of a PEDOT:PSS/ZnO thin film Schottky barrier diode. From this analysis, the effective barrier height and ZnO Richardson constant were extracted. The I - V - T analysis was made to understand the current conduction mechanism of the fabricated devices, as well as their performance under the temperature range of 302 to 373 °K.

2. Materials and methods

Vertical SBDs were fabricated in 1 cm^2 ITO-coated glass substrates with a surface resistivity of $60\ \Omega\ \text{sq}^{-1}$. The ZnO film was deposited by RF sputtering from a ZnO (99.99% pure) ceramic target purchased from Kurt J Lesker Company. PEDOT:PSS, 13 wt% dispersed in water, was purchased from Sigma Aldrich. The detailed device fabrication process and ZnO and PEDOT:PSS thin film characterization can be found in our previous work [18]. The fabricated SBD device structure is presented in figure 1.

The I - V - T characteristics were carried out with a couple of Keithley 2400 source-meter units. The voltage sweep was set from -1 to 1 V. The sample chuck was heated between room temperature (302 °K) and 373 °K in steps of 10°K under dark conditions. Previously, the rectifying behavior has been demonstrated to be produced only by the heterojunction between PEDOT:PSS and ZnO, while the contacts, Au and ITO, were ohmic [18]. In the literature it is found that the PEDOT:PSS can be used as a Schottky contact without top metal [2, 19]. On the other hand, the use of top gold contacts is beneficial for further integration of multiple devices. In this sense, gold is planned to be used as a hard mask to isolate the devices by reactively ion etching the PEDOT:PSS film with oxygen plasma and also as an interconnection line among several devices.

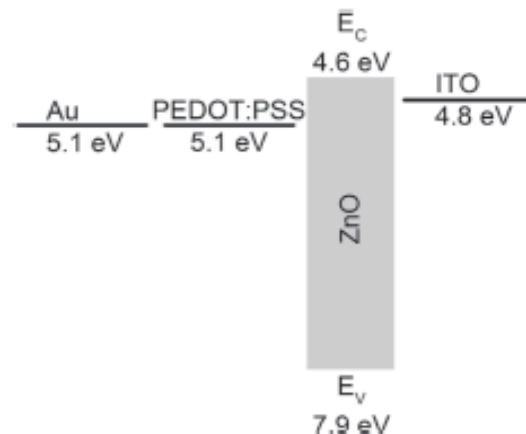


Figure 2. Energy band diagram of Au, PEDOT:PSS, ZnO and ITO.

3. Results and discussion

The ideal energy band diagram of Au, PEDOT:PSS, ZnO and ITO is presented in figure 2. E_C and E_V represent the conduction band and valance band of ZnO, respectively. The energy levels, were obtained from the literature [8, 20, 21]. When contact among the materials is made, the electrons start flowing from the ZnO conduction band into the PEDOT:PSS. This will cause a deformation of the band structure. Once the equilibrium is reached, the deformed band structure forms a potential barrier which electrons must overcome in order to flow from the ZnO into the PEDOT:PSS. The potential barrier determines the rectification characteristics of the SBDs. The following analysis will help to extract the value of the barrier height and its dependence with temperature.

The I - V - T characteristics of the SBDs were measured over the temperature range of 302–373 °K. The current of a metal–semiconductor contact dominated by thermionic emission is given by [22]:

$$I = AA^*T^2c^{-q\phi_B/kT}(e^{qV/nkT} - 1) = J_0(e^{qV/nkT} - 1) \quad (1)$$

where T is the absolute temperature, q is the elementary charge, V is the applied voltage, ϕ_B is the effective barrier height, k is the Boltzmann constant, A is the contact area, n is the diode ideality factor, J_0 is the saturation current density and A^* is the Richardson constant. The I - V - T plots are shown in figure 3. In table 1, the extracted values for J_0 , ϕ_B and n are shown. The extracted electrical parameters, from equation (1), are normally affected by the series resistance (R_s) value at voltages higher than 0.5 V. To include the effect of the R_s in the extraction of both n and ϕ_B , Cheung's method was used [23, 24]. With this method, the diode ideality factor and R_s are extracted from the $dV/d\ln I$ versus I plot as plotted in figure 4. The extracted series resistance is used to correct the voltage axis ($V = V - IR_s$) of the original I - V plot to determine the saturation current density and additional n for each temperature. These parameters are now extracted without the effect of the series resistance. In order to extract the effective barrier height, a second plot denominated as $H(I)$ is used as

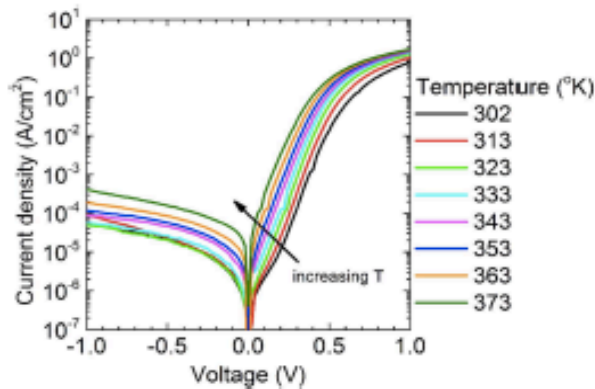


Figure 3. I-V-T characteristics of the SBDs.

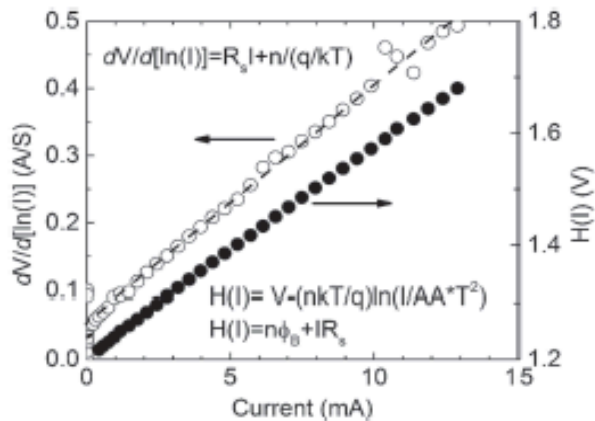


Figure 4. Extraction of the R_s , n and ϕ_B according to Cheung's model. This plot is for the SBD at 363 °K.

presented in figure 4. In the $H(I)$ plot, the previously extracted R_s and n values are used to finally obtain the ϕ_B from the slope of this plot. For comparison, the extracted values of n , J_0 , ϕ_B , and R_s are listed in table 1 for both thermionic emission and Cheung models. The series resistance, over the temperature range, turned out to be constant at 36 Ω. This value is significantly lower than those obtained with other ZnO Schottky contacts [25, 26]. The diode ideality factor seems to be the only major difference between models which can be related to the effect of series resistance. The n values from Cheung's model are slightly higher and practically constant than those extracted from the thermionic emission model. For Cheung's model in the 302–313 °K temperature range, there is also a higher ϕ_B and lower n which is associated to the error in parameter extraction due to the presence of more than one slope, slightly noticeable at low voltages in figure 3. The presence of more than one slope at low voltages (<0.1 V) represent additional transport mechanisms normally associated to tunneling (slopes with $n > 2$). In general, the diode ideality factor deviates from unity ($1 < n < 2$) indicating the presence of electron-hole recombination ($n = 2$) which is also responsible for the increment

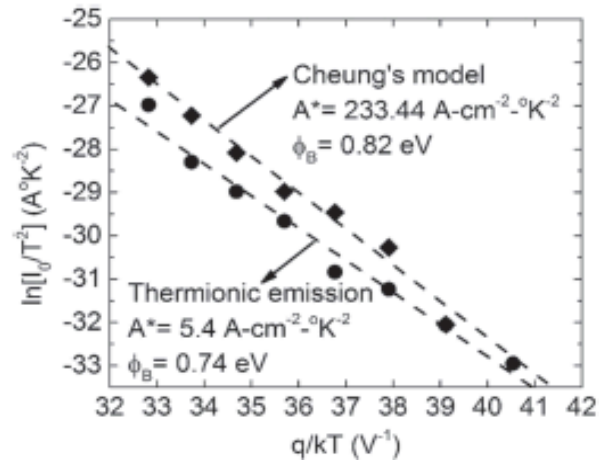


Figure 5. Richardson plot for the extraction of the A^* and ϕ_B .

in the value of J_0 . In the 0.1–0.5 voltage range, the thermionic emission model dominates over the electron-hole recombination due to the observed temperature independence of the n , ϕ_B and R_s . The temperature independence of both the diode ideality factor and effective barrier height turned out to be a specific characteristic of the PEDOT:PSS/ZnO interface. This is contrary to what is normally found in other inorganic Schottky contacts such as: Pd/ZnO [27], IrO₂/ZnO [28], Ag/ZnO [29], Au/ZnO and Pt/ZnO [16]. For those systems there is a temperature dependence of both n and ϕ_B . This produces an in-homogenous Schottky barrier, normally attributed to partial oxidation of the metal, with the exception of Au. When barrier in-homogeneities are presented, the thermionic emission model (equation (1)) is modified to include this effect which is not the present case. On the other hand, the use of high quality single crystal ZnO can be beneficial in reducing the electron-hole recombination current as reported by Nakano *et al* who obtained ideal PEDOT:PSS/ZnO Schottky diode characteristics at room temperature [10]. In the present work, the deviation from ideal device characteristics has been associated with two main reasons. First, the polycrystalline ZnO film growth due to the use of glass substrates and low temperature processing which can be solved with high temperature deposition/annealing. Second, due to precipitates in the unfiltered PEDOT:PSS solution, non-uniform PEDOT:PSS thickness and the uncontrolled PEDOT:PSS etching over the ZnO film. These problems can be solved by optimizing the deposition of PEDOT:PSS with: the use of PEDOT:PSS solution with reduced PSS concentration, the film deposition by spinner and the filtration of the PEDOT:PSS solution with 0.45 μm syringe filters.

From equation (1) and the data obtained from the thermionic emission and Cheung models, the effective barrier height and Richardson constant were extracted by plotting $\ln(I_0/T^2)$ versus q/kT according to:

$$\ln\left(\frac{I_0}{T^2}\right) = \ln(AA^*) - \frac{q\phi_B}{kT} \quad (2)$$

Table 1. Extracted parameters with different methods: n , J_0 , φ_B , and R_s .

T (°K)	Thermionic emission model			Cheung's model			R_s (Ω)
	J_0 ($A\ cm^{-2}$)	φ_B (eV)	n	J_0 ($A\ cm^{-2}$)	φ_B (eV)	n	
302	5.7×10^{-8}	0.78	1.48	7.3×10^{-8}	0.83	1.53	35.0
313	1.5×10^{-7}	0.78	1.44	1.5×10^{-7}	0.83	1.44	38.5
323	3.6×10^{-7}	0.79	1.40	9.4×10^{-7}	0.78	1.58	38.0
333	5.7×10^{-7}	0.80	1.31	2.2×10^{-6}	0.78	1.56	36.2
343	2.0×10^{-6}	0.80	1.35	3.8×10^{-6}	0.79	1.53	35.1
353	4.1×10^{-6}	0.80	1.33	1.0×10^{-5}	0.78	1.55	34.7
363	8.5×10^{-6}	0.80	1.26	2.5×10^{-5}	0.78	1.55	35.3
373	3.4×10^{-5}	0.78	1.36	6.4×10^{-5}	0.77	1.55	36.6

From the Richardson plot, figure 5, the effective barrier height turned out to be 0.74 eV and 0.83 for thermionic emission and Cheung models, respectively. Also, the obtained Richardson constant value was 5.4 and 233 $A\ cm^{-2}\ ^\circ K^{-2}$ for thermionic emission and Cheung models, respectively. The Richardson constant for the thermionic emission model is closer to the widely accepted theoretical value for ZnO of 32 $A\ cm^{-2}\ ^\circ K^{-2}$. Previous studies on ZnO-based Schottky barrier diodes have demonstrated that when the diode ideality factor is high ($n > 1.3$) the extracted A^* values are normally lower than the theoretical value due to barrier height in-homogeneities or interfacial defects [28]. For the case of the extraction of the Richardson constant with the parameters from Cheung's model, the A^* value turned out to be higher than the theoretical value. This increment is related to an underestimated value of the n for the 302–313 °K temperature range. If these two values are removed from the fitting, the resulting φ_B and A^* turned out to be 0.71 eV and 4.6 $A\ cm^{-2}\ ^\circ K^{-2}$, respectively which are more in agreement with the results obtained with the thermionic emission model.

4. Conclusions

Low-temperature processed SBDs were fabricated using the conductive polymer PEDOT:PSS as a Schottky contact to ZnO. PEDOT:PSS represents an alternative to the expensive noble metals: Pt, Pd, Ag and metal oxides: IrOx, PdOx, ROx. The I - V - T characteristics demonstrated that the device performance is consistent with the thermionic emission model although its ideal characteristics are limited by electron-hole recombination at the PEDOT:PSS/ZnO interface. Using the thermionic emission and Cheung models, the extracted parameters were: Richardson constant close to 5 $A\ cm^{-2}\ ^\circ K^{-2}$, an effective barrier height around 0.74 eV, a diode ideality factor of 1.5 and a series resistance of around 36 Ω . These parameters were found to be temperature independent, 302–373 °K temperature range, in agreement with the thermionic emission model. There is also room for improvement in terms of the preparation of PEDOT:PSS in order to enhance the device reliability while avoiding an over-etch in the ZnO film. The maximum processing temperature of 80 °C makes these devices attractive for flexible electronics.

Acknowledgments

This work was supported by CONACYT-Mexico under grant CB-2014/240103 and by SIP-IPN under grant 20150045.

References

- [1] Kim S, Kim H S and Park Y D 2016 *Org. Electron.* **30** 296–301
- [2] Ikenoue T, Kameyama N and Fujita S 2011 *Phys. Status Solidi C* **8** 613–5
- [3] Kislyuk V V, Fedorchenko M I, Smertenko P S, Dimitriev O P and Pud A A 2010 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **43** 185301
- [4] Lee J, Mubeen S, Hernandez-Sosa G, Sun Y, Toma F M, Stucky G D and Moskovits M 2013 *Adv. Mater.* **25** 256–60
- [5] Pietsch M, Jäckle S and Christiansen S 2014 *Appl. Phys. A* **115** 1109–13
- [6] Ashok Kumar A, Rajagopal Reddy V, Janardhanam V, Yang H D, Yun H J and Choi C J 2013 *J. Alloys Compd.* **549** 18–21
- [7] Enver Aydin M and Yakuphanoglu F 2012 *Microelectron. Reliab.* **52** 1350–4
- [8] Lee D H, Park D H, Kim S and Lee S Y 2011 *Thin Solid Films* **519** 5658–61
- [9] Lin C-Y, Tsai C-H, Lin H-T, Chang L-C, Yeh Y-H, Pei Z, Peng Y-R and Wu C-C 2011 *Org. Electron.* **12** 1777–82
- [10] Nakano M et al 2008 *Appl. Phys. Lett.* **93** 123309
- [11] Vempati S, Chiraklara S, Mitra J, Dawson P, Kar Nanda K and Krupandhi S B 2012 *Appl. Phys. Lett.* **100** 162104
- [12] Sharma B K, Khare N and Ahmad S 2009 *Solid State Commun.* **149** 771–4
- [13] Zhu Y-B, Hu W, Na J, He F, Zhou Y-L and Chen C 2011 *Chinese Phys. B* **20** 047301
- [14] Özgür Ü, Alivov Y I, Liu C, Teke A, Reshchikov M A, Doğan S, Avrutin V, Cho S J and Morkoç H 2005 *J. Appl. Phys.* **98** 1–103
- [15] Allen M W, Mendelsberg R J, Reeves R J and Durbin S M 2009 *Appl. Phys. Lett.* **94** 103508
- [16] Lajn A et al 2009 *J. Vac. Sci. Technol. B* **27** 1769
- [17] Hernandez-Como N, Morales-Acevedo A, Aleman M, Mejia I and Quevedo-Lopez M A 2016 *Microelectron. Eng.* **150** 26–31
- [18] Hernandez-Como N, Rivas-Montes G, Hernandez-Cuevas F J, Mejia I, Molinar-Solis J E and Aleman M 2015 *Mater. Sci. Semicond. Process.* **37** 14–8
- [19] Shah M, Sayyad M H, Karimov K S and Wahab F 2010 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **43** 405104
- [20] Wang Z, Qi J, Yan X, Zhang Q, Wang Q, Lu S, Lin P, Liao Q, Zhang Z and Zhang Y 2013 *RSC Adv.* **3** 17011

- [21] Rakhshani A E 2014 *Appl. Surf. Sci.* **311** 614–20
- [22] Schroder D K 2005 *Semiconductor Material and Device Characterization* 3rd edn (Hoboken, NJ: Wiley)
- [23] Cheung S K and Cheung N W 1986 *Appl. Phys. Lett.* **49** 85–7
- [24] Werner J H 1988 *Appl. Phys. A* **47** 291–300
- [25] Somvanshi D and Jit S 2014 *J. Nanoelectron. Optoelectron.* **9** 21–6
- [26] Mayimele M A, Van Rensburg J P J, Auret F D and Diale M 2016 *Physica B* **480** 58–62
- [27] Somvanshi D and Jit S 2013 *IEEE Electron Device Lett.* **34** 1238–40
- [28] Sarpatwari K, Awadelkarim O O, Allen M W, Durbin S M and Mohny S E 2009 *Appl. Phys. Lett.* **94** 242110
- [29] Kim H, Kim H and Kim D W 2010 *J. Appl. Phys.* **108** 074514

Anexo 2



Sociedad Mexicana
de Materiales A.C.

August 2016

TO WHOM IT MAY CONCERN
P r e s e n t

This is to certify that *Andrés Rodríguez* presented the contribution: **TEMPERATURE SENSITIVITY OF SCHOTTKY BARRIER DIODES MADE OF ZnO/PEDOT:PSS JUNCTION**, in the **Advances In Functional Semiconducting Materials Symposium** at the **XXV International Materials Research Congress** held in Cancun, Mexico from August 14th to 19th, 2016.







Sincerely,

José Gerardo Cabañas Moreno
President





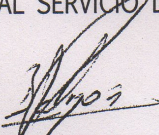



SF-3-PC08

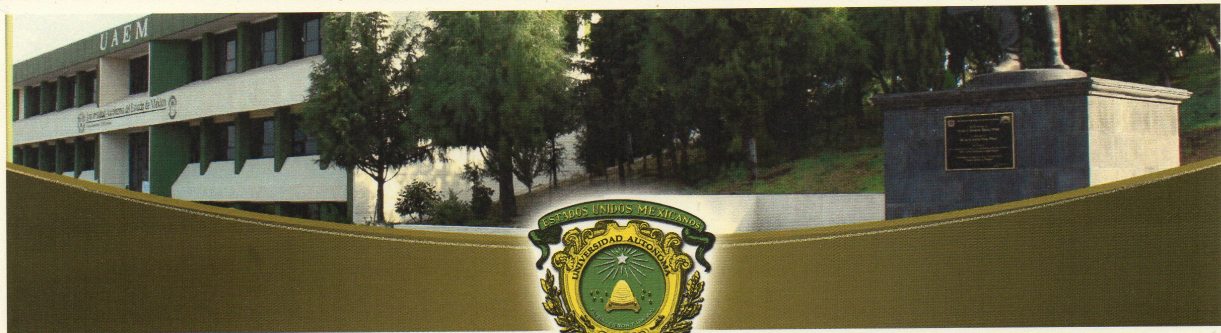
Anexo 3

 SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA		 Instituto Politécnico Nacional Centro de Nanociencias y Micro y Nanotecnologías <small>*2015, Año del Generalísimo José María Morelos y Pavón*</small> 
Plan de trabajo		México, D.F. a 15 de septiembre del 2015 OFICIO: N° CNMN/STT/211/15
Alumnos: Ing. Andrés Rodríguez López		
Período:		
DR. RODOLFO ZOLÁ GARCÍA LOZANO COORDINADOR DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO DEL CENTRO UNIVERSITARIO UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO		
Presente		
Asunto: Aceptación de Estancia		
Por medio del presente, me permito informarle que el alumno Rodríguez López Andrés , con número de cuenta 8949258 , realizará su Estancia de Investigación en este centro, el C. Rodríguez ha sido ACEPTADO , de acuerdo a los criterios de su Unidad Académica; durante el periodo del 24 de agosto al 24 de noviembre del 2015 .		
Así mismo, le comunico que estará bajo la supervisión del Dr. Norberto Hernández Como , <i>Especialista en Micro y Nanotecnología</i> .		
Se anexa plan de trabajo de las actividades que desarrollará el alumno.		
Sin otro particular por el momento, reciba un cordial saludo.		
Atentamente "LA TÉCNICA AL SERVICIO DE LA PATRIA"		
 Dr. HEBERTO BALMORI RAMÍREZ DIRECTOR		
HBR*MLPR*pcm	 S.E.P. INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL CENTRO DE NANOCIENCIAS Y MICRO Y NANOTECNOLOGÍAS DIRECCIÓN	
Dr. Norberto Hernández Como		
Ing. Andrés Rodríguez López		
Unidad Profesional "Adolfo López Mateos", Av. Luis Enrique Erro s/n, Col. Zacatenco, México D.F., C.P. 07738 Tel.: 5729 6000, ext. 57501 46081 www.nanocentro.ipn.mx, nanocentro@ipn.mx		

Anexo 4

 SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA		Instituto Politécnico Nacional Centro de Nanociencias y Micro y Nanotecnologías	
		México, D.F. a 18 de enero del 2016 OFICIO: N° CNMN/STT/008/16	
<p>M. en ISC ALEJANDRA MORALES RAMÍREZ COORDINADORA DE LA MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA COMPUTACIÓN DEL CU UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO, ECATEPEC</p>			
<p>Presente</p>			
<p>Asunto: <i>Aceptación de Estancia</i></p>			
<p>Por medio del presente, me permito informarle que el alumno Rodríguez López Andrés, con número de cuenta 8949258, realizará su Estancia de Investigación en este centro, el C. Rodríguez ha sido ACEPTADO, de acuerdo a los criterios de su Unidad Académica; durante el periodo del 18 de enero al 30 de junio del 2016.</p>			
<p>Así mismo, le comunico que estará bajo la supervisión del Dr. Norberto Hernández Como, <i>Especialista en Micro y Nanotecnología</i>.</p>			
<p>Se anexa plan de trabajo de las actividades que desarrollará el alumno.</p>			
<p>Sin otro particular por el momento, reciba un cordial saludo.</p>			
<p>Atentamente "LA TÉCNICA AL SERVICIO DE LA PATRIA"  Dr. HEBERTO BALMORI RAMÍREZ DIRECTOR</p> <p> S.E.P. INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL CENTRO DE NANOCIENCIAS Y MICRO Y NANOTECNOLOGÍAS DIRECCIÓN</p>			
<p>HBR*MDPR*pcm</p>			
<p>Unidad Profesional "Adolfo López Mateos", Av. Luis Enrique Erro s/n, Col. Zacatenco, México D.F., C.P. 07738 Tel: 5729 6000, ext. 57601 46081 www.nanocentro.ipn.mx, nanocentro@ipn.mx</p>			

Anexo 5



UAEM | Universidad Autónoma
del Estado de México

Centro Universitario Ecatepec

Otorga la presente

CONSTANCIA

A: Rodríguez López Andrés

Por participar con la ponencia:

Diseño y fabricación de un circuito detector de temperatura basado en diodos Schottky.

en el “Seminario de Investigación de la Maestría en Ciencias de Computación”,
celebrado el día 02 de Junio del 2016 en las Instalaciones de este Centro
Universitario.

Patria, Ciencia y Trabajo

*“2016, Año del 60 Aniversario de la Universidad Autónoma del Estado de México”
“2016, Año de Leopoldo Flores Valdés”*

M. en I.S.C. Cuauhtémoc Hidalgo Cortés
Encargado del Despacho de la Dirección del CU UAEM Ecatepec



Anexo 6



UAEM | Universidad Autónoma
del Estado de México

La Sociedad Mexicana de Física y La Universidad Autónoma del Estado de México, a través del Centro Universitario UAEM Ecatepec, la Facultad de Ciencias en colaboración con el Gobierno del Estado de México, la Secretaría de Educación y el Consejo Mexiquense de Ciencia y Tecnología

Otorga la presente

CONSTANCIA

A: Rodríguez López Andrés

Por su participación como Jurado en la PRIMERA ETAPA del Concurso de Aparatos y Experimentos de Física, en el Estado de México.

Ecatepec de Morelos, Estado de México a 23 de mayo de 2015.

MTRO. CUAUHTÉMOC HIDALGO CORTÉS
ENCARGADO DEL DESPACHO DE LA DIRECCIÓN
DEL CENTRO UNIVERSITARIO UAEM ECATEPEC



CENTRO UNIVERSITARIO U.A.E.M.
ECATEPEC
DIRECCIÓN



GOBIERNO DEL
ESTADO DE MÉXICO



Anexo 7



UAEM | Universidad Autónoma
del Estado de México

CONSTANCIA

**A QUIEN CORRESPONDA:
PRESENTE**

El que suscribe, Encargado del Despacho de la Dirección del Centro Universitario UAEM Ecatepec HACE CONSTAR que el ING. ANDRÉS RODRÍGUEZ LÓPEZ, estudiante de la Maestría en Ciencias de la Computación de este Centro Universitario, cumplió como ponente en el Taller de Electrónica para Niños que se impartió en esta institución, el cual se llevó a cabo del 6 al 18 del presente mes y año.

Se extiende la presente en Ecatepec de Morelos, Estado de México a los veintisiete días del mes de Agosto del año dos mil quince, para los fines administrativos a que haya lugar.

PATRIA, CIENCIA Y TRABAJO
"2015, Año del Bicentenario Luctuoso de José María Morelos y Pavón"

**M. EN I.S.C. CUAUHTÉMOC HIDALGO CORTÉS
ENCARGADO DEL DESPACHO DE LA DIRECCIÓN DEL
CENTRO UNIVERSITARIO UAEM ECATEPEC**

ECATEPEC



DIRECCION

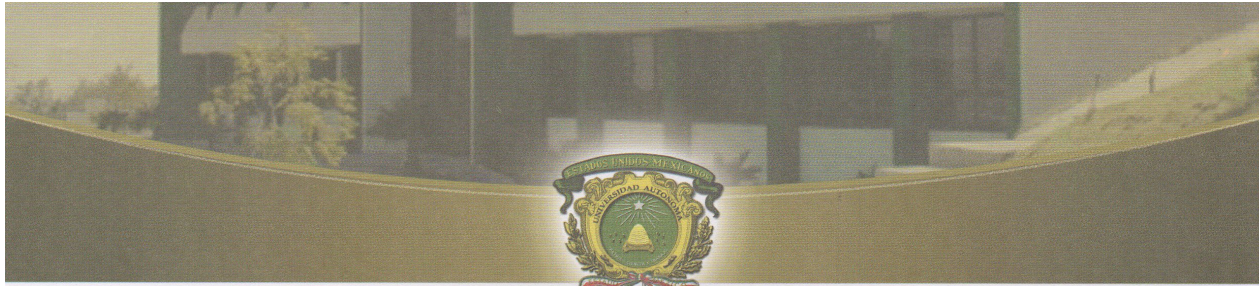


CHC/ciah

www.uaemex.mx

Av. José Revueltas no. 17 Col. Tierra Blanca, C.P. 55020, Ecatepec, Estado de México. Tels (Fax): 57.87.36.26 y 57.87.35.10

Anexo 8



UAEM | Universidad Autónoma
del Estado de México

Centro Universitario Ecatepec

Otorga la presente

Constancia

A: *ANDRÉS RODRÍGUEZ LÓPEZ*

Por su participación con la Conferencia del tema:
Demostración de Realidad Virtual Inmersiva: "Pon a
prueba tus sentidos". En el marco de la celebración de
la Semana Multidisciplinaria llevada a cabo en este
Centro Universitario.

Ecatepec, Estado de México a 20 de Abril del 2016.

Patria, Ciencia y Trabajo

ECATEPEC
"2016, Año del 60 Aniversario de la Universidad Autónoma del Estado de México"
"2016, Año de Leopoldo Flores Valdés"

M. en I.S.C. Cuauhtémoc Hidalgo Cortés
Encargado del Despacho de la Dirección CU UAEM Ecatepec



DIRECCION



Referencias

[1] C. Tsiarapas., D. Girginoudi., N. Georgoulas. (2014). “*Electrical characteristics and deep level traps study of Au/ZnO:H Schottky diodes, Superlattices and Microstructures*”. 75. 171-182.

[2] J. Herrán. et al. “*Schottky diodes based on electrodeposited ZnO nanorod arrays for humidity sensing at room temperature*”. ELSEVIER. pp. 274-278. 2012.

[3] B. Gunduz., I.S. Yahia., F. Yakuphanoglu. (2012). “*Electrical and photoconductivity properties of p-Si/P3HT/Al and p-Si/P3HT:MEH-PPV/Al organic devices*”. Microelectronic Engineering. 98. 41-57.

[4] Y. Liu., J. Yu., P.T. Lai. (2014). “*Investigation of WO₃/ZnO thin-film heterojunction-based Schottky diodes for H₂ gas sensing*”. International journal of Hydrogen energy. 39. 1013-10319.

[5] N. Hernandez-Como, et al, “*Ultraviolet photodetectors based on low temperature processed ZnO/PEDOT:PSS Schottky barrier diodes*”. *Materials Science in Semiconductor Processing*, no. 37. pp. 14-18. 2015.

[6] T. Fjeldly., T. Ytterdal., M. Shur. (1998). “*Introduction to device modeling and circuit simulation*”. USA: Editorial Wiley Interscience.

[7] M. Campos., L.O.S. Bulhoes., C. Lindino. (2000). “*Gas-sensitive characteristics of metal/semiconductor Schottky device*”. *Sensors and Actuators*. 87. 67-71.

[8] D. Halliday., R. Resnick., K. Krane. (1994). “*Física*”. México: Editorial Continental.

[9] A.P. Malvino. (1999). “*Principios de electrónica*”. España. Mc Graw Hill.

[10] S.K. Cheung., N.W. Cheung. (1986). “*Extraction of Schottky diode parameters from forward current-voltage characteristics*”. *Appl. Phys. Lett.* 49(2), pp. 85-87.

[11] Y. Kashiwaba, et al, "Fabrication of Schottky barrier diodes using H₂O₂-treated non-polar ZnO substrates". *ELSEVIER*, pp.126-130, 2013.

[12] X. Zhang, J. Zhai, X. Yu, L. Ding, W. Zhang. "Fabrication and characterization of flexible Ag/ZnO Schottky diodes on Polyimide Substrates". *ELSEVIER*. pp. 623-626. 2013.

[13] S. Aydogan., K. Cinar., H. Asil., C. Coskun., A. Turut. (2009). "Electrical characterization of Au/n-ZnO Schottky contacts on n-Si". *Journal of Alloys and Compounds*. 476. 913-918.

[14] V.H. Jiménez. (2015). "Análisis, simulación y aplicación de diodos Schottky con compuestos orgánicos". UAEM. Estado de México, México

[15] Texas Instruments. (2015). "LM741 Operational Amplifier". Recuperado de: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm741.pdf>.