

ESTUDIO DE PARÁMETROS MEDIANTE SIMULACIÓN PARA OPTIMIZACIÓN DE UN MESFET DE ZNO

STUDY OF SIMULATING PARAMETERS TO OPTIMIZE A MESFET OF ZNO

Armando Gregorio Rojas Hernández

Universidad de Sonora, México
arojas@cifus.uson.mx

Rodolfo Rodríguez Dávila

University of Texas at Dallas, USA
Rodolfo.RodriguezDavila@utdallas.edu

Alicia Vera Marquina

Universidad de Sonora, México
alicia.vera@unison.mx

Ana Lilia Leal Cruz

Universidad de Sonora, México
ana.leal@cifus.uson.mx

Antonio Ramos Carrasco

Universidad de Sonora, México
antonio.ramos@cifus.uson.mx

Manuel Quevedo López

University of Texas at Dallas, USA
mquevedo@utdallas.edu

Recepción: 29/octubre/2020

Aceptación: 3/diciembre/2020

Resumen

En este trabajo se realiza un estudio de los parámetros principales que afectan el desempeño de una unión rectificadora Schottky que es la base del control del canal en un MESFET de ZnO. Los parámetros estudiados son el grosor a , el ancho de compuerta L_G y las distancias de separación entre la compuerta y la fuente L_{GS} , y entre la compuerta y el drenaje L_{GD} . Así como diferentes metales para el contacto rectificador de compuerta, del análisis se encuentra que la estructura de Paladio de 500nm de $L_{GS} = L_{GD}$ y $500\text{ nm} = L_G$ con un grosor $a = 74\text{ nm}$ y una concentración de $5 \times 10^{17}\text{ cm}^{-3}$ da $\Delta \frac{i_{on}}{i_{off}} = 1.24 \times 10^{10}$, la mejor rectificación y valores de resistencia serie de 0.076 ohms que son característicos de este material.

Palabras Clave: Diseño de dispositivos, física de semiconductores, microelectrónica.

Abstract

In this work is realized a study of the main parameters and the effects of the behavior of a rectifier Schottky junction that is used as a base to channel control of a ZnO MESFET. The parameters considered are thickness a , gate width L_G , and the lengths of the source at gate L_{GS} and gate at drain L_{GD} . Different metals are considered like rectifier contact of the gate, results of the analysis shown that the Palladium structure of 500 nm of $L_{GS} = L_{GD}$ and 500 nm = L_G with a thickness $a = 74\text{nm}$ and a free carrier density of $5 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ yield $\Delta \frac{i_{on}}{i_{off}} = 1.24 \times 10^{10}$, the best rectification and values of serial resistance of 0.076 Ohms are typical of this material.

Keywords: Device design, microelectronic, physics of semiconductors.

1. Introducción

Los materiales II-VI, específicamente el Óxido de Zinc (ZnO), Indium Galium Zinc Óxido de Zinc Galio e Indio (IGZO), y Óxido de Zinc Estaño (ZTO) son algunos de los materiales que se tienen para superar las expectativas del silicio amorfo hidrogenado (a -Si-H) usado en displays de panel plano de matriz activa. Esto es debido a su mayor movilidad, y estabilidad bajo el efecto estresante de luz y de polarización [Elzwawi, 2015]. También dentro de sus muchas e importantes aplicaciones se reporta su uso como oscilador en anillo basado en transistores de película delgada con compuerta aisladora, obteniéndose frecuencias en el rango de kilo a megahertz para osciladores con 5 y 7 etapas respectivamente [Kupfel, 2016]. El ZnO es el candidato idóneo para aplicaciones electrónicas por sus propiedades únicas y porque es ampliamente estudiado hoy en día. Su grande ancho de banda prohibida de 3.4 eV y energía de enlace del excitón de 60 meV hacen que el ZnO se vuelva transparente a la luz visible [Elzwawi, 2015], [Klingshirn, 2005].

Las ventajas no solo son esas, sino que además del más alto desempeño, se tiene sustratos transparentes y flexibles, y menor temperatura de fabricación.

Una menor temperatura de fabricación permite la posibilidad de que los circuitos basados en óxido semiconductor ZnO puedan ser transferidos a sustratos flexibles [Salina, 2010].

El transistor de efecto de campo metal semiconductor (MESFET) tiene 3 contactos metálicos semiconductores la compuerta metálica forma un contacto metálico rectificador tipo Schottky, y los metales de contacto de drenaje y de fuente son rectificadores esto implica generalmente dos diferentes tipos de metales.

La elección típica de materiales para los MESFETs se basa en la alta movilidad del electrón, la cual minimiza la resistencia serie, y la alta velocidad de saturación la cual resulta en el incremento de la frecuencia de corte. En la práctica los MESFETs son fabricados usando capas epitaxiales sobre sustratos aisladores para minimizar la capacitancia parásita, es un transistor de película delgada (TFT) con un diodo Schottky como electrodo de compuerta [Klingshirn, 2005], [Grundmann, 2010].

Las alturas de barrera Schottky para el diodo rectificador del MESFET son típicamente 0.95 y 0.90 eV para la plata Ag y para el platino Pt respectivamente [Klingshirn, 2005], [Grundmann, 2010], estos valores resultan en corrientes inversas tan bajas como 5nA/cm^2 ($\alpha - 1V = V_G$), y voltajes de operación relativamente pequeños, [Frenzel, 2008]. ZnO es el único óxido semiconductor sobre el cual se ha reportado la fabricación de JFETs, MISFETs y MESFETs [Schein, 2012], [Frenzel, 2010], [Lorenz, 2011]. En [Kao, 2005] se hizo una comparación entre MISFETs y MOSFETs sin embargo sus dispositivos mostraron alta corriente de fuga y un gran voltaje umbral negativo, pero [Klupfel, 2013] reporta JFETs, MISFETs, y MESFETs fabricados con ZnO con similares voltajes de trabajo pero con más bajas corrientes de fuga, resultado del estudio y comparación de las estructuras de compuerta en el desempeño de FETs basados en óxido. Además, las propiedades de los contactos de barrera Schottky sobre ZnO han mejorado considerablemente últimamente debido a un refinado pretratamiento del ZnO o al uso de óxidos metálicos no estequiométricos en vez de un metal puro. Esto debido por ejemplo a que en fotodiodos de $AgOx/ZnO$ los portadores fotogenerados no son eficientemente colectados si no se lleva a cabo un correcto encapsado metálico [Wenckstern, 2010], [Schifano, 2007], [Allen, 2007], [Lajn, 2009].

En este trabajo se optimiza un MESFET por medio de simulaciones, la idea es proporcionar un entendimiento claro de la dependencia de los parámetros de tamaño de compuerta, dimensiones laterales de compuerta a fuente y de compuerta a drenaje así como el grosor de la película de ZnO y diferentes valores de altura de barrera de los metales comúnmente usados en la formación del contacto de compuerta Schottky y su efecto con los parámetros de estudio: movilidad, eficiencia, concentración y parámetros de entrada salida.

2. Métodos

Los parámetros del dispositivo incluyen el ancho L_G , longitud de la compuerta Z , el grosor de la capa semiconductor a , así como las separaciones laterales L_{GS} y L_{GD} que se ilustran en la figura 1. Esta figura también muestra la estructura del MESFET para el caso a) aspecto bidimensional con dos capas ZnO y capa aisladora, y b) Detalles tridimensionales de las separaciones L_{GS} y L_{GD} .

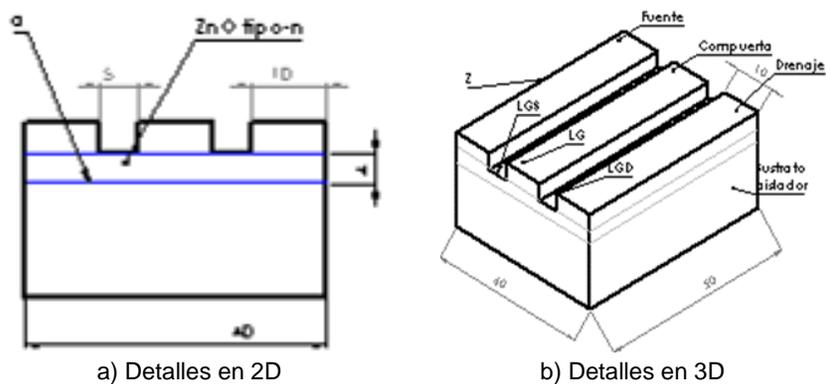


Figura 1 Estructura del MESFET.

Modo de funcionamiento

Para entender el modo de funcionamiento nos enfocamos debajo de la compuerta como se ve de la figura 2, la fuente es aterrizada y el voltaje de compuerta y drenaje es medido con respecto a la fuente. La figura 2 muestra las características de salida del MESFET bajo varias condiciones de polarización: a) $V_G = 0$ y un pequeño V_D llamada región lineal, b) $V_G = 0$ y en un extremo agotado llamado en ingles pinch-off o pellizcado de la zona de agotamiento, c) $V_G = 0$ después de la primera región

agotada ($V_D > V_{Dsat}$) llamada región de saturación, d) $V_G = -1 V$ y un $V_D > 0$ llamada región de corte.

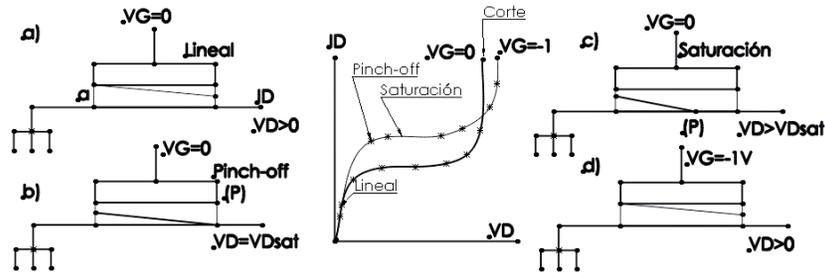


Figura 2 Características del MESFET con varias polarizaciones (propia del autor).

Bajo condiciones normales de operación el voltaje de compuerta es cero o polarizado inversamente, y el voltaje de operación del drenaje es cero o polarizado directamente es decir $V_G < 0$ y $V_D > 0$, en nuestro caso ya que el material ZnO es tipo n tendremos un MESFET de canal n.

Un parámetro importante del MESFET es la transconductancia g_m la cual representa el cambio en la corriente de drenaje a un voltaje de drenaje dado respecto al voltaje de compuerta, y que en la región de saturación es expresada como ecuación 1 [Sze, 2002].

$$g_m = \frac{I_p}{V_p} \left[1 - \sqrt{\frac{V_G + V_{bi}}{V_p}} \right] = \frac{aZqN_D\mu_n}{L_G} \left[1 - \sqrt{\frac{V_G + V_{bi}}{V_p}} \right] \quad (1)$$

Donde I_p y V_p son la corriente y voltaje de pinch-off respectivamente a , Z y L_G están definidos en las figuras 1 y 2, μ_n es la movilidad de electrones, q la carga del electrón y N_D la densidad de donadores, V_G es el voltaje de compuerta y V_{bi} es el voltaje interconstruido [Sze, 2002]. Para la metodología usamos la expresión de la ecuación 2 para I_{SD} que aparece en [Frenzel, 2010].

$$I_{SD} \propto q\mu_{ch}(N_D)a \frac{Z}{L_G} \quad (2)$$

Donde I_{SD} es la corriente de fuente a drenaje que es proporcional a a , Z , L_G que son parámetros geométricos definidos en las figuras 1 y 2, μ_{ch} es la movilidad en el canal, N_D es la densidad de donadores, y q la carga del electrón.

Parámetros Iniciales

Este estudio fue realizado mediante simulaciones eléctricas y de síntesis en el software de fabricación virtual Silvaco específicamente a través de Athena y Atlas respectivamente. Para las simulaciones iniciales se utilizaron parámetros de trabajos experimentales previos como la concentración de donadores de $5.9 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, y la movilidad Hall de $1.65 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$, de la película delgada de ZnO muy similares a los publicados en [Klupfel, 2013], [Vogt, 2018] donde películas delgadas son obtenidas a temperatura ambiente mediante Deposito por Laser Pulsado (PLD).

Para simplificar las simulaciones se consideraron contactos óhmicos en los electrodos de fuente y drenaje. En el caso de la compuerta, esta fue definida como contacto rectificador con una función trabajo para el contacto de Platino, Oro, Paladio y Plata de 5.64 eV, 5.3 eV, 5.2 eV, y 4.64 eV respectivamente.

De la misma manera se realizó la comparación con contactos de drenaje y fuente no ideales simulados con una función trabajo de 4.3 correspondiente al aluminio y esta se mantuvo fija para el resto de las simulaciones ya que los resultados con contactos ideales y no ideales es similar, estos valores de función trabajo son tomados de [Herbert, 1977].

La realización de simulaciones con la función trabajo del Platino de 5.64 eV resulto en cambios no consistentes, es decir no se observó rectificación en la unión rectificadora de compuerta y tampoco una razón de corriente de encendido respecto a la de apagado, por lo que se decidió realizar las simulaciones con los demás materiales como contactos de compuerta.

Las simulaciones no consideraron defectos ni ningún tipo de trampas, por lo que se puede decir que es una simulación ideal. La idea es primero determinar la relevancia de la dependencia de los parámetros intrínsecos y extrínsecos de las diferentes estructuras simuladas.

3. Resultados

La tabla 1 muestra los principales parámetros para la comparación. Entre estos esta la razón de corriente de encendido respecto a la corriente de apagado, principal

parámetro tomado en cuenta en el desempeño de las estructuras simuladas, el voltaje de encendido V_{on} , corriente de fuga i_L y corriente de saturación de drenaje a diferentes voltajes de compuerta ($I_D - N$) donde N son los diferentes valores negativos de voltaje de compuerta para los que I_D es medida. Se resumen los resultados de 3 diferentes simulaciones de estructuras MESFETs con 3 diferentes valores de longitud de compuerta 5 micrómetros (555, 10510, 15515), 1 micrómetro (111, 212, 313), y 500 nm (500500500, 10005001000, 15005001500, 20005002000). Los números medios comunes de cada triada corresponden a los anchos de compuerta descritos por L_G y los números laterales que son iguales son las distancias entre el contacto de compuerta y fuente L_{GS} , y la distancia del contacto de compuerta a drenaje L_{GD} .

Tabla 1 Parámetros resultantes de variar L_G , L_{GS} y L_{GD} .

MESFET	555	10510	15515	111	212	313	500500500	10005001000
$\Delta \frac{i_{on}}{i_{off}}$	1.11e8	1.5e8	1.02e8	3.3e9	2.4e9	1.92e9	1.24e10	0.8e10
i_{OFF}	6.2e-4	8e-4	5.3e-4	4.6e-3	3.28e-3	2.3e-3	9.1mA	6.5e-3
iD sat	10V	10V	10V	10V	10V	10V	10V	10V
ID-1	3.85e-4	4e-4	3.3e-4	3.1 mA	2.44 mA	2.06 mA	7.6 mA	6 mA
ID-2	8.5e-5	9e-5	9e-5	0.72 mA	6.04e-4	0.55 mA	2.3 mA	1.9 mA
ID-3	3e-11	3e-11	3e-11	1.14e-9	9.03e-10	9e-10	2.8e-6	1.8e-6
ID-4	5.8e-12	5.8e-12	5.6e-12	1.35e-12	1.57e-12	1.8e-12	8.59e-13	8e-13
ID-5	5.8e-12	5.8e-12	5.6e-12	1.35e-12	1.57e-12	1.8e-12	8.59e-13	8e-13
ID-6	5.8e-12	5.8e-12	5.6e-12	1.35e-12	1.57e-12	1.8e-12	8.59e-13	8e-13
i_L	5.6 pA	5.5e-12	5.2e-12	1.4e-12	1.38e-12	1.2e-12	7.32e-13	8e-13
V_{on}	-3.0	-3.04	-3.04	-3.15	-3.15	-3.16 V	-3.35	-3.32

Así, tenemos que para el caso de $L_G = 5$ micrómetros las longitudes a los contactos laterales son $L_{GS} = L_{GD} = 5, 10$ y 15 micrómetros, estas longitudes de separaciones son consideradas por recomendación de [Sze, 2002].

En la misma tabla 1 tenemos el parámetro de $\Delta \frac{i_{on}}{i_{off}}$ que es el parámetro que más varia y es el elegido para poder determinar los demás parámetros con mejor desempeño, cabe señalar que se hicieron más simulaciones, no mostradas en este trabajo, pero estas son las que permiten una mejor comparación.

En esta tabla también se muestran los valores de voltaje de encendido y corriente de encendido, así como la corriente de fuga muy cercana a la reportada en [Vogt,

2018]. El voltaje de encendido fue encontrado alrededor de -3 V lo cual nos confirma que tenemos un dispositivo normalmente encendido, como debería ser para el ZnO tipo- *n*. La más baja corriente de encendido corresponde a las estructuras de 500 nm de longitud de canal este es un parámetro importante pues permite tener una razón de encendido apagado mayor. Otro parámetro importante reportado en la tabla 1 es el valor de corriente de drenaje para diferentes valores de voltaje de compuerta, como se mencionó en el modo de funcionamiento en un MESFET normalmente encendido este valor es negativo y es reportado en la tabla de la misma forma. Los valores más negativos corresponden a -6 V y como puede observarse para estos valores de voltaje de compuerta el contacto de compuerta es polarizado inversamente lo que significa una región de agotamiento mayor. En estas condiciones un voltaje pequeño de drenaje provoca que el canal actúe como un resistor debido a que el área de sección transversal de flujo de corriente es disminuida, esto se puede apreciar con valores del orden de 10^{-3} para longitudes de compuerta de 500 nm.

Se unieron todas las razones de corriente de salida respecto de la entrada para poder discernir más claramente respecto de las estructuras simuladas (Figura 3).

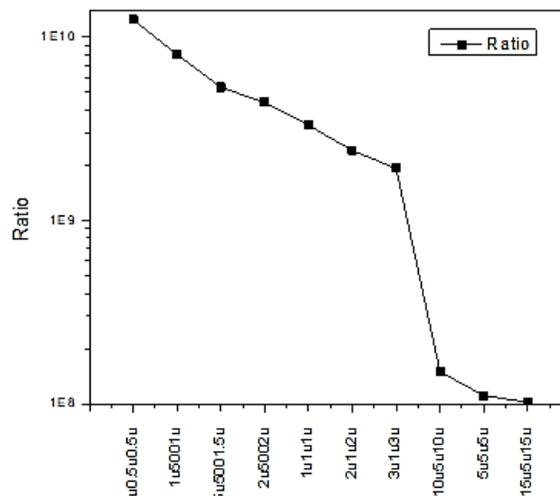


Figura 3 Razón $\Delta \frac{i_{on}}{i_{off}}$, para las diferentes estructuras simuladas.

Como se puede observar la estructura con el valor de razón de corriente de encendido respecto a apagado es mayor para la estructura de 500 nm, esto es

debido a que hay un mejor control de la región de agotamiento. Después de la región de saturación en donde ocurre el pinch off o pellizco de la corriente esta es reducida, pero como el tamaño de la compuerta es pequeño un aumento del voltaje de drenaje solo refuerza la región de agotamiento, es decir esta región ya está extendida.

Como puede observarse de la figura 3 el mayor valor de razón de corriente de encendido respecto al de apagado es para la estructura de 500 nm de longitud de compuerta y 500 nm también para las separaciones laterales.

En la figura 4 se realiza un comparativo de las corrientes de drenaje y de compuerta respecto al voltaje de compuerta de las diferentes estructuras simuladas.

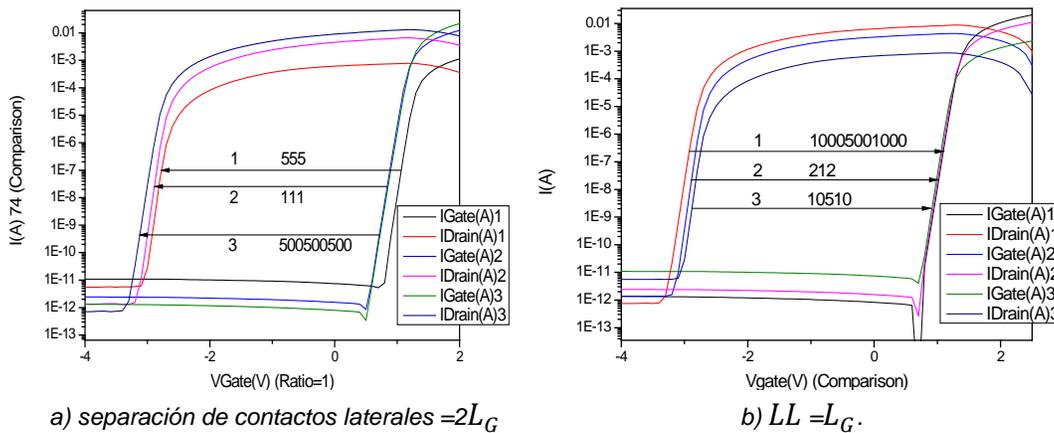


Figura 4 Comparación entre separación de contactos laterales $=2L_G$ y $LL = L_G$.

Como puede verse de la figura 4 a la comparación entre las diferentes estructuras con anchos de compuerta diferentes de 500 nanómetros, 1 micrómetro y 5 micrómetros tienen en común que la razón de las separaciones laterales respecto al ancho de compuerta es el doble. En estas curvas de IG vemos que en la región lineal tienen las mismas pendientes y además están superpuestas y que las curvas de la corriente ID para valores de compuerta mayores (5 micras) se corren hacia valores de encendido y apagados menores dando como resultado una razón de encendido apagado menor. También se observa un corrimiento del voltaje de encendido V_{on} hacia la derecha, la disminución de las corrientes de encendido y apagado se debe a que las separaciones laterales tienen un menor efecto de campo principalmente a L_G más grandes.

La diferencia de la figura 4a respecto a la 4b es que hay un mayor corrimiento para la estructura de mayor separación hay que señalar que en esta figura 4b todas las razones comparadas son iguales a 1. Esto mismo sucede con las estructuras de prueba de [Vogt, 2018] solo que en este último caso sucede para densidades de portadores bajas. La explicación dada es que a menor concentración de portadores la región de agotamiento es mayor y por tanto el voltaje de apagado es menor.

Una concentración de dopado alta hace que el ancho de la región de agotamiento sea pequeña. Es necesario aplicar un voltaje inverso de compuerta Schottky grande para que se muestre el efecto de campo en la corriente fuente drenaje. Sin embargo, la corriente de fuga de compuerta limita el voltaje de compuerta a aplicar. Un canal grueso por tanto no puede ser completamente agotado. Así la zona del pinch-off y la saturación no pueden observarse.

De las diferentes estructuras simuladas en la tabla 2, se observa que la razón del ancho de compuerta respecto a la longitud lateral es importante, LL / L_G siendo la $LL=L_{GS}=L_{GD}$ L_{GS} y L_{GD} las longitudes laterales de fuente a compuerta y la longitud lateral de compuerta a drenaje simétricas respectivamente. El (*) significa que las curvas de L_D no alcanzaron la saturación y (NO) significa normalmente encendido por las siglas en ingles. Conforme esta razón aumenta de valores entre $0.25L_G$ - $2.5L_G$ la corriente de drenaje también lo hace.

Tabla 2 Parámetros resultantes del barrido de grosor del ZnO.

Grosor	67	70	72	74	76
$\Delta \frac{i_{on}}{i_{off}}$	0.66e8	8e7	7e7	3.5e7	3.25e4
ioff	6e-4	8e-4	7e-4	7e-4	6.5e-4
iD sat	0.43mA	0.48mA	0.55mA	0.57mA	0.61mA
ID-3	0.27mA*	0.33mA*	0.37mA*	0.42mA*	0.47mA
ID-4	0.1mA*	0.18mA*	0.22mA*	0.27mA*	0.31mA*
ID-5	0	0.015mA	0.012mA*	0.013mA*	0.02mA*
ID-6					
iL	9pA	10pA	10pA	20pA	2e-8
Von (NO)	-2.4V	-2.75V	-2.8V	2.99V	3.08V

Sin embargo, para valores de $10L_G$ y $16.7L_G$ las curvas de salida de I_D-V_D no presentan saturación en este rango, es decir continúan en la región lineal, indicándonos que la zona predominante es ahora la del canal, ya que no hay pinch-off del canal. Cabe señalar que los barridos de grosor fueron llevados a cabo con los parámetros previamente estudiados es decir $500 \text{ nm}=L_G=L_{GS}=L_{GD}$, $N_D=5.9 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, contactos de fuente y drenaje Óhmicos y contacto rectificador Schottky de Oro sobre un sustrato aislador de dióxido de Silicio.

De acuerdo con las simulaciones vemos que el grosor del ZnO influye en el V_{on} . Aunque a primera vista se ve una mayor razón de rectificación para 70 nm, no es tan diferente de los otros dos grosores.

Conforme se hace más grueso el ZnO de 67-80, él V_{on} se va corriendo poco a poco a valores más cercanos a -3 V, así mismo en 76 nm de grosor se nota un cambio en la i_{off} que aumenta tres órdenes de magnitud mientras la de encendido se mantiene prácticamente igual incrementando por tanto $\Delta \frac{i_{on}}{i_{off}}$.

La variación de las I_D son mínimas con este barrido (grosor de ZnO), e inclusive con la corrida de 2 micras de longitud de canal y separaciones también de 2, las corrientes de drenaje correspondientes a -6 y -5 V de V_G siguen del orden de decimas de mA mientras que las de -4 y -3V de voltaje de compuerta suben un orden de magnitud (mA).

Además, cuando el ZnO cambia de 67-80 micras de grosor, y él V_{on} se acerca a -3 V, entonces el V_{bi} medido en la curva de C-V es casi fijo se mantiene alrededor de 0.45 V. Conforme aumenta el grosor la curva de corriente de drenaje con -5 V de voltaje de compuerta empieza a perder la zona de saturación, es decir se queda en la zona lineal y no alcanza V_p a 2 V que es la referencia, tal vez lo alcanza pero a un voltaje mayor, esto sucede debido a que la capa de ZnO es demasiado gruesa y no se consigue agotar completamente el canal.

Por otro lado, si el grosor es tan delgado como 10 o 20 nm la zona activa estará limitada por el tamaño de partícula y la rugosidad. En resumen, cuando se tienen grosores mayores a 80 nm la limitante será que la zona de agotamiento no alcanza a agotar el canal y por tanto no se alcanza el punto de pinch-off y menos la

saturación, mientras para grosores delgados es el tamaño de partícula y la rugosidad.

La figura 5 muestra el comportamiento de la corriente de compuerta rectificadora en función del voltaje de compuerta. Comparando primeramente las curvas con compuerta de Oro con contactos ideales (Óhmicos, declarados en Silvaco como neutrales) y con contactos no ideales de Aluminio con una función trabajo de 4.3 eV observamos que la corriente de fuga para estos dos casos es muy pequeña del orden de $10 - 14 A/m$, y ruidosa varía alrededor de 6 órdenes de magnitud, esto no es conveniente cuando calculamos $\Delta \frac{i_{on}}{i_{off}}$ pues disminuye. Esto se debe principalmente a efectos térmicos ya que las corrientes son demasiado pequeñas, sin embargo, comparando con el contacto de compuerta rectificador de Paladio que tiene una función trabajo de 5.2 eV, esta ofrece una mejor estabilidad en las corrientes de encendido que se encuentran muy cerca de los valores de I_D para el Oro. Por tanto, también debemos observar los efectos del factor de idealidad, que depende inversamente de la pendiente y del voltaje térmico, y en el caso del Oro tenemos una mayor pendiente lo cual implica un menor factor de idealidad.

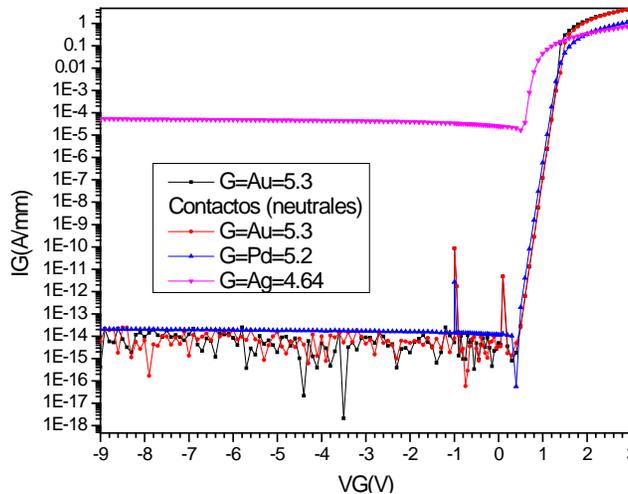


Figura 5 Comparación de las curvas I_G-V_G de las compuertas de Au, Pd y Ag.

La resistencia de canal para este mismo material Oro disminuye abruptamente como puede verse en la figura 6 donde las pendientes de la curva I_D-V_G cambian a valores más grandes cerca de 2 V, esto lo podemos corroborar en la figura 7.

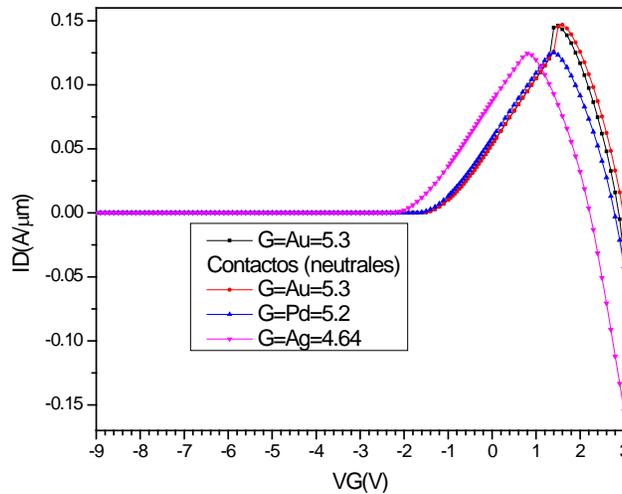


Figura 6 ID-VG con dos diferentes valores de VG, -2 y -1V.

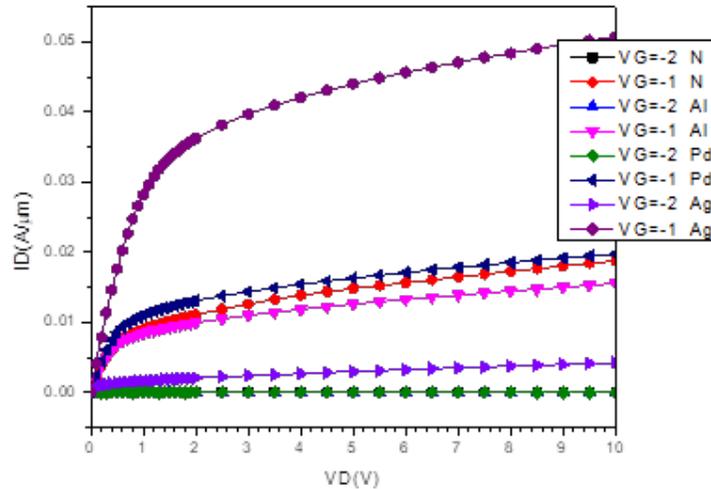


Figura 7 ID-VD con diferentes valores de VG.

En figura 7 las curvas del MESFET de contactos ideales y no ideales son las curvas de corriente de drenaje en función del voltaje de drenaje designados como $V_G=-2$ N, $V_G=-2$ Al, y $V_G=-2$ Pd, son 3 curvas con valores mínimos que se encuentran superpuestas en una sola y que nos indica que no hay diferencia entre el caso ideal y no ideal a este V_G que es el voltaje de compuerta fijado en -2 V. N significa la definición en Silvaco de neutrales (ideales), Al nos indica que consideramos la función trabajo no ideal para el Aluminio de 4.3 eV. En esta misma grafica vemos que la comparación es entre un grupo de 4 materiales, 2 para la compuerta rectificadora de Oro ideal y no ideal, el Paladio y la plata como las otras 2 opciones

del metal de la compuerta rectificadora. Como podemos observar para los valores de $V_G = -2$ V y -1 V el metal Plata usado como material de compuerta rectificadora es el que nos da las más grandes corrientes de drenaje a través del canal, lo cual implica una menor resistencia. En el caso de la figura 5 también podemos decir que para la Plata la corriente de encendido se incrementa casi 9 órdenes de magnitud lo cual disminuye la $\Delta \frac{i_{on}}{i_{off}}$, parámetro importante de la respuesta del MESFET.

La figura 8 muestra la corriente de compuerta en función del voltaje de compuerta en escala lineal con el objetivo de comparar los efectos en el diodo rectificador. Comparando el MESFET con contacto de compuerta rectificadora de Oro con contactos de drenaje y fuente ideales y de aluminio podemos observar un cruce de las dos graficas alrededor de los 2.7 V, este cruce es explicado en [Di, 2014] y es generalmente resultado de la activación de dopantes debido al incremento de temperatura y por tanto un incremento en la densidad de corriente. Y esto ocurre con la curva del MESFET de contacto rectificador de compuerta de Oro no ideal y con la compuerta de paladio.

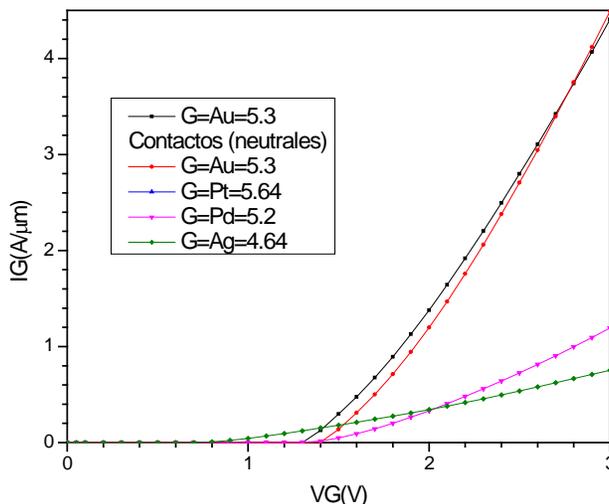


Figura 8 Comparación de las curvas $I_G - V_G$ de las compuertas de Au, Pd y Ag.

4. Discusión

Después de la variación de los anchos de compuerta LG, Longitudes laterales LL simétricas de diferentes grosores y diferentes tipos de metales de compuerta

rectificadora tipo Schottky se encontró que el MESFET que tiene una mejor razón de corriente de encendido respecto a la de apagado es la combinación de 500500500, esto simplemente observando la figura 3. De la tabla 2 se puede observar que el mejor grosor es el de 74 nm ya que nuevamente es el que indica una mejor razón de corriente de encendido respecto al de apagado.

Por otro lado, si el grosor es delgado 10- 20 nm la zona activa estará limitada por el tamaño de partícula y la rugosidad. Y cuando se tienen grosores mayores a 80nm la limitante será que la zona de agotamiento no conseguirá cerrar el canal y por tanto no se alcanza el punto de pinch-off y menos la saturación.

De la figura 4, al elegir separaciones laterales grandes implica usar valores de V_G mayores para poder activar la región de agotamiento, haciendo que el valor del voltaje de encendido se corra a valores más negativos y disminuye la razón de corriente de encendido respecto a la de apagado. Del análisis del material de compuerta de la figura 5 se seleccionan los valores del Oro y del Paladio que tienen valores de función trabajo apenas de una décima de diferencia lo cual hace más estable a este último.

En la figura 5 la corriente de fuga para el Oro es muy ruidosa y varia alrededor de 6 órdenes de magnitud, con respecto al paladio que es estable. Esto se debe principalmente a efectos térmicos ya que las corrientes son demasiado pequeñas, sin embargo comparando con el contacto de compuerta rectificador de Paladio que tiene una función trabajo de 5.2 eV este último ofrece una mejor estabilidad en las corrientes de encendido que se encuentran muy cerca de los valores de I_D para el Oro, por tanto también debemos observar los efectos del factor de idealidad, que depende inversamente de la pendiente y del voltaje térmico, y en el caso del Oro tenemos una mayor pendiente lo cual implica un menor factor de idealidad.

La resistencia de canal para este mismo material Oro disminuye abruptamente como puede verse de las pendientes de la curva I_D-V_G que cambian a valores más grandes, cerca de 2 V.

La corriente de compuerta en función del voltaje de compuerta en escala lineal muestra un cruce de las dos graficas alrededor de los 2.7 V, este cruce es explicado en [Di, 2014] y es generalmente resultado de la activación de dopantes debido al

incremento de temperatura y por tanto un incremento en la densidad de corriente, lo cual es observado con la curva del MESFET de contacto rectificador de compuerta de Oro no ideal y con la compuerta de paladio.

Con el MESFET de ZnO de 74 nm de grosor, separaciones laterales iguales a la longitud de compuerta de 500 nm y el ancho de canal de 50 micras, metal de compuerta rectificadora de Oro o Paladio, metales de contactos óhmicos de aluminio para la fuente y drenaje tenemos un factor de idealidad de 1.3, corrientes de fuga menores de 8.8×10^{-11} , y resistencia serie del orden de 0.076 ohms.

5. Conclusiones

Se realizó el estudio simulado para la optimización de una estructura MESFET de ZnO con una concentración de portadores libres de $5.9 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, se usaron contactos simétricos laterales e iguales al ancho de compuerta y para una mayor simplicidad se simularon como contactos Óhmicos ideales y se compararon con los no ideales, mientras que el contacto de compuerta fue simulado con las diferentes funciones trabajo correspondientes al oro, plata, y paladio definiéndose este último con el mejor desempeño. Se realizaron barridos de longitud de compuerta y de separaciones laterales de acuerdo a la tabla 1 y 2, encontrándose que el dispositivo de compuerta de Paladio tiene mejor respuesta de razón de corriente de encendido respecto a la de apagado $\Delta \frac{i_{on}}{i_{off}} = 1.24 \times 10^{10}$, para la estructura de 500 nm de L_G y $L_{GS}=L_{GD}$ también de 500nm. Se realizó también el barrido de diferentes grosores obteniendo también una mayor $\Delta \frac{i_{on}}{i_{off}}$ para un grosor de ZnO de 74 nm de la tabla 2, además de valores de V_{on} cercanos a -3 y voltajes umbrales cercanos a -1.6 V obtenidos del ajuste de la raíz de la ID en función de V_G si como voltajes de saturación del orden 2 cuando el $V_G=0$.

6. Bibliografía y Referencias

- [1] Elzwawi S, Hyland A., Lynam M., Partridge J. G., McCulloch D. G. and Allen M. W., Effect of Schottky gate type and channel defects on the stability of transparent ZnO MESFETs, *Semicond. Sci. Technol.* 30, pp.024008, 2015.

- [2] Allen M.W., Durbin S. M. and Metson J. B., Silver oxide Schottky contacts on n-type *ZnO*, *Appl. Phys. Lett.* 91, 053512, 2007.
- [3] Di Benedetto Luigi, Gian Domenico Licciardo, Member, IEEE, Roberta Nipoti, and Salvatore Bellone, Member, IEEE, On the Crossing-Point of 4H-SiC Power Diodes Characteristics, *IEEE Electron Device Letters*, vol. 35, no. 2, p. 1-3, February 2014.
- [4] Frenzel H., Lajn A., Brandt M., Von Wenckstern H., Biehne G., Hochmuth H., Lorenz M., and Grundmann M., *ZnO* metal-semiconductor field-effect transistors with Ag-Schottky gates, *Appl. Phys. Lett.* 92, 192108, 2008.
- [5] Frenzel H., Lajn A., Von Wenckstern H., Lorenz M., Schein F., Zhang Z., and Grundmann M., Recent progress on *ZnO*-based metalsemiconductor field-effect transistors and their application in transparent integrated circuits, *Adv. Mater.*, vol. 22, no. 47, pp. 5332–5349, Dec. 2010.
- [6] Grundmann M., H. Frenzel, A. Lajn, H. von Wenckstern, F. Schein, and M. Lorenz, *ZnO*-based MESFET Devices, *Mater. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 1201*, 2010.
- [7] Herbert B. Michaelson, The work function of the elements and its periodicity, *J. Appl. Phys.* 48, 4729, 1977.
- [8] Kao C. J., Kwon Y. W., Heo Y. W., Norton D. P., Pearton S. J., Ren F., and Chi G. C. , Comparison of *ZnO* metal-oxide-semiconductor field effect transistor and metal-semiconductor field effect transistor structures grown on sapphire by pulsed laser deposition, *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena* 23, 1024, 2005.
- [9] Klingshirn C., R. Hanschid, H. Priller, M. Decker, J. Zeller, H. Kalt, *Superlattices and Microstructures*, 38, pp. 209-222, 2005.
- [10] Klüpfel Fabian J., Holger von Wenckstern, and Marius Grundmann, Ring Oscillators Based on *ZnO* Channel JFETs and MESFETs, *Adv. Electron. Mater.*, 1500431, pp. 1-5, 2016.
- [11] Klüpfel Fabian Johannes, Friedrich Leonhard Schein, Michael Lorenz, Heiko Frenzel, Holger von Wenckstern, and Marius Grundmann, Comparison of

- ZnO*-Based JFET, MESFET, and MISFET, *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 60, no. 6, June 2013.
- [12] Lajn A., Wenckstern H. V., Zhang Z., Czekalla C., Biehne G., Lenzner J., Hochmuth H., Lorenz M., Grundmann M., Wickert S., Vogt C., and Denecke R., Properties of reactively sputtered Ag, Au, Pd, and Pt Schottky contacts on n-type *ZnO*, *J. Vac. Sci. Technol. B* 27, 1769-1773, 2009.
- [13] Lorenz M., H. von Wenckstern, and M. Grundmann, Tungsten oxide as a gate dielectric for highly transparent and temperature-stable zinc-oxide-based thin-film transistors, *Adv. Mater.*, vol. 23, no. 45, pp. 5383–5386, Dec. 2011.
- [14] Salina Muhamad, Mohamad Zainizan Sahdan, Mohamad.Haufiz Mamat and Mohamad Rusop, I-V Performances of Aligned *ZnO* Nanorods/MgO.3*ZnO*.7O Thin Film Heterojunction for MESFET Applications, 2010 International Conference on Enabling Science and Nanotechnology (ESciNano), 1-3 December 2010.
- [15] Schein F., H. von Wenckstern, H. Frenzel, and M. Grundmann, *ZnO*-based n-channel junction field-effect transistor with roomtemperature- fabricated amorphous p-type ZnCo2O4 gate, *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 33, no. 5, pp. 676–678, May 2012.
- [16] Schifano R., E. V. Monakhov, U. Grossner, and B. G. Svensson, Electrical characteristics of palladium Schottky contacts to hydrogen peroxide treated hydrothermally grown *ZnO*, *Appl. Phys. Lett.* 91, 193507, 2007.
- [17] Sze, *Semiconductor Devices Physics Technology*, 2nd Ed, Wiley, pp. 242, 2002.
- [18] Vogt Sofie, Holger von Wenckstern, and Marius Grundmann, MESFETs and inverters based on amorphous zinc-tin-oxide thin films prepared at room temperature, *APPLIED PHYSICS LETTERS* 113, 133501, 2018.
- [19] Von Wenckstern H., Z. P. Zhang, M. Lorenz, C. Czekalla, H. Frenzel, A. Lajn and M. Grundmann, Light beam induced current measurements on *ZnO* Schottky diodes and MESFETs, *Mater. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 1201*, 2010.