

Microsensor MOS de compuerta extendida (EGFET) para detección de gas CH_4

Hernández-Domínguez, I.¹, Salas-Rodríguez, S.¹,
López-Huerta, F.^{1,2}, Martínez-Castillo, J.^{1,2*}

¹ Centro de Investigación en Micro y Nanotecnología; Universidad Veracruzana;
Calzada Ruiz Cortines 455, Boca del Río, Veracruz, C.P. 94294, México.

² Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica; Universidad Veracruzana; Calzada
Ruiz Cortines 455, Boca del Río, Veracruz, C.P. 94294, México.

indirahdez12345@gmail.com; ssalas84@gmail.com; frlopez@uv.mx; jaimartinez@uv.mx

Resumen

En este trabajo se presenta una estructura base principal de un microsensor CMOS (Semiconductor Complementario de Óxido Metálico) de compuerta extendida donde se le ha incorporado una capa de Óxido de Vanadio (VO_2) como membrana de detección de gas Metano CH_4 con el propósito de analizar el comportamiento del dispositivo propuesto. El microsensor completo se compone de un transistor NMOS y una compuerta extendida EGFET (Transistor de Efecto de Campo de Compuerta Extendida), usando el proceso de fabricación CMOS ON Semiconductor de $0.5\ \mu m$ de longitud de canal con voltajes de polarización V_{DS} menores a 1V y voltaje V_{GS} menores a 1V, con el fin de que trabaje en la región lineal. Las simulaciones fueron realizadas en TopSPICE presentando un comportamiento óptimo. Se presentan resultados de simulaciones de curvas características I_{DS} vs V_{DS} del layout y simulaciones numéricas 2D con la película de membrana sensitiva de VO_2 usando el software silvaco TCAD.

Palabras clave: Detector EGFET CMOS de CH_4 , Sensor CMOS, Sensor EGFET CMOS, Sensor óxido de Vanadio (VO_2), Transistor CMOS.

Abstract

In this article, the main structure of an extended gate CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) microsensor is presented where a Vanadium Oxide (VO_2) layer has been incorporated as a Methane gas (CH_4) detection membrane to analyze the behavior of the proposed device. The complete microsensor is composed of an NMOS transistor and an extended gate EGFET (Extended Gate Field Effect Transistor), using ON Semiconductor CMOS manufacturing process of $0.5\ \mu m$ channel length, with V_{DS} bias voltages less than 1V and V_{GS} voltage less than 1V, for it to work in the linear region. The simulations were performed in TopSPICE software showing an optimal behavior. I_{DS} vs V_{DS} characteristics curve simulations of the layout and 2D numerical simulations with the VO_2 sensitive membrane film using the silvaco TCAD software are presented.

Key Words: CH_4 CMOS EGFET Detector, CMOS Sensor, CMOS EGFET Sensor, Vanadium Oxide (VO_2) Sensor, CMOS Transistor.

I. Introducción

En el siglo XVIII en un estudio donde emergían burbujas de un pantano inundado fueron identificadas y nombradas como metano por el físico Alessandro Volta, nadie imaginaría la gran importancia que tendría este gas para el desarrollo de la humanidad a lo largo de los siglos [1]. Este gas metano tiene las características especiales de no poseer olor ni color por lo que escapa a los sentidos del ser humano. Además, es de gran importancia considerar que, dependiendo de su concentración en el aire, este gas puede ser altamente inflamable y explosivo [2]. Por otra parte; el gas metano, definido como CH_4 , es abundante en la naturaleza y forma la parte más importante del gas natural que es ampliamente utilizado tanto en la industria como en los hogares, y que al ser inhalado por el ser humano en altas concentraciones puede provocar la muerte [2]. Aparte, el CH_4 tiene un alto impacto en el medio ambiente, ya que es uno de los principales gases de efecto invernadero, sólo por debajo del Dióxido de Carbono CO_2 [3], además tiene la particularidad de que no interactúa tan fácilmente con diversos materiales, porque es muy difícil de absorber, física o químicamente, debido a la alta estabilidad de su forma molecular; e igualmente, un gran porcentaje es generado de forma natural, ya sea por actividades humanas como la agricultura, minería, o incluso existencia de CH_4 bajo sedimentos marinos [4]. Actualmente, en algunos sensores que detectan CH_4 dependen del calentamiento del dispositivo, es decir, que físicamente, trabajan a temperaturas altas, provocando un aumento en el consumo de corriente y potencia ocasionando que el equipo no puede ser portable para diversas aplicaciones en distintos lugares. Otro problema es el tipo de material que se emplea para absorber el gas metano, dicho material no tiene un buen nivel de sensibilidad debido a su baja y lenta respuesta de velocidad, también el costo de fabricación de los sensores es muy elevado y son dispositivos muy grandes y voluminosos; o incluso no se ha podido fabricar un dispositivo que pueda cumplir con todas las características y especificaciones necesarias para la detección de gas CH_4 [5]. Por todas las razones anteriores, se presenta el diseño de un microsensor NMOS con compuerta extendida incluyéndole una película de Óxido de Vanadio (VO_2) como membrana de detección de gas metano CH_4 con el fin de que cumpla con polarización a bajo voltaje, consumo de potencia mínima, geometría pequeña, comportamiento lineal, velocidad de respuesta rápida y opere a diferentes temperaturas. El resto de este documento está organizado de la siguiente manera: La sección 2 describe el estado del arte de los tipos microsensors EGFET (Transistor de Efecto de Campo de Compuerta Extendida). La sección 3 se presenta la propuesta del detector de gas metano y los resultados obtenidos. Finalmente, en la sección 4 se dan las conclusiones y el trabajo futuro.

II. Transistor CMOS con compuerta extendida para detección CH₄

Hoy en día existe un alto interés en la disminución de tamaño de sistemas y sensores de gas, especialmente para monitorear gases ambientales como son el Monóxido de Carbono (CO) y el gas metano (CH₄); existen diversos materiales sensibles para detectar estos gases, los más utilizados son los óxidos semiconductores, tales como el Óxido de Estaño (SnO₂), Óxido de Indio (In₂O₃) y Óxido de Tungsteno (WO₃). Estos funcionan cuando se encuentran en altas temperaturas, para ello se integra al material sensible un calentador resistivo, impulsado por un transistor de potencia, que se emplea para calentar la placa que contiene la capa del óxido semiconductor. No obstante, este tipo de calentador no es confiable arriba de 350°C ya que se genera una electromigración entre los metales de las interconexiones [6]. Aún y con todo lo anterior, toda la investigación sobre sensores de gas se dirige hacia una integración tecnológica completa y adecuada como lo es la tecnología CMOS (CMOS.- Complementary Metal Oxide Semiconductor, de sus siglas en inglés). Ya que los sensores de gas de estado sólido abarcan una amplia gama de procesos tecnológicos entre los que se encuentran los sensores químico-resistivos,

los cuales por su simplicidad en diseño y operación lo convierten en un adecuado candidato para la integración en tecnología CMOS [7]; eso sin mencionar el bajo consumo de energía por parte del sensor, señales eléctricas confiables y bajos costos de producción en comparación con un enfoque multicircuitos que de por sí sola la estructura monolítica ya tiene como ventajas todas las anteriores [6]. No obstante, no debemos dejar atrás las limitaciones de la tecnología CMOS que en cierto momento llega a volverse un problema, hablamos de los materiales y capas establecidos por los procesos tecnológicos de fabricación, las temperaturas máximas de operación, procesamiento y funcionamiento de los elementos CMOS, por lo cual se han buscado alternativas a fin de que no se vuelvan obstáculos en la topología clásica de sensores de gas que conocemos normalmente. Una de estas variantes es la EGFET (EGFET.- *Extended Gate Field Effect Transistor*, de su acrónimo en inglés) cuya estructura es la que se toma como base de nuestra propuesta [7].

II.I. Transistor de Efecto de Campo con Compuerta Extendida (EGFET)

El EGFET es un elemento desarrollado a partir de la tecnología ISFET (ISFET.- Ion Sensitive Field Effect Transistor, por sus siglas en inglés) que fue presentado por primera vez por J. van der Spiegel et al. (1983) [8] [9]. La estructura de un EGFET está compuesta principalmente por un MOSFET (MOSFET.- Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor, por su acrónimo en inglés) [10] convencional donde se reserva el área de la puerta MOSFET con la única diferencia de la capa de detección se deposita lejos de la puerta, ya que esta área se diseñó para estar lejos del transistor MOS, lo que permite obtener una mayor superficie para la detección y al mismo tiempo se mantiene alejada del contacto directo con los componentes del MOSFET [9]. Una de las ventajas de utilizar esta estructura es la capacidad de cubierta de la pasivación [10], proporciona estabilidad a largo plazo de las variaciones en el medio ambiente, facilita el aislamiento y el encapsulado, y hace que sea posible variar la geometría de la membrana de detección más fácilmente. Como se puede observar en la figura 1, la estructura del transistor EGFET consta de 3 elementos principales que son: 1. un transistor NMOS que tenga una alta impedancia a la entrada, 2. una línea alargada que produce la extensión y lo ideal sería que estuviese blindada y 3. la placa almohadilla que funciona como el área sensible, la cual termina al final de la línea extendida y se caracteriza por una baja impedancia; por consiguiente, mayor conductividad y mejor sensibilidad. Así la placa almohadilla pueda quedar fuera del chip y es la única que está en contacto con la partícula de interés a detectar [9].

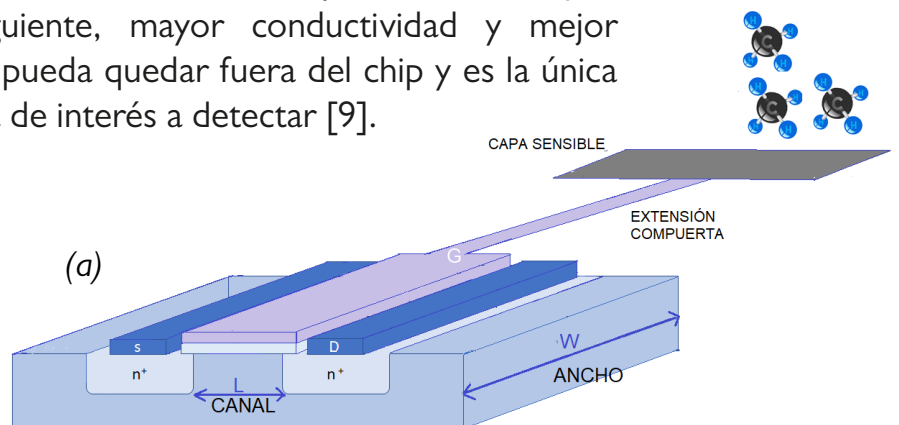
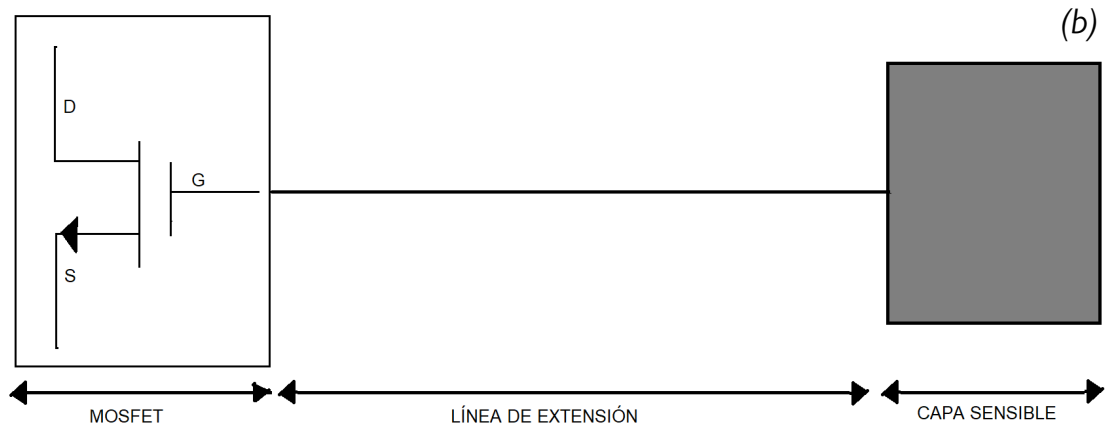


Figura 1. (a) Sección de un dispositivo basado en tecnología de transistor de efecto de campo de puerta extendida (EGFET) (no a escala); y (b) esquema de un transistor de efecto de campo de puerta extendido separativo (SEGFET) [9].



Esta arquitectura se ha utilizado para diversas aplicaciones, la más significativa es para la detección de pH, uno de los primeros trabajos fue el reportado en [11] donde se realizó un estudio que utiliza el Óxido de Estaño (SnO_2), obtenido por pulverización catódica, como membrana de detección de los iones en una solución; sin embargo, también se experimentó otra membrana SnO_2 mediante la síntesis sol gel con el proceso de Pechini como fue reportado en [12] otra investigación realizada por [13] presentó un sensor de bajo costo que utiliza electrodos encapsulados de ITO/PET en el que también el SnO_2 es aplicado como material de detección, pero con una síntesis por micro maquinado con láser en tereftalato de polietileno (PET.- Polyethylene Terephthalate, de sus siglas en inglés). También, los EGFET se han empleado como biomarcadores: [14] detección de complejos de proteínas de estreptavidina-biotina usando un canal microfluídico de silicio en una monocapa autoensamblada (SAM) de Oro (Au) con tiol, fabricado en una tecnología de semiconductores IC y el sistema microelectromecánico (MEMS); [15]

inmovilización de sondas de ADN en una superficie de Oro (Au) y su aplicación para una detección completamente eléctrica de hibridación de ADN; [16] detección selectiva de iones de Calcio (Ca) utilizando nanorods de Óxido de Zinc (ZnO) funcionalizados; [17] detección de pesticidas de carbarilo basado en un ensayo de inhibición enzimática sobre un sustrato de vidrio de óxido de indio y estaño (ITO). Inclusive se han utilizado en multidetecciones simultaneas como es en [9] donde se utiliza un EGFET como empaquetado en microcanales para la detección de biomarcadores de glucosa, urea y proteínas. Sin embargo, el transistor en arquitectura EGFET fue utilizado para la detección de gases, de los cuales podemos mencionar los siguientes: sistema de detección de Dióxido de Carbono (CO_2) disuelto basado en EGFET de alto rendimiento con un electrodo de microreferencia empaquetado en tecnología planar [18] y desarrollo de microsensors basados en EGFET con alta sensibilidad y alta linealidad para la detección de Oxígeno disuelto y Dióxido de Carbono (CO_2) basados en los procesos tecnológicos MEMS (MEMS.- Micro electromechanical systems, de sus siglas en inglés) para aplicaciones de monitoreo de calidad del agua [19]. En la tabla 1, se presentan diferentes trabajos basados en los EGFET. De manera cronológica muestran como fueron evolucionando en su desarrollo para diferentes aplicaciones empleando distintos materiales como membranas de detección.



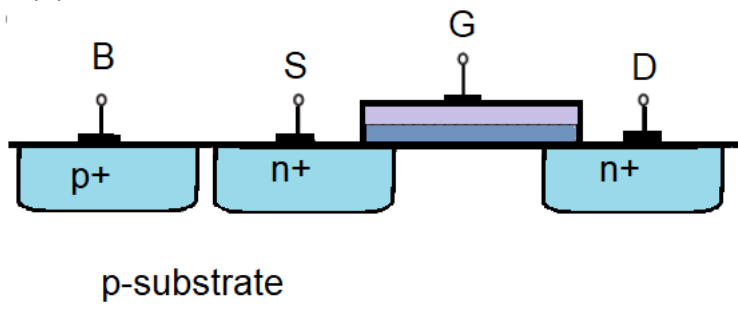
Tabla 1.- Trabajos realizados con Transistor de Efecto de Campo de Compuerta Extendida EGFET

FECHA	VARIABLE POR DETECTAR	MATERIAL	ÁREA DETECCIÓN	TIPO DE SÍNTESIS	TAMAÑO ESTRUCTURA	REFERENCIA
abr-06	ADN	Oro Au	0.4 x 0.4 mm	N/E	Electrodo de oro Au	Inmovilización de sondas de ADN en superficie de oro y su aplicación para una detección completamente eléctrica de hibridación de ADN por sensor de transistor de efecto de campo [15]
jun-06	pH	Óxido de Estaño SnO ₂	N/E	Sol gel y proceso de Pechini	N/E	El transistor de efecto de campo de compuerta extendida SnO ₂ como sensor de pH [12]
feb-09	pH	Película delgada de Pentóxido de Vanadio V ₂ O ₅	N/E	Sol-gel	N/E	Transistor de efecto de campo de puerta extendida que utiliza la membrana de detección de xerogel V ₂ O ₅ por el método sol-gel [20]
jul-09	iones de calcio Ca ²⁺	Nanorods de ZnO	N/E	N/E	Diámetro 125nm ± 25nm longitud 700nm ± 100nm	Detección selectiva de iones de calcio con nanorods ZnO funcionalizados - MOSFET de puerta extendida [16]
oct-12	pH	Nanorods de SnO	N/E	Sintetizados hidrotérmicamente a baja temperatura	Diámetro 50nm, longitud 150nm	Un transistor de efecto de campo de puerta extendida con sintetizado hidrotérmicamente a baja temperatura Nanorods como sensor de pH [21]
sep-14	Dióxido de Carbono (CO ₂)	N/E	1mm ²	Tecnología planar estándar	N/E	Sistema de detección de dióxido de carbono disuelto basado en transistor de efecto de campo extendido de alto rendimiento con un electrodo de microrreferencia empaquetado [18]
dic-14	pH	TiO ₂	N/E	N/E	N/E	Circuito integrado de interfaz de lectura con transistor de efecto de campo de puerta (EGFET) para detección de pH [22]
dic-14	Iones de hidrógeno en soluciones de tampón de pH	Óxido de paladio PdO	N/E	Evaporación haz de electrones reactivo y posterior oxidación térmica en un flujo óptimo de O ₂	Película de 130nm de espesor	FET de compuerta extendida de óxido fino de paladio altamente sensible como sensor de pH [8]

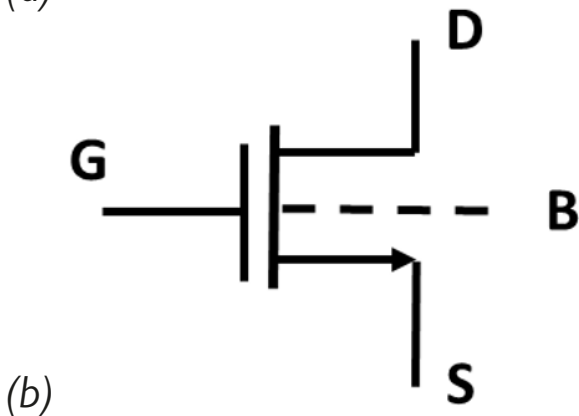
abr-15	pH	TiO ₂	1cm x 1xm	Sol gel	N/E	Sistema de detección de pH paralelo MOSFET de puerta extendida [23]
nov-15	pH, glucosa, urea y proteínas	Óxido Nativo Al ₂ O ₃	N/E	N/E	Espesor 50-80nm	Transistor de efecto de campo de puerta extendida empaquetado en microcanales para la detección de biomarcadores de glucosa, urea y proteínas [9]
dic-15	Inosina, biomarcador de disfunción renal	Película de polímero (MIP)	N/E	Electropolimerización potenciodinámica	Espesor de la película 209 ± 5nm	Transistor de efecto de campo de puerta extendida (EG-FET) con película de polímero con impresión molecular (MIP) para la determinación selectiva de inosina[26]
jun-16	pH	Silicio poroso (Psi)	N/E	Anodización de una oblea de silicio	Tamaño de poros de 500-750nm, profundidad 42µm	Sensor de pH de alta sensibilidad basado en transistor de efecto de campo de puerta extendida de silicio poroso (PSi) [24]
jul-17	Pesticida de carbarilo	Sustrato de Vidrio de Óxido de Indio y Estaño (ITO)	N/E	N/E	N/E	Transistor de efecto de campo de puerta extendida (EGFET) para la detección de pesticidas de carbarilo basado en un ensayo de inhibición enzimática [17]
feb-18	pH	Películas multicapa ZnO / Ag / ZnO (ZAZ) sobre sustrato de vidrio	N/E	Pulverización magnetronica de RF y DC	Espesor (200/100/200) nm, (100/50/100) nm,	Capa media de metal de Ag basada en el nuevo transistor de efecto de campo de puerta extendida de estructura multicapa de detección (EG-FET) para sensor de pH [25]
may-18	pH	Óxido de Estaño (ITO) micromaquinado con láser en Tereftalato de Polietileno (PET)	43mm ²	Micromaquinado con láser	Espesor total hoja 127µm incluyendo 130 nm de ITO pulverizado en un lado	Sensor de pH basado en EGFET de bajo costo que utiliza electrodos encapsulados de ITO / PET [13]

III. Desarrollo y Resultados

Basado en los estudios previos, se muestra el diseño del dispositivo basado en un transistor NMOS con compuerta extendida EGFET con una capa de película de Óxido de Vanadio (VO_2). Iniciamos con la estructura típica del transistor MOS de canal N de un proceso tecnológico de fabricación que se presenta en la figura 2. Podemos observar, en la figura 2(a), el corte transversal de un transistor NMOS fabricado en una oblea (substrato) de silicio tipo p, indicándonos sus terminales drenador (drain, D), fuente (source, S), compuerta (gate, G) y el cuerpo (bulk, B) así como la representación eléctrica del transistor NMOS, mostrada en la figura 2(b).



(a)



(b)

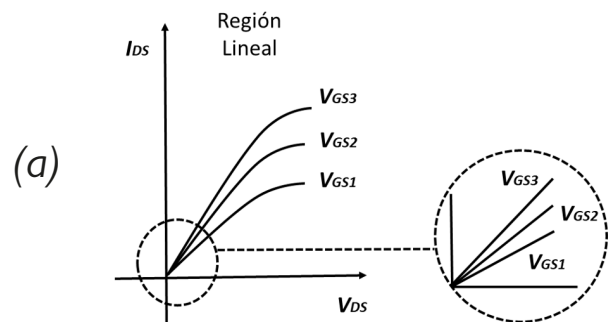
Figura 2. (a) Sección transversal de un transistor NMOS y (b) Representación eléctrica.

Una vez polarizado el transistor NMOS, y dependiendo de los voltajes aplicados en sus terminales, se consideran sus dos regiones de operación, lineal y saturación, dadas por la representación en las **Ec. (1) y (2)**, respectivamente:

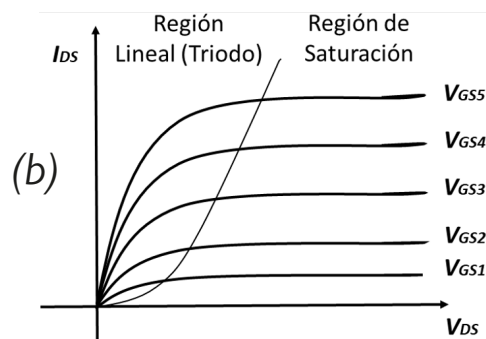
$$I_{DS} = \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} \left[(V_{GS} - V_{TH}) V_{DS} - \frac{1}{2} V_{DS}^2 \right] \quad (1)$$

$$I_{DS} = -\frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{TH})^2 \quad (2)$$

donde I_{DS} es la corriente de drenador a fuente obtenida, V_{DS} es el voltaje aplicado de drenador a fuente, V_{GS} voltaje aplicado de compuerta a fuente, V_{TH} es el voltaje de umbral, C_{ox} es la capacitancia de óxido, μ_n es la movilidad de los electrones, W es el ancho y L es la longitud del canal del transistor NMOS. El comportamiento de las ecuaciones 1 y 2 lo podemos ver en las gráficas de la figura 3, donde se presenta las curvas características I_{DS} vs V_{DS} en su región lineal y saturación, respectivamente.



(a)



(b)

Por todo lo anterior, se procedió a realizar el diseño de la propuesta EGFET en un patrón geométrico (layout) como se presenta en la figura 4. Este layout del EGFET fue planeado usando las reglas de diseño del proceso de fabricación CMOS ON Semiconductor de $0.5 \mu\text{m}$. Utilizando el software *L-Edit*, se realiza el transistor NMOS con un tamaño de longitud de canal, L , de $1.8 \mu\text{m}$ y un ancho del transistor, W , de $18 \mu\text{m}$, teniendo una relación de W/L de 10.

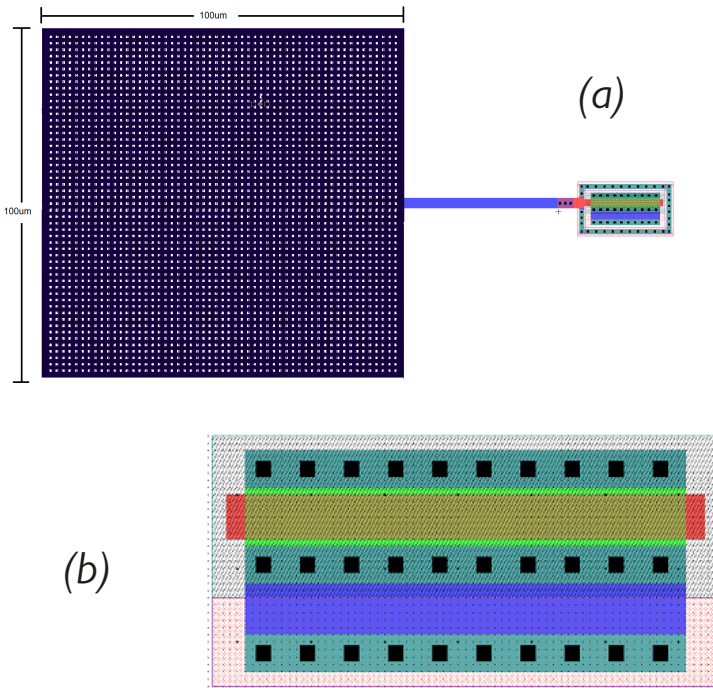


Figura 4. Diseño del patrón geométrico del transistor NMOS con compuerta extendida, EGFET, (a) layout de la compuerta extendida de $100 \times 100 \mu\text{m}$ y (b) del transistor NMOS.

Para obtener las curvas características I_{DS} vs V_{DS} de la propuesta de diseño del EGFET, se procedió a simular el circuito eléctrico extraído del layout de la siguiente manera, observe la figura 5, variando los voltajes de polarización V_{DS} , V_{GS} y utilizando los parámetros del proceso de fabricación CMOS ON Semiconductor de $0.5 \mu\text{m}$ para el transistor NMOS nivel 49.

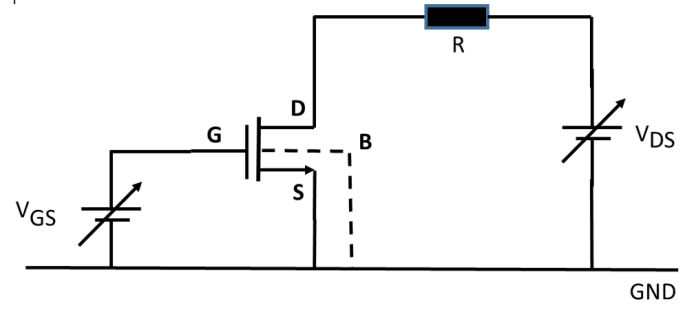
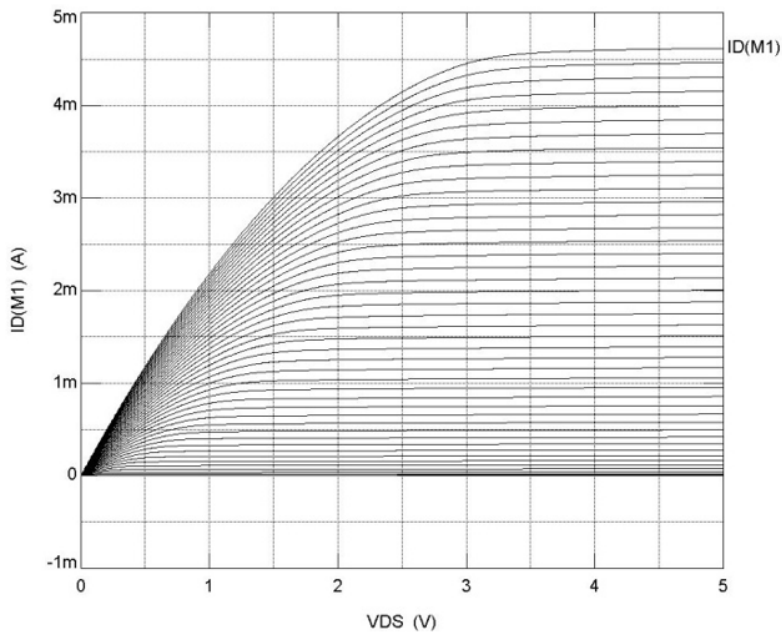


Figura 5. Diagrama eléctrico del transistor NMOS en arreglo EGFET con variación V_{DS} y V_{GS} .

Los resultados de la simulación los podemos observar en la figura 6. Los voltajes de barrido en V_{DS} fueron de 0 a 5 volts con incrementos de 0.005 volts y en V_{GS} el barrido de 0 a 5 volts con incrementos de 0.1 volt en la figura 6(a). Para un barrido de 0 a 1 volts con incrementos de 0.1 volt en V_{GS} es presentado en la figura 6(b). Una vez acreditado el comportamiento del transistor NMOS del EGFET se procede a dejar fijo un voltaje de V_{GS} de 0.8 volts con un barrido de V_{DS} de 0 a 5 volts. Emulando el comportamiento de la capa sensible de Óxido de Vanadio en la compuerta del transistor NMOS se procedió a colocar una fuente de voltaje en serie, definida como $\Delta V_{GS} VO_2$, como señal generada en la presencia y detección de gas metano, con el voltaje V_{GS} . Por lo que las expresiones de las regiones lineal y saturación se vieron modificadas por las **Ec. (3) y (4)**:

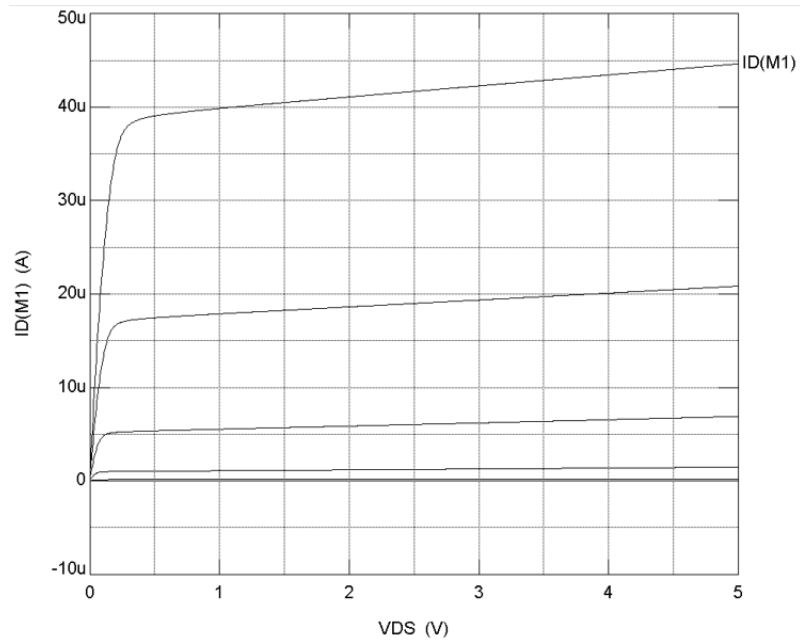
$$I_D = \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} \left[((V_{GS} + \Delta V_{GS} VO_2) - V_{TH}) V_{DS} - \frac{1}{2} V_{DS}^2 \right] \quad (3)$$

$$I_D = -\frac{1}{2} \mu_p C_{ox} \frac{W}{L} ((V_{GS} + \Delta V_{GS} VO_2) - V_{TH})^2 \quad (4)$$



(a)

Figura 6. Curvas características I_{DS} vs V_{DS} del arreglo EGFET tipo N variando V_{DS} y V_{GS} .



(b)

Para obtener las curvas características I_{DS} vs V_{DS} de la propuesta de diseño del EGFET con la película sensible de Óxido de Vanadio, se procedió a simular el circuito eléctrico mostrado en la figura 7.

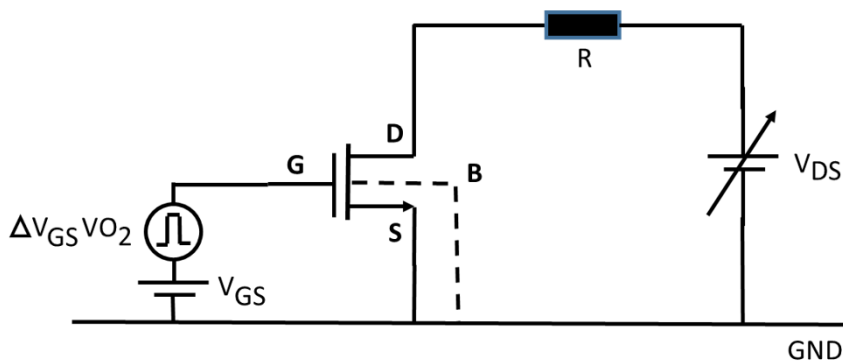
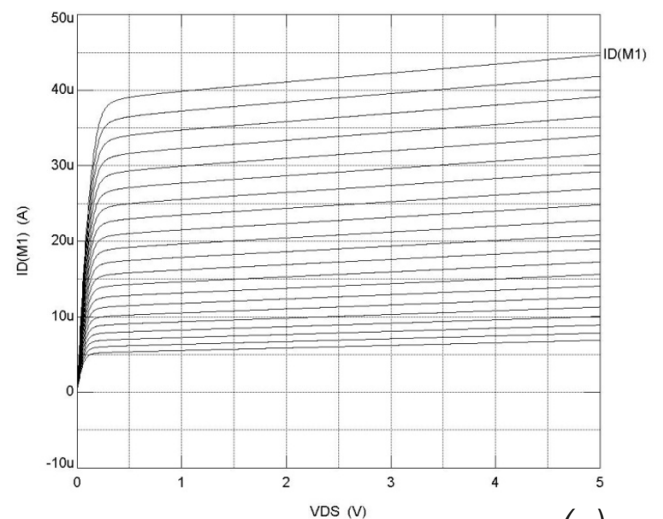


Figura 7. Diagrama eléctrico del transistor NMOS en arreglo EGFET con la capa sensible de Óxido de Vanadio representada por $\Delta V_{GS}VO_2$, con variación de 0 a 200mV con incrementos de 10mV.

Los resultados de la simulación de las curvas características las podemos ver en la figura 8. El voltaje de barrido en V_{DS} fue de 0 a 5 volts con incrementos de 0.005 volts y V_{GS} con un valor fijo de 0.8 volts. El barrido de la fuente de voltaje $\Delta V_{GS}VO_2$ se propuso de 0 a 200 mV con incrementos de 10 mV,

es mostrado en la figura 8(a), esto con el objetivo de tener una visualización de la variación de resistencia de la película de Óxido de Vanadio de $22M\Omega$ a $30M\Omega$ y una detección de 0 a 500ppm de gas metano de acuerdo con la literatura. Para la región lineal, un barrido de 0 a 50 mV con incrementos de 5 mV en V_{DS} y el voltaje de barrido de $\Delta V_{GS}VO_2$ fue de 0 a 200 mV con incrementos de 10 mV y V_{GS} de 0.8 volts como valor constante, por lo que, esta región de operación lineal puede ser observada en la figura 8(b).



(a)

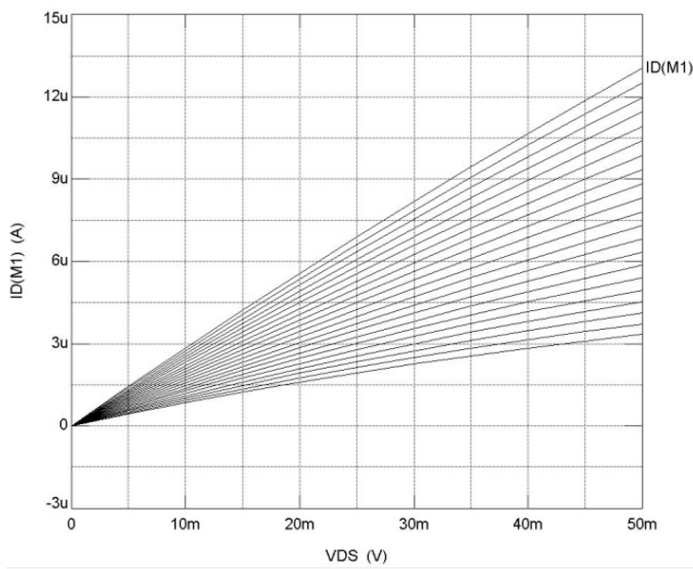


Figura 8. Curvas características I_{DS} vs V_{DS} del EGFET tipo N con la emulación de la película de Óxido de Vanadio dada por fuente por $\Delta V_{GS} VO_2$. (a) Representación de la región de saturación y (b) región lineal.

Con el fin de comparar los resultados obtenidos de las simulaciones eléctricas mediante TopSPICE se desarrollaron simulaciones numéricas 2D para un transistor tipo N EGFET sin y con una capa de VO_2 como membrana de detección del gas CH_4 utilizando el software Silvaco TCAD a través de las herramientas Atlas y Devedit (Santa Clara, CA, EE. UU.) [27]. Esta herramienta de simulación utiliza el método de elementos finitos para realizar el análisis electrostático. En la figura 9 podemos observar la vista esquemática de la sección transversal del transistor NMOS y los resultados de las curvas características I_{DS} vs V_{DS} son presentadas en la figura 10. Cabe mencionar que las corrientes I_{DS} obtenidas del transistor NMOS deben multiplicarse por $18 \mu m$ que es el ancho (W) del transistor NMOS. La figura 11 muestra una vista esquemática de la sección transversal del dispositivo propuesto del transistor tipo N EGFET con la película VO_2 . Los parámetros principales de la capa de VO_2 son los siguientes: longitud de compuerta,

$l_g = 1.8 \mu m$, banda prohibida, $E_g = 2.35 eV$, constante de permitividad, $\epsilon_r = 50$. Para el transistor NMOS, los parámetros principales son: longitud de canal (L_g) de $1.8 \mu m$, el dieléctrico de compuerta es Óxido de Silicio, SiO_2 , con un espesor $T_{ox} = 4.1 nm$. Los electrodos de compuerta y de drenaje/fuente son de aluminio con un espesor T_G y T_D/T_S de $100 nm$, respectivamente. Se utiliza una longitud de traslape entre los electrodos de compuerta y de drenaje/fuente de $L_{OV} = 10 nm$. Se emplea una región de extensión con espesor $T_{EXT} = 40 nm$ y longitud $L_D/L_S = 2 nm$. El nivel de dopado del sustrato de silicio es de $1e15 cm^{-3}$. Las regiones de alto nivel de dopado para asegurar un buen contacto óhmico entre los electrodos de drenaje y fuente son de $1e19 cm^{-3}$, con un perfil de dopado de $0.15 \mu m$. Los resultados de la simulación numérica 2D de las curvas características I_{DS} vs V_{DS} obtenidas, las podemos observar en la figura 12. Los voltajes de barrido en V_{DS} fueron de 0 a 5 V y en V_{GS} el barrido de 0 a 1V con incrementos de 0.1V.

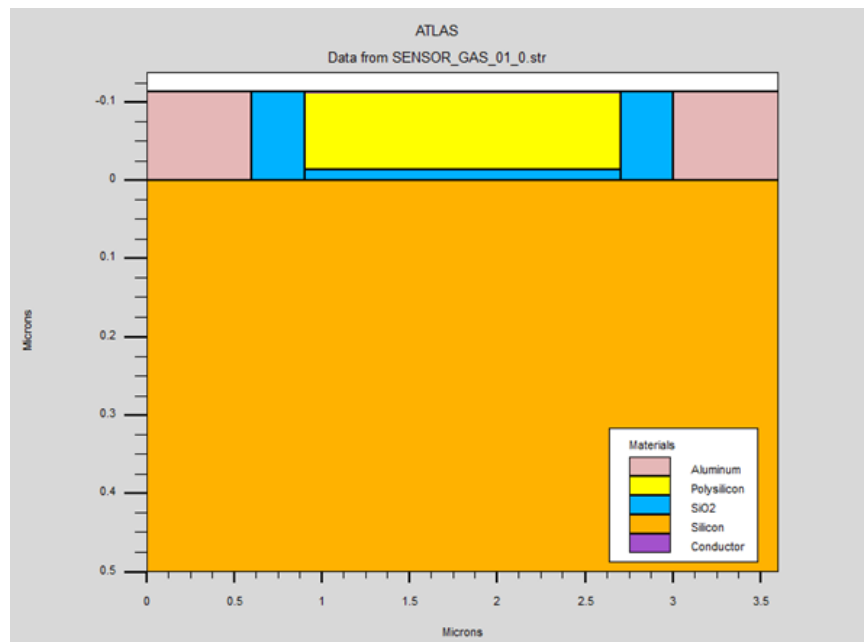


Figura 9. Sección transversal del transistor NMOS usando TCAD [27].

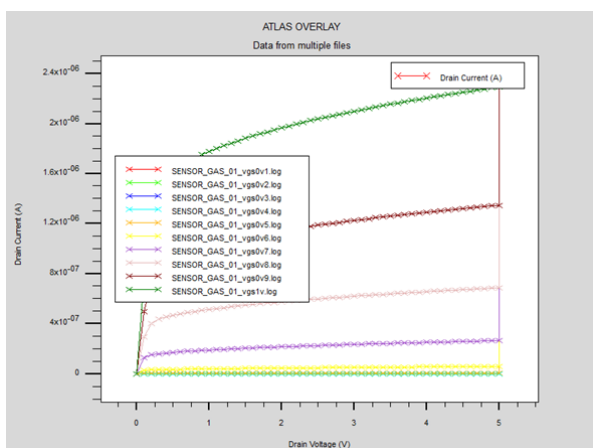


Figura 10. Curvas características I_{DS} vs V_{DS} de simulaciones numéricas 2D [27] del transistor NMOS.

Figura 11. Sección transversal del transistor NMOS EGFET con la capa de VO_2 usando TCAD [27].

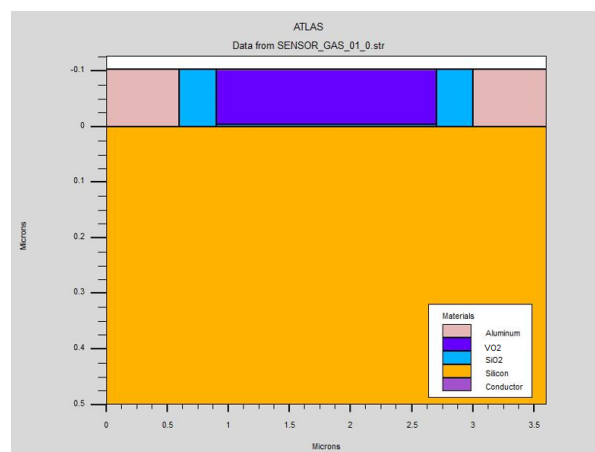
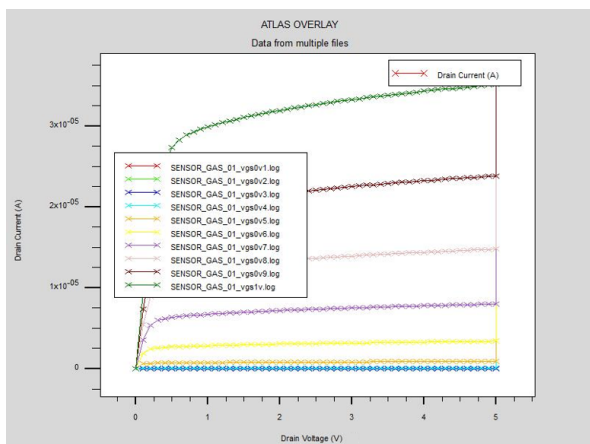


Figura 12. Curvas características I_{DS} vs V_{DS} de simulaciones numéricas 2D [27] del transistor NMOS EGFET con la película sensible VO_2 .



IV. Conclusiones

El diseño de un microsensor que detecta gas metano CH_4 basado en un arreglo entre un transistor tipo N y una compuerta extendida (EGFET) incorporando una capa sensible de Óxido de Vanadio (VO_2) como membrana de detección fue propuesto y analizado. Se aprecia claramente en las simulaciones dadas por el software TopSPICE al realizar el comparativo de las Figuras 6 y 8 la interacción de gas metano con el transistor, debido a un pequeño desplazamiento en las curvas características del transistor dado por la suma del voltaje adicional de la fuente $\Delta V_{GS} VO_2$. Aún más notorio es en las simulaciones realizadas con el software Silvaco TCAD donde se ve un aumento considerable en la I_{DS} de la Figura 12 lo que nos hace entender que la capa sensible de Óxido de Vanadio (VO_2) permite que el campo generado por el transistor se forme a una velocidad mayor alcanzando las regiones de corte y las regiones de saturación antes que el transistor normal de la figura 10. Las simulaciones realizadas presentaron un correcto funcionamiento a polarizaciones a bajo voltaje, corriente de polarización baja, consumo de potencia mínimo, comportamiento lineal en rangos de los voltajes de alimentación bajos y también el área geométrica mínima. Como trabajo futuro se realizará un arreglo matricial de microsensors EGFET con película del Óxido de Vanadio (VO_2) y además la fabricación de ambas propuestas de diseño para su medición experimental, individual y matricial.

Agradecimientos

Los autores reconocen al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca 716996 otorgada.

Referencias

- [1] D. Hrs. . *Reay, Methane and climate change Elektronische Ressource*, no. December 2016. 2010.
- [2] X. Chen, Z. Huang, J. Li, C. Wu, Z. Wang, and Y. Cui, "Methane gas sensing behavior of lithium ion doped carbon nanotubes sensor," *Vacuum*, vol. 154, no. February, pp. 120-128, 2018. doi: <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2018.04.053>
- [3] N. S. Lawrence, "Analytical detection methodologies for methane and related hydrocarbons," *Talanta*, vol. 69, no. 2 SPEC. ISS., pp. 385-392, 2006. doi: <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2005.10.005>
- [4] J. Kim, A. Maiti, L. C. Lin, J. K. Stolaroff, B. Smit, and R. D. Aines, "New materials for methane capture from dilute and medium-concentration sources," *Nat. Commun.*, vol. 4, pp. 1694-1697, 2013. doi: <https://DOI: 10.1038/ncomms2697>
- [5] L. C. Alvarez, "CMOS interface circuits for metal-oxide gas sensors," National Institute for Astrophysics, Optics and Electronics, 2014. <http://inaoe.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1009/316>
- [6] D. Barlettino, M. Graf, S. Taschini, S. Hafizovic, C. Hagleitner, and A. Hierlemann, "CMOS monolithic metal-oxide gas sensor microsystems," *IEEE Sens. J.*, vol. 6, no. 2, pp. 276-286, 2006. doi: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2006.870156>.
- [7] S. M. Mortazavi Zanjani, M. Holt, M. M. Sadeghi, S. Rahimi, and D. Akinwande, "3D integrated monolayer graphene-Si CMOS RF gas sensor platform," *npj 2D Mater. Appl.*, vol. 1, no. 1, p. 36, 2017. doi: <https://doi.org/10.1038/s41699-017-0036-0>
- [8] S. A. Pullano et al., "EGFET-based sensors for bioanalytical applications: A review," *Sensors (Switzerland)*, vol. 18, no. 11, 2018. doi: <https://doi.org/10.3390/s18114042>
- [9] Y. H. Lin, C. P. Chu, C. F. Lin, H. H. Liao, H. H. Tsai, and Y. Z. Juang, "Extended-gate field-effect transistor packed in micro channel for glucose, urea and protein biomarker detection," *Biomed. Microdevices*, vol. 17, no. 6, pp. 1-9, 2015. doi: <https://doi.org/10.1007/s10544-015-0020-4>
- [10] E. L. Huang et al., "Effects of Poly(3-hexylthiophene) Concentration on Performance of Extended-Gate Field-Effect Transistor for Silver Ion Detection," pp. 352-353, 2015. doi: 10.7567 / SSDM.2013.PS-10-10
- [11] L. L. Chi, J. C. Chou, W. Y. Chung, T. P. Sun, and S. K. Hsiung, "Study on extended gate field effect transistor with tin oxide sensing membrane," *Mater. Chem. Phys.*, vol. 63, no. 1, pp. 19-23, 2000. doi: [https://doi.org/10.1016/S0254-0584\(99\)00184-4](https://doi.org/10.1016/S0254-0584(99)00184-4)
- [12] P. D. Batista, M. Mulato, C. F. D. O. Graeff, F. J. R. Fernandez, and F. D. C. Marques, "SnO₂ extended gate field-effect transistor as pH sensor," *Brazilian J. Phys.*, vol. 36, no. 2 A, pp. 478-481, 2006. <https://doi.org/10.1590/S0103-97332006000300066>
- [13] N. Mokhtarifar, F. Goldschmidtboeing, and P. Woias, "Low-cost EGFET-based pH-sensor using encapsulated ITO/PET-electrodes," I2MTC 2018 - 2018 IEEE *Int. Instrum. Meas. Technol. Conf. Discov. New Horizons Instrum. Meas. Proc.*, pp. 1-5, 2018. doi: 10.1109 / I2MTC.2018.8409571
- [14] D. S. Kim et al., "An extended gate field effect transistor based protein sensor integrated with a SI micro-fluidic channel," *Dig. Tech. Pap. - Int. Conf. Solid State Sensors Actuators Microsystems, TRANSDUCERS '05*, vol. 2, no. 111, pp. 2011-2014, 2005. doi: 10.1109 / SENSOR.2005.1497496



- [15] Y. Ishige, M. Shimoda, and M. Kamahori, "Immobilization of DNA Probes onto Gold Surface and its Application for a Fully Electric Detection of DNA Hybridization by Field Effect Transistor Sensor," pp. 454-455, 2015. doi: 10.1143 / JJAP.45.3776
- [16] M. H. Asif, O. Nur, M. Willander, and B. Danielsson, "Selective calcium ion detection with functionalized ZnO nanorods-extended gate MOSFET," *Biosens. Bioelectron.*, vol. 24, no. 11, pp. 3379-3382, 2009. doi: <https://doi.org/10.1016/j.bios.2009.04.011>
- [17] S. Sasipongpana, Y. Rayanasukha, S. Prichanont, C. Thanachayanont, S. Porntheeraphat, and N. Hounkamhang, "Extended-gate field effect transistor (EGFET) for carbaryl pesticide detection based on enzyme inhibition assay," *Mater. Today Proc.*, vol. 4, no. 5, pp. 6458-6465, 2017. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.06.153>
- [18] C.-H. Hsieh, W.-C. Hung, P.-H. Chen, and I.-Y. Huang, "High-performance extended gate field-effect-transistor-based dissolved carbon dioxide sensing system with a packaged microreference electrode," *J. Micro/Nanolithography, MEMS, MOEMS*, vol. 13, no. 3, p. 033017, 2014. doi: <https://doi.org/10.1117/1.JMM.13.3.033017>
- [19] C. H. Hsieh, P. H. Chen, R. H. Chen, and I. Y. Huang, "Development of EGFET-based microsensors with high-sensitivity and high-linearity for dissolved oxygen and carbon dioxide detection," 2013 *Transducers Eurosensors XXVII 17th Int. Conf. Solid-State Sensors, Actuators Microsystems*, TRANSDUCERS EUROSensors 2013, vol. 2, no. June, pp. 2051-2054, 2013. doi: 10.1109 / Transductores.2013.6627202
- [20] E. M. Guerra, G. R. Silva, and M. Mulato, "Extended gate field effect transistor using V2O5 xerogel sensing membrane by sol-gel method," *Solid State Sci.*, vol. 11, no. 2, pp. 456 - 460, 2009. doi: <https://doi.org/10.1016/j.solidstatesciences.2008.07.014>
- [21] H. H. Li, W. S. Dai, J. C. Chou, and H. C. Cheng, "An extended-gate field-effect transistor with low-temperature hydrothermally synthesized SnO₂ nanorods as pH sensor," *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 33, no. 10, pp. 1495-1497, 2012. doi: 10.1109 / LED.2012.2210274
- [22] H. Guliga, W. F. H. Abdullah, and S. H. Herman, "Extended gate field effect transistor (EGFET) integrated readout interfacing circuit for pH sensing," 2014 *2nd Int. Conf. Electr. Electron. Syst. Eng. ICEESE 2014*, pp. 11-14, 2014. doi: 10.1109 / ICEESE.2014.7154605
- [23] A. M. I. Kahar, F. Kamaruzaman, M. F. Azlan, S. H. Herman, and W. F. H. Abdullah, "Parallel extended gate MOSFET pH sensing system," *ISCAIE 2015 - 2015 IEEE Symp. Comput. Appl. Ind. Electron.*, no. c, pp. 134-137, 2015. doi: 10.1109 / ISCAIE.2015.7298342
- [24] N. H. Al-Hardan et al., "High sensitivity pH sensor based on porous silicon (PSi) extended gate field-effect transistor," *Sensors (Switzerland)*, vol. 16, no. 6, pp. 1-12, 2016. doi: 10.3390 / s16060839
- [25] H. S. Rasheed, N. M. Ahmed, and M. Z. Matjafri, "Ag metal mid layer based on new sensing multilayers structure extended gate field effect transistor (EG-FET) for pH sensor," *Mater. Sci. Semicond. Process.*, vol. 74, no. October 2017, pp. 51-56, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2017.10.011>
- [26] Z. Iskierko et al., "Extended-gate field-effect transistor (EG-FET) with molecularly imprinted polymer (MIP) film for selective inosine determination," *Biosens. Bioelectron.*, vol. 74, pp. 526-533, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2015.06.073>
- [27] Silvaco International. Atlas User's Manual. Available online: www.silvaco.com (accessed on 18 March 2021).

