



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

CINVESTAV UNIDAD ZACATENCO  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA  
SECCIÓN DE ELECTRÓNICA DEL ESTADO SÓLIDO

Optimización del diseño y funcionamiento de un sensor de  
gas MEMS basado en FGMOS.

**Tesis que presenta**

Ing. Ángel Sacramento Orduño

**Para obtener el grado de**

Maestro en Ciencias

En la especialidad de Ingeniería Eléctrica

**Director de tesis**

Dr. Mario Alfredo Reyes Barranca

Ciudad de México, México

Octubre, 2015



## **Agradecimientos**

En primer lugar, mis padres (Amalio Sacramento y Magdalena Orduño), a quienes les debo muchísimo, no sólo el haberme dado la vida, sino los sacrificios que han tenido que hacer para que nuestra familia saliera adelante, eso es algo de lo cual, estaré eternamente agradecido; la culminación de este trabajo refleja el resultado del esfuerzo realizado por ustedes. Gracias por todas esas palabras de aliento; las cuales han servido de inspiración para poder seguir y compartir con ustedes estos logros. De todo corazón les vuelvo a decir **¡Gracias!**

A mis hermanos (Martin, Aniceto, Hugo, Luis, Jorge y Cecilia), que siempre me han apoyado y alentado en la decisión de seguir estudiando. El compartir estos dos años contigo hermanita, fue de gran ayuda, ya que compartimos varios días de trabajo, tú con tus tareas y yo con el desarrollo de este trabajo; eso lo hizo más divertido.

Al Dr. Mario Alfredo Reyes Barranca, no sólo por haberme aceptado para realizar este trabajo bajo su dirección, sino por toda su ayuda, facilidades y participación en la realización del mismo, sin su ayuda no habría sido posible terminar en tiempo y forma.

Al Dr. Alejandro Ávila García y al Dr. Gabriel Romero Paredes Rubio por aceptar ser parte de mi jurado y revisar mi trabajo.

Al M. en C. Luis Martin Flores Nava y al Dr. Oliverio Arellano Cárdenas, por toda la ayuda que me proporcionaron para la realización de este trabajo; estar siempre dispuestos a ayudar e involucrarse en el trabajo, así como la facilidad de acceso al laboratorio y la enseñanza del manejo de los equipos.

*[Agradecimientos]*

Así mismo, agradezco a Yesenia Cervantes Aguirre, secretaria de coordinación académica, por su tiempo y completa disposición de apoyarme para la realización de los trámites necesarios a lo largo de esta etapa.

A mis compañeros de generación y amigos (Benito, Yesenia, Isaí, Chuy, Morales, Larissa, Ernesto, Esme y Melo), con los cuales compartí muchísimas experiencias en estos dos años, gracias por todo su apoyo. A todos mis demás amigos que aunque casi no los veo, estamos en contacto muy a menudo; Maribel (gracias por estar siempre haciéndome reír), Adrianita, Sandry, Diana y Azucena (Por apoyarme y alentarme siempre), Marily, Catherine, Uxmal, Iris, Toño, Toti, Pillo, Edgar; que hacen que mis visitas a mi pueblito sean siempre muy divertidas.

Por último, agradezco al *CONACyT* y al *CINVESTAV* por todos los recursos y apoyo otorgados para la realización de este trabajo.

## Tabla de contenido

Agradecimientos.....	i
Tabla de contenido.....	iii
Índice de figuras .....	vi
Índice de tablas.....	x
Abstract.....	xi
Resumen .....	xi
Objetivos.....	xiii
Justificación.....	xiv
1. Introducción .....	1
1.1 Antecedentes .....	1
1.2 Sistemas Micro Electromecánicos.....	3
1.3 Técnicas de micro fabricación .....	5
1.3.1 LIGA o micro moldeo.....	7
1.3.2 Micromaquinado.....	8
1.3.2.1 Micromaquinado Superficial .....	8
1.3.2.2 Micromaquinado Volumétrico.....	12
1.4 Transistor MOS de compuerta flotante .....	15
1.4.1 Estructura del transistor FGMOS .....	15
1.5 Sensores de gas de estado sólido.....	17
1.5.1 Principio de operación .....	18
1.6 Conclusiones del capítulo .....	19

2. Optimización y adaptación del diseño topológico del micro sensor y micro calefactor a la tecnología CMOS estándar de 0.5 $\mu\text{m}$ . .....	20
2.1 Layout del micro calefactor y micro sensor en L-Edit .....	21
2.2 Extracción de resistencia mediante L- Edit .....	22
2.3 Definición de áreas sin pasivación en tecnología CMOS estándar de 1.2 $\mu\text{m}$ .....	24
2.4 Definición de áreas sin pasivación en tecnología CMOS estándar de 0.5 $\mu\text{m}$ .....	26
2.5 Conclusiones del capítulo .....	32
3. Simulaciones .....	33
3.1 Programa de simulación ACES (Anisotropic Crystalline Etching Simulator) .....	33
3.1.1 Simulaciones de micromaquinado en ACES.....	34
3.2 COMSOL Multiphysics.....	39
3.2.1 Simulación Electro-Térmica en COMSOL 2D y 3D.....	41
3.3 Conclusiones del capítulo .....	49
4. Caracterización de los componentes del sensor de gas MEM. ....	50
4.1 Coeficiente Térmico de resistencia (TCR).....	51
4.1.1 Montaje para la medición de R (T).....	52
4.1.2 Determinación del TCR de los micro calefactores y micro sensores del Chip T83T .....	54
4.2 Caracterización de los Transistores FGMOS del chip T83T .....	61
4.2.1 Caracterización de un transistor MOS convencional .....	62
4.2.2 Caracterización del FGMOS sensor 2 .....	64
4.2.3 Caracterización del FGMOS sensor 2b .....	66
4.3 Caracterización del circuito de lectura del sensor de gas MEM. ....	68

*[Tabla de contenido]*

4.4 Caracterización de un Transistor FGMOS de 2 compuertas de control .....	74
4.5 Caracterización del transistor MOS de control .....	79
4.5.1 Aplicación del transistor MOS de control en circuito comparador .....	81
4.6 Caracterización con máquina de puntas de la micro placa maquinada .....	83
4.7 Discusión de resultados .....	89
5. Conclusiones .....	91
Trabajo futuro.....	93
Referencias .....	95

## Índice de figuras

Figura 1.1: Diagrama de flujo típico para la fabricación de MEMS. ....	6
Figura 1.2: Proceso LIGA .....	7
Figura 1.3: Proceso de micromaquinado superficial .....	9
Figura 1.4: Proceso de micromaquinado superficial de 1 máscara .....	11
Figura 1.5: Proceso de micromaquinado superficial de 2 máscaras .....	12
Figura 1. 6: Proceso de micromaquinado volumétrico.....	14
Figura 1. 7: Transistor de compuerta flotante.....	16
Figura 1. 8: (a) Estructura de un Transistor de compuerta flotante de dos compuertas de control y (b) divisor capacitivo equivalente de entrada [13]. ....	16
Figura 2.1: Layout del micro sensor y micro calentador en L-Edit .....	22
Figura 2.2: Extracción de Resistencia en L-Edit del Micro sensor y Micro calefactor (0.5 $\mu\text{m}$ )....	23
Figura 2.3: Extracción de Resistencia en L-Edit del Micro sensor y Micro calefactor (1.2 $\mu\text{m}$ )....	23
Figura 2.4: Vista Superior (a) y (b) sección transversal de la micro placa caliente (1.2 $\mu\text{m}$ )......	24
Figura 2.5: Definición de región activa y contacto a región activa.....	25
Figura 2.6: Definición de capa vía y overglass (pasivación).....	25
Figura 2.7: Vista superior (a) y sección transversal (b) de la micro placa caliente (0.5 $\mu\text{m}$ ), (c, d) zoom de la región de ventana. ....	27
Figura 2.8: Definición de región activa y arreglo de contacto a región activa .....	27
Figura 2.9: Arreglo para la definición de Vía 1.....	28
Figura 2.10: Arreglo para la definición de vía 2. ....	28
Figura 2.11: Overglass.....	29
Figura 2.12: Sección transversal para silicio totalmente expuesto .....	30
Figura 2.13: Sección transversal para una ventana con primera capa de SiO <sub>2</sub> .....	30
Figura 2.14: Sección transversal Sección transversal para una ventana con segunda capa de SiO <sub>2</sub> .....	31



[Índice de figuras]

Figura 3.1: Interfaz de usuario de ACES.....	34
Figura 3.2: Mascarilla utilizada para simulación de micromaquinado volumétrico en ACES. ....	35
Figura 3.3: Resultado de la simulación en ACES.....	36
Figura 3. 4: Vista superior de la simulación en ACES.....	37
Figura 3. 5: Profundidad máxima de decapado.....	37
Figura 3. 6: Diferentes vistas de la estructura final.....	38
Figura 3.7: Vista lateral con corte transversal.....	38
Figura 3.8: Interfaz gráfica de COMSOL Multiphysics.....	40
Figura 3.9: Geometría del micro calefactor y micro sensor en COMSOL Multiphysics.....	41
Figura 3.10: Geometría completa en COMSOL Multiphysics.....	42
Figura 3.11: Vista lateral de la geometría completa.....	43
Figura 3.12: Materiales que conforman la estructura.....	43
Figura 3. 13: (a) Declaración de fuente de calor y (b) Diferencia de potencial aplicada.....	44
Figura 3. 14: Malla de la estructura generada.....	44
Figura 3.15: Distribución de temperatura.....	45
Figura 3. 16: Temperatura VS voltaje aplicado.....	46
Figura 3. 17: Temperatura en función del tiempo.....	47
Figura 3. 18: Densidad de corriente en el micro calefactor.....	48
Figura 3. 19: Densidad de potencia disipada en el micro calefactor.....	48
Figura 4.1: Layout del chip T83T.....	52
Figura 4.2: Montaje para la medición de R (T).....	53
Figura 4.3: Resistencia en función de la temperatura medido (Micro calefactor 1).....	54
Figura 4.4: Resistencia en función de la temperatura medido (Micro sensor 1). ....	56
Figura 4.5: Resistencia en función de la temperatura (Micro Calefactor 1 y Micro Sensor 1)....	57
Figura 4.6: Resistencia en función de la temperatura (Micro Calefactor 2 y Micro Sensor 2)....	58

Figura 4.7: Resistencia en función de la temperatura (Micro Calefactor 3 y Micro Sensor 3)....	58
Figura 4.8: Resistencia en función de la temperatura (Micro Calefactor 4 y Micro Sensor 4).....	59
Figura 4. 9: Resistencia en función de la temperatura (Micro Calefactor MOS 2 y Micro Sensor MOS 2). .....	59
Figura 4.10: Resistencia en función de la temperatura (Micro Calefactor MOS 2b y Micro Sensor MOS 2b). .....	60
Figura 4.11: (a) Curvas de salida y (b) curva de transconductancia de un transistor MOS Convencional ( $V_g$ sin ningún potencial).....	62
Figura 4.12: Curvas de salida (a) y curva de transconductancia (b) de un transistor MOS Convencional ( $v_g=0$ V). .....	63
Figura 4.13: Curvas de salida (a) y curva de transconductancia (b) de un transistor MOS Convencional ( $V_g= -5$ V).....	64
Figura 4.14: Curva de transconductancia (antes de iluminar) del transistor FGMOS sensor 2 ( $V_g= -5$ V).....	65
Figura 4.15: Curva de transconductancia (después de iluminar durante 5 minutos) del transistor FGMOS sensor 2 ( $V_g= -5$ V).....	66
Figura 4.16: Curva de transconductancia (antes de iluminar) del transistor FGMOS sensor 2b ( $V_g= -5$ V).....	67
Figura 4.17: Curva de transconductancia (después de iluminar) del transistor FGMOS sensor 2 ( $V_g= -5$ V).....	67
Figura 4. 18: Circuito de lectura FGMOS.....	69
Figura 4.19: Curvas de transferencia del circuito de lectura FGMOS obtenidas en PSPICE.....	70
Figura 4. 20: Respuesta del circuito de lectura ante una entrada senoidal .....	71
Figura 4.21: Gráficas de las señales de entrada (rampa) y salida.....	72
Figura 4.22: Curvas de transferencia obtenidas de la caracterización del circuito de lectura.....	73
Figura 4.23: Arreglo con transistor FGMOS de 2 compuertas de control .....	74
Figura 4.24: Curvas de salida (a) y curva de transconductancia (b) de un FGMOS de 2 compuertas de control.....	75

[Índice de figuras]

Figura 4. 25: Curvas de transferencia obtenidas mediante PSPICE para un FGMOS de 2 CG.....	76
Figura 4.26: Curvas de transferencia obtenidas de la caracterización de un FGMOS de 2 CG ....	76
Figura 4.27: Simulación del efecto electroquímico con un FGMOS de 2 compuertas de control. .....	77
Figura 4.28: Caracterización de un FGMOS de 2 compuertas de control, emulando el efecto ...	78
Figura 4.29: Circuito esquemático del controlador de temperatura .....	79
Figura 4.30: Curvas de salida del transistor MOS de control.....	80
Figura 4.31: Curva de transconductancia del transistor MOS de control .....	81
Figura 4.32: Arreglo experimental para aplicación del MOS de control como comparador .....	81
Figura 4. 33: Respuesta del comparador para un voltaje de referencia de 2.5 V .....	82
Figura 4. 34: Respuesta del comparador para un voltaje de referencia de 3.5 V .....	83
Figura 4. 35: Foto del chip después del proceso de micromaquinado.....	84
Figura 4. 36: Arreglo para la caracterización de la micro placa maquinada.....	85
Figura 4.37: Resistencia en función del voltaje del micro sensor.....	86
Figura 4.38: Resistencia en función del voltaje del micro calefactor. ....	86
Figura 4.39: Temperatura aproximada en función del voltaje en el micro calefactor. ....	88
Figura 4.40: Curva de eficiencia .....	88

## Índice de tablas

Tabla 1.1: Proceso de micromaquinado superficial de 1 máscara.....	10
Tabla 1.2: Proceso de micromaquinado superficial de 2 máscaras.....	11
Tabla 1.3: Proceso de micromaquinado volumétrico.....	14
Tabla 4.1: Valores de TCR y R(T) obtenidos para cada micro calefactor y micro sensor.....	54
Tabla 4.2: Cálculo de TCR (micro calefactor 1).....	55
Tabla 4.3: Resistencia medida a diferentes temperaturas del micro sensor 1.....	55
Tabla 4.4: Cálculo del TCR (micro sensor 1).....	56
Tabla 4.5: Valores de TCR y R (T) obtenidos para cada micro calefactor y micro sensor.....	60
Tabla 4.6: Valores de voltaje y corriente medidos y valores de resistencia calculada.....	85
Tabla 4.7: Valores de resistencia, temperatura y potencia aproximados.....	87

## Abstract

This work presents the continuation of the study of a thermal analytical model for a MEMS gas sensor, previously studied at SEES in a Doctoral thesis [1]. Similar to the previous work, the thermal behavior of the micro hotplate design as a MEMS structure is first reviewed being used for gas sensing, measuring the Temperature Coefficient of Resistance (TCR). The characterization of the first prototype design suggests an optimization for the gas sensor and, in particular, the micro heater and sensor geometry for the micro hotplate.

Here, a new design is now established, using the design rules for the 0.5  $\mu\text{m}$  CMOS standard technology, based on the structure previously proposed by [1], which was fabricated employing the 1.2  $\mu\text{m}$  CMOS standard technology. The latter is not available with MOSIS at this time.

Taking into consideration the dimensions and materials used when manufacturing the MEMS structure, the magnitude of the voltage to be applied to the terminals of the polysilicon micro heater to achieve temperatures of the microplate around 300  $^{\circ}\text{C}$ , is determined.

Various simulations, like bulk micromachining (with software ACES), electrical (PSPICE) and electro-thermal (with COMSOL) for an adapted design of the micro hotplate with the actual technology available, are presented.

The results of the characterization for a reading circuit containing a floating gate MOS transistor (FGMOS) as the transducer, together with other components of the sensor, are presented. This characterization was both for a non micromachined chip and one already micromachined. Experimental results are compared to simulations, showing the feasibility of using the FGMOS as transducer for a gas sensor like the one previously studied.

## Resumen

En el presente trabajo se presenta la continuación del estudio de un modelo analítico térmico para un micro sensor de gas MEM, estudiado anteriormente en la SEES en un trabajo doctoral [1]. Al igual que en el trabajo anterior, se revisa el comportamiento térmico del diseño de la micro placa caliente de una estructura MEM, utilizada en el sensado de gases, mediante la medición del Coeficiente Térmico de Resistencia (TCR). Se caracteriza el primer prototipo para sugerir una optimización para el sensor de gas y, en particular, del micro calefactor y micro sensor que conforman la micro placa caliente.

Se establece un nuevo diseño haciendo uso ahora de las reglas de diseño de la tecnología CMOS estándar de 0.5  $\mu\text{m}$ , apoyándose en la estructura propuesta anteriormente [1], la cual fue realizada empleando la tecnología CMOS estándar de 1.2  $\mu\text{m}$ . Esta última ya no está disponible de parte de MOSIS.

Teniendo en cuenta las dimensiones y materiales utilizados en la fabricación, se determina la magnitud del voltaje que debe ser aplicada a las terminales del micro calefactor de polisilicio para elevar la temperatura de la microplaca hasta aproximadamente 300 °C.

Se presentan diversas simulaciones, tanto de micromaquinado (con el paquete ACES), eléctricas (con PSPICE) y electro-térmicas (con COMSOL) para un diseño adaptado de la micro placa caliente a la tecnología disponible.

Se presentan los resultados de la caracterización de un circuito de lectura con un transistor MOS de compuerta flotante (FGMOS) como transductor, así como otros componentes del sensor. Esta caracterización se hizo tanto a un chip sin micromaquinado como uno ya micromaquinado. Se comparan resultados experimentales con simulaciones, demostrando la viabilidad del empleo del FGMOS como transductor para un sensor de gas como el estudiado.

## Objetivos

### Objetivo General:

Retomar el trabajo “*Prototipo de sensor para gas con tecnología MEMS*” desarrollado en la SEES y continuar con algunos puntos de lo sugerido en el trabajo a futuro del mismo.

### Objetivos particulares:

- Optimización y adaptación del diseño del micro sensor y micro calefactor a la tecnología CMOS estándar actual disponible (0.5 $\mu$ m).
- Simulación electro-térmica y de maquinado de la micro placa caliente.
- Caracterización de los diferentes componentes del sensor de gas MEM.

## **Justificación**

En el Grupo de Sistemas VLSI de la SEES se tiene como una de sus líneas de investigación la del estudio y desarrollo de Sistemas Micro-Electro-Mecánicos (MEMS) junto con el de los transistores MOS de compuerta flotante (FGMOS). Ambas líneas de investigación se conjuntan en el desarrollo de un sensor de gas a semiconductor (SGS), en el que se emplean las herramientas disponibles para diseño de circuitos integrados CMOS y las técnicas conocidas para micromaquinado volumétrico sobre silicio para lograr las estructuras MEMS. Con base a estos recursos y los antecedentes que se tienen en el Grupo de Sistemas VLSI en el diseño y desarrollo de un sensor de gas, se le está dando continuidad a este trabajo, cuya novedad consiste en aplicar el FGMOS como transductor, a diferencia de otros SGS, que operan usualmente a partir del sensado de la variación de resistividad de la capa sensora de óxido metálico en función de la concentración del gas a detectar. El sensor de gas estudiado en este trabajo es un prototipo que fue propuesto en tesis anteriores y que aún tiene aspectos a considerar y a optimizar en función de resultados preliminares obtenidos. Estos derivaron en procedimientos de diseño y análisis que se requieren adaptar a la tecnología CMOS estándar disponible y caracterizaciones eléctricas y térmicas que quedaron por realizar en trabajos anteriores y que se requieren para completar y proponer un prototipo con las características requeridas.



## 1. Introducción

### 1.1 Antecedentes

Tener conocimiento de nuestro entorno, es una necesidad natural en la humanidad. La mejor manera de conocer el medio que nos rodea, es midiendo las diferentes variables físicas (Longitud, masa, presión, temperatura, velocidad, entre otros), las cuales nos puedan proporcionar información para conocer el entorno. Debido a esta inquietud, se ha tenido el desarrollo de diversos medios para detectar una gran cantidad de variables de nuestro entorno, permitiendo así, el desarrollo de sistemas tecnológicos cada vez más complejos.

Una vez lograda la detección, transducción, monitoreo, registro, control y la automatización, éstas forman una cadena que permite mantener y regular estas variables, en condiciones óptimas para su aplicación en diversos procesos relacionados a la manufactura, seguridad e higiene, control industrial y ambiental, diagnóstico, calidad, instrumentos médicos, medios de transporte, entre otros [1]. Las exigencias de dichos procesos son cada vez más rigurosas y se hace necesario que los dispositivos, instrumentos y equipos de instrumentación, sean lo más pequeño posible, así como que se tenga un menor consumo de energía y además que cumplan de manera óptima con las especificaciones de trabajo, para las cuales fueron diseñados.

Un ejemplo de dispositivos que se han orientado hacia esta dirección, son los llamados Sistemas Micro Electro Mecánicos, o MEMS, también conocidos como Microsistemas. En la actualidad, éstos se encuentran presentes en infinidad de aplicaciones como las mencionadas anteriormente y que gracias a su tamaño mínimo, han ayudado a la integración de sistemas en pequeños volúmenes, lo cual es la tendencia desde los inicios de la era del Estado Sólido y la Microelectrónica.

Desde la creación del transistor bipolar en 1947 y el primer circuito integrado en 1958, la Microelectrónica ha tenido una evolución continua, por lo que se puede decir que ha

logrado una gran madurez y sigue enfrentando retos al ir encontrando límites respecto a la miniaturización de los dispositivos. En el camino de este desarrollo, y gracias a los alcances logrados por la tecnología microelectrónica, fue que surgió la tecnología MEMS. Ésta basa muchos de sus procesos en aquellos empleados en la fabricación de circuitos integrados, con la diferencia de que estos últimos son diseños de dos dimensiones mientras que los MEMS se consideran estructuras tridimensionales, logrados gracias al uso optimizado de los procesos de micromaquinado, ya sea volumétrico o superficial. De la misma manera, la tecnología para la fabricación de dispositivos MEMS ha venido evolucionando y madurando y ha venido encontrando, cada día, diferentes aplicaciones en la electrónica de consumo, académica, industrial, farmacéutica y biológica, entre otras. El conocimiento básico y el desarrollo de estas estructuras se han convertido en una ciencia y es de amplio interés para su estudio, de tal forma que es importante conocer sus fundamentos. Las bases de su teoría son muy amplias y depende del enfoque que se le quiera dar al desarrollo, de acuerdo a lo que se requiera, sensores o actuadores, así como el tipo de fenómeno que se quiera estudiar o la acción que se desee tener. Así, pueden monitorearse estímulos mecánicos, químicos, térmicos, magnéticos u ópticos, por ejemplo, con los que se tiene una transducción de un fenómeno físico hacia una señal eléctrica. Pero también puede tenerse el efecto contrario, es decir, que a partir de una señal eléctrica, térmica o magnética, tener una respuesta mecánica, como la obtenida con los actuadores. Ejemplos de actuadores se tienen con las micro pinzas, cristales para osciladores, micro motores, micro válvulas o micro bombas, por mencionar algunos.

Un caso particular de estructura MEMS, es la que se aborda en el presente trabajo con un sensor de gas de estado sólido. En este caso, el diseño comprende una estructura micro calefactora que aísla térmicamente al sensor de la electrónica de procesamiento de señal, gracias a un micromaquinado volumétrico. Además, la capa sensora se acopla a la compuerta flotante de un transistor MOS de compuerta flotante, FGMOS, con el cual, se puede correlacionar la concentración del gas con la corriente de drenador del transistor. La explicación del diseño y operación de este sensor se dará en los siguientes capítulos.

## 1.2 Sistemas Micro Electromecánicos

Sistemas Micro Electromecánicos (MEMS), es un término utilizado para definir los componentes mecánicos hechos por el hombre, que se caracterizan por su tamaño micrométrico. Traducido literalmente, los MEMS deben tener dimensiones en la escala de micras y tener ambos componentes, tanto eléctricos, como mecánicos, los cuales conforman un sistema. En Europa, a menudo se les llama Microsistemas. Este término puede ser más preciso, pero MEMS es más común y es utilizado en Estados Unidos, Asia, y cada vez más en Europa [2].

Los MEMS son definidos típicamente como dispositivos microscópicos diseñados, fabricados y utilizados para interactuar o producir cambios dentro de un ambiente controlado. Estos pequeños y sofisticados dispositivos que actúan, miden y se comunican, han estado reemplazando a los dispositivos tradicionales en muchas aplicaciones. Debido al gran campo de aplicación que tienen y en sus funciones, principalmente como actuadores o sensores a una escala micro y nanométrica, han permitido la disminución de tamaño en los diferentes instrumentos de medición utilizados [3].

Además de proporcionar una alternativa más barata y/o mejorar la tecnología existente, los MEMS han permitido nuevos dispositivos, por ejemplo: cabezales de impresoras de inyección de tinta, los cuales han hecho una realidad el bajo costo de la impresión a color; arreglos de micro espejos, que contienen más de un millón de espejos individuales, fueron desarrollados para la televisión de alta definición y también se utilizan en los proyectores de imágenes en oficinas, aulas, auditorios, así como para videojuegos y cine en casa [2].

El uso de los MEMS ofrece un menor consumo de potencia, alto desempeño, peso reducido y un costo más bajo que los dispositivos tradicionales utilizados. La técnica de fabricación reduce los costos de ensamble y manufactura, reduce el tamaño y su peso,

lo que resulta en menos consumo de potencia e incrementa la flexibilidad en el diseño de sistemas. La reducción del tamaño y el peso de un dispositivo permiten que puedan usarse múltiples componente en serie o en paralelo para aumentar la funcionalidad, capacidad y fiabilidad del dispositivo.

Por ejemplo, hoy en día los acelerómetros de silicio en miniatura han sustituido en gran medida a los costosos acelerómetros piezoeléctricos macroscópicos. Los acelerómetros MEMS son más pequeños, pero su ventaja real es el proceso de fabricación, el cual utiliza los procesos de fabricación por lotes, desarrollados originalmente para la tecnología de circuitos integrados (CI). La fabricación por lotes, permite el procesamiento simultáneo de miles de dispositivos idénticos en una sola oblea.

Actualmente, se considera que un sistema de este tipo, cuenta con la integración de elementos mecánicos, actuadores, sensores y de la electrónica en un mismo substrato a través de tecnología de micro-fabricación.

Una de las formas de llevar a cabo la integración de los sensores junto a los circuitos de interfaz, es por medio de micro-módulos, que son chips individuales con los que generalmente son fabricados los sensores/actuadores, y por otro lado, la circuitería de interfaz se tiene en otro chip. Posteriormente se interconectan entre sí en el mismo encapsulado, mediante alambrado o mediante alguna otra técnica. La ventaja de esta técnica es que pueden fabricarse los diferentes chips de manera independiente con la tecnología individual óptima para cada uno de ellos. La desventaja principal se presenta debido a que el encapsulado puede ser demasiado complejo, caro y una fuente de fallos, debido a la baja repetibilidad del proceso de conexión entre los elementos [1].

Los tipos de MEMS son muy variados en cuanto a aplicaciones, entre las cuales se destacan, sensores químicos, biológicos, térmicos, ópticos, de presión, posición y aceleración [1], cabe destacar que también se tienen los actuadores, tales como capacitores variables, micro válvulas, micro espejos y micro tenazas, por mencionar algunos.

*[Optimización del diseño y funcionamiento de un sensor de gas MEMS basado en FGMOS]*

Para poder diseñar y fabricar los MEMS, se requiere conocer las propiedades físicas de los materiales (Mecánicas, Eléctricas, Térmicas y Magnéticas), hacer uso de procesos de fotolitografía y técnicas de micromaquinado. Una solución común es hacer uso de la tecnología CMOS, la cual ha sido muy estudiada y se encuentra ya consolidada. Esto permite integrar sensores, transductores, procesamiento de señales, control y actuadores en el mismo CI.

El desarrollo de los Sistemas Micro Electromecánicos y su aplicación en los campos de la medicina, militar, consumo, industria, entre otros, ha crecido considerablemente en los últimos años. Para esto, se desarrollan estructuras tridimensionales complejas, las cuales requieren un ensamblado. De entre algunos ejemplos de estos desarrollos, se tienen micro-engranajes, micro-motores, micro-turbinas y micro-componentes ópticos, con aplicaciones ya sea en la industria automotriz, aeroespacial, de seguridad, salud, manufactura, telecomunicaciones, entre otras.

### 1.3 Técnicas de micro fabricación

En este apartado se describe la fabricación de MEMS. Los procesos básicos para la producción de los dispositivos MEMS son el depósito de capas delgadas, transferencia de un patrón (fotolitografía) y remoción de un material (micromaquinado). Respecto a este último, se describen las 3 técnicas más utilizadas: a) LIGA (Litografía, Electro depósito y moldeo, del alemán *Lithographie*, *Galvanoformung*, *Abformung*), b) Micromaquinado Superficial y c) Micromaquinado Volumétrico.

La micro fabricación hace referencia al empleo de técnicas de miniaturización. La fabricación de MEMS crea características físicas en las obleas quitando capas llamadas de *sacrificio*, por debajo de las estructuras mecánicas deseadas, llamadas *estructurales*. Debido a esto, es habitual utilizar procesos especializados en la fabricación para obtener grabados más profundos. Además, una gran ventaja que posee esta tecnología es la capacidad de fusionar obleas una sobre otra, para crear un dispositivo multicapa de mayor tamaño, así como la posibilidad de tener diferentes características en ambos lados

de la oblea, lo que da una gran variedad de alternativas al momento de diseñar el micro dispositivo [4].

El proceso de micro fabricación de MEMS empieza con el depósito de capas o películas delgadas sobre un sustrato como base, generalmente silicio. Posteriormente, se utiliza un proceso fotolitográfico para definir cuál material va a ser removido y cuál deberá permanecer en la oblea. Por último el material se remueve de manera selectiva o bien se protege, de acuerdo con la máscara empleada en el proceso fotolitográfico. Existen varios métodos para el procedimiento de cada uno de los pasos anteriormente mencionados, los cuales pueden repetirse las veces necesarias hasta satisfacer los requerimientos de diseño.

Como ya se había mencionado, las principales técnicas de micro fabricación de MEMS tienen tres procesos básicos, los cuales son:

1. Depósito de capas finas
2. Fotolitografía
3. Grabado

Las fases del proceso de micro fabricación de MEMS se muestran en la figura 1.1 [3].

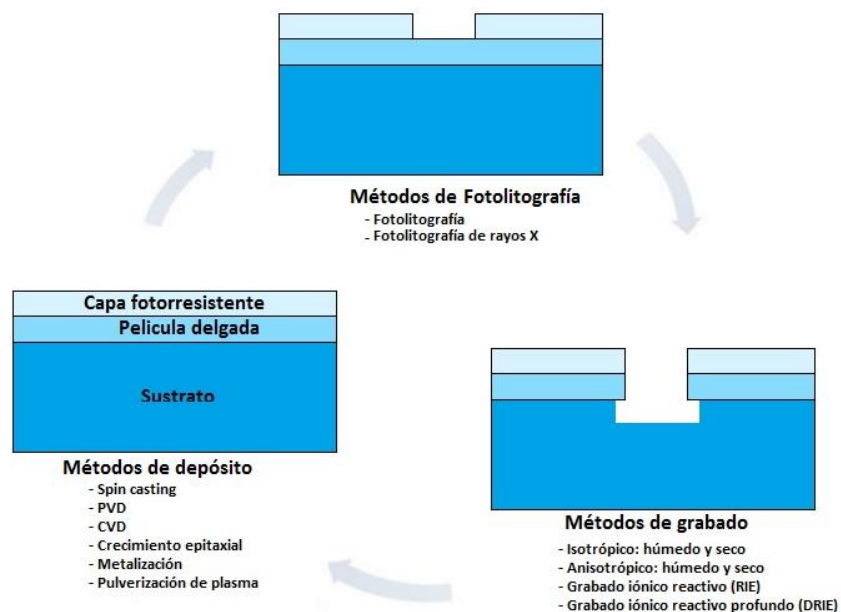


Figura 1.1: Diagrama de flujo típico para la fabricación de MEMS.  
[Optimización del diseño y funcionamiento de un sensor de gas MEMS basado en FGMS]

Actualmente, la micro fabricación de MEMS se realiza con 3 tecnologías principales:

1. LIGA o micro moldeo.
2. Micromaquinado superficial.
3. Micromaquinado volumétrico.

### 1.3.1 LIGA o micro moldeo

Este método fue desarrollado en Alemania y su significado es Lithographie (Litografía), Galvanoformung (Electro depósito) y Abformung (Moldeo). A partir de este proceso se obtienen micro estructuras con moldes creados mediante fotolitografía de rayos X, seguida de metalizado. Se parte de una capa de material fotosensible como la resina, la cual se encuentra colocada encima de un sustrato. Sobre dicha capa se coloca una máscara y se transmite un patrón mediante rayos X para obtener un molde. Posteriormente, el molde de resina obtenido se rellena con metal (Ni, Cu, Au, entre otros metales o aleaciones) mediante un proceso de electrodeposición. Después de remover la resina se obtiene una estructura metálica, ésta puede ser la estructura final o utilizarse para replicar la pieza a plástico mediante estampado en caliente o inyección. En la figura 1.2, se muestra un esquema del proceso [3].

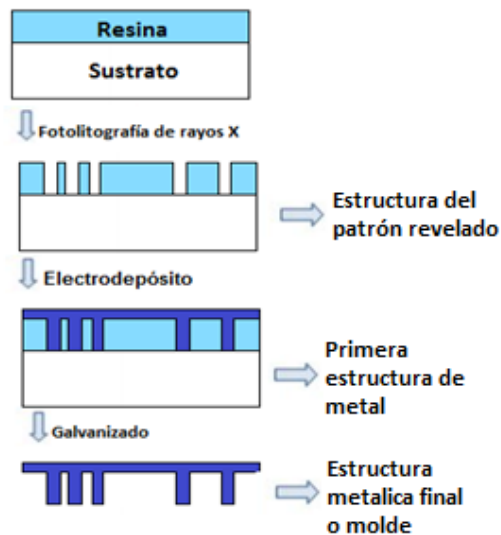


Figura 1.2: Proceso LIGA

### **1.3.2 Micromaquinado**

El micromaquinado es un conjunto de herramientas para el diseño y fabricación, que maquina y forma estructuras en tres dimensiones (3D) de elementos en micro escala. El micromaquinado es el fundamento básico en la fabricación de MEMS y se puede definir como la caja de herramientas de los MEMS. [5]

Básicamente, para la micro fabricación de MEMS existen dos procesos de micromaquinado, que permiten construir estructuras mecánicas de dimensiones pequeñas (del orden de micrómetros). Dichos procesos son: *Micromaquinado Superficial* y *Micromaquinado Volumétrico*, tal como a continuación se describen.

#### **1.3.2.1 Micromaquinado Superficial**

El micromaquinado superficial se creó a finales de los años 80's, para hacer micromaquinado de silicio compatible con la tecnología de circuitos integrados (CI) [3]. De esta forma, se puede tener MEMS y circuitos integrados en una misma oblea de silicio.

Se dice que ésta es una técnica de fabricación aditiva, ya que se construyen micro estructuras mediante la deposición sucesiva de capas sobre la superficie de un sustrato. Generalmente en el proceso, se utilizan dos capas; la estructural y la de sacrificio.

El proceso se empieza con el depósito sucesivo de capas finas; posteriormente se realiza la transmisión de patrones utilizando fotolitografía; por último se realiza un grabado selectivo. Se aplica un grabado en seco para definir las características de la superficie en el plano XY, pero también se puede utilizar un grabado húmedo isotrópico para liberar las capas.



El proceso de micromaquinado superficial se muestra en la figura 1.3 [6].

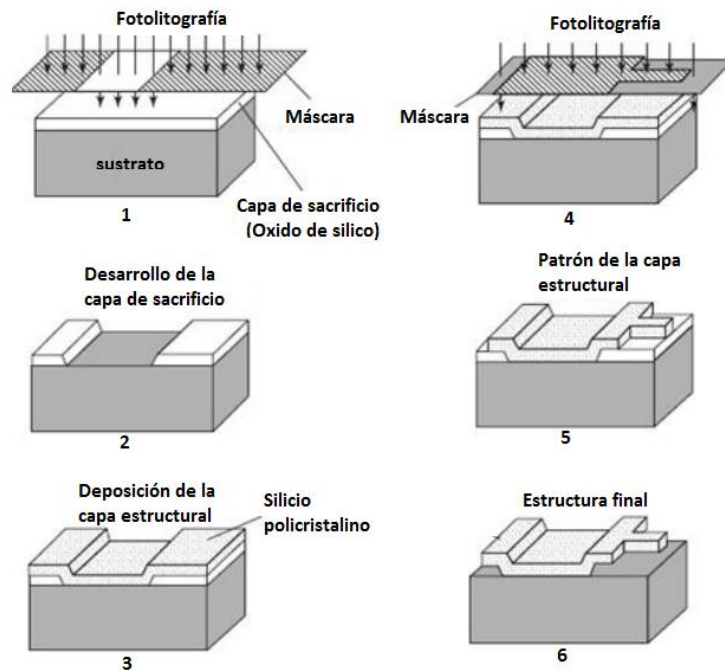


Figura 1.3: Proceso de micromaquinado superficial

Las dimensiones de las estructuras obtenidas al emplear el micromaquinado superficial pueden ser más pequeñas que las estructuras obtenidas con el micromaquinado volumétrico. Generalmente son estructuras planas; con esta tecnología se produce la manufactura de acelerómetros de bajo costo para sistemas de bolsas de aire en automóviles, por mencionar un ejemplo de aplicación [7].

Es importante mencionar que el micromaquinado superficial requiere que los materiales estructurales (capas que conforman al sensor/actuador) sean compatibles con los materiales de sacrificio (capas sobre las que se depositan los materiales estructurales y que posteriormente se eliminan) y con los decapantes químicos. Los materiales estructurales deben poseer propiedades físicas y químicas adecuadas para la aplicación. También, deben cumplir con las propiedades mecánicas (rendimiento y buena resistencia al desgaste) [8]. De la misma forma, los materiales de sacrificio también deben poseer buenas propiedades mecánicas, todo esto con el fin de evitar fallas en el

[Optimización del diseño y funcionamiento de un sensor de gas MEMS basado en FGMOS]

dispositivo durante la fabricación. Otras de las propiedades que deben poseer son buena adherencia y bajas tensiones residuales para evitar la formación de grietas.

Existen diferentes combinaciones de materiales estructurales y de sacrificio, pero una de las más comunes es la combinación de Polisilicio como material estructural y óxido de silicio como material de sacrificio.

Para no afectar a los materiales estructurales al momento de remover el material de sacrificio, se utiliza un grabado selectivo que no ataque al primero y elimine únicamente al segundo. Cuando los materiales de sacrificio y estructural son; óxido de silicio y polisilicio, el material de sacrificio se elimina sumergiendo la oblea en una solución de ácido fluorhídrico (HF), que ataca de manera isotrópica al óxido de silicio, dejando prácticamente intacto al polisilicio [9].

Esta tecnología puede implementarse de dos maneras: con procesos de una máscara o con procesos de 2 máscaras.

En la tabla 1.1, se muestran los pasos para el proceso de 1 máscara:

Proceso de 1 máscara	
Paso	Proceso
1	Se coloca sobre el sustrato la primera capa de sacrificio. Después se elimina de manera selectiva y sobre ésta se deposita una capa estructural.
2	Sobre la capa estructural se define el patrón de la estructura.
3	Mediante un grabado húmedo se elimina la capa de sacrificio, de esta forma se libera la estructura.

Tabla 1.1: Proceso de micromaquinado superficial de 1 máscara

En la figura 1.4 se muestra un esquema del proceso de micromaquinado superficial de una máscara [7].

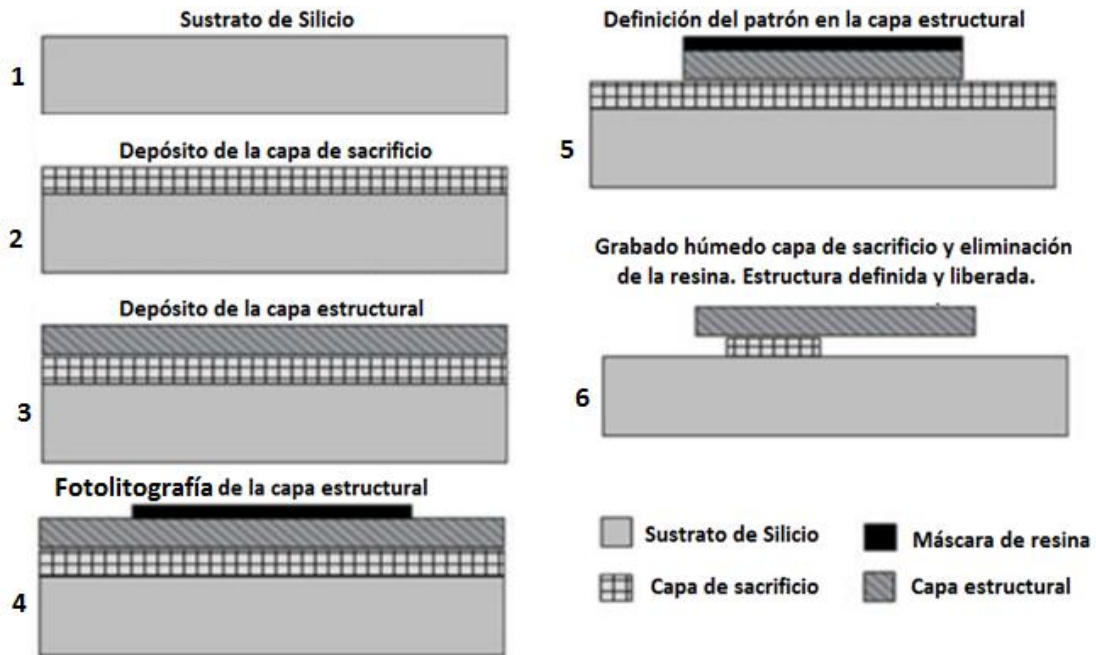


Figura 1.4: Proceso de micromaquinado superficial de 1 máscara

En la tabla 1.2, se muestran los detalles de los pasos para el proceso de 2 máscaras

Proceso de 2 máscaras	
Paso	Proceso
1	Se deposita la capa de sacrificio y sobre ésta se define un patrón. Dicho patrón será el contacto de la capa estructural con el sustrato y a la vez hará el anclaje de la estructura.
2	Se deposita la capa estructural, sobre ésta se define la estructura final.
3	Mediante un grabado húmedo se elimina la capa de sacrificio y de esta forma se libera la estructura.

Tabla 1.2 Proceso de micromaquinado superficial de 2 máscaras

En la figura 1.5 se muestra un esquema del proceso de micromaquinado superficial de dos máscaras [7].

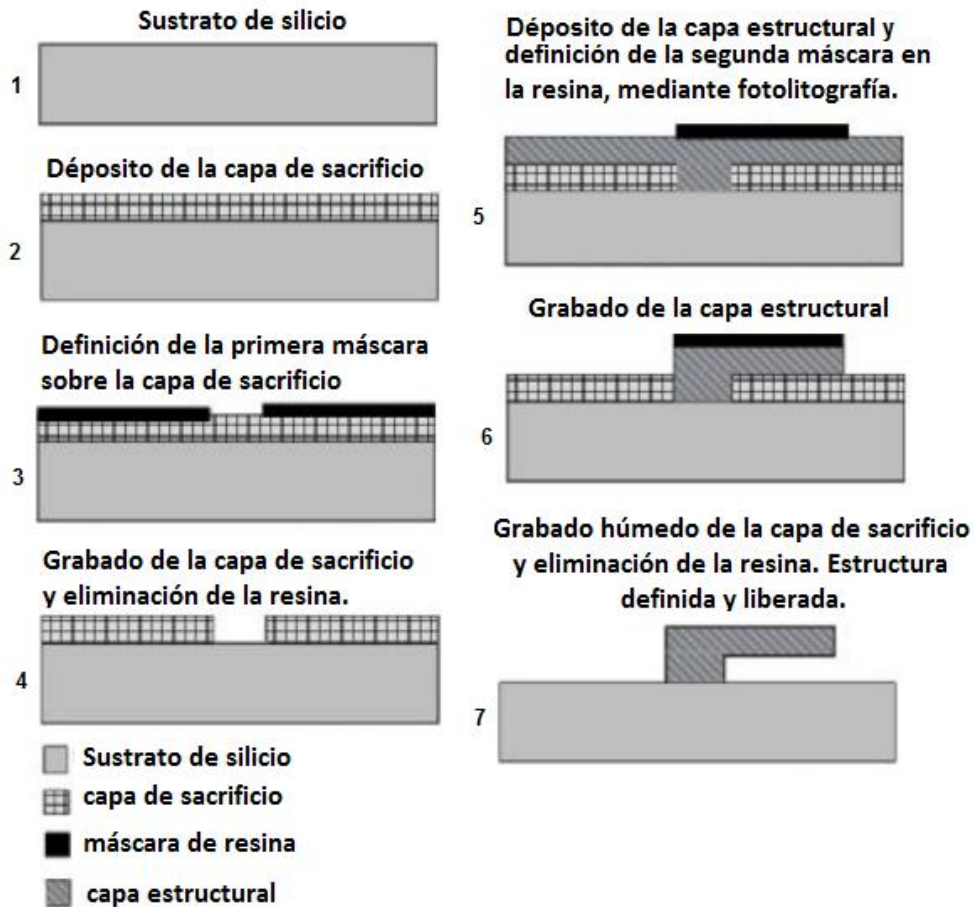


Figura 1.5: Proceso de micromaquinado superficial de 2 máscaras

### 1.3.2.2 Micromaquinado Volumétrico

El micromaquinado volumétrico es una de las tecnologías de micro fabricación de silicio más populares. Surgió en la década de 1960's y se ha utilizado para realizar estructuras en volumen. Se utiliza en la fabricación de la mayoría de los dispositivos comerciales como sensores de presión, válvulas de silicio y el 90 % de los acelerómetros de silicio [7]. Este proceso es fundamental en la fabricación de los MEMS y es importante conocerlo para poder darle la aplicación apropiada.

Es una técnica de fabricación subtractiva para la construcción de micro estructuras por eliminación del material sobrante de un sustrato. Este proceso permite eliminar de forma selectiva grandes cantidades de silicio, generalmente en la cara inferior. Además se pueden obtener cavidades muy útiles en la fabricación de membranas y otro tipo de transductores para la fabricación de sensores [7].

Este tipo de micromaquinado prácticamente atraviesa a toda la oblea; las dimensiones de las microestructuras obtenidas utilizando esta técnica van desde las 200 a 500 micras [7].

Con este método se logran estructuras geométricas de gran definición, aprovechando sustancias que atacan selectivamente los diferentes planos cristalográficos mediante la remoción o ataque selectivo de material dentro del sustrato. Este proceso se inicia con un sustrato, el cual es atacado selectivamente, hasta obtener la estructura del micro dispositivo deseado, utilizando decapado húmedo o seco. Se utiliza en la fabricación de la mayoría de dispositivos comerciales, tales como; sensores de presión y acelerómetros.

En los procesos de micromaquinado volumétrico, parte del sustrato se elimina con el fin de crear estructuras mecánicas libres de contacto, es decir, para aquellos elementos que requieren un movimiento libre. Por ejemplo: Estructuras en voladizo o membranas, cavidades o agujeros. Estos elementos atraviesan la oblea mediante el uso de reactivos dependientes (anisotrópicos) e independientes (isotrópicos) de la orientación cristalográfica. Este tipo de procesos puede ser aplicado a piezas de silicio, vidrio, arseniuro de galio, entre otros materiales [8].

En la tabla 1.3 se muestra una explicación del proceso.

Micromaquinado Volumétrico	
Paso	Proceso
1	En la cara superior de la oblea, se definen estructuras o contactos. El número de capas y niveles definidos dependerá de la estructura y la tecnología utilizada. Se puede tener hasta un proceso CMOS completo.
2	Se define una máscara en el dorso del sustrato. La máscara puede ser de aluminio, óxido, Nitruro o resina, según el tipo de grabado.
3	Se realiza la remoción de volumen en casi toda la profundidad del sustrato, a través del grabado isotrópico o anisotrópico. Si es necesario, también se realizan más procesos tanto en la cara de componentes como en la cara dorsal.

Tabla 1.3: Proceso de micromaquinado volumétrico

En la figura 1.6 se muestra un esquema del proceso de micromaquinado volumétrico [7].

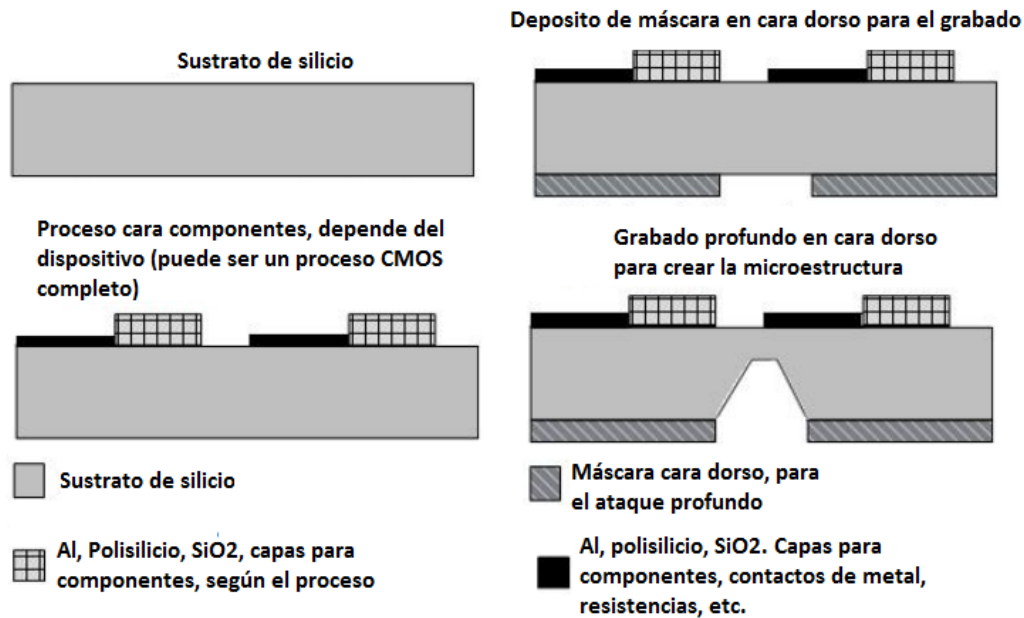


Figura 1. 6: Proceso de micromaquinado volumétrico

En esta técnica se utilizaba grabado húmedo, pero en la actualidad, debido a los avances en los grabados por iones reactivos (“Reactive Ion Etching”, RIE) permiten tener el control de la velocidad de remoción y la profundidad, logrando conseguir hasta paredes verticales [7].

## 1.4 Transistor MOS de compuerta flotante

Como se mencionó anteriormente, una de las características que se le quiere dar a la estructura del sensor de gas aquí reportado, es lograr una transducción de la concentración de gas basado en el FGMOS. Éste es un método novedoso que se aparta de aquel empleado por los sensores de gas a semiconductor (SGS) normalmente reportados y encontrados comercialmente, que correlacionan la concentración del gas con el cambio de resistividad de la película sensora. Por lo tanto, a continuación se presenta una explicación del funcionamiento y operación de este dispositivo, con la finalidad de enfocar la aplicación del FGMOS hacia el sensor de gas [10].

El transistor MOS de compuerta flotante, comúnmente llamado FGMOS, es muy similar a transistor MOS convencional, debido a que la compuerta flotante es equivalente a la compuerta del transistor MOS convencional, la diferencia radica en que el voltaje de la compuerta flotante es controlado a través de una capacitancia de acoplamiento que se forma entre la compuerta flotante y una compuerta de control, Figura (1.8 a y 1.8 b).

El primer reporte de un MOSFET de compuerta flotante fue hecho por Kahng y Sze en el año de 1967, cuya primera aplicación fue la de almacenar datos digitales en las EPROM, EEPROM y memorias flash [11].

Al final de los años 80's fueron utilizados como elementos analógicos de memoria permanente como es el caso del chip Intel ETANN y en circuitos de adaptación de retina de rayos ultravioleta [12].

### 1.4.1 Estructura del transistor FGMOS

El transistor MOS de compuerta flotante, se forma con la modificación de un transistor MOSFET convencional (Figura 1.7). En dicho caso, la compuerta flotante se rodea de óxido, quedando completamente aislada eléctricamente del exterior. La creación de un nodo flotante y un número de entradas secundarias se depositan por encima de la compuerta flotante. Sin embargo, el control de la corriente que va de drenador a fuente

*[Optimización del diseño y funcionamiento de un sensor de gas MEMS basado en FGMOS]*

( $I_{DS}$ ), sigue siendo función del potencial en la compuerta de polisilicio del transistor convencional y del potencial en las demás terminales.

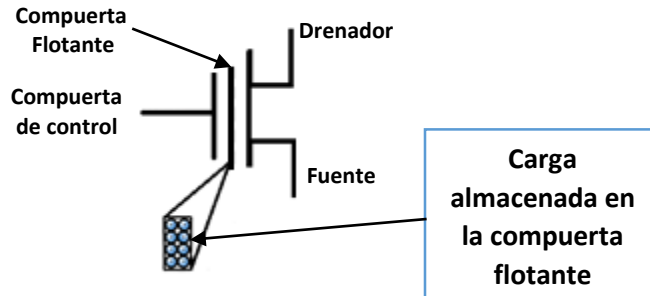


Figura 1. 7: Transistor de compuerta flotante

Para inducir voltaje en la compuerta flotante es necesario implementar algún mecanismo de inducción. Comúnmente existen dos técnicas para conseguirlo, los cuales son *electrones calientes* y *tunelamiento "Fowler-Nordheim"*. Como se observa en la Figura 1.8 (a), para el caso de dos compuertas de entrada, las compuertas CG1 y CG2 son conectadas a los voltajes  $V_1$  y  $V_2$ , respectivamente. Dichas fuentes se conectan a capacitores formados por las capas polisilicio 2-óxido-polisilicio 1. En la Figura 1.8 (b), se muestra el equivalente capacitivo que se genera en la compuerta flotante con respecto al sustrato  $V_{FG-B}$ .

De esta forma, los voltajes  $V_1$  y  $V_2$  controlan la cantidad de corriente  $I_{DS}$  que fluye por el transistor desde la fuente hacia el drenador.

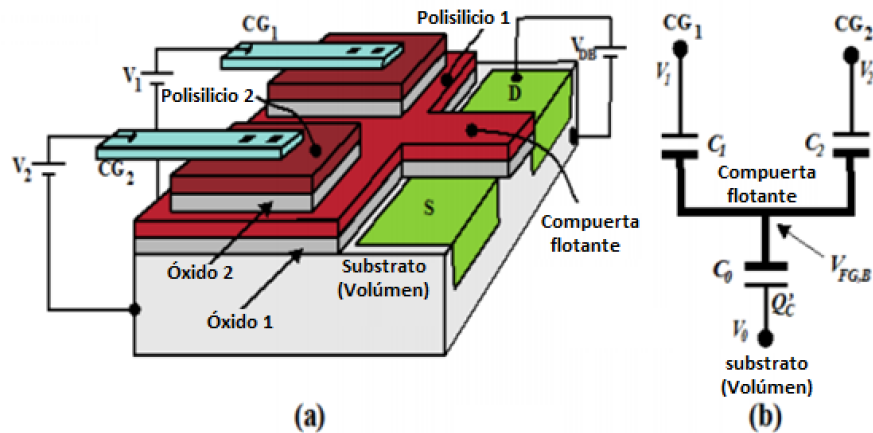


Figura 1. 8: (a) Estructura de un Transistor de compuerta flotante de dos compuertas de control y (b) divisor capacitivo equivalente de entrada [13].

[Optimización del diseño y funcionamiento de un sensor de gas MEMS basado en FG MOS]



En resumen, cuando se aplican N voltajes de entrada en las N compuertas de control, en la superficie del sustrato del MOSFET se genera un potencial de superficie, como resultado de la suma ponderada de los voltajes de entrada, el cual es equivalente al que se obtiene de un divisor de voltaje capacitivo similar al que se muestra en la Figura 1.8 (b).

Uno de los problemas que se presenta en la construcción de un FGMOS, es la presencia de una carga indeseada que permanece almacenada en la compuerta flotante desde el proceso de fabricación. Una forma de eliminar esta carga es iluminando con luz ultravioleta en la compuerta flotante. También con ayuda de un inyector se puede eliminar dicha carga.

Una cuestión importante a tener en cuenta, se refiere a si los elementos de compuerta flotante se encuentran a disposición en los procesos CMOS estándar, lo cual permite que puedan ser utilizados ampliamente como elementos de múltiples entradas en microelectrónica debido a su gran versatilidad. En otras palabras, se requiere que la tecnología ofrezca dos capas de polisilicio, ya que existen tecnologías que trabajan únicamente con una capa de este material y por lo tanto, no son adecuadas para considerar la inclusión de FGMOS en los circuitos a diseñar.

Algunas de las aplicaciones de los FGMOS son como elemento de almacenamiento digital en EPROM, EEPROM y memorias flash, como elemento computacional en redes neuronales, elemento de almacenamiento analógico, potenciómetros digitales, por mencionar algunos [13].

## **1.5 Sensores de gas de estado sólido**

Estos sensores están entre los más versátiles, ya que ellos pueden ser usados para detectar una gran variedad de gases en rangos bajos y altos de ppm de concentración de gas. Esto debido a las diferentes características de respuesta que se logran variando los materiales de óxidos metálicos, técnicas de procesamiento y temperatura de operación [14].

### 1.5.1 Principio de operación

Un sensor de gas de estado sólido se compone de uno o más óxidos metálicos de metales de transición. Típicamente, en los sensores que usan óxidos metálicos en sus capas activas, se mide el cambio de la resistencia eléctrica del material ante la presencia de un gas [15].

El principal mecanismo de detección se debe al cambio en la concentración de oxígeno que se encuentra adsorbido en la superficie de estos óxidos metálicos. Este cambio se produce por la absorción de pequeñas cantidades de gases de tipo oxidante-reductor en la superficie del material y su posterior reacción catalítica con el oxígeno adsorbido.

La conductividad eléctrica depende de los gases en el ambiente externo y de la temperatura de operación a la que es sometido el material. Debido a que la señal que genera la capa sensitiva depende en gran medida de la temperatura de operación, los sensores utilizan un elemento para calentar estas capas (calefactor o heater). Generalmente, dicho elemento está compuesto de platino o polisilicio, y usualmente se coloca en la parte superior del sustrato [16]. Este elemento calefactor debe ser capaz de generar una temperatura superior a la temperatura de trabajo, ya que en muchos casos utilizan una temperatura que supera en más de 50 °C a la temperatura de operación del calefactor para recuperar su valor inicial, después de haber sido expuesto a los gases a detectar. Esto se hace para eliminar posibles residuos de los componentes de gas, lo que se llama “degasar”.

La información referente al sensor de gas propuesto que emplea un FGMOS como elemento de transducción, así como la interacción con dicho transistor para detectar el cambio en la concentración de un gas, se encuentra descrito en [1].

## 1.6 Conclusiones del capítulo

En este capítulo se presentaron los conceptos necesarios para enmarcar las actividades que conducen a la realización del trabajo propuesto.

Los conceptos presentados sobre micromaquinado nos ayudarán a diferenciar entre micromaquinado volumétrico y superficial, ya que el micromaquinado volumétrico es el que se realiza hacia el volumen del substrato de la oblea y el superficial es el que se lleva a cabo sobre las capas de materiales depositados sobre la superficie de la oblea. Para hacer posible el aislamiento térmico del sensor de gas propuesto para este trabajo, se hará uso de la técnica de micromaquinado volumétrico.

Es necesario también tener bien clara la teoría del transistor MOS de compuerta flotante (FGMOS), ya que en el trabajo propuesto el transistor FGMOS se utilizará como transductor, con el cual se podrá correlacionar la concentración del gas presente con la corriente de drenador del transistor.

## **2. Optimización y adaptación del diseño topológico del micro sensor y micro calefactor a la tecnología CMOS estándar de 0.5 $\mu\text{m}$ .**

El diseño topológico del micro calefactor y micro sensor realizado en [1], fue con tecnología CMOS estándar de 1.2  $\mu\text{m}$ . La optimización y adaptación del diseño propuesto para este trabajo, se hizo tomando en cuenta 2 factores importantes:

- En las nuevas tecnologías de procesos de fabricación CMOS estándar, como la de 0.5  $\mu\text{m}$  que se utilizará en este trabajo, no se permiten grandes áreas para disponer de ventanas sin pasivación del substrato, la cual es necesaria para hacer posteriormente un proceso de micromaquinado. Por lo que en el diseño se implementó un arreglo mediante una matriz de estructuras, lo cual, posteriormente se explicará a detalle (ver tema 2.4). Con estos arreglos, se puede disponer de las áreas necesarias para posteriormente hacer el proceso de micromaquinado requerido (Ver Figura 3.2).
- El otro factor a tomar en cuenta es la geometría del micro sensor y micro calefactor. Aunque se mantuvieron las dimensiones, la forma es la que se modificaría, ya que se tenía una forma de serpentina, pero con esquinas en ángulo recto. Mediante simulación se pudo observar que se tenía una mayor densidad de corriente en las esquinas de la estructura, la cual se procuró reducir en el rediseño; esto se logró dándole una forma redondeada a las esquinas, (ver Figura 2.1).

Tomando en cuenta los puntos anteriormente mencionados, se realizó un nuevo diseño del micro sensor y micro calefactor, haciendo uso del software L-Edit, respetando las dimensiones de la micro placa caliente de 100  $\mu\text{m}$  x 100  $\mu\text{m}$  que se tenía en el diseño realizado en [1], por lo que, se buscó distribuir de manera uniforme las dimensiones tanto del micro calefactor como del micro sensor, tal como a continuación se describe.

La micro placa caliente es una estructura realizada mediante procesos de fabricación de MEMS, que permitirá aislar térmicamente la zona de sensado, donde estará depositada la película de óxido metálico (película sensible) [1].

## **2.1 Layout del micro calefactor y micro sensor en L-Edit**

Para el diseño topológico del micro sensor y micro calefactor, se hizo uso del software L-Edit, el cual es una herramienta de diseño para la fabricación de circuitos integrados, ahora tomando en cuenta las reglas de diseño de la tecnología de 0.5  $\mu\text{m}$  de la fábrica On Semi y las limitaciones que éstas imponen para la definición de grandes áreas para el micromaquinado volumétrico.

En la Figura 2.1 se muestran las dimensiones tanto del micro sensor, como del micro calefactor, ambos de material de polisilicio 1. Las dimensiones están en lambdas, lo cual para esta tecnología equivale a 0.3  $\mu\text{m}$  y se denota por la letra  $\lambda$ .

Se buscaron varias maneras para distribuir las dimensiones del micro calefactor y micro sensor, obteniendo finalmente una donde se aprovechaba de mejor manera el área de la micro placa caliente de 100  $\mu\text{m}$  x 100  $\mu\text{m}$ . Ésta consta de un serpentín de polisilicio de 33.5  $\lambda$  (equivalente a 10.05  $\mu\text{m}$ ) de ancho para el micro calefactor y 10  $\lambda$  (equivalente a 3  $\mu\text{m}$ ) para el micro sensor. La separación entre el micro sensor y el micro calefactor es de 15.5  $\lambda$  (equivalente a 4.65  $\mu\text{m}$ ), las demás dimensiones se muestran de manera detallada en la figura 2.1.

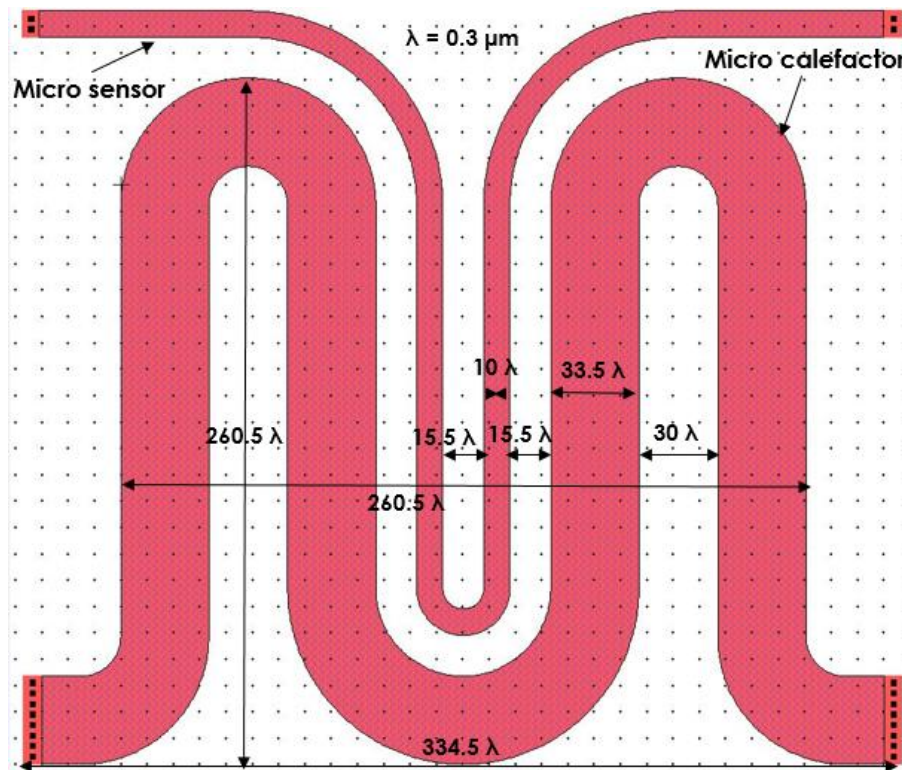


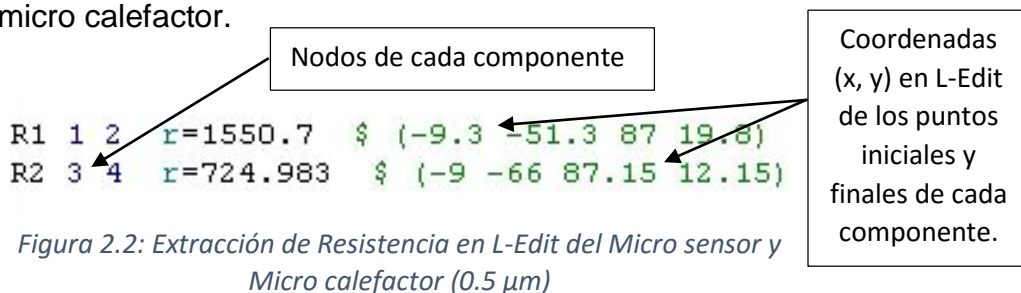
Figura 2.1: Layout del micro sensor y micro calentador en L-Edit

## 2.2 Extracción de resistencia mediante L- Edit

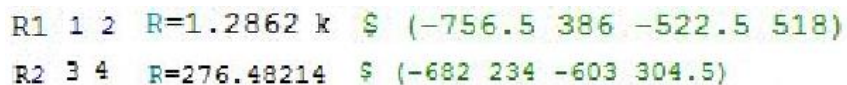
El micro sensor está hecho de polisilicio al igual que el micro calefactor, y debido a su cercanía con el micro calefactor, por conducción térmica estaría a una temperatura aproximadamente del mismo valor, por lo que se aprovecharía para determinar la temperatura de la micro placa caliente midiendo su cambio de resistencia, haciendo uso de su coeficiente térmico de resistencia (TCR).

Al tener el diseño topológico del micro sensor y micro calefactor, utilizando una de las herramientas de L-Edit se puede hacer una extracción para saber el valor de resistencia que se tendría en cada componente a temperatura ambiente.

Los valores de resistencia obtenidos se muestran en la Figura 2.2, donde el valor de R1 corresponde a la resistencia del micro sensor y el valor de R2 corresponde a la resistencia del micro calefactor.



También se hizo una extracción para el diseño presentado en [1], cuyos valores de resistencia se muestran en la figura 2.3, donde R1 corresponde al valor de resistencia del micro sensor y R2 al valor de resistencia del micro calefactor, recordando que la tecnología utilizada en ese diseño es la tecnología CMOS estándar de 1.2  $\mu\text{m}$ .



Como se puede apreciar en las figuras 2.2 y 2.3 los valores de resistencia son diferentes para cada componente en las dos tecnologías, esto debido a que para la tecnología CMOS estándar de 1.2  $\mu\text{m}$  se tiene un valor de resistividad de 21 Ohms/cuadro y para la de 0.5  $\mu\text{m}$  se tiene un valor de 26.2 Ohms/cuadro para polisilicio 1. Por lo tanto, el valor de resistencia aumenta al adaptar el diseño a la tecnología CMOS estándar de 0.5  $\mu\text{m}$ .

### 2.3 Definición de áreas sin pasivación en tecnología CMOS estándar de $1.2 \mu\text{m}$

Un aspecto importante al hacer el diseño topológico, es definir áreas del sustrato de silicio que quedarán expuestas para un post-proceso MEMS de micro maquinado y formar las estructuras que se desean, para poder liberar la micro placa caliente y tener el aislamiento térmico requerido.

Después de haber definido las capas de materiales que forman la micro placa caliente, es necesario dibujar las geometrías para indicar las áreas donde el sustrato de silicio no tendrá ningún otro material por encima, es decir, las áreas del sustrato de silicio que quedarán expuestas para el post-proceso antes mencionado, tal como se muestra en las ventanas de la figura 2.4. En dicha figura se muestra también la vista superior (a) y un corte transversal (b), obtenido mediante L-Edit, en el cual se muestra la micro placa caliente, las ventanas sin pasivación, y las zonas donde sí se tendrá pasivación, sirviendo esta última como mascarilla de protección durante el proceso de decapado mediante una solución selectiva que ataque únicamente al silicio.

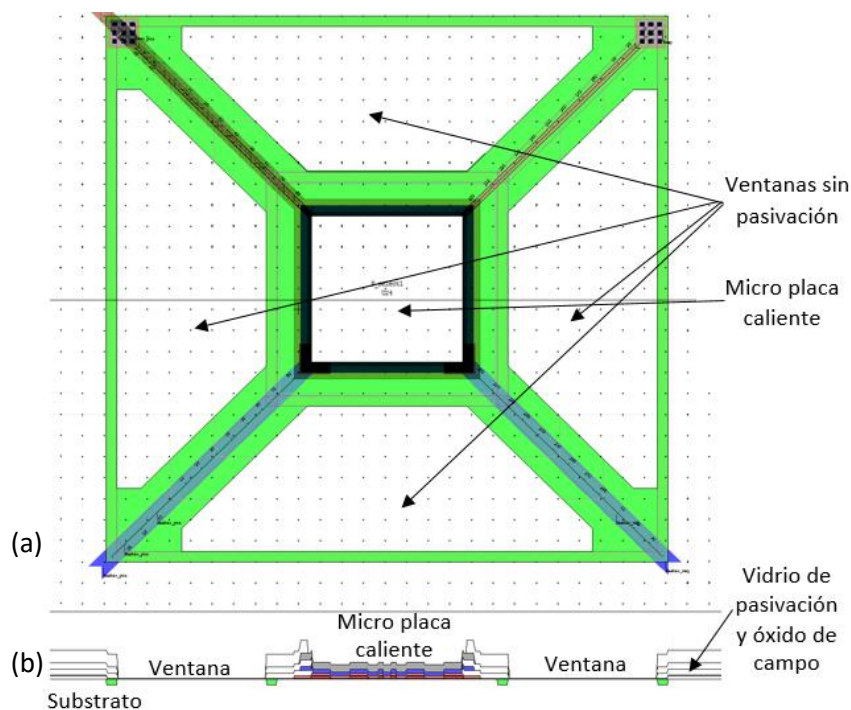


Figura 2.4: Vista Superior (a) y (b) sección transversal de la micro placa caliente ( $1.2 \mu\text{m}$ ).

[Optimización del diseño y funcionamiento de un sensor de gas MEMS basado en FGMOS]



Las geometrías de las diferentes capas para obtener las ventanas sin pasivación se muestran a continuación:

- Definición de región activa (Izquierda) y contacto a región activa (Derecha)

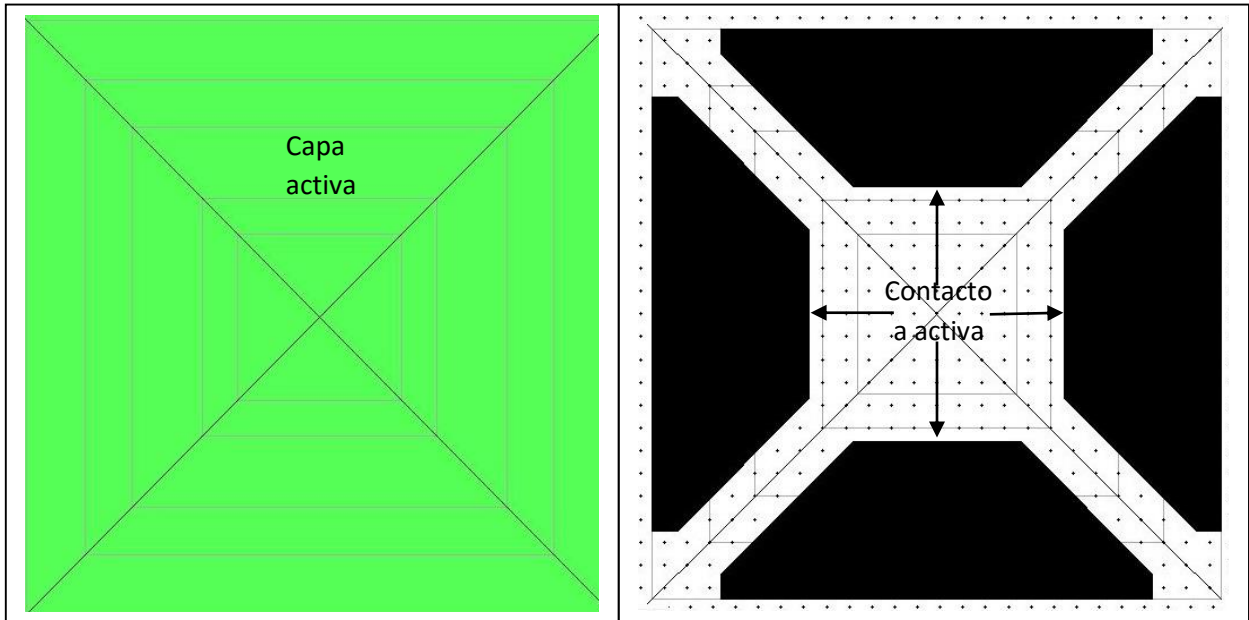


Figura 2.5: Definición de región activa y contacto a región activa.

- Definición vía (contacto entre metal 2 y metal 1) y Overglass (Derecha)

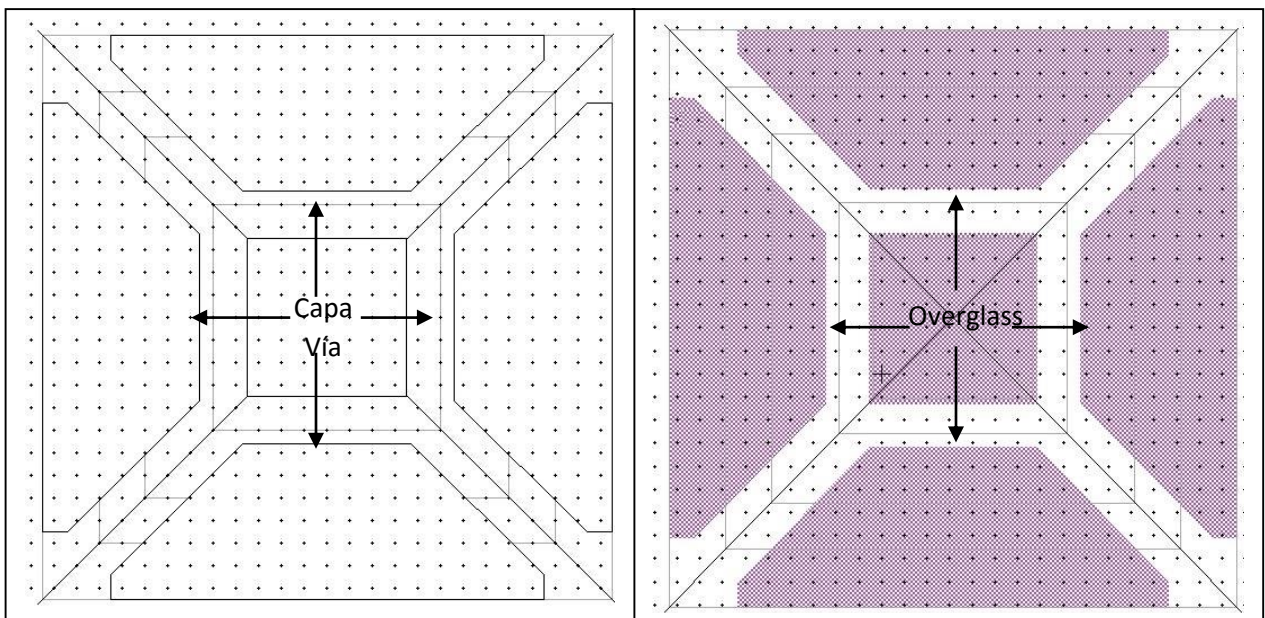


Figura 2.6: Definición de capa vía y overglass (pasivación).

[Optimización del diseño y funcionamiento de un sensor de gas MEMS basado en FGMS]

## 2.4 Definición de áreas sin pasivación en tecnología CMOS estándar de 0.5 $\mu\text{m}$

Para definir las áreas del sustrato de silicio que quedarán expuestas, empleando la tecnología de 1.2  $\mu\text{m}$ , aunque se violaban las reglas de diseño de esa tecnología se podían tener geometrías como las mostradas en las figuras 2.5 y 2.6 y no había problema al momento de mandarlo a fabricar, es decir, el diseño era admitido a pesar de presentarse estas violaciones a las reglas de diseño. Pero, para la tecnología de 0.5  $\mu\text{m}$ , esto ya no es posible, ya que lo marcan como un error en el diseño y en este caso, el reporte del fabricante al recibir y verificar el diseño, responde con un mensaje de que mientras no se corrijan estas violaciones, no fabricarán el chip, por lo que sugieren una forma diferente para indicar esas áreas del sustrato de silicio que se requiere queden expuestas. El nuevo diseño propuesto para la micro placa se muestra en la figura 2.7, la cual además está girada 45° respecto a la estructura de la figura 2.4. Esto con el fin de propiciar un mejor ataque preferencial durante el post-proceso de micromaquinado con Hidróxido de Trimetil-Acético (TMAH). Se muestra también en esta figura un corte transversal donde se indica la región de las ventanas que dejarán el silicio expuesto para permitir el micromaquinado. De la misma manera que con la estructura de la figura 2.4, todas las demás regiones quedan protegidas con vidrio y no serán atacadas por la solución preferencial. Para indicar esto, es necesario hacer un arreglo de estructuras (varias capas encimadas) de región *activa*, *contacto a región activa*, *vía 1*, *vía 2* y *overglass*, esto en geometrías de cuadrados de 2 x 2  $\lambda$  ( $\lambda=0.3 \mu\text{m}$ ), cuya separación debe ser 3  $\lambda$  entre cada cuadrado, según las reglas de diseño respectivas, tal como se muestra en las figuras 2.8, 2.9, 2.10 y 2.11.

En la figura 2.7 (a) se muestra la vista superior de un diseño para la micro placa en la tecnología de 0.5  $\mu\text{m}$ , (b) un corte transversal en el cual se aprecia la micro placa y las ventanas sin pasivación, y (c) un zoom en una de las ventanas sin pasivación obtenida mediante el arreglo de estructuras sugerido; aunque en el simulador se muestre la ventana como en (c), en realidad es sólo indicativo, ya que realmente se tendrán ventanas como la mostrada en (d).

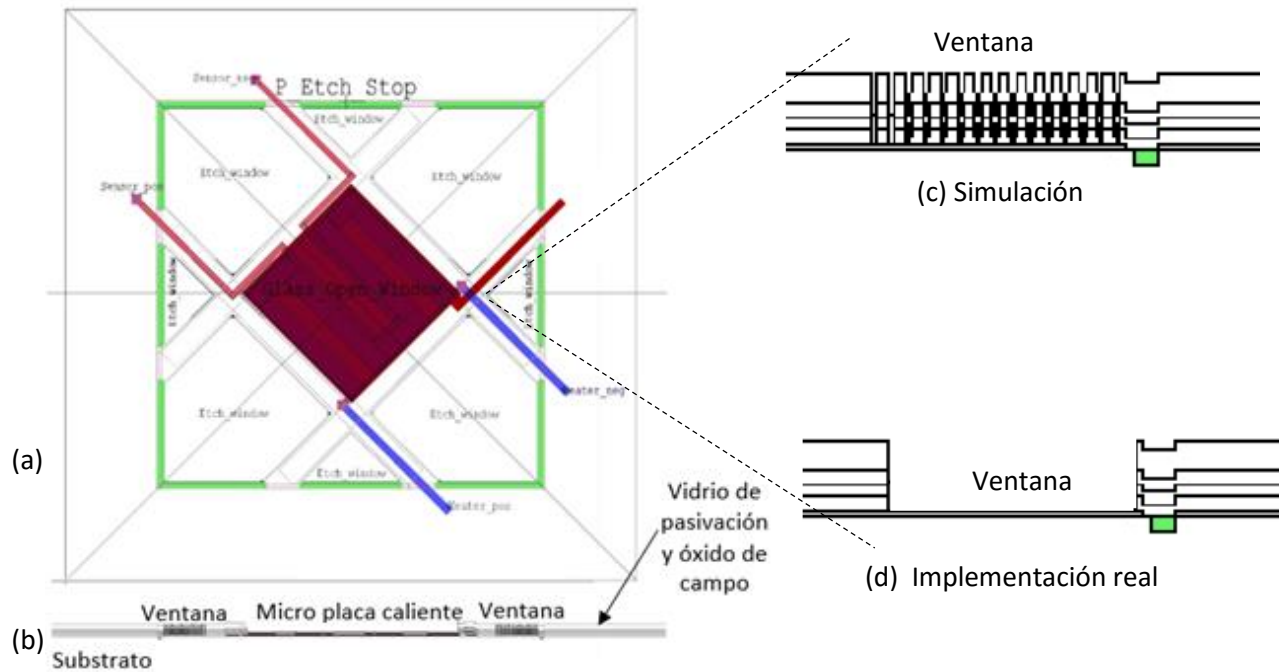


Figura 2.7: Vista superior (a) y sección transversal (b) de la micro placa caliente (0.5  $\mu\text{m}$ ), (c, d) zoom de la región de ventana.

Las geometrías para obtener las ventanas sin pasivación en la tecnología CMOS estándar de 0.5  $\mu\text{m}$ , se muestran a continuación:

- Definición de región activa (Izquierda) y contacto a región activa (Derecha)

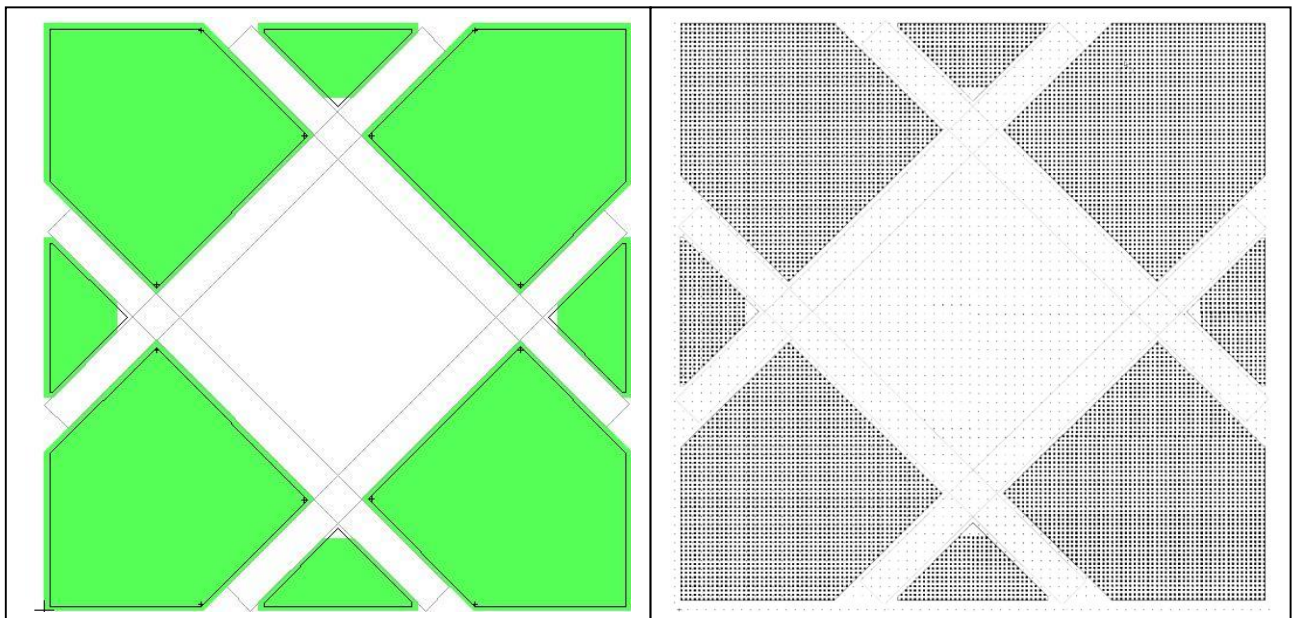


Figura 2.8: Definición de región activa y arreglo de contacto a región activa

[Optimización del diseño y funcionamiento de un sensor de gas MEMS basado en FGMOS]

- Arreglo de cuadrados de vía 1 de  $2\lambda \times 2\lambda$  con una separación de  $3\lambda$  (Figura 2.9).

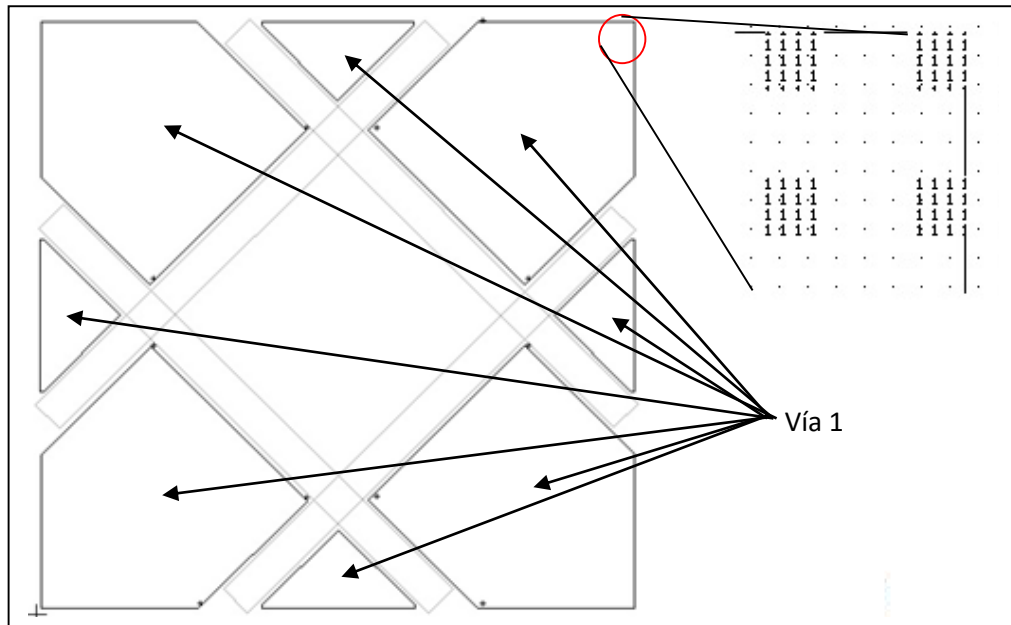


Figura 2.9: Arreglo para la definición de Vía 1

- Arreglo de cuadrados de vía 2 de  $2\lambda \times 2\lambda$  con una separación de  $3\lambda$  (Figura 2.10)

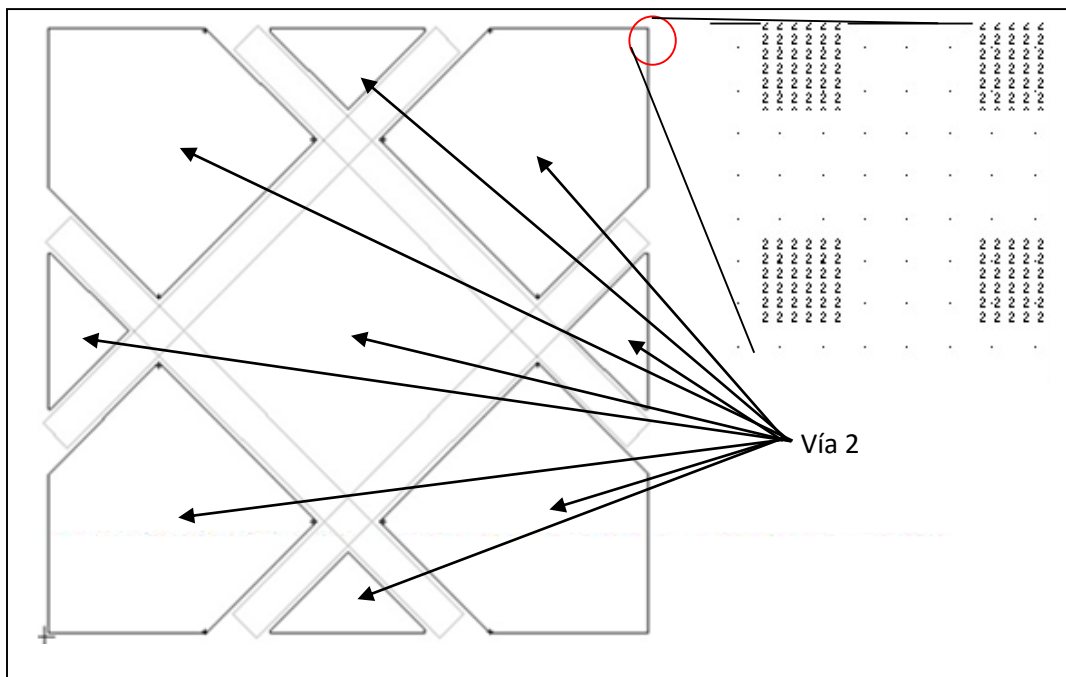


Figura 2.10: Arreglo para la definición de vía 2.



➤ Overglass (pasivación)

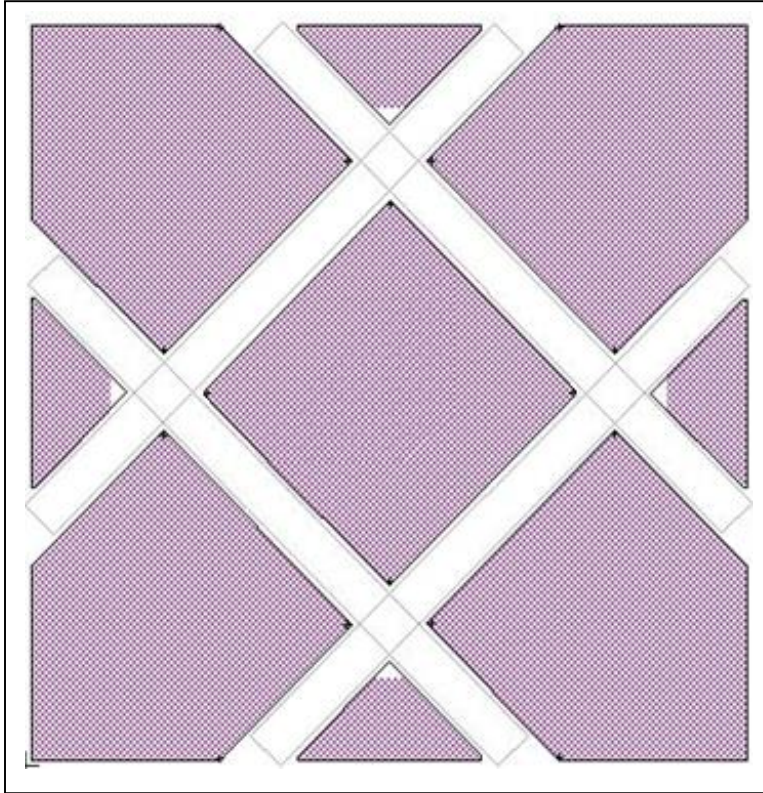


Figura 2.11: Overglass

Con esta forma para indicar qué áreas quedarán expuestas al momento de que se fabrique el chip en la tecnología de 0.5  $\mu\text{m}$ , dependiendo de las capas empleadas, existe la posibilidad de elegir si se quiere el substrato completamente expuesto o si se prefiere, quede con alguna protección de óxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ), tal como a continuación se muestra:

- Si se requiere el substrato de silicio completamente expuesto (ver figura 2.12) las capas a utilizar en el arreglo de estructuras son: *activa*, *contacto a activa*, *vía 1*, *vía 2* y *overglass*.

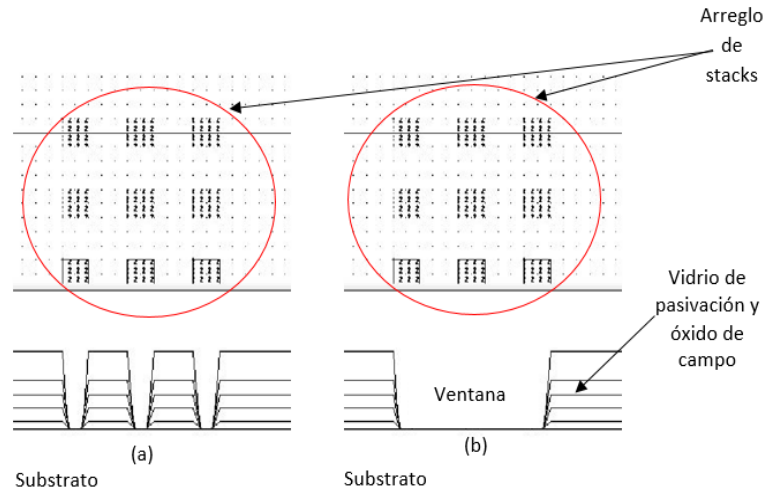


Figura 2.12: Sección transversal para silicio totalmente expuesto

Es importante recalcar, que las imagenes mostradas de los cortes transversales generados por L-Edit, quedaría como la mostrada en la figura 2.12 (a), pero el resultado real sería como la imagen mostrada en la figura 2.12 (b).

- Por otro lado, si se requiere que el substrato conserve la protección de una capa de  $\text{SiO}_2$  (ver figura 2.13), es decir el óxido inferior a la capa de metal 1 (aluminio), las capas a utilizar en el arreglo de estructuras son: *vía 1*, *vía 2* y *overglass*. La figura 2.13(a) ilustra la sección transversal generada por L-Edit y la figura 2.13(b) el resultado real después de la fabricación.

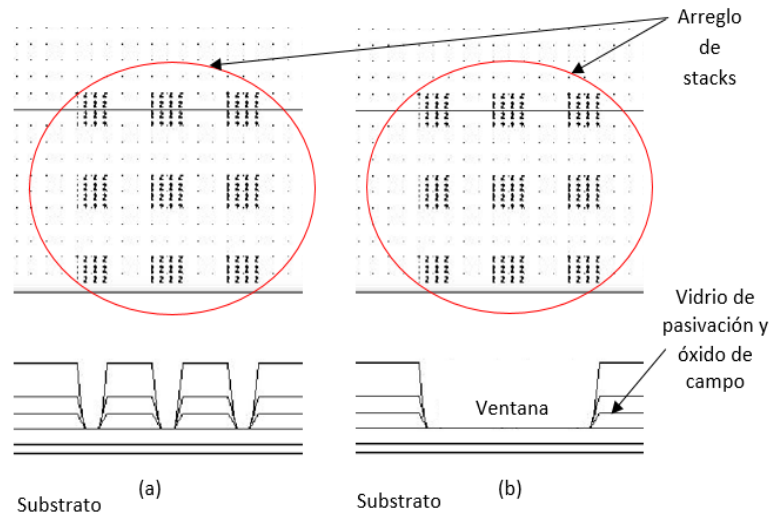


Figura 2.13: Sección transversal para una ventana con primera capa de  $\text{SiO}_2$

[Optimización del diseño y funcionamiento de un sensor de gas MEMS basado en FGMS]

- Si se requiere tener una protección aún más gruesa de  $\text{SiO}_2$  sobre el sustrato de silicio (ver figura 2.14), existe otra opción en donde se tiene una segunda capa de óxido de silicio, es decir el óxido inferior a la capa de metal 2 (aluminio), las capas a utilizar en el arreglo de estructuras son: *vía 2* y *overglass*. Una vez más, la figura 2.14(a) ilustra la sección transversal generada por L-Edit y la figura 2.14(b) muestra el resultado después de la fabricación del chip.

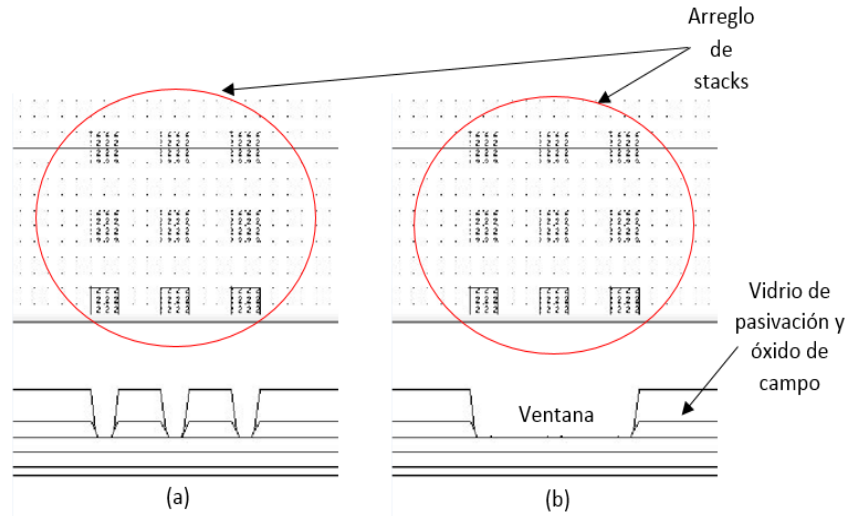


Figura 2.14: Sección transversal Sección transversal para una ventana con segunda capa de  $\text{SiO}_2$

Las tres recomendaciones anteriores aplicadas a la tecnología de 0.5  $\mu\text{m}$ , resultan muy útiles para fines de definición de áreas grandes a las cuales se les requiere eliminar determinadas capas de óxido de silicio y principalmente para la generación de estructuras tridimensionales como los MEMS. La primera de las técnicas, es útil para micromaquinado volumétrico y las dos siguientes se pueden emplear principalmente para micromaquinado superficial. De esta manera, se puede aprovechar la adaptación recomendada por MOSIS para emplear la fabricación estándar CMOS de 0.5  $\mu\text{m}$  y extenderla para la definición de MEMS, lo cual se conoce como **tecnología CMOS-MEMS**. Dentro de las ventajas que se puede mencionar de esta tecnología es que es posible la fabricación en el mismo sustrato o chip, tanto los sensores como los actuadores junto con la electrónica asociada, lo cual se conoce como *integración monolítica*. Sin embargo, dentro de las desventajas se puede comentar que el espesor de las posibles capas estructurales, como lo serían el polisilicio y el aluminio, está por

[Optimización del diseño y funcionamiento de un sensor de gas MEMS basado en FGMS]

debajo del espesor usado en las tecnologías dedicadas para MEMS, en las cuales no se pueden fabricar elementos o circuitos electrónicos. Éste deberá ser un elemento de juicio para decidirse por la tecnología CMOS o por la tecnología MEMS. Cabe agregar que el costo de fabricación en tecnologías dedicadas exclusivamente a MEMS (como PolyMUMPS o MetalMUMPS) es sumamente elevado (aproximadamente USD \$5,000 por 15 chips sin micromaquinar contra USD\$2,000 por 40 chips en tecnología CMOS).

## **2.5 Conclusiones del capítulo**

- Se mostró la forma en la que se deben elaborar las geometrías en el diseño topológico para indicar las áreas que quedarán expuestas para cada tecnología de fabricación (1.2  $\mu\text{m}$  y 0.5  $\mu\text{m}$ ) cuya finalidad es remarcar los pasos que se tuvieron que seguir para adaptar el diseño que ya se tenía en la tecnología CMOS estándar de 1.2  $\mu\text{m}$ , a la tecnología de 0.5  $\mu\text{m}$ , necesaria para poder continuar con el estudio del sensor de gas, ya que aún hay aspectos a considerar y a optimizar, en función de los resultados que se vayan obteniendo.
- Se mostraron también las formas para indicar cuando se quiere un área expuesta hasta el substrato o bien, protegido solamente por un óxido delgado (óxido contenido por debajo de metal 1 hasta substrato) o por un óxido más grueso (óxido contenido por debajo de metal 2 hasta substrato).
- Se mostró el diseño topológico o layout con las modificaciones que se le hicieron al micro calefactor y al micro sensor, con el fin de obtener una optimización en cuanto a consumo de energía en el micro calefactor. También se mostraron los valores de extracción de resistencia para cada tecnología (1.2  $\mu\text{m}$  y 0.5  $\mu\text{m}$ ).



### 3. Simulaciones

Como en todo sistema, es necesario realizar simulaciones para cerciorarse del correcto funcionamiento previo a la fabricación de los diferentes componentes que conforman dicho sistema.

En este capítulo se mostrarán las diversas simulaciones que se llevaron a cabo. Con el fin de realizar un análisis lo más completo posible del comportamiento del sistema; se realizaron simulaciones de micromaquinado en ACES y electro-térmicas en COMSOL.

#### 3.1 Programa de simulación ACES (Anisotropic Crystalline Etching Simulator)

Este paquete es un simulador 3D de micromaquinado volumétrico de silicio que usa un modelo continuo y un método dinámico, que ofrecen alta velocidad de cálculo y los requisitos de memoria son reducidos drásticamente. El software puede simular el micromaquinado de silicio con diferentes orientaciones cristalográficas en la superficie, con los agentes de ataque seleccionados de un menú que puede incluir soluciones convencionales y propuestas por el usuario, con tasas de ataque variables.

Este software puede recibir diseños de máscaras 2D en formato de máscaras comunes (Incluyendo CIF, GDSII, BMP) genera el perfil 3D en lenguajes de modelado estándar y los resultados de visualización utilizando un visor tridimensional integrado, que se basa en OpenGL, la cual es una especificación estándar que define una interfaz de programación de aplicaciones multilenguaje y multiplataforma para escribir aplicaciones que produzcan gráficos 2D y 3D. La figura 3.1 muestra una captura de pantalla de la interfaz gráfica de ACES.

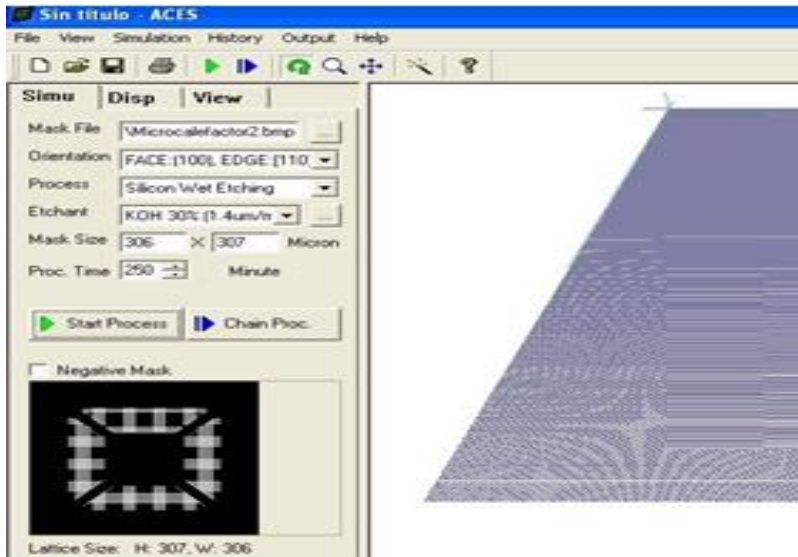


Figura 3.1: Interfaz de usuario de ACES

### 3.1.1 Simulaciones de micromaquinado en ACES

Como se mencionó antes, en la tecnología de fabricación CMOS de  $0.5 \mu\text{m}$  no se permiten dejar ventanas o áreas grandes del substrato sin pasivación como las que en este caso se necesitan para hacer el micromaquinado, esto debido a las reglas de diseño de la tecnología, por lo que es necesario en el diseño topológico hacer un arreglo mediante una matriz de estructuras de  $2\lambda \times 2\lambda$  separados una distancia de  $3\lambda$  para poder indicar el área sin pasivación requerida y de esta forma, al momento de la fabricación del CI, queden libres o sin pasivación esos espacios indicados con el arreglo antes mencionado. Las regiones que si tienen pasivación funcionarán como mascarilla al momento de realizar el micromaquinado [1].

Después de realizar el diseño topológico del micro sensor y micro calefactor y con base en sus dimensiones, se hace un diseño de una mascarilla para poder realizar una simulación de micromaquinado volumétrico en el software ACES. Este está disponible para descargar en: <http://www.cleanroom.byu.edu/KOH.phtml>, donde se puede obtener de forma libre, tanto el paquete de simulación como las razones de ataque para distintas concentraciones de solución a base de KOH.

En la figura 3.2 se muestra la mascarilla elaborada para hacer la simulación en ACES; la mascarilla se diseñó de acuerdo a las dimensiones de la micro placa caliente, la cual se describe en diferentes secciones como se indica a continuación:

- Un cuadro central donde se encuentra la micro placa caliente, cuyas dimensiones son de  $100\ \mu\text{m} \times 100\ \mu\text{m}$ , además de indicar sus brazos, las cuales servirán de soporte al momento de que se haga el micromaquinado.
- Un cuadrado intermedio, que es hasta donde se extienden los brazos de la micro placa, dentro del cual se observan las matrices de estructuras elaboradas; ésta tiene dimensiones de  $200\ \mu\text{m} \times 200\ \mu\text{m}$ .
- Un cuadrado exterior, que para el software ACES, es el que hace referencia al tamaño de la oblea. En este caso, es de  $300\ \mu\text{m} \times 300\ \mu\text{m}$  (esta dimensión es arbitraria). Los arreglos de cuadros pequeños, a los lados de los brazos que soportan la micro placa, son los arreglos o matrices de estructuras de  $2 \times 2\ \lambda$  propuestos para adaptar el diseño a la tecnología de  $0.5\ \mu\text{m}$  (ver tema 2.4) . Se diseñó de esa forma la mascarilla, debido a que no se había mandado a fabricar haciendo uso de esta tecnología y se tenía duda si las ventanas finalmente se tenían como las mostradas en (c) o en (d) de la figura 2.7.

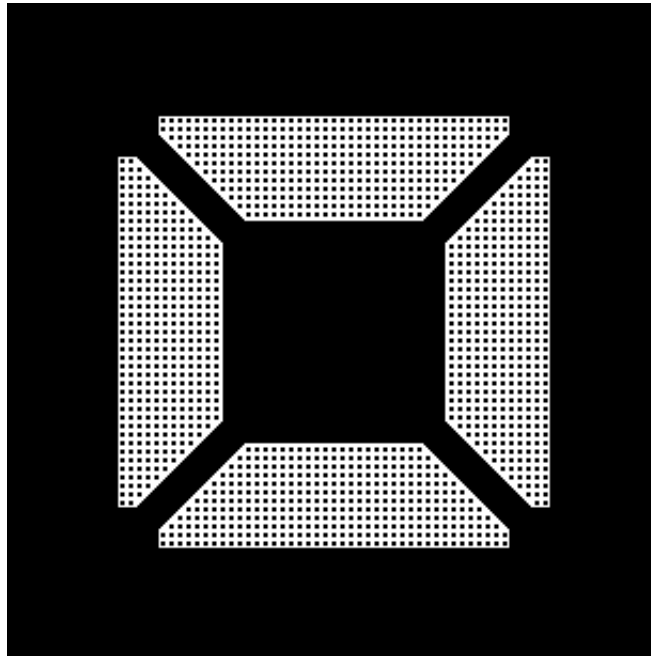


Figura 3.2: Mascarilla utilizada para simulación de micromaquinado volumétrico en ACES.

[Optimización del diseño y funcionamiento de un sensor de gas MEMS basado en FGMOS]

Para llevar a cabo la simulación, en la ventana de trabajo (figura 3.1), se debe seleccionar la mascarilla (figura 3.2), posteriormente, se elige la orientación en la superficie de la oblea; en este caso se eligió la orientación (100) debido a que las obleas sobre las que se fabrican los CI tienen esa orientación en la superficie. En el software se pueden elegir diferentes soluciones como decapante o proponer algunas como usuario, para este caso se eligió la solución KOH (hidroxido de potasio), para una concentración y temperatura del 30% y 80 ° C, respectivamente. Con lo cual, se tiene una velocidad de ataque de 1.4  $\mu\text{m}/\text{min}$ . También, debe elegirse el tiempo de duración del proceso a simular, se probaron varios tiempos hasta que quedara totalmente plana la parte inferior en donde estaría la micro placa caliente. Finalmente para un tiempo de proceso de 250 minutos se obtuvo el resultado deseado, éste tiempo es muy largo considerando la velocidad de ataque para la concentración de KOH mencionada, pero, es necesario resaltar que es debido a la mascarilla que se utilizó para la simulación (ver figura 3.2), ya que la solución decapante entra por los espacios de los cuadros pequeños de la mascarilla, por lo que el tiempo para decapar y suspender la micro placa caliente es mayor, en comparación con una mascarilla sin el arreglo de cuadros pequeños, es decir, sólo con las ventanas.

Una vez configurado todo, se procedió a realizar la simulación. En la figura 3.3, se muestra el resultado obtenido del micromaquinado volumétrico, a partir de la mascarilla mostrada en la figura 3.2.

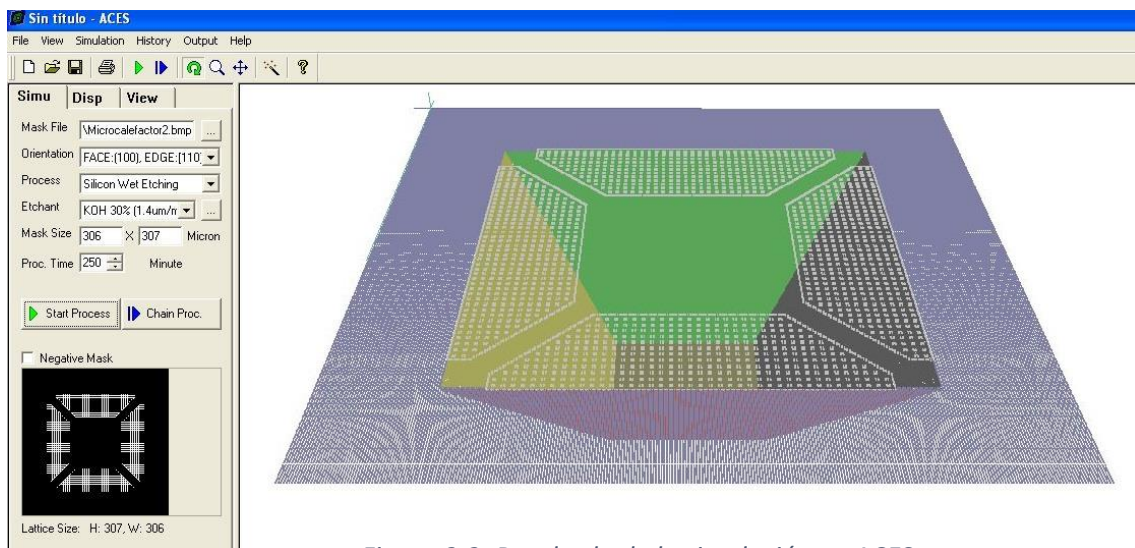


Figura 3.3: Resultado de la simulación en ACES

En la figura 3.4, se muestra una vista superior de la cavidad obtenida por la simulación, donde también se muestra la máscara y la forma que se obtuvo a partir de esa mascarilla.

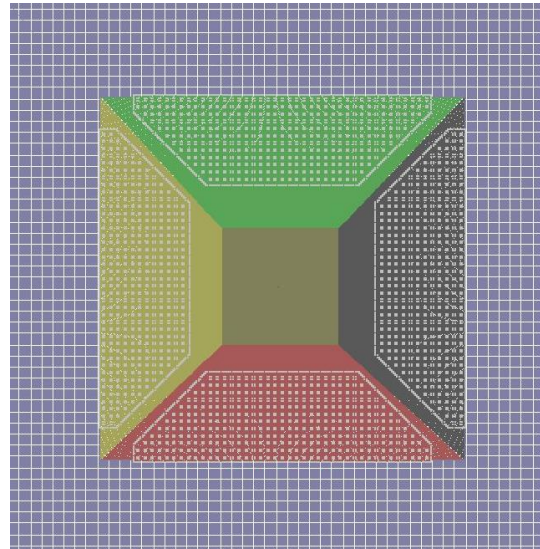


Figura 3. 4: Vista superior de la simulación en ACES

Una vez que se tiene la simulación, el software permite saber cuál es la profundidad de la cavidad formada. En la figura 3.5 se muestra esta medida, en la parte inferior izquierda se puede observar que corresponde a un valor de 125  $\mu\text{m}$ .

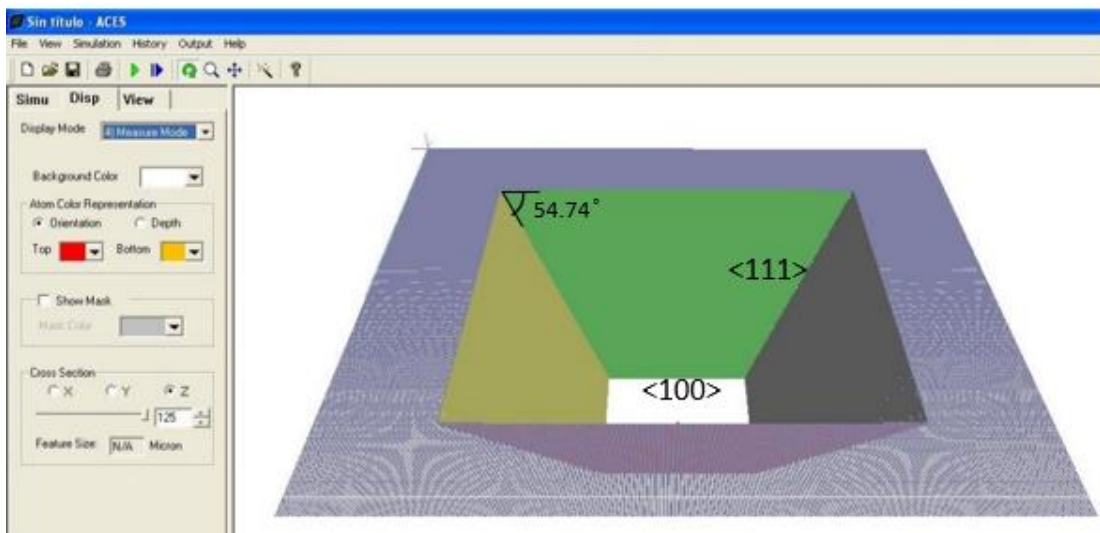


Figura 3. 5: Profundidad máxima de decapado



También se pueden obtener distintas vistas de la estructura final, como se muestra en la figura 3.6.

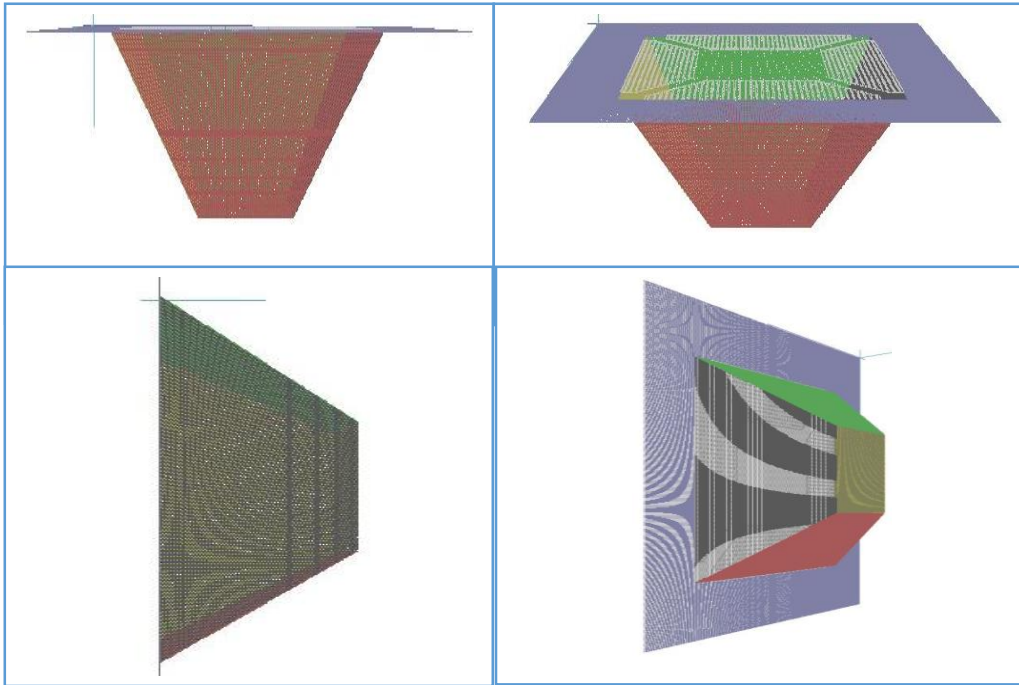


Figura 3. 6: Diferentes vistas de la estructura final

El software ACES también nos muestra una vista con un corte transversal, tal como se muestra en la figura 3.7.

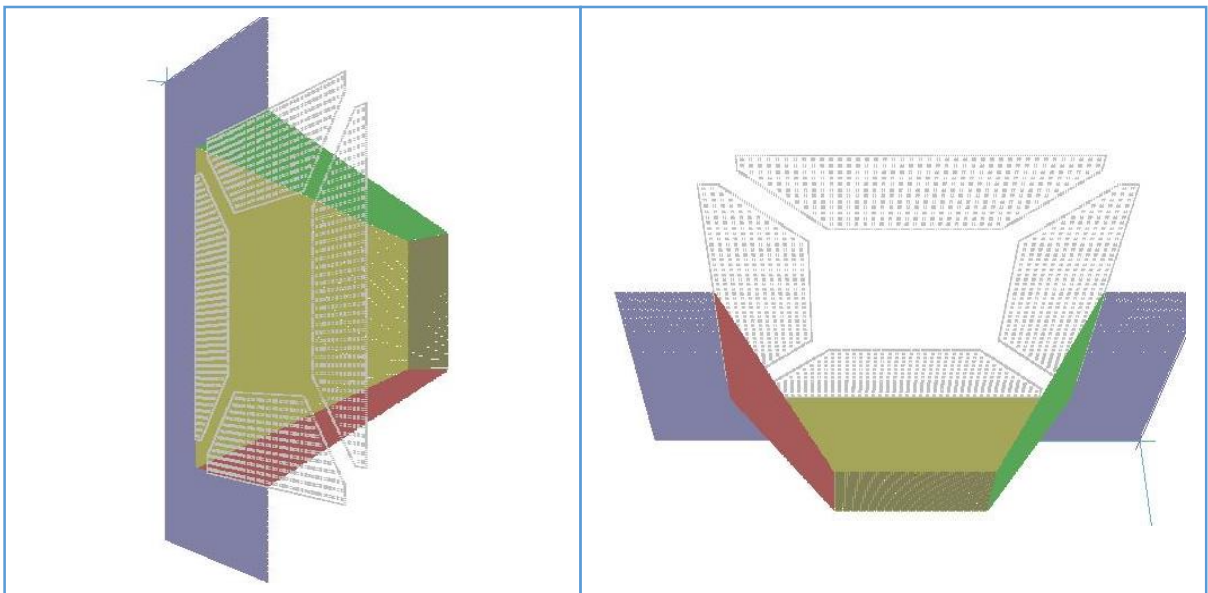


Figura 3.7: Vista lateral con corte transversal

[Optimización del diseño y funcionamiento de un sensor de gas MEMS basado en FG MOS]

De estas simulaciones, se puede observar la utilidad de emplear una oblea cuya superficie tiene una orientación cristalográfica 100, ya que se logra la cavidad esperada para obtener una delgada membrana suspendida por los cuatro brazos, con lo que se logra el aislamiento térmico en esa parte de la estructura, que corresponde a la zona donde estará la película sensora que operará a temperaturas entre 200°C y 300°C y el resto de la superficie (no ilustrada) donde se integrará la electrónica de control y procesamiento. De acuerdo con lo reportado en la literatura [8] [20], el ángulo de las paredes laterales de la pirámide truncada invertida, que forma la cavidad, es de 54.74° respecto al plano de la superficie, que corresponde al plano (111), esperado para un decapado o micromaquinado anisotrópico (ver fig. 3.5).

En resumen, se puede comentar que gracias a este programa (ACES) se pueden ensayar diferentes procesos de micromaquinado y geometrías de estructuras tridimensionales, con el objetivo de optimizar el diseño de la micro placa caliente. De las simulaciones, se obtiene la profundidad de decapado en la que la micro placa queda suspendida, y es la que se utilizará en el paquete de simulación multifísica, para analizar el comportamiento electro-térmico mediante elementos finitos y determinar si efectivamente se logra el aislamiento térmico deseado. Estas simulaciones se presentarán más adelante.

### **3.2 COMSOL Multiphysics**

COMSOL Multiphysics es un software para el modelado de sistemas físicos basándose en el método de elementos finitos [17].

El proceso para llevar a cabo una simulación en COMSOL Multiphysics se define a través de los siguientes pasos:

- Creación de la geometría
- Selección de materiales para la estructura a simular
- Especificación de la(s) física(s)
- Creación de la malla
- Tipo de estudio
- Visualización de resultados

En la figura 3.8 se muestra la interfaz gráfica de COMSOL Multiphysics 4.4.

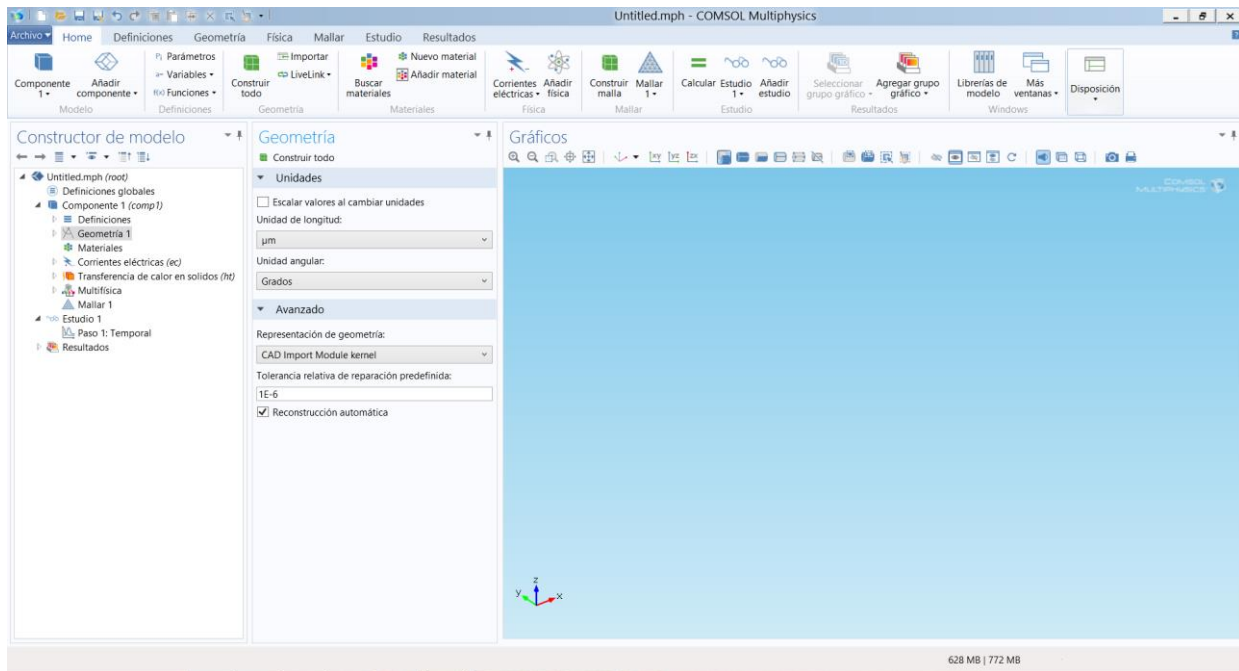


Figura 3.8: Interfaz gráfica de COMSOL Multiphysics



### 3.2.1 Simulación Electro-Térmica en COMSOL 2D y 3D

Siguiendo los pasos anteriormente mencionados y partiendo de la geometría propuesta en el diseño de la micro placa caliente, la cual contiene al micro calefactor y al micro sensor, ambas de polisilicio, se crea una geometría de la estructura completa en COMSOL Multiphysics, considerando las características físicas de cada material que conforman la estructura del dispositivo. También se consideró el micromaquinado, de acuerdo a lo obtenido en simulación con el software ACES, para ver si se logra el aislamiento térmico deseado de la micro placa caliente.

En la figura 3.9 se muestra la geometría dibujada para el micro calefactor y micro sensor en COMSOL Multiphysics.

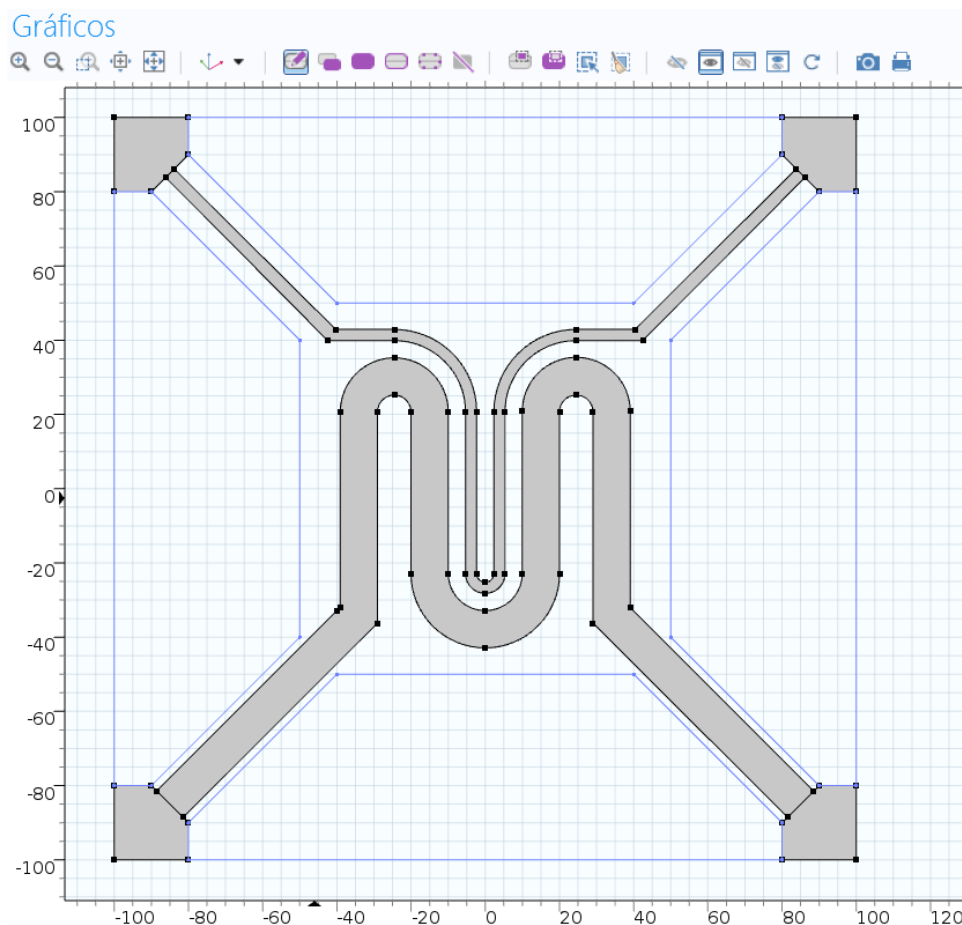


Figura 3.9: Geometría del micro calefactor y micro sensor en COMSOL Multiphysics

[Optimización del diseño y funcionamiento de un sensor de gas MEMS basado en FGMOS]

A partir de la geometría mostrada en la figura 3.9, se extruyó para un espesor correspondiente a polisilicio 1, el cual es de  $0.4 \mu\text{m}$ , y se cubrió con óxido de silicio, correspondiente al óxido de compuerta por la parte inferior y por la parte superior, al óxido de campo. Se procedió a crear una estructura en la parte inferior del óxido de compuerta, la cual correspondería al sustrato de silicio, cuyas dimensiones fueron de  $600 \mu\text{m} \times 600 \mu\text{m}$  y  $200 \mu\text{m}$  de espesor.

Posteriormente, como se muestra en la figura 3.10, se le quita al sustrato la parte correspondiente al micromaquinado, para dejar aislada térmicamente la micro placa caliente. La profundidad micromaquinada fue de  $125 \mu\text{m}$  (lo cual se obtuvo mediante simulación en ACES, ver figura 3.5). En la figura 3.11, se muestra una vista lateral de la geometría dibujada en COMSOL Multiphysics, en la cual se puede observar la profundidad de micromaquinado y en la parte superior la capa de óxido de silicio que envuelve al micro calefactor y al micro sensor.

En la figura 3.10 se muestra la geometría final completa con sus dimensiones, en la cual se puede observar cómo quedaría suspendida la micro placa caliente, después de un proceso de decapado.

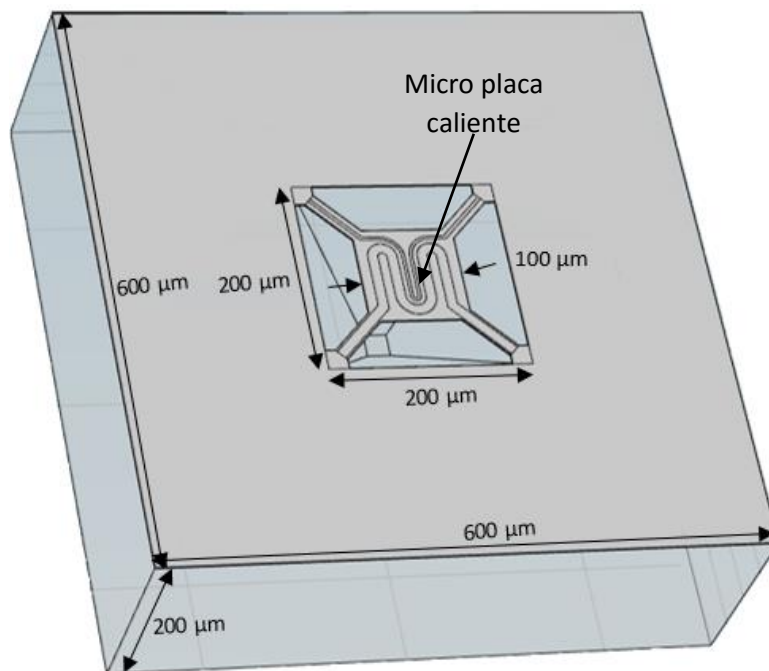


Figura 3.10: Geometría completa en COMSOL Multiphysics

[Optimización del diseño y funcionamiento de un sensor de gas MEMS basado en FGMOS]

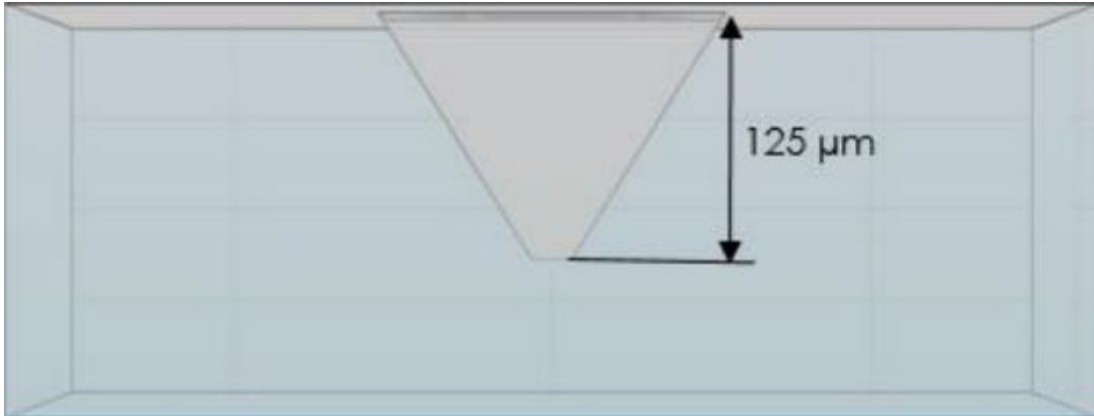


Figura 3.11: Vista lateral de la geometría completa

Después de tener la geometría completa, es necesario declarar o elegir los materiales desde la biblioteca de materiales proporcionada por COMSOL. En la figura 3.12 se indican los diferentes materiales elegidos, los cuales corresponden al silicio para el sustrato, polisilicio para el micro sensor y micro calefactor (Poly 1) y óxido de silicio para el material que los cubre, también se eligió aluminio para los contactos del micro sensor y micro calentador.

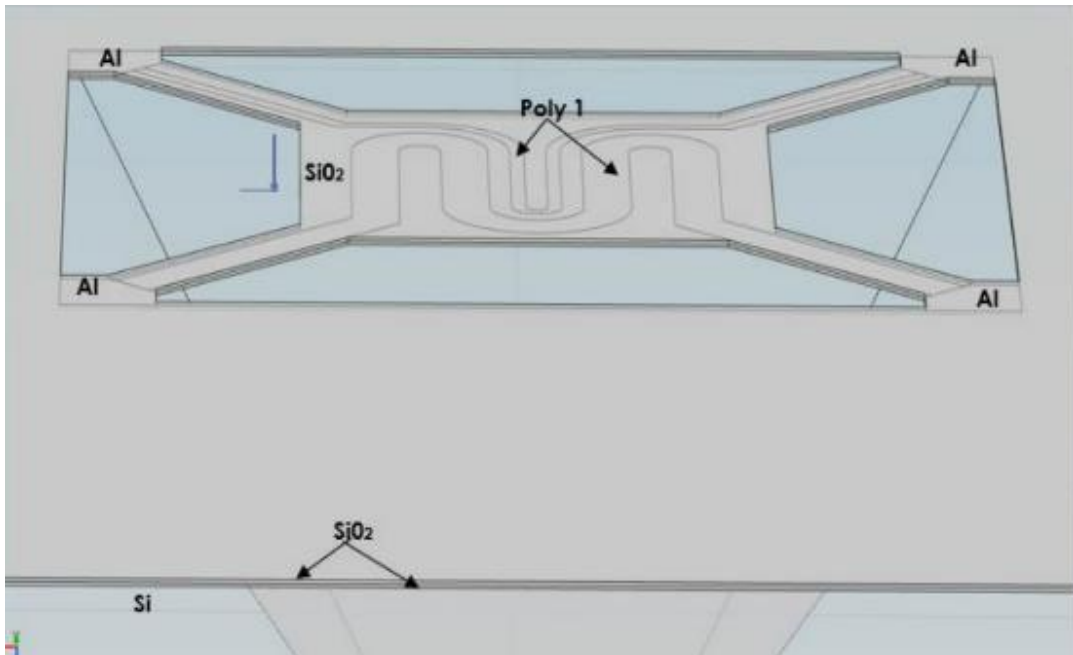


Figura 3.12: Materiales que conforman la estructura

Después de la selección de materiales, se definieron las físicas para una simulación de transferencia de calor por efecto Joule, por lo que se agregan dos físicas, las cuales corresponden a “Corrientes Eléctricas” y “Transferencia de calor en Sólidos”.

Se tuvieron que hacer diferentes declaraciones de parámetros para cada una de estas físicas, pero dentro de las más importantes de cada una, fue la elección de los contornos donde se aplicaría la diferencia de potencial en las terminales del micro calefactor (ver figura 3.13 b) y cuál dominio sería la fuente de calor, eligiéndose al micro calefactor y a sus contactos de aluminio (ver figura 3.13 a).

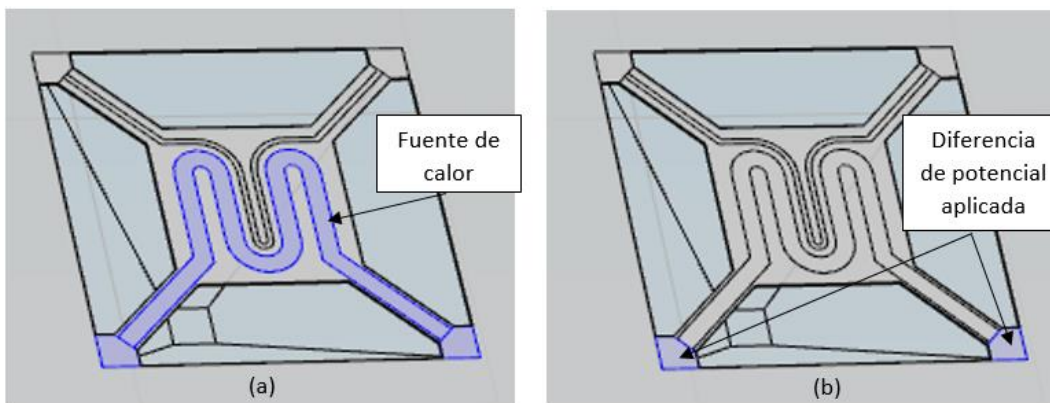


Figura 3. 13: (a) Declaración de fuente de calor y (b) Diferencia de potencial aplicada

Una vez declarados los parámetros de cada física, se crea la malla de toda la estructura (ver figura 3.14); ésta se puede crear con formas geométricas y tamaños propuestos por el usuario y la otra opción es dejar que la física sugiera una forma y tamaños, lo cual se eligió para ésta simulación.

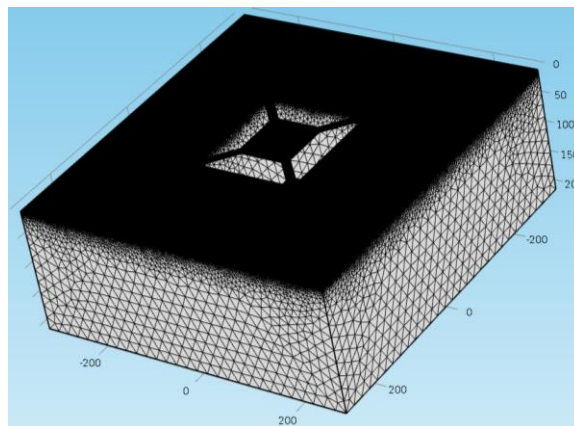


Figura 3. 14: Malla de la estructura generada

[Optimización del diseño y funcionamiento de un sensor de gas MEMS basado en FGMOS]

El paso final antes de correr la simulación fue declarar el tipo de estudio que se iba a realizar. Después de varios ensayos en estado estacionario, se hizo la simulación temporal para un tiempo de 50 mS. También se hizo un barrido paramétrico desde 0 V hasta 1.5 V, con pasos de 100 mV para el voltaje aplicado en las terminales del micro calefactor.

En la figura 3.15 se muestra el resultado obtenido de la simulación para un gráfico 3D de superficie, en el cual se muestra la distribución de temperatura en toda la estructura, para un voltaje de 1.5 V aplicado en las terminales del micro calefactor por un tiempo de 50 mS.

El valor máximo de temperatura obtenido fue de 290 °C. Como se puede observar en la figura 3.15, debido al micromaquinado, la micro placa caliente es la única zona que alcanza altas temperaturas, tal como se esperaba, debido al aislamiento térmico propiciado por el decapado. La disminución de temperatura ocurre hasta los extremos de los brazos de la micro placa caliente y se llega a temperatura ambiente en la zona del substrato que ya no se encuentra maquinada.

Aunque la simulación se hizo para un barrido paramétrico de voltaje, en la figura 3.15 sólo se muestra la distribución de temperatura alcanzada para un voltaje de 1.5 V,

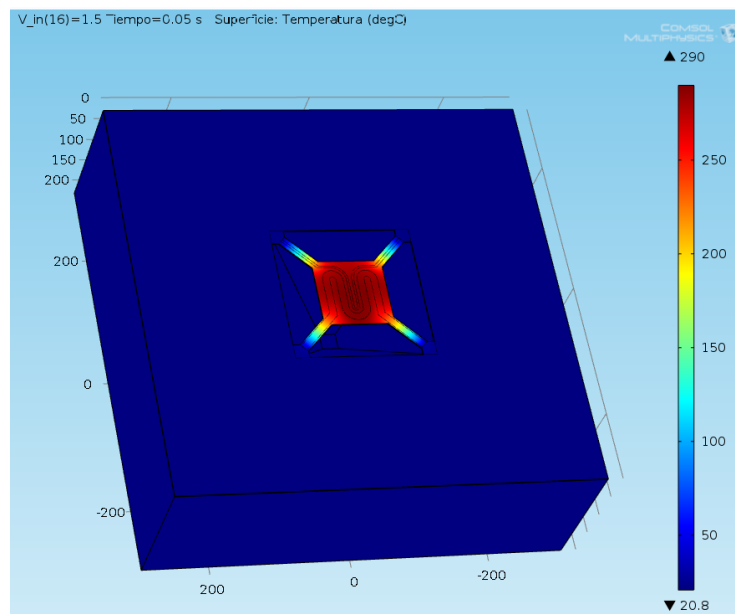


Figura 3.15: Distribución de temperatura

[Optimización del diseño y funcionamiento de un sensor de gas MEMS basado en FGMOS]

En la figura 3.16 se muestran las curvas de temperatura obtenidas para diferentes zonas en la estructura, para un barrido paramétrico de voltaje de 0 a 1.5 V con pasos de 100 mV. Tal como se esperaba, la temperatura en la micro placa caliente es casi uniforme; esto se puede observar en las curvas obtenidas para los puntos 107 y 117, los cuales corresponden al micro calefactor y micro sensor. Dichos componentes se encuentran aproximadamente a la misma temperatura, lo cual es importante ya que eso es lo deseado.

También es importante remarcar que donde empiezan los brazos que sostienen a la micro placa caliente, se tiene una disminución de aproximadamente 60 °C y una disminución, hasta temperatura ambiente, en la zona donde termina el micromaquinado, tal como ya se había mencionado.

En dicha figura se muestra, mediante una línea, la zona de la estructura a la cual pertenece cada curva. Todas las curvas obtenidas son para un tiempo de 20 mS.

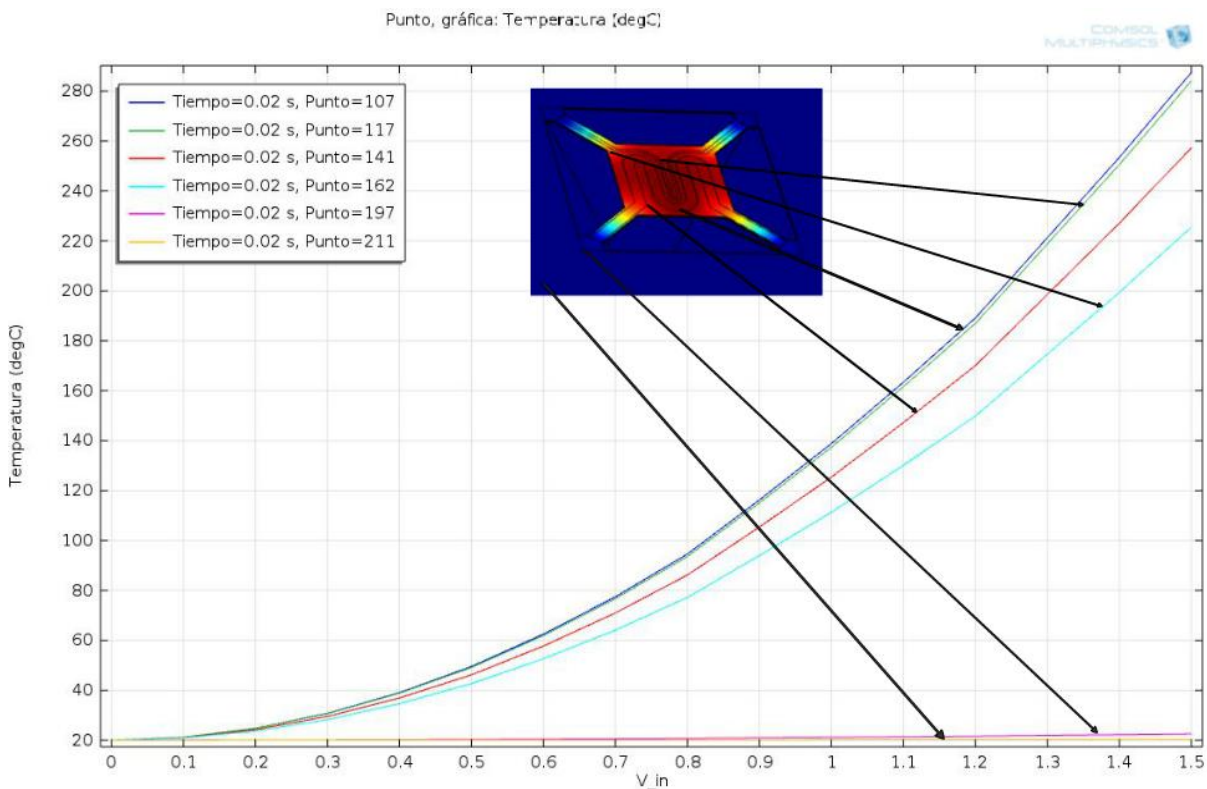


Figura 3. 16: Temperatura VS voltaje aplicado

[Optimización del diseño y funcionamiento de un sensor de gas MEMS basado en FG MOS]

En la figura 3.17, se muestra la dependencia de la temperatura con el tiempo que se obtendría en la zona del micro calefactor para valores de voltaje aplicados al micro calefactor de 0.4 V, 0.8 V, 1.2 V y 1.5 V respectivamente, aplicados por 25 mS.

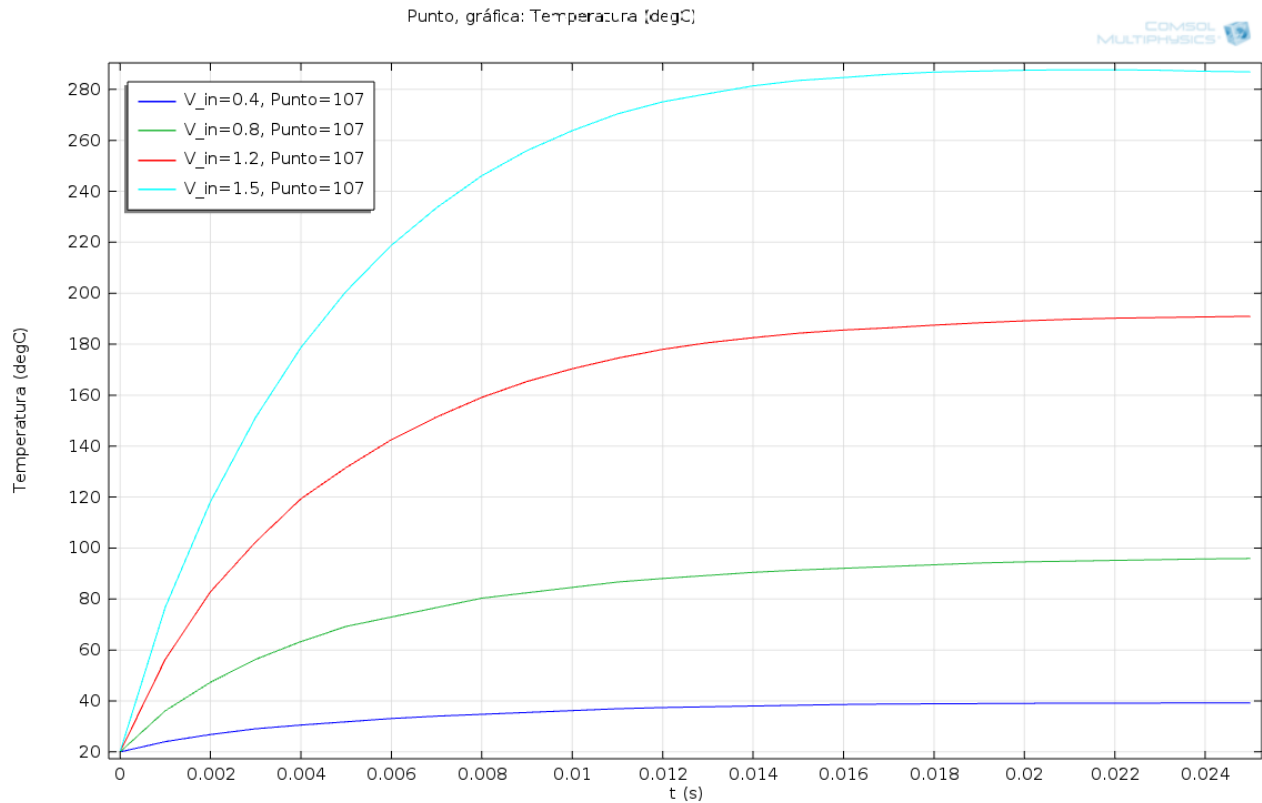


Figura 3. 17: Temperatura en función del tiempo

Se realizó también un análisis de densidad de corriente para tener una idea más clara de en qué zonas se tiene una mayor densidad de corriente.

En la figura 3.18 se muestra la densidad de corriente en el micro calefactor, en la cual se puede observar que se tiene los valores máximos en las zonas de menor radio de curvatura en la geometría del micro calefactor. En estas zonas se tiene un valor de  $8.05 \times 10^8$  (A/m<sup>2</sup>), la cual es menor a los valores obtenidos por [1], que eran del orden de  $4.692 \times 10^9$  A/m<sup>2</sup> y, a pesar de variar un poco la forma de la geometría, el valor mínimo de densidad de corriente obtenido fue de  $1 \times 10^9$  A/m<sup>2</sup>.



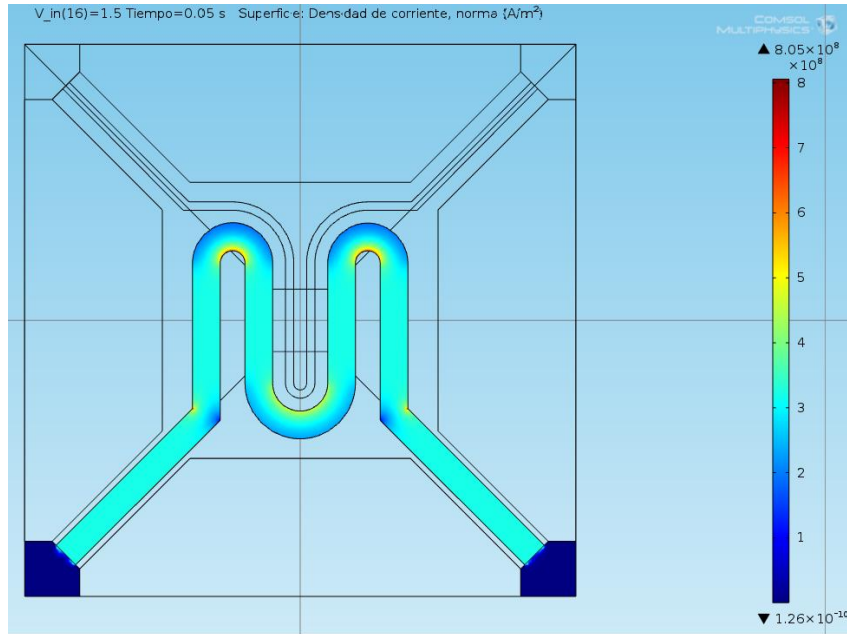


Figura 3. 18: Densidad de corriente en el micro calefactor

En la figura 3.19 mediante un gráfico de superficie se muestra la densidad de disipación de potencia en el micro calefactor, obteniéndose un valor máximo de  $6.92 \times 10^{22}$  W/m<sup>2</sup>, como se puede apreciar, la mayor disipación de potencia se tiene en los puntos donde hay una mayor densidad de corriente como se mostró en la figura 3.18.

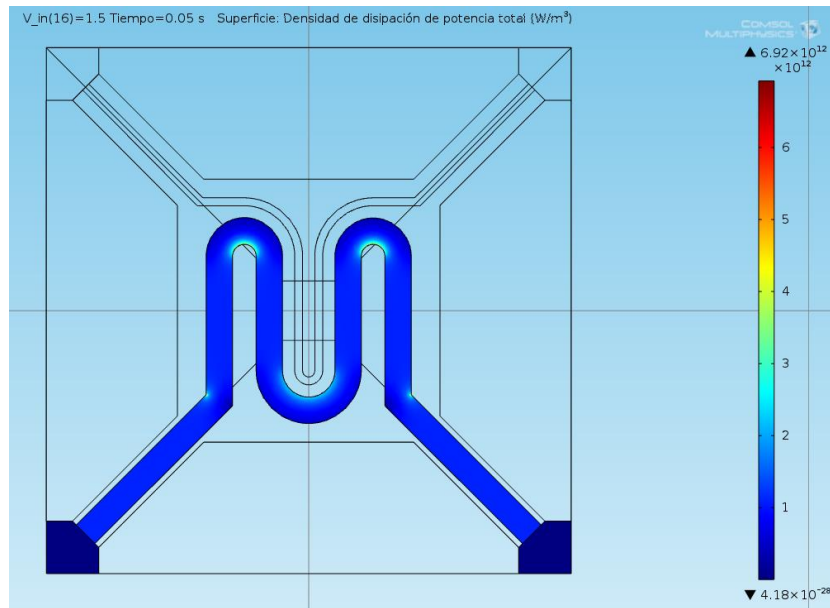


Figura 3. 19: Densidad de potencia disipada en el micro calefactor



### 3.3 Conclusiones del capítulo

Mediante las diversas simulaciones presentadas en este capítulo, se muestra que:

- Con el arreglo de estructuras elaborado para la adaptación del diseño de la micro placa caliente a la tecnología de  $0.5 \mu\text{m}$ , se muestra que es viable para disponer de las áreas necesarias para hacer el micromaquinado, lo cual fue confirmado por las simulaciones en el software ACES, en el cual se hizo uso de una mascarilla como la considerada para realizar la simulación, se obtiene el decapado deseado.
- Con el micromaquinado por debajo de la micro placa caliente se logra aislar térmicamente de manera óptima esa zona y mantener el resto del chip y sus componentes a temperatura ambiente; con ayuda del software COMSOL Multiphysics, se pudo llevar a cabo un análisis más completo del comportamiento del sistema en estudio.
- Con el nuevo diseño dado a la estructura del micro calefactor y micro sensor; se lograron muy buenos resultados de simulación en COMSOL de densidad de corriente a través del micro calefactor, para una menor disipación de potencia en las zonas que fueron redondeadas.
- Como se puede apreciar en el gráfico de voltaje vs temperatura (Figura 3.17), la temperatura alcanzada con  $1.5 \text{ V}$  es de  $290 \text{ }^\circ\text{C}$ , lo cual está dentro del rango de operación, ya que se propone operar en un rango entre  $200 \text{ }^\circ\text{C}$  y  $300 \text{ }^\circ\text{C}$ .

#### **4. Caracterización de los componentes del sensor de gas MEM.**

En este capítulo se mostrarán los resultados obtenidos de las diversas caracterizaciones realizadas a los diferentes componentes del sensor de gas MEM contenidos en el chip T83T, cuyo diseño fue realizado por Salvador Mendoza Acevedo [1], ya que en su trabajo de tesis no se lograron caracterizar todos los componentes, y fue parte de lo que se retomó para este trabajo.

Primero se caracterizaron los diferentes micro calefactores y micro sensores que se tienen en el chip, para determinar el valor del TCR (coeficiente térmico de resistencia), también se describe el montaje utilizado para realizar dichas mediciones y los resultados obtenidos.

Posteriormente se caracterizaron los transistores FGMOS que se tenían disponibles, para analizar el tipo de carga que tenían almacenada en la compuerta flotante y posteriormente hacerles un borrado y volver a medirlos para analizar su comportamiento.

También se realizó la caracterización de un circuito de lectura integrado en el mismo chip, con el fin de comprobar su correcto funcionamiento y obtener sus curvas de transferencia a partir de un arreglo que se hizo para emular un cambio de voltaje en la compuerta flotante del transistor FGMOS utilizado. De igual forma se caracterizó un transistor FGMOS de 2 compuertas de control y se obtuvieron tanto su curva de transconductancia y de salida, así como sus curvas de transferencia.

Se caracterizó también un transistor MOS, cuya función es llevar a cabo el control de temperatura de la micro placa caliente. Primeramente se obtuvieron sus curvas de salida y de transconductancia y después con ayuda de un Amplificador Operacional comercial se hizo una prueba, actuando como comparador.

Finalmente, se mostrarán los resultados obtenidos sobre las pruebas realizadas a un chip, al cual ya se le realizó micromaquinado, pero aún no se le había hecho ninguna caracterización posterior al proceso de decapado. Por lo que, se utilizó una maquina de puntas para realizar dichas mediciones.

#### 4.1 Coeficiente Térmico de resistencia (TCR)

Debido que el polisilicio, material con el que están fabricados tanto el micro calefactor como el micro sensor, tiene un valor de resistividad, el cual depende de la temperatura, con un coeficiente térmico de resistencia, el cual es particular del material y se puede emplear tanto como calefactor, como sensor de temperatura. Aprovechando el valor de la resistencia del polisilicio a la temperatura que encuentre, se puede hacer uso del efecto Joule para lograr el calentamiento, al hacer circular una corriente a través del micro calefactor y de esta forma calentar la micro placa [1] [18][19] [20].

El valor del TCR se puede obtener de manera experimental, calentando externamente toda la estructura y midiendo el valor de resistencia para cada temperatura conocida.

La relación entre el cambio de resistencia con respecto al cambio de temperatura, está expresado por la ecuación (Ec. 4.1) [21]:

$$\frac{R-R_0}{R_0} = TCR * (T - T_0) \quad \text{Ec. 4.1}$$

Donde:

$T_0$  y  $R_0$  son, la temperatura ambiente y el valor de la resistencia a temperatura ambiente, respectivamente.  $R$  es la resistencia que se tiene a una temperatura  $T$ .

Despejando  $R$  de la ecuación (Ec. 4.1), se tiene:

$$R = (R_0 * TCR * (T - T_0)) + R_0 \quad \text{Ec. 4.2}$$

Con ayuda de la expresión obtenida para  $R$  (Ec. 4.2), se determinará el valor de TCR de cada micro calefactor y micro sensor que se tienen en el chip T83T (el cual no se encuentra micromaquinado), haciendo uso de una fuente de calor externa para elevar la temperatura, cuyo montaje se describe a continuación.

#### 4.1.1 Montaje para la medición de R (T)

Para medir el valor de la resistencia en función de la temperatura y posteriormente hacer el cálculo de TCR; el chip ya montado y alambrado en un empaque DIP cerámico cuyo diseño se muestra en la figura 4.1, se fijó sobre una base de cobre fija, sobre la cual se aplicó calor mediante una resistencia que se colocó bajo dicha base (Figura 4.2) [1] [20].

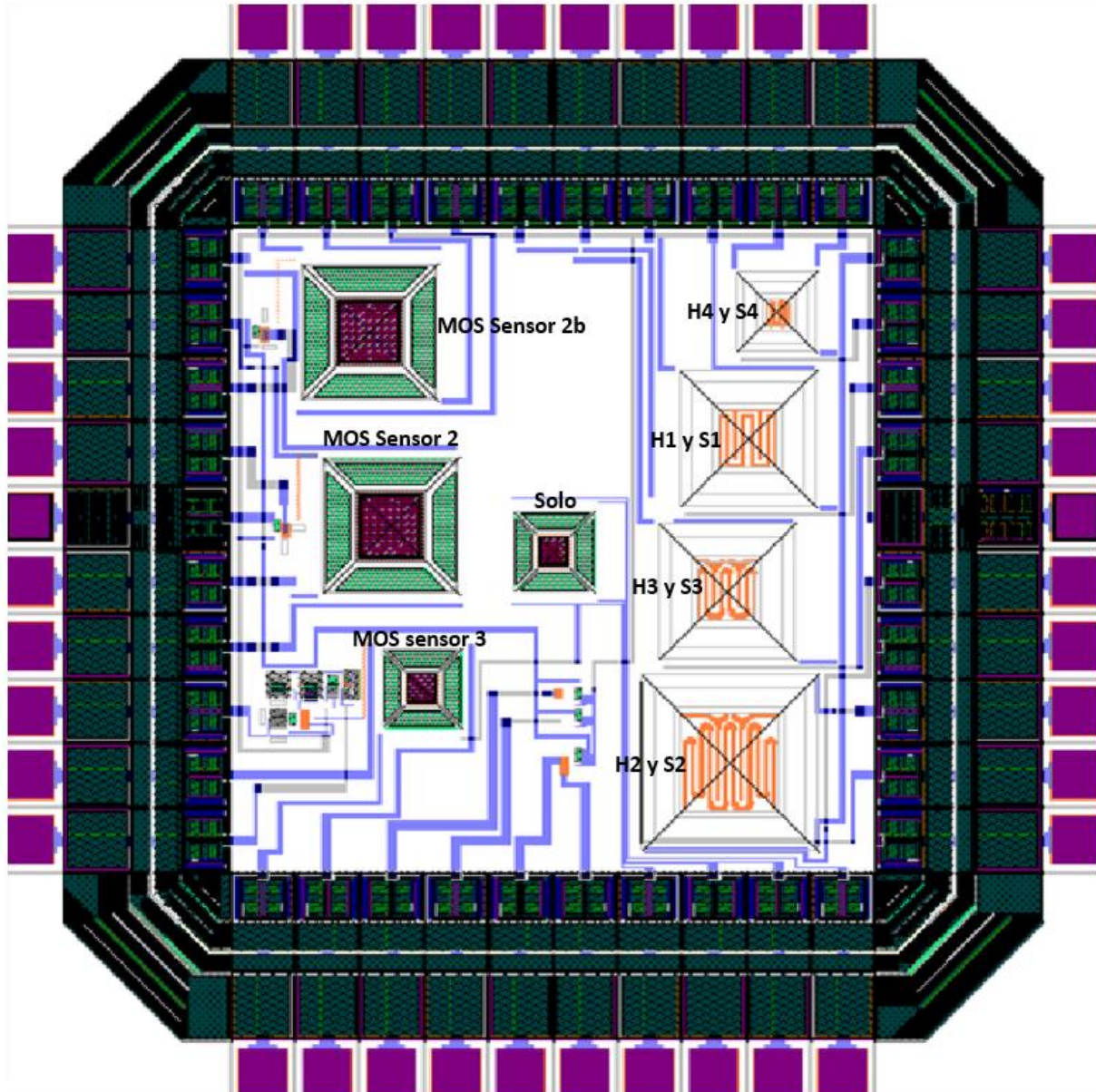


Figura 4.1: Layout del chip T83T

De la figura 4.1:

**MOS Sensor 2:** Micro calefactor y micro Sensor MOS 2.

**MOS Sensor 2b:** Micro calefactor y micro sensor MOS 2b.

**MOS Sensor 3:** Micro calefactor y micro Sensor MOS 3.

**H1 y S1:** Micro calefactor y micro sensor 1.

**H2 y S2:** Micro calefactor y micro sensor 2.

**H3 y S3:** Micro calefactor y micro sensor 3.

**H4 y S4:** Micro calefactor y micro sensor 4.

Se utilizó un controlador de temperatura externo para calentar la resistencia y de esta forma calentar al chip a una temperatura conocida, la cual se mide mediante un termopar tipo K, conectado al controlador de temperatura y de esta forma hacer las mediciones de resistencia a distintos valores de temperatura, para los micro calefactores y micro sensores, los cuales más adelante se describen.



Figura 4.2: Montaje para la medición de  $R(T)$

[Optimización del diseño y funcionamiento de un sensor de gas MEMS basado en FG MOS]

### 4.1.2 Determinación del TCR de los micro calefactores y micro sensores del Chip T83T

Una vez establecida la temperatura deseada con ayuda del controlador de temperatura, se hizo circular una corriente a través del micro calefactor, haciendo un barrido de voltaje desde -1.5 V hasta 1.5 V, con pasos de 0.1 V y se calculó el valor de resistencia, para finalmente obtener una resistencia promedio para cada valor de T. Estas mediciones se hicieron desde la temperatura ambiente aumentando 10 °C en cada medición hasta 100 °C. Los resultados se resumen en la Tabla 4.1, para el micro calefactor 1:

Temperatura (°C)	Resistencia (Ω)
23	2.81E+03
30	2.83E+03
40	2.85E+03
50	2.87E+03
60	2.89E+03
70	2.92E+03
80	2.94E+03
90	2.96E+03
100	2.99E+03

Tabla 4.1: Resistencia medida a diferentes temperaturas del micro calefactor 1

Graficando los valores mostrados en la tabla 4.1, se obtiene la figura 4.3:

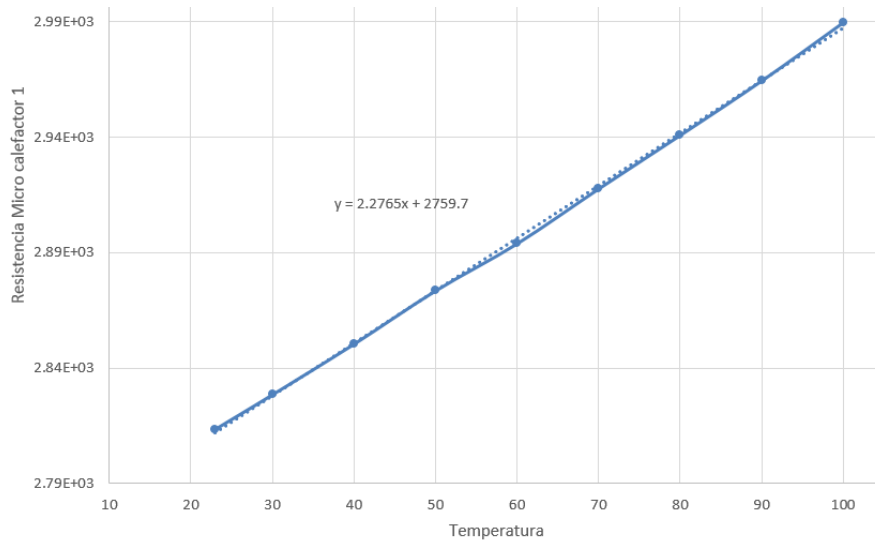


Figura 4.3: Resistencia en función de la temperatura medido (Micro calefactor 1)

Al tener la gráfica de los valores de resistencia medidos, con ayuda de Excel, se hace una aproximación lineal sobre el gráfico obtenido ya que no se obtenía una línea totalmente recta, cuya ecuación se muestra en la Ec. 4.3.

$$Y = 2.765 x + 2759.7 \quad \text{Ec. 4.3}$$

Donde  $x$  representa la temperatura y  $Y$  la resistencia a una temperatura  $x$ .

Se volvieron a calcular los valores de resistencia para los mismos valores de temperatura, pero ahora haciendo uso de la ecuación de la recta aproximada (Ec. 4.3), y con ayuda de la ecuación 4.2, se obtiene el valor del TCR para el micro calefactor 1 ( $\alpha=8.1 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ \text{C}^{-1}$ ), como se indica en la Tabla 4.2.

Regresión lineal				
Temperatura (°C)	Resistencia (Ω)	R-R0	T-T0	$\alpha$ (1 / °C)
23	2812.0595	0	0	0
30	2827.995	15.9355	7	8.10E-04
40	2850.76	38.7005	17	8.10E-04
50	2873.525	61.4655	27	8.10E-04
60	2896.29	84.2305	37	8.10E-04
70	2919.055	106.9955	47	8.10E-04
80	2941.82	129.7605	57	8.10E-04
90	2964.585	152.5255	67	8.10E-04
100	2987.35	175.2905	77	8.10E-04

Tabla 4.2: Cálculo de TCR (micro calefactor 1)

En la Tabla 4.3, se muestran los valores de resistencia obtenidos para el micro sensor 1, los cuales se obtuvieron de la misma forma que con el micro calefactor 1, es decir, haciendo un barrido de voltaje desde -1.5 V hasta 1.5 V con pasos de 0.1 V y midiendo el valor de corriente para posteriormente calcular la resistencia:

Temperatura (°C)	Resistencia (Ω)
23	918
30	924
40	930
50	938
60	947
70	953
80	961
90	968
98	974

Tabla 4.3: Resistencia medida a diferentes temperaturas del micro sensor 1

[Optimización del diseño y funcionamiento de un sensor de gas MEMS basado en FG MOS]

Al graficar los valores mostrados en la tabla 4.3, se tiene la figura 4.4:

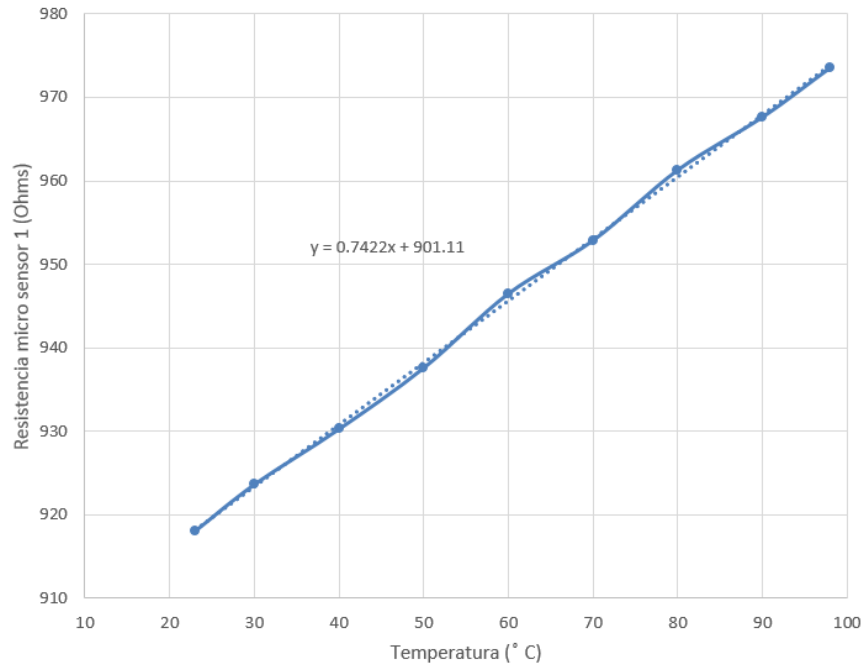


Figura 4.4: Resistencia en función de la temperatura medido (Micro sensor 1).

Al hacer la aproximación lineal, se obtiene la ecuación:

$$Y = 0.7422x + 901.11 \quad \text{Ec. 4.4}$$

Y al volver a hacer el cálculo de resistencia para cada temperatura, se tiene la Tabla 4.4, donde también se muestra el valor de TCR calculado con ayuda de la ecuación 4.2 ( $\alpha=8.08 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ).

Regresión lineal				
Temperatura (°C)	Resistencia (Ω)	R-R0	T-T0	$\alpha$ (1 / °C)
23	918.1806	0	0	0
30	923.376	5.1954	7	8.08E-04
40	930.798	12.6174	17	8.08E-04
50	938.22	20.0394	27	8.08E-04
60	945.642	27.4614	37	8.08E-04
70	953.064	34.8834	47	8.08E-04
80	960.486	42.3054	57	8.08E-04
90	967.908	49.7274	67	8.08E-04
100	975.33	57.1494	77	8.08E-04

Tabla 4.4: Cálculo del TCR (micro sensor 1)

[Optimización del diseño y funcionamiento de un sensor de gas MEMS basado en FGMOS]



Se repite el mismo procedimiento llevado a cabo para determinar el TCR del micro calefactor y micro sensor anteriormente descrito, pero ahora para los micro calefactores y micro sensores (2, 3, 4, MOS 2 y MOS 2b).

De los resultados obtenidos, se hizo una extrapolación para determinar los valores de resistencia que se tendrían hasta temperaturas de 350 ° C, ya que las mediciones se realizaron hasta 100 ° C. Mediante la ecuación que se obtiene al ajustar linealmente la gráfica obtenida de las mediciones, se obtuvo el valor de la resistencia para temperaturas mayores a 100 ° C.

En la figura 4.5 se muestran las rectas extrapoladas para el micro calefactor 1 y micro sensor 1 (anteriormente descritos), en donde también se muestra los valores de TCR y resistencia medida a 23 ° C. En el eje vertical izquierdo de la gráfica mostrada se muestran los valores de resistencia para el micro sensor 1, y el eje vertical derecho los valores de resistencia para el micro calefactor 1.

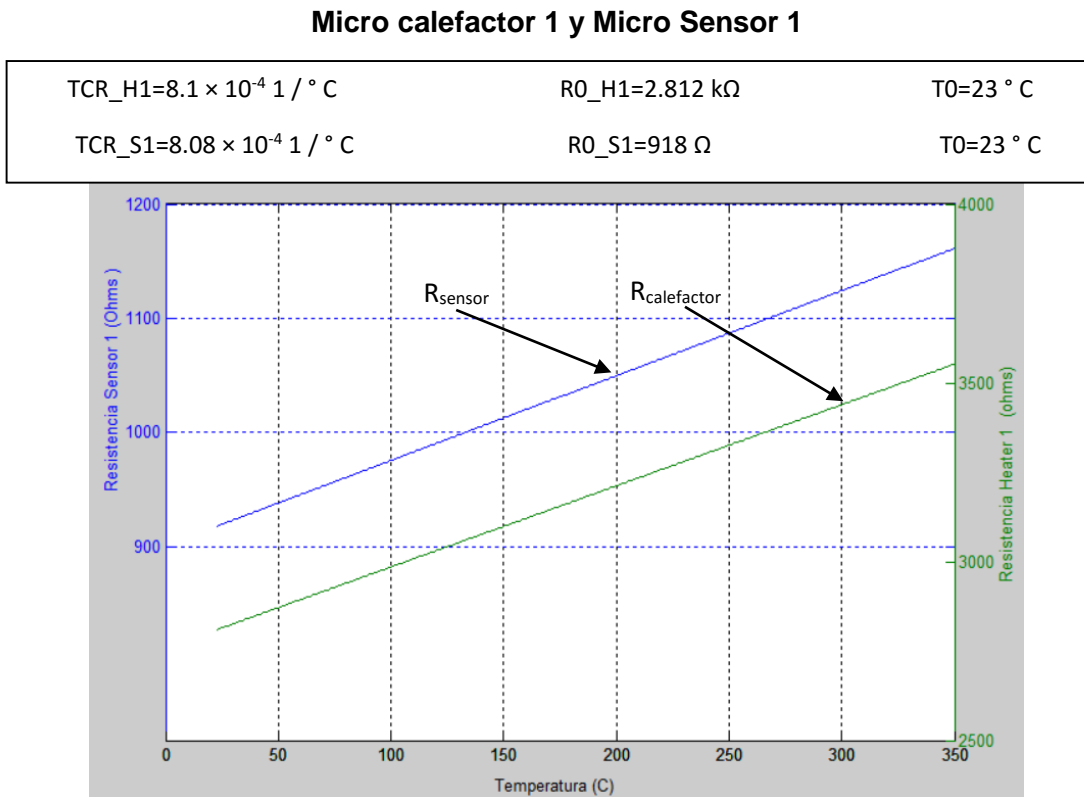


Figura 4.5: Resistencia en función de la temperatura (Micro Calefactor 1 y Micro Sensor 1).

En las figuras 4.6 y 4.7, se muestran las gráficas de las rectas extrapoladas para el micro calefactor y micro sensor 2 y 3, respectivamente.

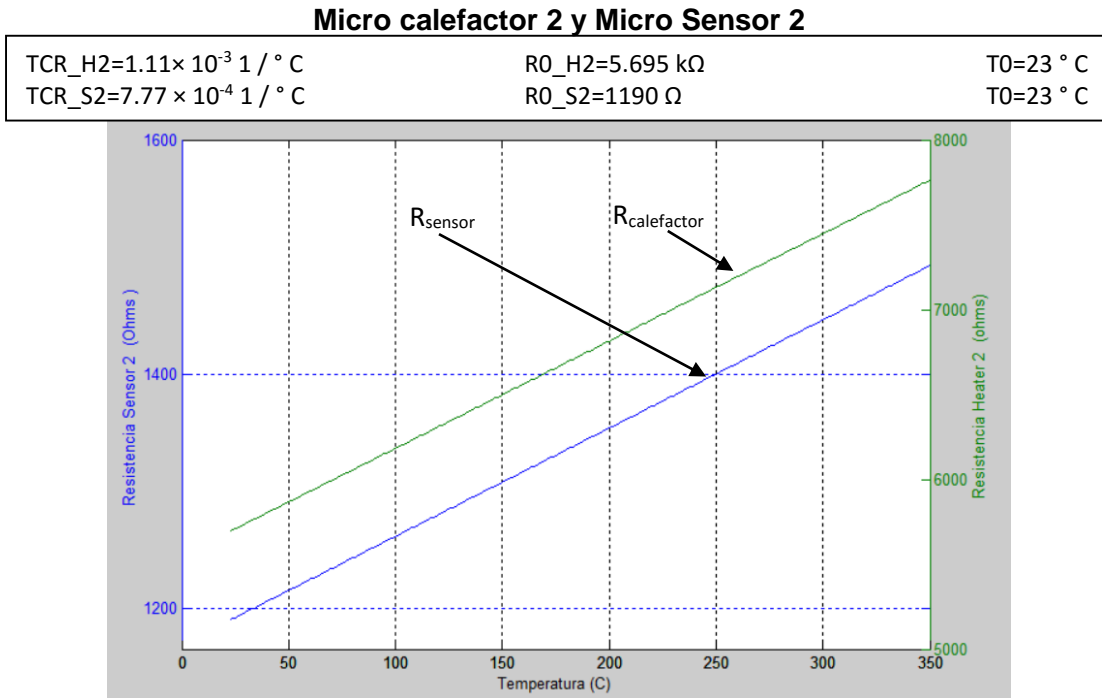


Figura 4.6: Resistencia en función de la temperatura (Micro Calefactor 2 y Micro Sensor 2).

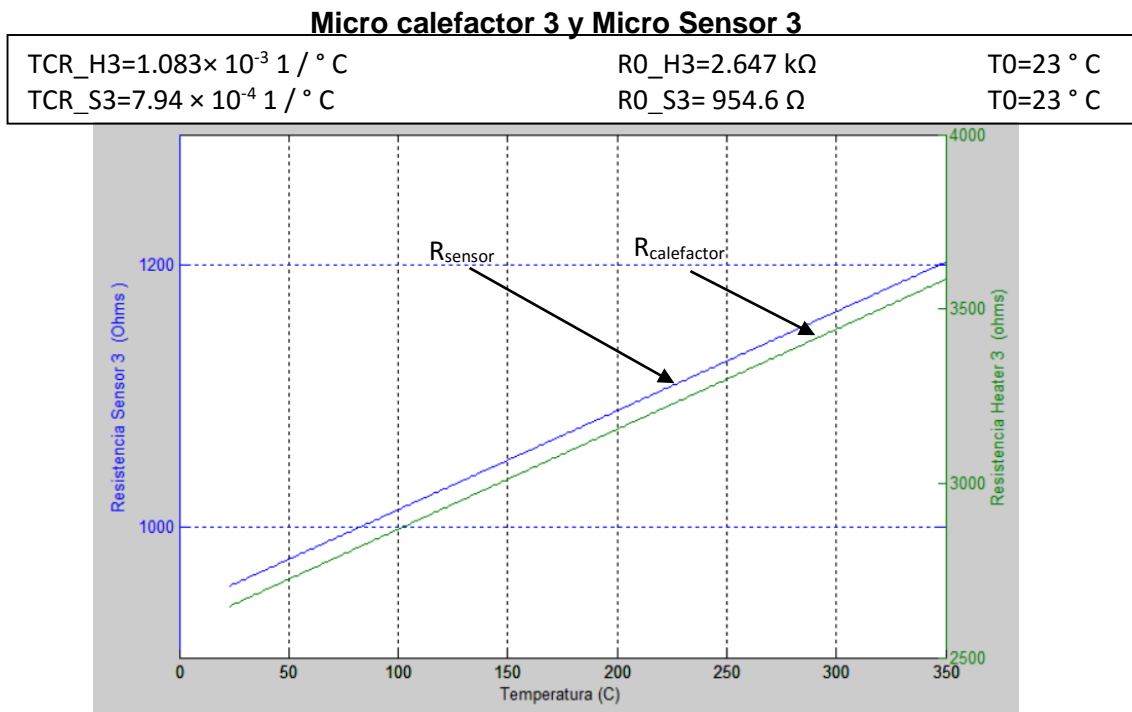


Figura 4.7: Resistencia en función de la temperatura (Micro Calefactor 3 y Micro Sensor 3).

En las figuras 4.8 y 4.9, se muestran las gráficas extrapoladas para el micro calefactor y micro sensor 4 y MOS 2, respectivamente.

**Micro calefactor 4 y Micro Sensor 4**

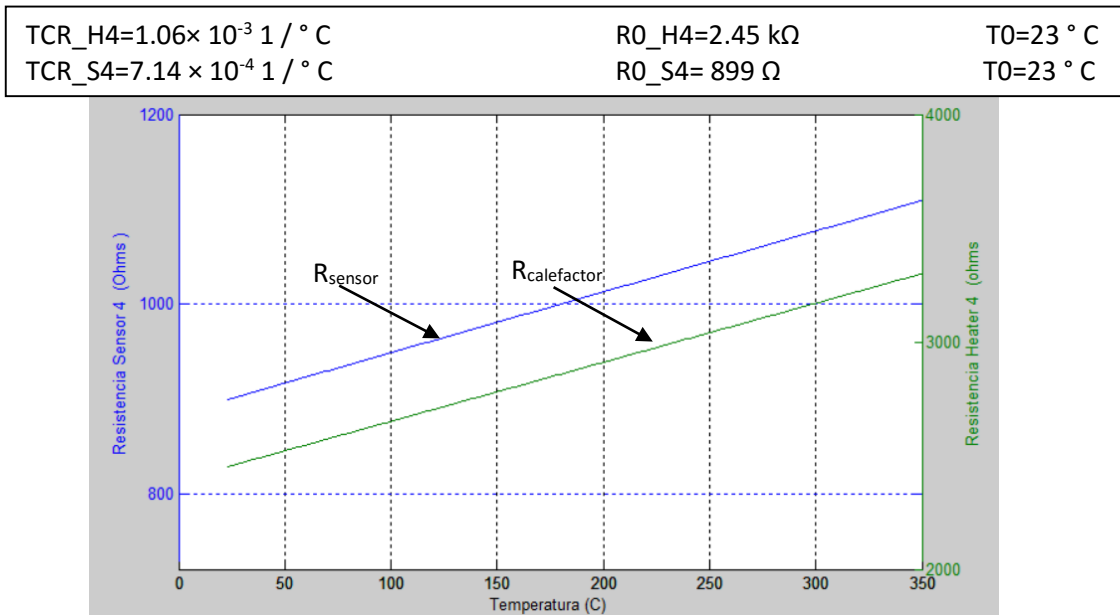


Figura 4.8: Resistencia en función de la temperatura (Micro Calefactor 4 y Micro Sensor 4).

**Micro calefactor MOS 2 y Micro Sensor MOS 2**

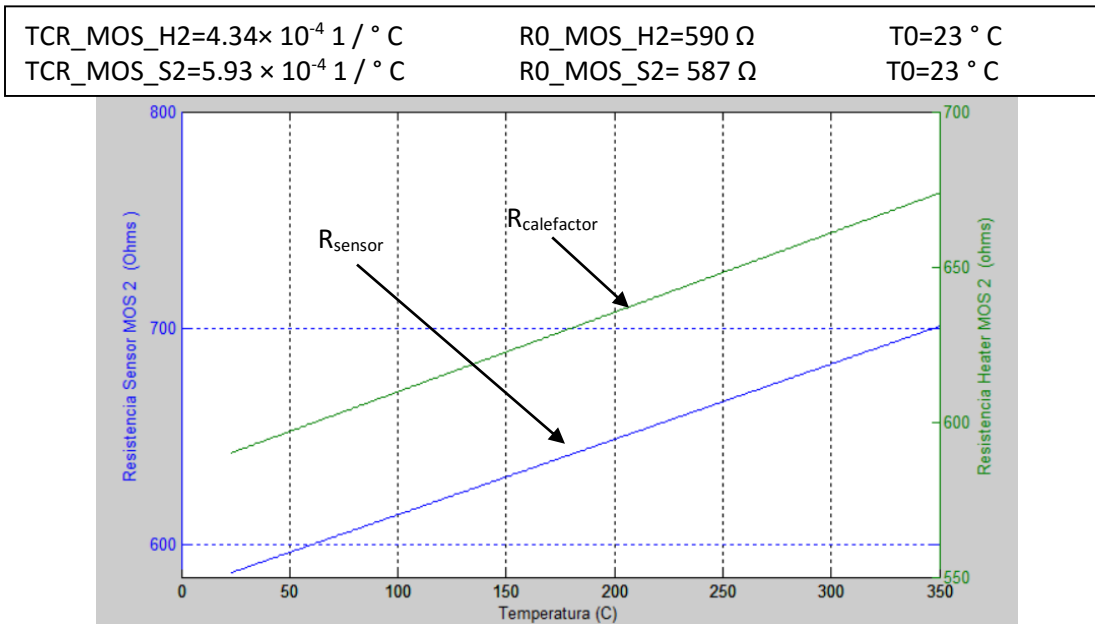


Figura 4. 9: Resistencia en función de la temperatura (Micro Calefactor MOS 2 y Micro Sensor MOS 2).

En la figura 4.10, se muestran las gráficas extrapoladas para el micro calefactor y micro sensor MOS 2b

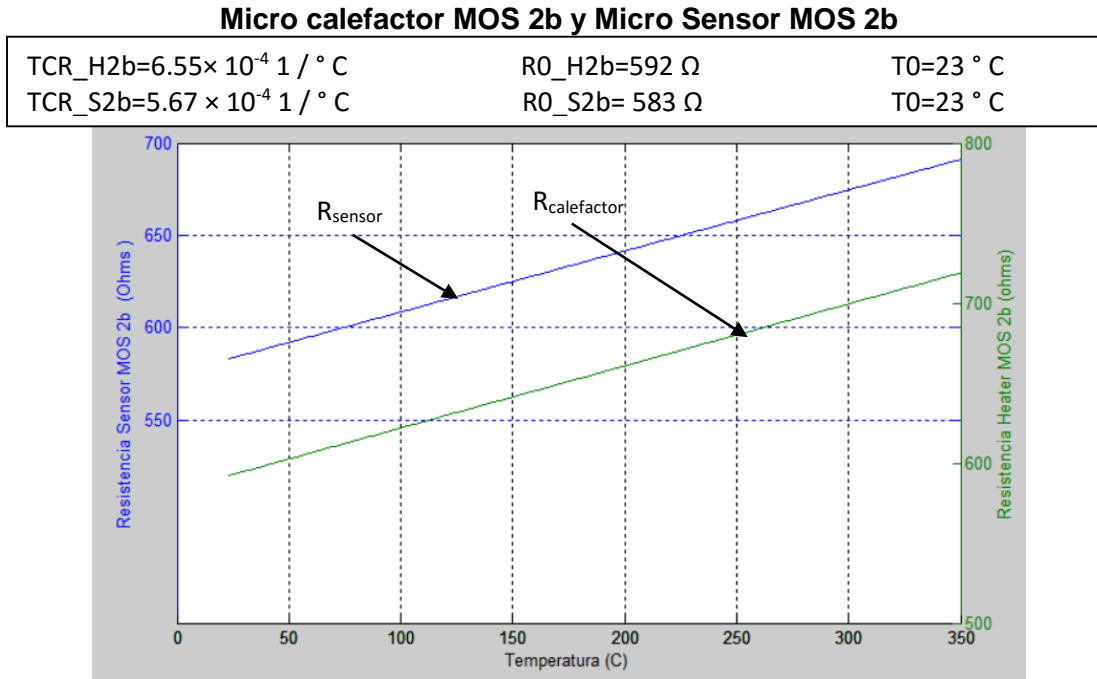


Figura 4.10: Resistencia en función de la temperatura (Micro Calefactor MOS 2b y Micro Sensor MOS 2b).

En la tabla 4.5 se muestran las ecuaciones aproximadas obtenidas para cada estructura, así como el valor de TCR calculado y el valor de resistencia medido a 23  $^\circ\text{C}$ .

Estructura	R(T)	R0	TCR ( $^\circ\text{C}^{-1}$ )
H1	$2.2765T+2759.7$	2.812 k $\Omega$	$8.1 \times 10^{-4}$
H2	$6.297T+5550.8$	5.695 k $\Omega$	$1.11 \times 10^{-3}$
H3	$2.8539T+2581.6$	2.647 k $\Omega$	$1.083 \times 10^{-3}$
H4	$2.592T+2389.4$	2.45 k $\Omega$	$1.063 \times 10^{-3}$
H_MOS 2	$0.2558T+583.35$	590 $\Omega$	$4.34 \times 10^{-4}$
H_MOS 2b	$0.3875T+583.06$	592 $\Omega$	$6.55 \times 10^{-4}$
Promedio calefactores			$8.59 \times 10^{-4}$
S1	$0.7422T+901.11$	918 $\Omega$	$8.08 \times 10^{-4}$
S2	$0.925T+1168.7$	1190 $\Omega$	$7.77 \times 10^{-4}$
S3	$0.758T+937.19$	954.6 $\Omega$	$7.94 \times 10^{-4}$
S4	$0.6423T+884.42$	899 $\Omega$	$7.14 \times 10^{-4}$
S_MOS 2	$0.3481T+578.26$	587 $\Omega$	$5.93 \times 10^{-4}$
S_MOS 2b	$0.3306T+575.52$	583 $\Omega$	$5.67 \times 10^{-4}$
Promedio sensores			$7.08 \times 10^{-4}$

Tabla 4.5: Valores de TCR y R (T) obtenidos para cada micro calefactor y micro sensor.

De los resultados anteriores, se puede ver que el diseño de los calefactores H1, H2, H3 y H4 no es óptimo dadas las altas resistencias resultantes (del orden de los K $\Omega$ ). Esto implica que se requiere un alto consumo de potencia para llegar a altas temperaturas, lo cual no es conveniente. Aun cuando los calefactores H\_MOS 2 y H\_MOS 2b resultaron del orden de 590  $\Omega$ , se deberá buscar optimizar su diseño para que tengan un valor aún menor para cumplir con el propósito de tener un bajo consumo de potencia y aumentar la eficiencia del micro calefactor. Debido a que para la tecnología CMOS estándar de 1.2  $\mu\text{m}$  se tiene un valor de resistividad de 21 Ohms/cuadro y para la de 0.5  $\mu\text{m}$  se tiene un valor de 26.2 Ohms/cuadro para polisilicio 1, el valor de resistencia aumenta al adaptar el diseño a la tecnología CMOS estándar de 0.5  $\mu\text{m}$ . Una forma de optimizar el diseño fue el mostrado en el capítulo 2, el cual consistió en redondear las esquinas del micro calefactor, con lo cual se logra disminuir dicho valor de resistencia. Por otro lado, los valores promedio del TCR tanto del micro calefactor como del sensor no están muy alejados de valores reportados para el polisilicio, que es de  $8.1 \times 10^{-4}$   $1/^{\circ}\text{C}$  y la diferencia se puede adjudicar a la dispersión tecnológica, que puede llegar a ser hasta del 10%.

## 4.2 Caracterización de los Transistores FGMOS del chip T83T

En el chip T83T se tienen varios transistores, algunos ya integrados en algún circuito para realizar una función en específico (circuito de lectura, figura 4.18), otros están disponibles para caracterizarlos individualmente, como es el caso de los transistores FGMOS, cuya compuerta flotante está conectada al área de aluminio, donde se depositaría la película sensible correspondientes al micro calefactor y micro sensor MOS 2 y MOS 2b, así como de un transistor convencional y un FGMOS de 2 compuertas de control, cabe mencionar que los 4 transistores comparten VDD y VSS. Esto dificultó la caracterización de algunos transistores, ya que al compartir terminales con el propósito de reducir el uso de pines externos, al momento de querer medir un transistor, se tenía al mismo tiempo influencia de los demás transistores compartidos, reflejada en la magnitud de corriente obtenida, como se verá en los siguientes resultados presentados.

Para realizar la caracterización de los transistores antes mencionados, se hizo uso del equipo disponible en el laboratorio de VLSI del CINVESTAV; para esto se tiene una plantilla elaborada en LabView para declarar los valores de voltaje que se van a aplicar tanto en compuerta como en drenador del transistor MOS y al final se guarda un archivo en Excel con los datos de la medición (voltajes y corrientes medidas). Dicha plantilla controla a un equipo de medición Keithley (con el cual se aplican los voltajes drenador-fuente y se mide la corriente de drenador a fuente del transistor). La misma plantilla controla a una tarjeta de adquisición de datos de National Instruments, con la cual se controla los voltajes compuerta-fuente aplicados al transistor.

#### 4.2.1 Caracterización de un transistor MOS convencional

Primeramente se midió un transistor convencional, para comprobar el correcto funcionamiento de la plantilla en LabView y los equipos de medición, así como para familiarizarse con los mismos.

En las figuras 4.11, 4.12 y 4.13 se muestran las curvas de salida para valores VGS de 1, 1.25, 1.5, 1.75 y 2 V, para un barrido de Voltaje en VDS de 0 a 3 V para cada curva. También se muestran las curvas de transconductancia para un voltaje VDS de 2 V y un barrido de voltaje en VGS de 0 a 2 V.

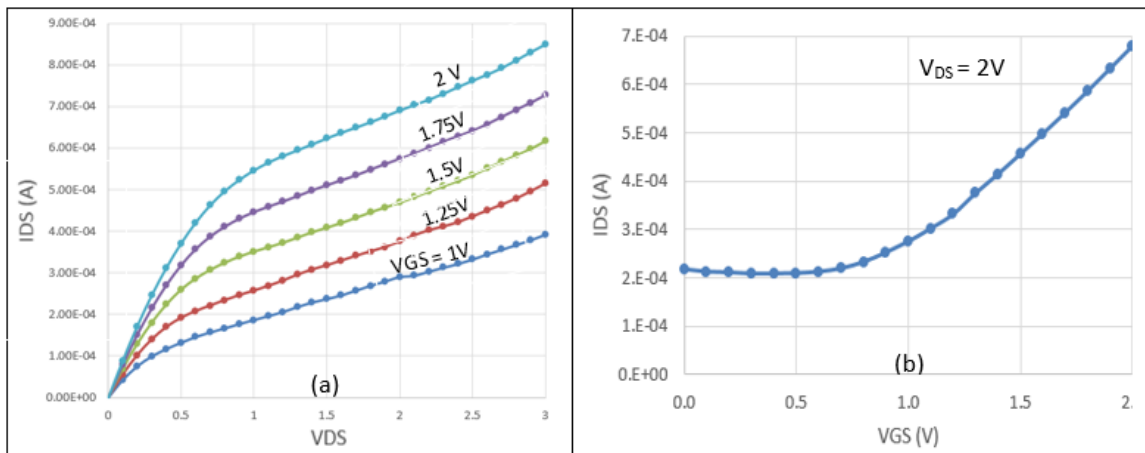


Figura 4.11: (a) Curvas de salida y (b) curva de transconductancia de un transistor MOS Convencional ( $V_g$  sin ningún potencial).

[Optimización del diseño y funcionamiento de un sensor de gas MEMS basado en FG MOS]

En la figura 4.11 se muestran tanto las curvas de salida, así como la curva de transconductancia sin aplicar voltaje en las compuertas ( $V_g$ ) de los transistores que comparten VDD y VSS contenidos en el chip T83T. Debido a que en el chip hay transistores que comparten el mismo drenador (D) y la misma fuente (S) y a que se tienen transistores de compuerta flotante (FGMOS). Se puede observar en la curva de transconductancia que aunque el voltaje aplicado en VGS del transistor convencional es cero, la corriente  $I_{DS}$  es de más de  $200 \mu A$ , esto es debido a que los FGMOS contienen una carga residual de fabricación en la compuerta flotante, por lo que, aunque no les sea aplicado un voltaje en la compuerta de control, estos pueden conducir al aplicar un potencial en VDS. Para medir sólo el valor de corriente que circula por el MOS convencional, se aplicó primeramente un voltaje de 0 V en las compuertas para intentar “pasivar” a los demás transistores que comparten terminales (Figura 4.12).

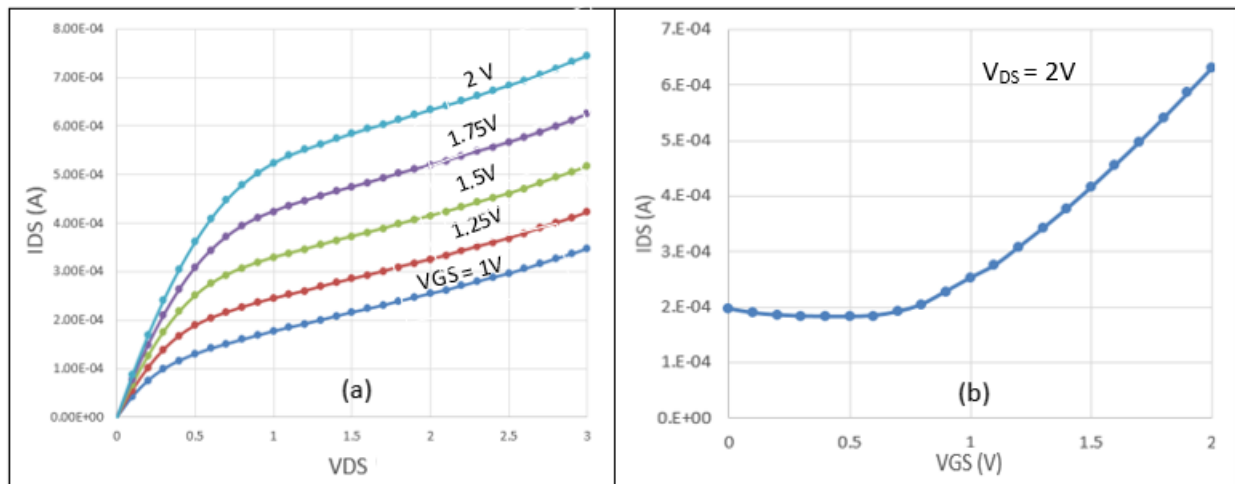


Figura 4.12: Curvas de salida (a) y curva de transconductancia (b) de un transistor MOS Convencional ( $v_g=0$  V).

En contraste, en la figura 4.13 se muestran las curvas de salida (a) y la curva de transconductancia (b) para un voltaje de -5 V en las compuertas de los demás transistores contenidos en el chip ( $V_g$ ).

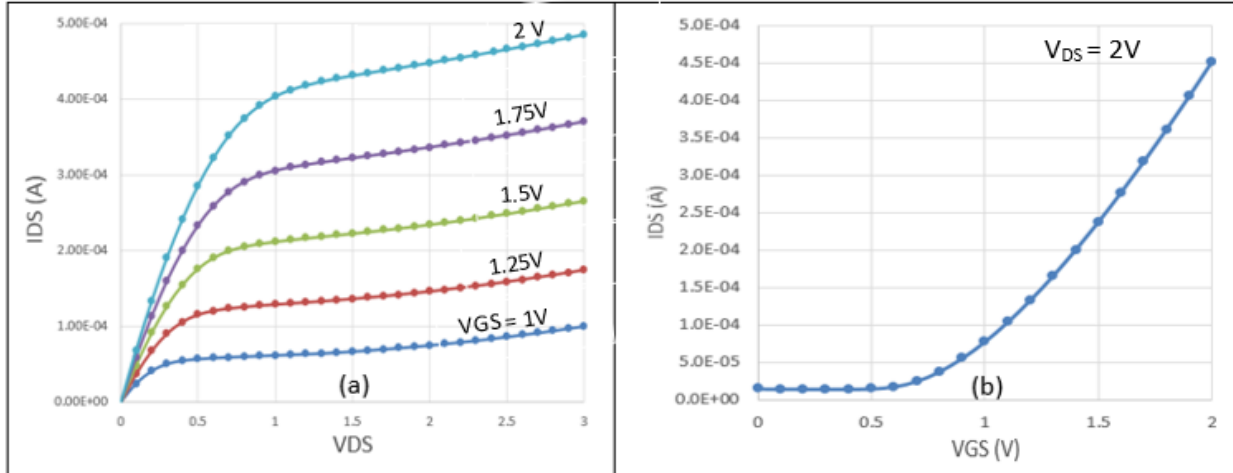


Figura 4.13: Curvas de salida (a) y curva de transconductancia (b) de un transistor MOS Convencional ( $V_g = -5V$ )

De esto se puede comentar que aunque se había aplicado un potencial de 0 V en las compuertas de los demás transistores con los que comparte VDD y VSS no se logró eliminar su efecto, aunque se logró disminuir un poco la corriente  $I_{DS}$  del transistor de interés (ver Figura 4.12 b). Esto fue de alrededor de 200  $\mu A$  para un voltaje de 0 V aplicado en  $V_{GS}$  del MOS convencional. Posteriormente, se aplicó un voltaje de -5V a las compuertas de los otros transistores antes mencionados y de esta forma se lograron anular casi en su totalidad; como se puede observar en la Figura 4.13 (b), ya que el valor de corriente  $I_{DS}$  es muy cercano a 0 A, para que empiece a conducir para un valor aproximado entre 0.6 y 0.7 V en  $V_{GS}$ , tal como debe ser para un transistor MOS convencional.

#### 4.2.2 Caracterización del FG MOS sensor 2

Una vez familiarizado con los equipos de medición y habiendo encontrado la forma de pasivar a los transistores que no se están midiendo, se procedió a medir a un transistor de compuerta flotante. Primeramente se obtuvo su curva de transconductancia para analizar y deducir qué tipo de carga residual almacenada tiene en su compuerta flotante y posteriormente tratar de reducirla o eliminarla mediante iluminación con luz ultravioleta.

En la figura 4.14 se muestra la curva de transconductancia, obtenida para un voltaje  $V_{DS} = 3V$  y un barrido de voltaje en  $V_{GS}$  desde 0 hasta 10 V.



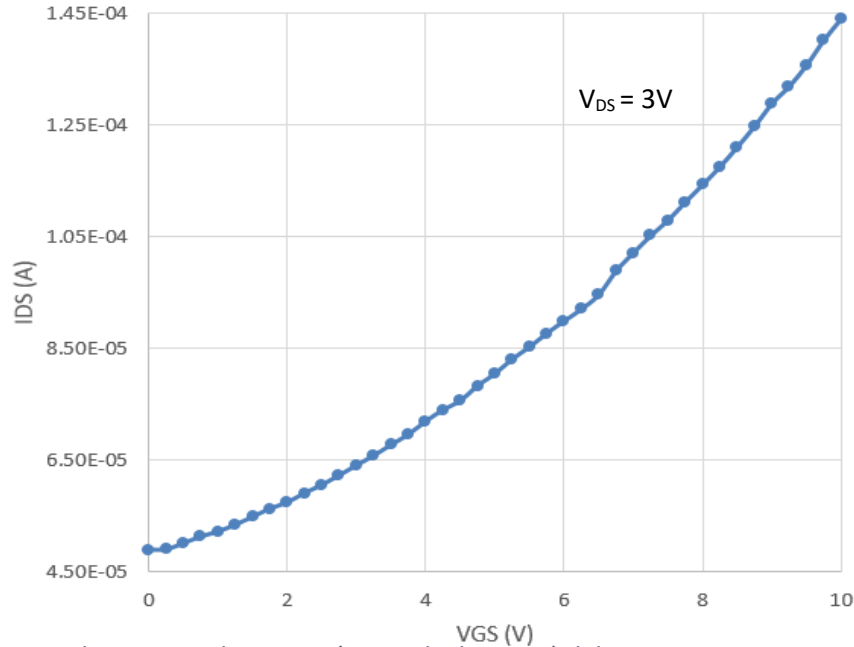


Figura 4.14: Curva de transconductancia (antes de iluminar) del transistor FGMOS sensor 2 ( $V_g = -5$  V).

En la curva de transconductancia mostrada en la Figura 4.14 se puede observar que se tiene un valor de corriente  $I_{DS}$  de  $49 \mu\text{A}$  aproximadamente para un voltaje de 0 volts en  $V_{GS}$  del FGMOS. Por lo tanto, se deduce que se tiene carga residual positiva en la compuerta flotante, ya que los transistores son canal N y al tener carga positiva en la compuerta flotante, dicha carga contribuye a que se forme el canal del transistor y éste conduzca aunque se le aplique un potencial de 0 V en la compuerta de control.

Para eliminar dicha carga almacenada en la compuerta flotante, se iluminó al chip con luz ultravioleta; el tiempo de iluminación del chip para el borrado total de la carga almacenada, depende de la cantidad de carga residual que se tenga. Se decidió iluminar por 5 minutos al chip y posteriormente volver a medirlo para observar el comportamiento de la curva de transconductancia del transistor MOS sensor 2.

En la figura 4.15 se muestra la curva de transconductancia después de haber iluminado el chip, de donde se puede observar una disminución en la corriente  $I_{DS}$  cuando se aplica un voltaje de 0 V en  $V_{GS}$ , el cual es ahora de un valor de  $26 \mu\text{A}$  aproximadamente, con lo cual se comprueba que sí se logró eliminar parte de la carga residual que se tenía de fabricación.

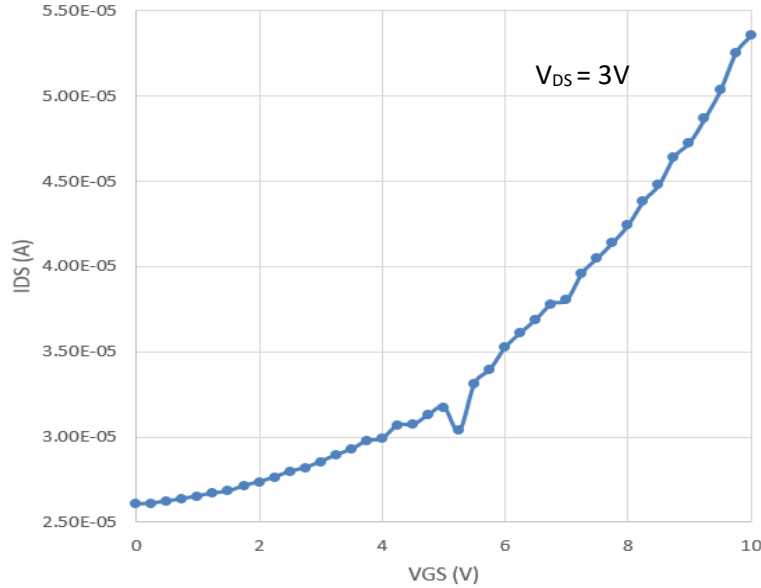


Figura 4.15: Curva de transconductancia (después de iluminar durante 5 minutos) del transistor FGMOS sensor 2 ( $V_g = -5$  V)

### 4.2.3 Caracterización del FGMOS sensor 2b

Después de haber medido el FGMOS sensor 2 (antes de iluminar), se midió también el otro transistor de compuerta flotante, el transistor FGMOS sensor 2b. Se midieron los dos transistores para comparar sus curvas de transconductancia y ver si circulaba corriente  $I_{DS}$  con valores similares a los presentados antes de iluminar con  $V_{GS} = 0$  V y de esta forma intuir si se tienen las mismas cantidades de carga residual en dichos transistores. Una vez más, todas estas mediciones se hicieron teniendo pasivadas las demás compuertas de los transistores FGMOS con un potencial de  $-5$  V.

De la misma forma como se caracterizó el transistor MOS convencional, se obtiene la curva de transconductancia para el FGMOS sensor 2b, con un voltaje  $V_{DS} = 3$  V y un barrido de voltaje en  $V_{GS}$  desde 0 hasta 10 V.

En la Figura 4.16 se muestra la curva de transconductancia antes de iluminar, donde se puede observar que se tiene un valor de corriente  $I_{DS}$  de  $70 \mu\text{A}$  para un voltaje en  $V_{GS}$  de 0 V. Con esto se deduce que también tiene carga positiva almacenada en la compuerta flotante, y se espera que ese valor de corriente  $I_{DS}$  disminuya, después de iluminarlo.

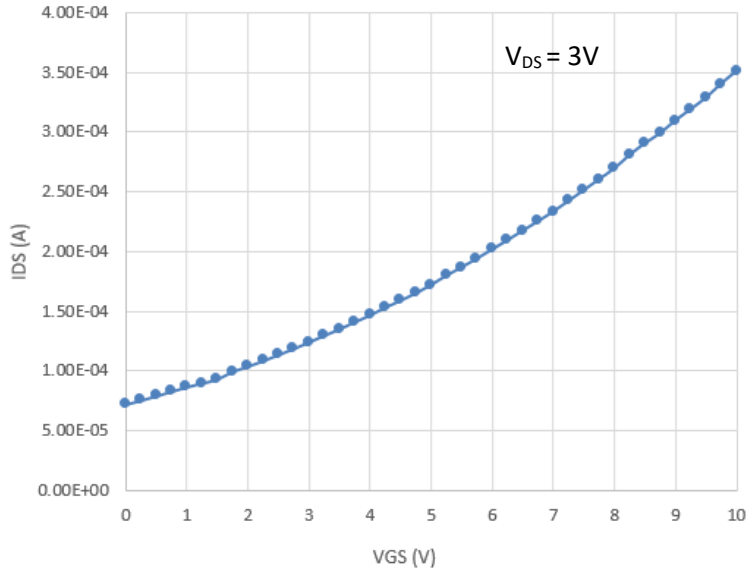


Figura 4.16: Curva de transconductancia (antes de iluminar) del transistor FGMOS sensor 2b ( $V_g = -5$  V).

En la figura 4.17 se muestra la curva de transconductancia después de haber iluminado el chip, de donde se puede observar una disminución en la corriente  $I_{DS}$  cuando se aplica un voltaje de 0 V en  $V_{GS}$ , el cual es de un valor de  $29 \mu\text{A}$  aproximadamente, con lo cual se comprueba que sí se logró eliminar parte de la carga residual que se tenía de fabricación, al igual que en el transistor MOS sensor 1.

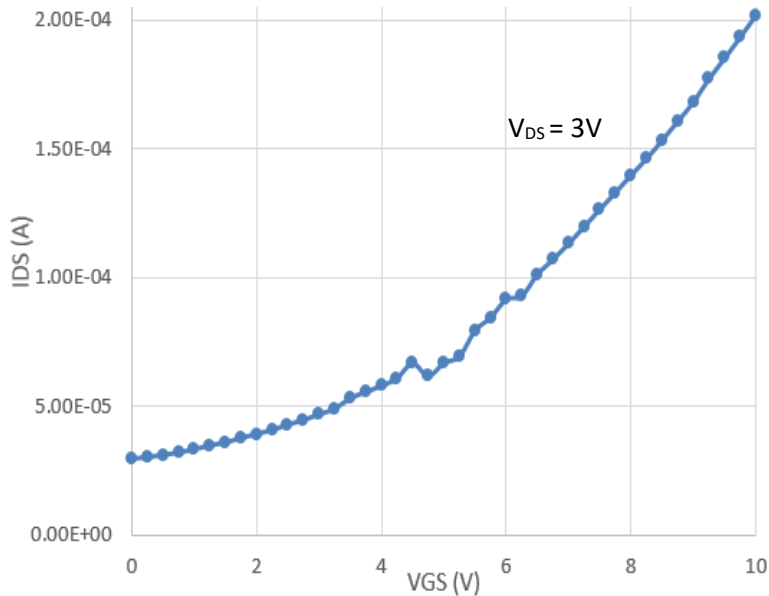


Figura 4.17: Curva de transconductancia (después de iluminar) del transistor FGMOS sensor 2 ( $V_g = -5$  V)

Aunque se tiene un valor de corriente ( $I_{DS}=29 \mu A$ ) aproximado al que se obtuvo para el FGMOS sensor 2 ( $I_{DS}=26 \mu A$ ) para un valor de voltaje de 0 V en VGS después de iluminar al chip con luz UV durante 5 minutos, se puede ver que la corriente que se obtiene a 10 V en VGS es diferente para los dos transistores ( $I_{DS}=200 \mu A$  para el FGMOS sensor 2b y para el FGMOS sensor 2  $I_{DS}= 54 \mu A$ ) .

La decisión de iluminar por 5 minutos al chip y no por más tiempo, fue para cuidar los hilos de oro que se tienen desde los Pads hacia los pines externos del chip encapsulado. Ya que con una sola iluminación se logró disminuir la carga, se decidió no volver a iluminar, dado que, por el momento no era necesario eliminar toda la carga presente en cada transistor FGMOS. De estas pruebas, se puede decir que el método de iluminación con luz UV se puede usar para eliminar la carga de la compuerta flotante de los FGMOS. Sin embargo, los resultados fueron enmascarados por la interconexión que se tiene en el circuito medido, entre los diferentes transistores, que por lo demostrado, contribuyen en cierta medida a la corriente del transistor medido.

### **4.3 Caracterización del circuito de lectura del sensor de gas MEM.**

El circuito de lectura, al igual que la micro placa caliente, es uno de los componentes principales del sistema, ya que tiene como función convertir la variación de la concentración de gas en una señal eléctrica adecuada para su acondicionamiento y uso en lazos de control de los diversos procesos [1].

En la figura 4.18 se muestra el arreglo esquemático del circuito de lectura y acondicionamiento de señal; que es un amplificador de voltaje de dos etapas con entrada diferencial, en la que se encuentra el FGMOS y en el que se comparan los voltajes de compuerta de un transistor convencional y el de compuerta flotante. Dicha compuerta se encuentra acoplada a la micro placa caliente donde se depositará la película sensible. En este caso,  $V_{in}$  es el voltaje aplicado externamente para ajustar el punto de operación del amplificador y lograr una ganancia máxima [1].

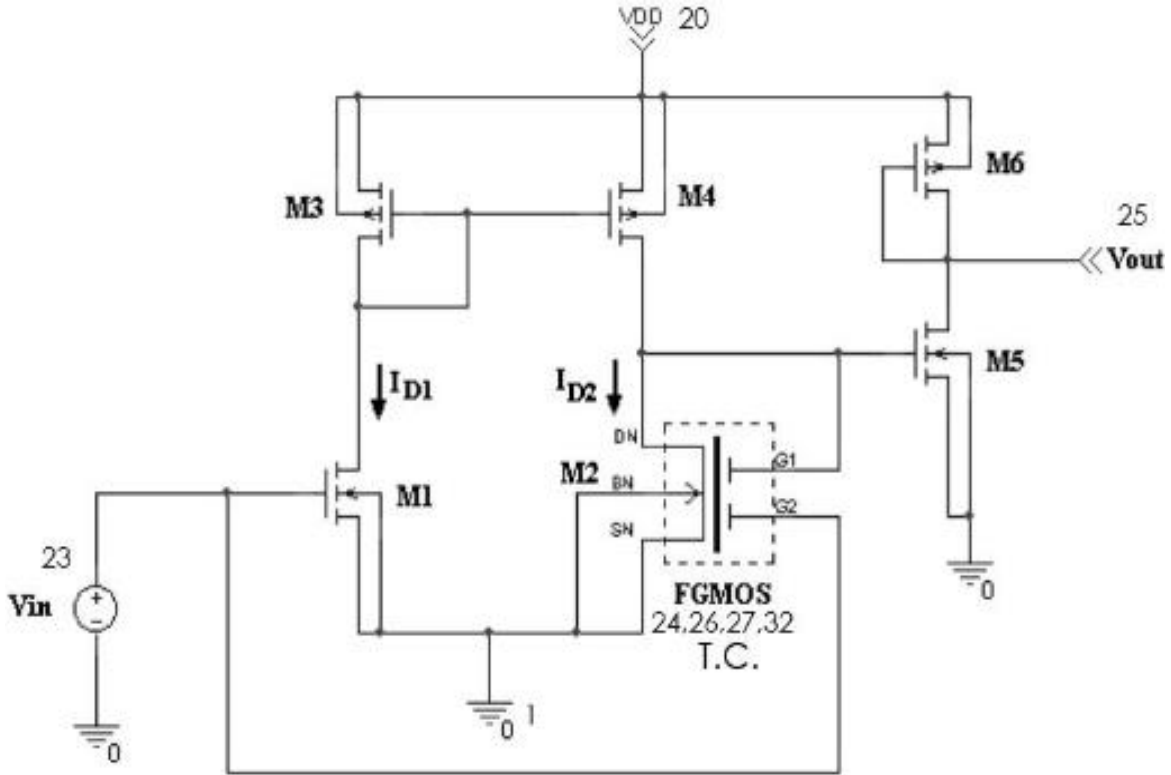


Figura 4. 18: Circuito de lectura FGMOS

Para verificar el funcionamiento del circuito de lectura contenido en el chip encapsulado T83T, se partió de la simulación en PSPICE en donde se varía arbitrariamente la carga en la compuerta flotante de un transistor FGMOS por medio de pasos de voltaje constantes, tanto positivos como negativos [1]. El resultado de dicha simulación muestra un desplazamiento de la curva de transferencia del amplificador con el FGMOS. Dicho desplazamiento de la curva de transferencia puede ser a la derecha o a la izquierda, dependiendo de si se tiene un potencial negativo o positivo en la compuerta flotante del FGMOS, respectivamente.

En la figura 4.19 se muestra el resultado obtenido de la simulación en PSPICE del comportamiento de la curva de transferencia, cuando se varía el voltaje en la compuerta flotante del FGMOS desde  $-1\text{ V}$  hasta  $1\text{ V}$ , con pasos constantes de voltaje de  $0.1\text{ V}$ , considerando que sería el mismo efecto que se tendría al variar la concentración del gas en la película sensora y éste se vea reflejado como variación de carga en la compuerta flotante.

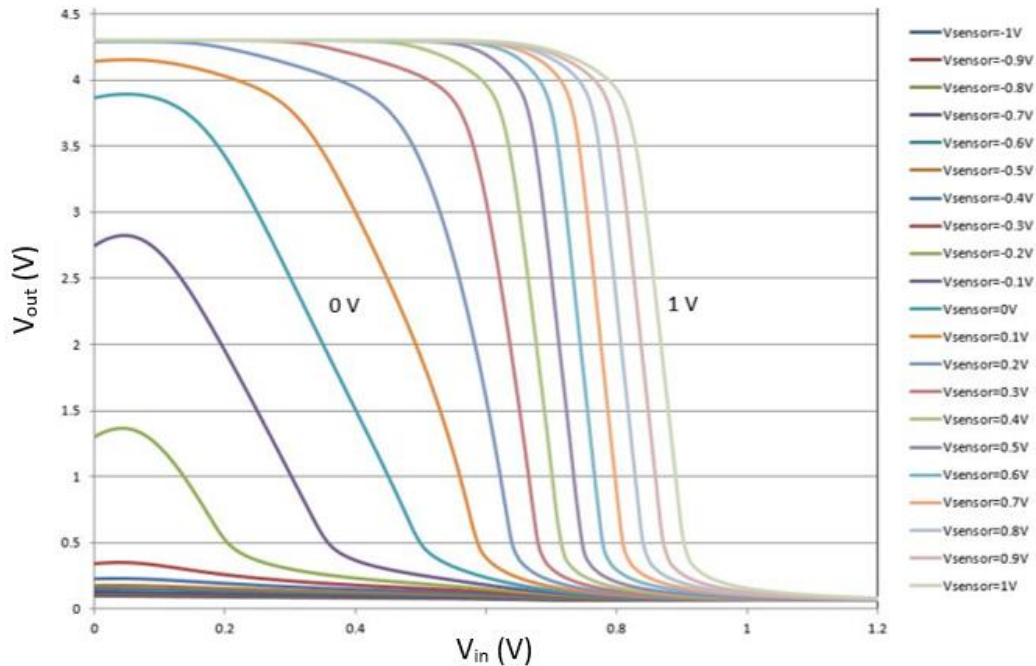


Figura 4.19: Curvas de transferencia del circuito de lectura FGMOS obtenidas en PSPICE

Mediante la simulación obtenida de PSPICE, se obtiene un panorama amplio de los resultados que se deberán obtener de la caracterización de dicho componente.

Tomando en cuenta que sería necesario aislar las compuertas de los demás transistores contenidos en el chip, en el que se encuentra el circuito de lectura (chip T83T). Siendo transistores FGMOS canal N, se requiere un potencial positivo en la compuerta flotante para que conduzcan, para que no conduzcan será necesario un voltaje negativo en la compuerta de control de cada FGMOS, de esta forma aislarlos y que no influyan en los resultados de las mediciones del circuito de lectura; el voltaje con el que se aislaron (pasivaron) las compuertas de los otros transistores fue de -5 V.

Primeramente, se probó al circuito de lectura como amplificador, es decir, ante una señal senoidal de entrada de 50 mV<sub>p-p</sub> y una frecuencia de 100 Hz, a través de la terminal marcada como  $V_{\text{in}}$  en el circuito de lectura (ver figura 4.18). En la figura 4.20 se muestra la captura de las señales leídas con ayuda de un osciloscopio, donde la señal mostrada en el canal 1 corresponde a la señal de entrada  $V_{\text{in}}$  y la mostrada en el canal 2, es la señal de salida  $V_{\text{out}}$  (Fig.4.18). En la parte inferior de la captura se puede observar que en la señal de entrada (canal 1) se tiene una configuración de 50 mV para cada línea

que divide al eje vertical, mientras que en la señal de salida se tiene una configuración de 500 mV por cada división, por lo que; para una señal de entrada de 50 mV<sub>p-p</sub>, se tiene una señal de salida 1.25 V<sub>p-p</sub>, aproximadamente, confirmándose la amplificación.

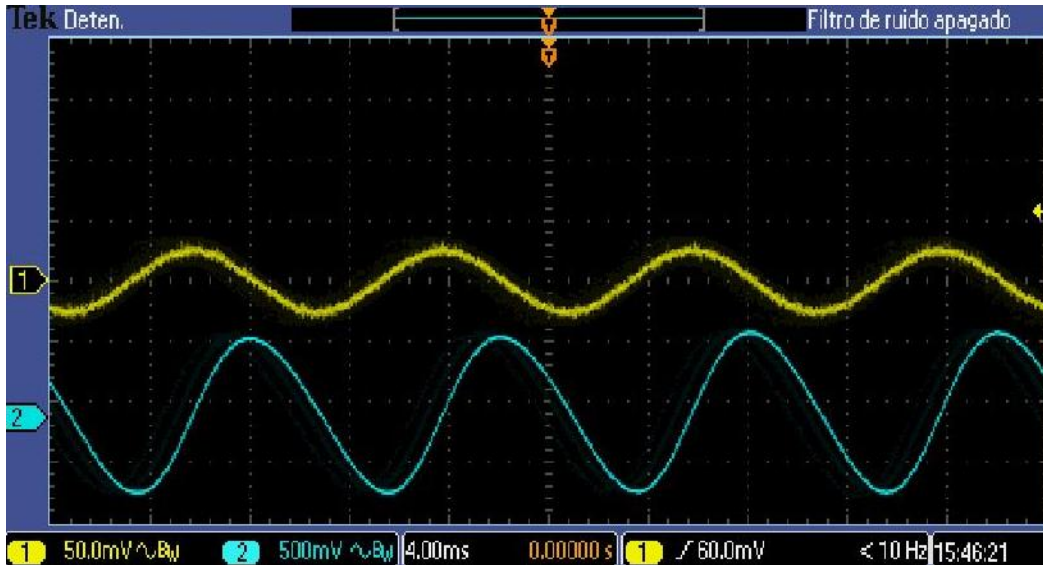


Figura 4. 20: Respuesta del circuito de lectura ante una entrada senoidal

La finalidad de la caracterización es poder obtener el desplazamiento en la curva de transferencia del circuito de lectura, obtenido en la simulación en PSPICE (ver figura 4.19), pero debido a que no se cuenta con la película sensible, se buscó la forma de representar esa variación de potencial en la compuerta flotante.

Como se mencionó anteriormente, el micro calefactor y el micro sensor están fabricados de polisilicio 1 y, encima de esta capa separada por SiO<sub>2</sub>, se encuentra depositado polisilicio 2, sobre el cual se depositará la película sensible (óxido metálico). Dicha capa de polisilicio 2 se encuentra conectada a través de metal 1 a la compuerta flotante. Aprovechando que las terminales del micro calefactor y del sensor son independientes, si se interconectan externamente se forma la placa inferior de un capacitor Poly1-Poly2, el cual puede operar como capacitor de acoplamiento al aplicarle un voltaje al micro calefactor. De esta manera, el voltaje acoplado en el Poly2, conectado directamente a la compuerta flotante del FGMOS, emula la presencia de carga derivada de la reacción química del gas con la película sensora, esto, mientras no se haga el depósito de esta

película, proceso que está aún pendiente. Por lo tanto, variando el potencial aplicado en las terminales cortocircuitadas, se podría obtener la variación de la curva de transferencia deseada. De esta forma se estaría emulando, en cierta forma, el comportamiento que se tendría al variar la concentración de gas en la película sensora.

Para poder caracterizar el circuito de lectura, se utilizó un generador de funciones para establecer una señal de rampa en la entrada al circuito de lectura ( $V_{in}$ ). Dicha rampa se varió desde -3 V hasta 5 V, con una frecuencia de 1 kHz aproximadamente.

En la figura 4.21 se muestran las gráficas de las señales de entrada y salida ( $V_{in}$  y  $V_{out}$  respectivamente) que se tienen, para un voltaje de 0 V aplicado en las terminales cortocircuitadas.

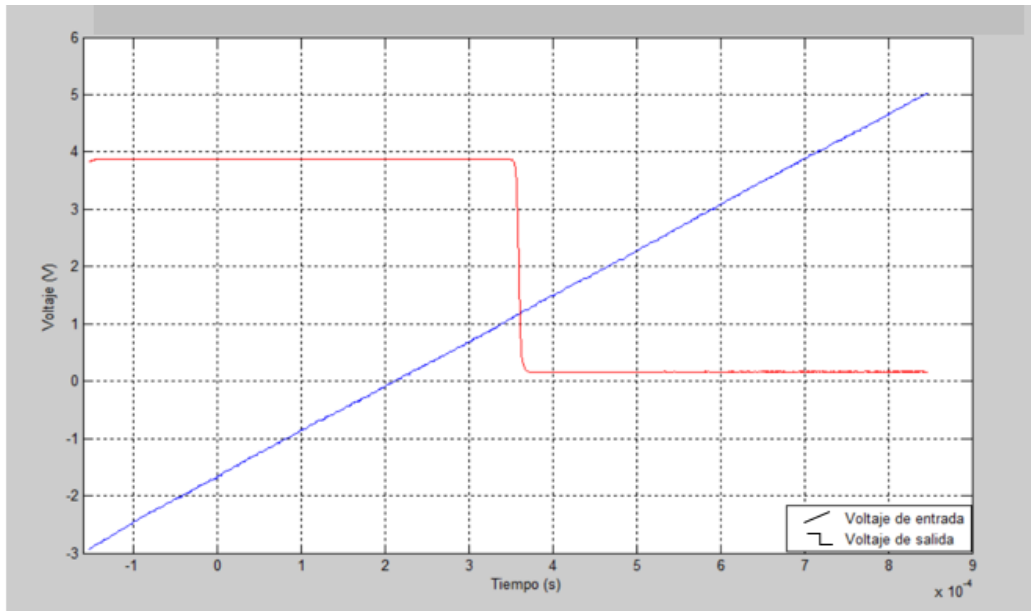


Figura 4.21: Gráficas de las señales de entrada (rampa) y salida

El valor de la señal de rampa en la entrada se dejó con los valores de voltaje antes mencionados y lo que se varió fue el voltaje DC aplicado en las terminales cortocircuitadas del micro calefactor y micro sensor, anteriormente descritas. Dicho valor de voltaje se varió desde -0.7 V hasta 1.4 V con pasos de 0.1 V y, con ayuda de un osciloscopio, se observó el comportamiento de la señal de salida para cada paso de voltaje, cuyos datos se guardaron, para posteriormente graficar los valores de la señal



de salida de cada paso de voltaje con respecto a la señal de entrada, y obtener así, la familia de curvas correspondiente al desplazamiento de la curva de transferencia (fig. 4.22).

Para esta caracterización, el voltaje VDD corresponde a 5 V y VSS a tierra y el potencial aplicado a las compuertas de otros transistores FGMOS fue de -5 V, por las razones ya antes mencionadas.

En la figura 4.22 se muestra la familia de curvas de transferencia ( $V_{out}$  vs  $V_{in}$ ) obtenida de la caracterización del circuito de lectura. De aquí se puede ver que la estrategia de acoplar un voltaje a través del capacitor formado entre Poly1 (micro calefactor y sensor cortocircuitados) y Poly2, funciona como alternativa para emular la “inyección química” debida a la reacción entre el gas y la película sensora. Esto fue posible gracias a que la estructura de la microplaca se configuró para ser conectada externamente a un controlador de temperatura y no al sistema integrado. El procedimiento para el depósito y tratamiento de la película sensora sobre el circuito integrado es todavía un asunto pendiente en la realización del sensor de gas.

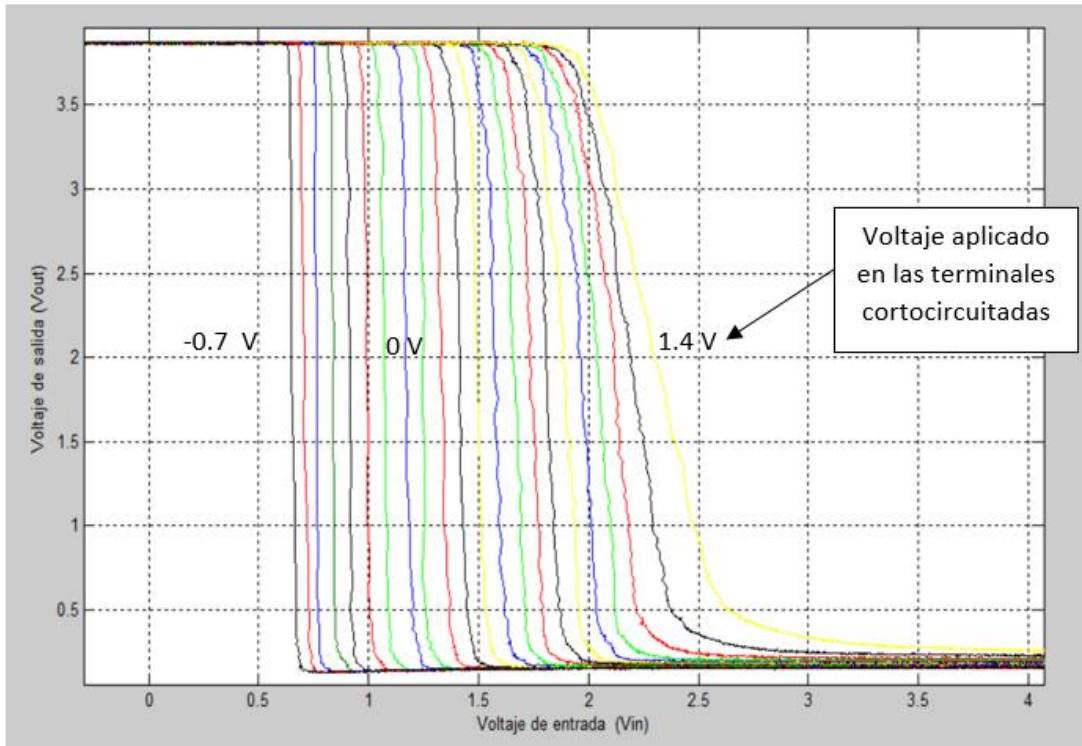


Figura 4.22: Curvas de transferencia obtenidas de la caracterización del circuito de lectura

[Optimización del diseño y funcionamiento de un sensor de gas MEMS basado en FGMOS]

#### 4.4 Caracterización de un Transistor FGMOS de 2 compuertas de control

En la figura 4.23 se muestra el arreglo elaborado con el FGMOS de compuertas de control, usado para llevar a cabo las mediciones.

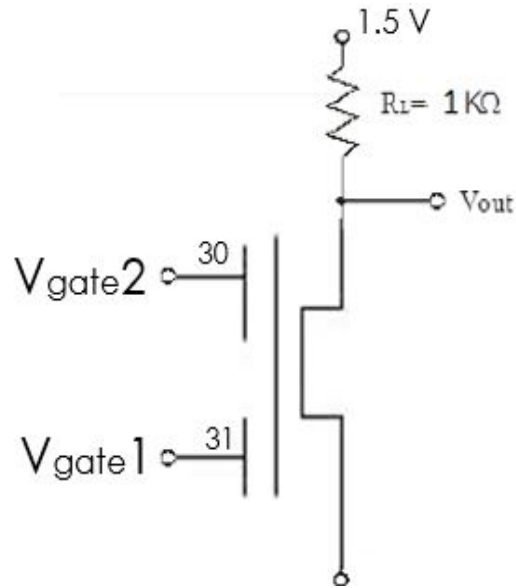


Figura 4.23: Arreglo con transistor FGMOS de 2 compuertas de control

Teniendo la caracterización del circuito de lectura y ya que se contaba con un transistor FGMOS de 2 compuertas de control, idéntico al del circuito de lectura, pero independiente, se decidió caracterizarlo también para compararlos con los resultados obtenidos en la caracterización del circuito de lectura. La diferencia es que, en este transistor, debido a que se encuentra de manera independiente, la compuerta flotante no se está acoplada a ninguna micro placa caliente. Es decir, para obtener las curvas de transferencia, ya no sería necesario cortocircuitar las terminales de ningún micro calefactor y micro sensor. De la misma manera que en la caracterización anterior, el voltaje presente en la compuerta flotante del FGMOS, debido a la presencia del gas, se puede representar mediante la aplicación de un voltaje en una de las compuertas de control; está claro que no será igual, pero el comportamiento será comparable, ya que de acuerdo al signo del potencial aplicado en la compuerta flotante, se hará la suma o resta de voltajes y habrá un desplazamiento en la curva de transferencia [1], [22].

Primero se obtuvieron las curvas de salida y curva de transconductancia. Dicha medición se hizo cortocircuitando las 2 compuertas de control, de tal forma que en ambas se aplicó el mismo voltaje (VGS). Las curvas de salida se obtuvieron para valores de 1, 2 y 3 V en VGS y un barrido de 0-3V en VDS. La curva de transconductancia se obtuvo para un barrido en VGS de 0-3 V para un voltaje fijo de 3 V en VDS. En la Figura 4.24 se muestran las gráficas de dichas curvas.

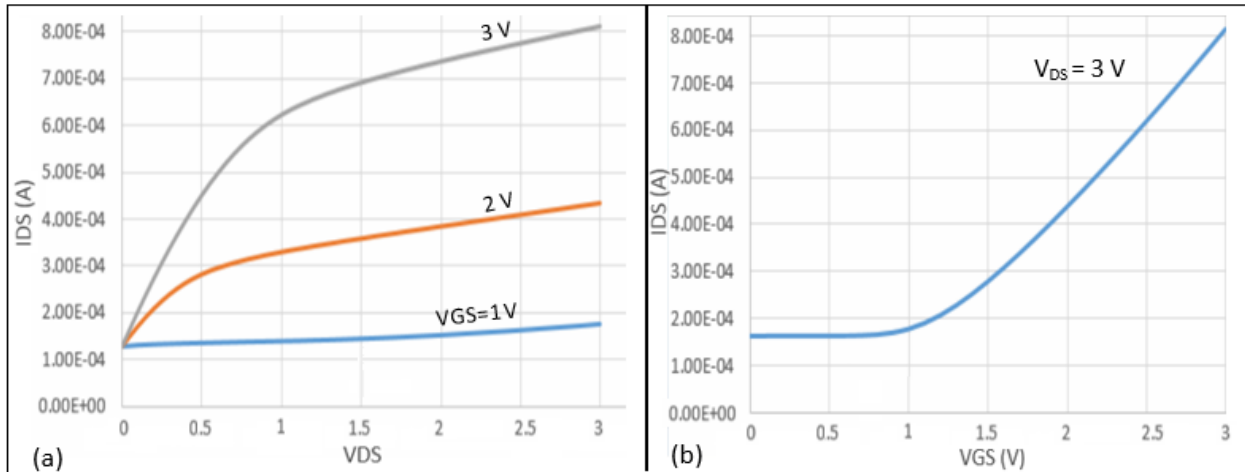


Figura 4.24: Curvas de salida (a) y curva de transconductancia (b) de un FGMOS de 2 compuertas de control.

Como se puede observar en la figura 4.24 (b), para un potencial de 0 V en las compuertas de control del FGMOS, se tiene un valor de corriente de drenador ( $I_{DS}$ ) de aproximadamente  $180 \mu A$ . por lo tanto, se tiene carga en la compuerta flotante, es decir, que ya se encuentra formado el canal. A pesar de que cuando se caracterizaron los transistores FGMOS sensor 2 y sensor 2b (ver temas 4.2.2 y 4.2.3), ya se había iluminado el chip durante 5 minutos, por lo que, aún se tiene carga positiva almacenada en la compuerta flotante.

Lo observado en las curvas de salida (fig. 4.24 a), para un  $V_{DS}=0$  V, se tiene un valor de corriente de aproximadamente  $120 \mu A$ , puede ser debida a una contribución de corriente por parte del circuito de lectura, ya que tiene un FGMOS interconectado internamente, el cual, se estima también tiene carga almacenada en la compuerta flotante, debido a que no se ha logrado eliminar por completo con la primera iluminación con luz UV.

En la figura 4.25 se muestra la simulación en PSPICE para potenciales en la compuerta flotante de -0.3 V hasta 0.3 V, con pasos constantes de voltaje de 0.1 V y un voltaje VDS de 1.5 V.

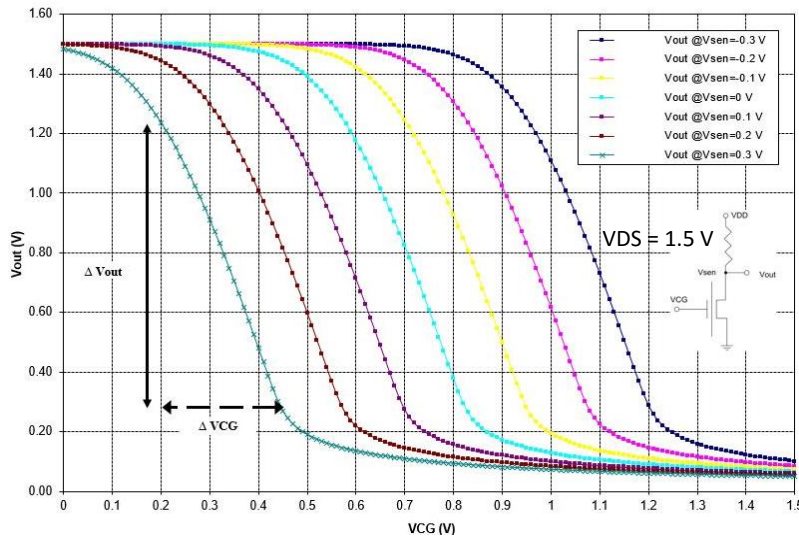


Figura 4. 25: Curvas de transferencia obtenidas mediante PSPICE para un FGMOS de 2 CG.

En la figura 4.26 se muestra la familia de curvas de transferencia obtenidas en la caracterización del FGMOS de doble compuerta de control, para un voltaje de rampa en la entrada ( $V_{gate2}$ ) desde -7 V hasta 18 V y un VDD de 1.5 V, para valores de voltaje en  $V_{gate1}$  desde -5 V hasta 5V con pasos constantes de voltaje de 1 V de acuerdo al arreglo mostrado en la figura 4.24.

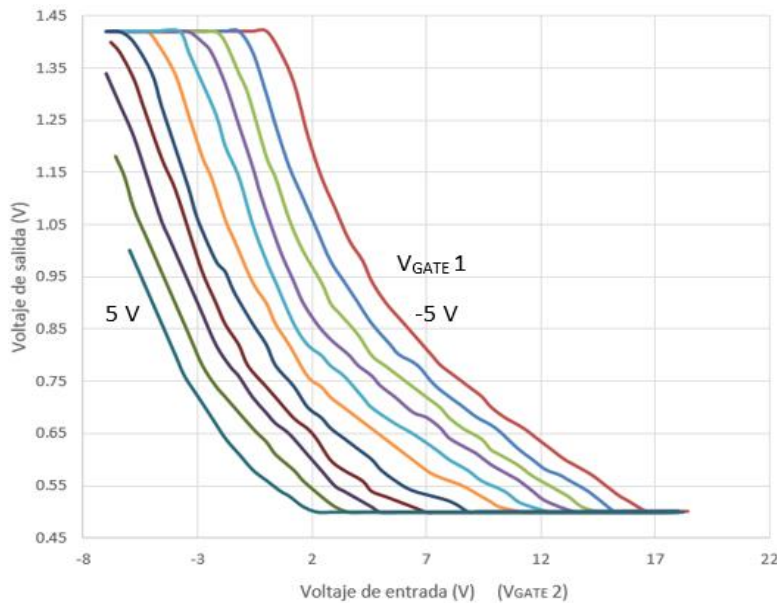


Figura 4.26: Curvas de transferencia obtenidas de la caracterización de un FGMOS de 2 CG

[Optimización del diseño y funcionamiento de un sensor de gas MEMS basado en FGMOS]

De esta gráfica se puede ver que la compuerta  $V_{gate1}$  es útil para entonar el punto de operación en función de la carga almacenada en la compuerta flotante, para que se opere al amplificador en la región de máxima ganancia.

De la figura 4.26 se puede observar que la tendencia de las curvas es la que se esperaba.

Como se ha comentado anteriormente, la curva de transconductancia del FGMOS de dos compuertas de control se desplazará en función de la carga almacenada en la compuerta flotante [1]. Para demostrar esto, se simuló ahora este transistor en PSPICE para obtener la característica I-V, considerando cuando se tiene una carga variable en la compuerta flotante del transistor FGMOS.

En la figura 4.27 se muestra la curva  $I_{DS}^{1/2}$  vs  $V_{gate1}$  obtenida mediante simulación en PSPICE, para un voltaje constante de 1.5 V en  $V_{gate2}$ , mientras se hace variar  $V_{sensor}$  (en la compuerta flotante), el cual hace referencia al voltaje derivado de la reacción química; dicha variación se hace desde 0 hasta -2 V, con pasos constantes de voltaje de 0.1 V.

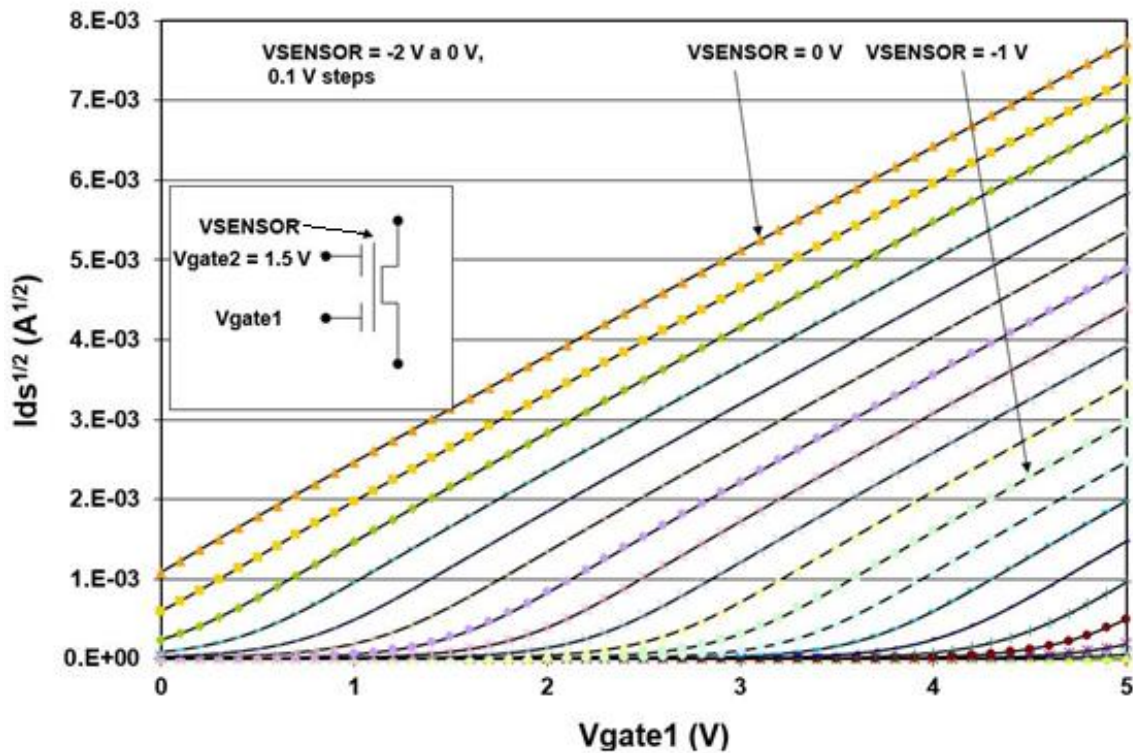


Figura 4.27: Simulación del efecto electroquímico con un FGMOS de 2 compuertas de control.

[Optimización del diseño y funcionamiento de un sensor de gas MEMS basado en FGMOS]



De la figura anterior se puede ver que conforme el voltaje en la compuerta flotante se hace más negativo, la curva se desplaza hacia la derecha y en consecuencia, aumenta su voltaje de umbral. Por lo tanto, combinando los efectos de esta simulación y la anterior, se puede recorrer el punto de operación del amplificador de tal forma que pueda ser procesada la concentración del gas en la región de mayor ganancia, lo cual, no se podría hacer si el transistor tuviera sólo una compuerta de control.

En la figura 4.28 se muestra la curva I-V obtenida mediante mediciones experimentales, en donde se obtiene el mismo comportamiento que la obtenida por simulación (figura 4.27).

La variación en VCG2 (ver figura 4.28) se hizo desde -1.2 hasta 1.2 V con pasos de voltaje constante de 0.1 V, para un barrido de voltaje desde -10 V hasta -4 V en VCG1 para cada VCG2, tal como se muestra en la figura 4.28.

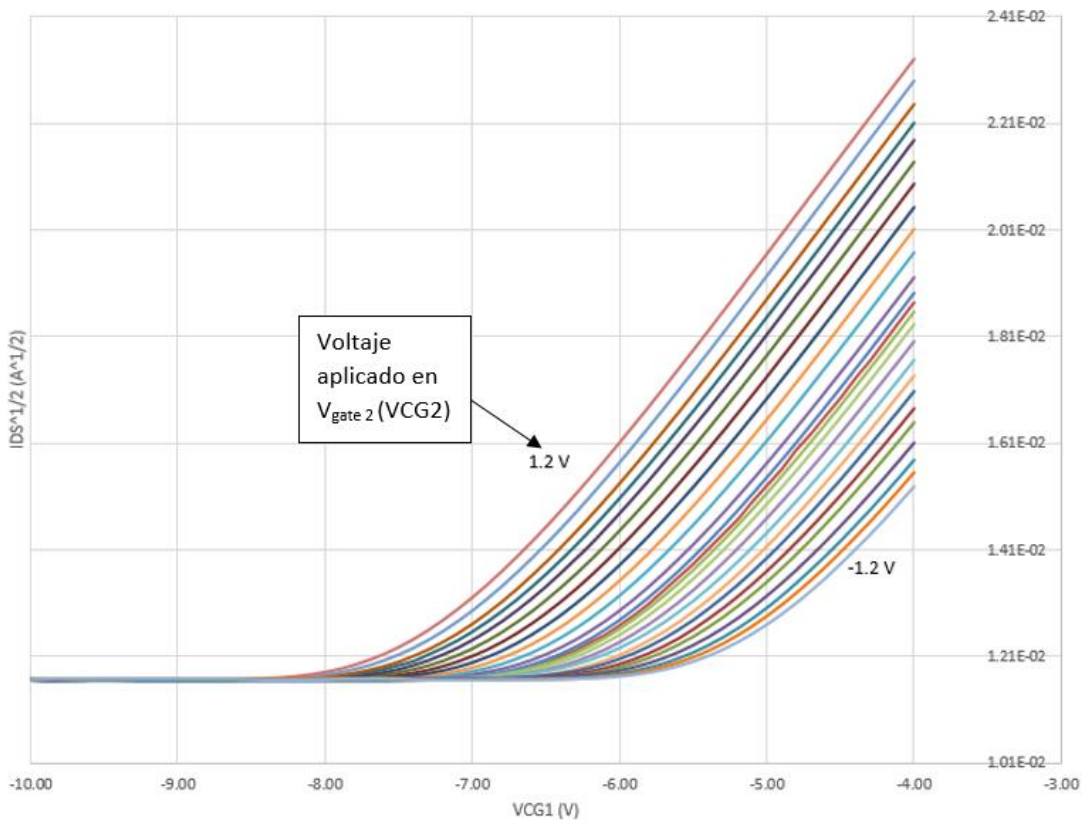


Figura 4.28: Caracterización de un FGMOS de 2 compuertas de control, emulando el efecto

Con las curvas I-V obtenidas, tanto en simulación como en la caracterización, se comprueba que efectivamente, se tendrá un desplazamiento en la curva de transconductancia para el transistor FGMOS, dependiendo de la carga que se tenga presente en la compuerta flotante, es decir, si se tiene carga positiva, la curva de transconductancia se desplazará hacia la izquierda, mientras que si se tiene carga negativa, dicha curva se desplazará hacia la derecha, tal como se puede observar en la figura 4.28.

#### 4.5 Caracterización del transistor MOS de control

En otro de los chips que se tenían fabricados (chip T93J) [1], se encuentra, el transistor MOS de control, el cual es parte del controlador de temperatura, al igual que, un amplificador operacional, el micro calefactor y el micro sensor (Figura 4.29). El amplificador operacional, recibe una retroalimentación de voltaje que corresponde a la caída de voltaje del micro sensor, el cual variará de acuerdo con la resistencia del micro sensor, ya que ésta cambiará con respecto a la temperatura. Dicho voltaje, es comparado con un voltaje de referencia o set point y el transistor MOS, abrirá o cerrará el circuito de alimentación al micro calefactor, tal como se muestra en la figura 4.29 [1].

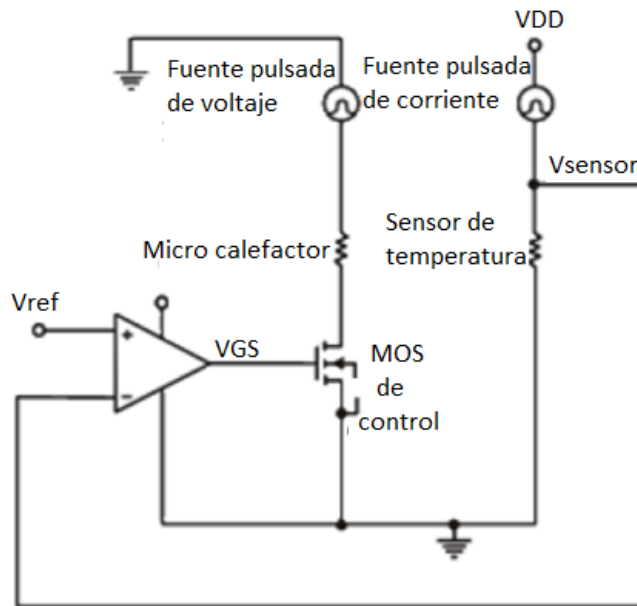


Figura 4.29: Circuito esquemático del controlador de temperatura

[Optimización del diseño y funcionamiento de un sensor de gas MEMS basado en FGMOS]

El transistor MOS de control, funciona como un interruptor, el cual permitirá o no, la circulación de corriente a través del micro calefactor. Debido a que debe manejar la corriente que demande el micro calefactor, se esperan valores del orden de mA en la corriente de drenador.

Con base a lo anteriormente mencionado, es necesario conocer las curvas características del dispositivo, por lo que, se procedió a obtener las curvas de salida y de transconductancia del transistor MOS de control, las cuales se muestran en la figura 4.30 y 4.31.

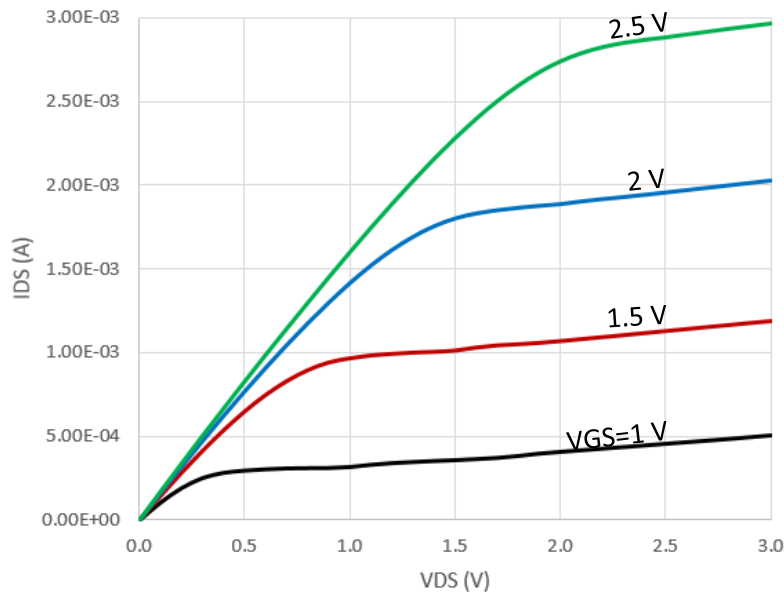


Figura 4.30: Curvas de salida del transistor MOS de control

Las curvas mostradas en la figura 4.30 fueron obtenidas para voltajes desde 1 V hasta 2.5 V en la compuerta (VGS) con pasos de 0.5 V y un barrido desde 0 hasta 3 V en VDS, para cada medición. Como se puede apreciar en las curvas de salida (fig. 4.30), para un valor de VGS de 2.5 V, se tiene una corriente IDS de 3 mA aproximadamente, para un valor de VDS = 2 V, lo cual es un valor esperado, ya que, dicho transistor debe manejar corrientes de ese orden, debido al micro calefactor.

En la figura 4.31 se muestra la curva de transconductancia para un VDS de 2V, de donde se observa que para un VGS=2.5 V, se tiene una IDS=2.75 mA, verificando lo mostrado en la figura 4.30 para ese mismo valor.



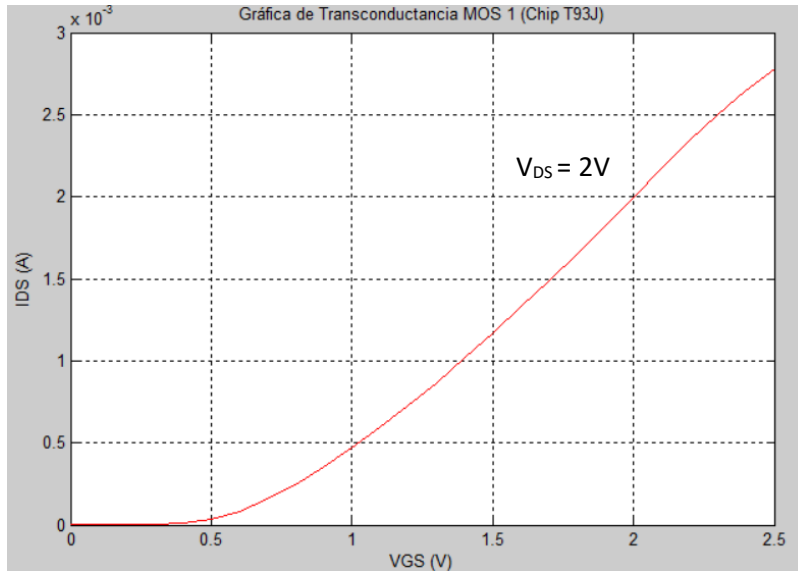


Figura 4.31: Curva de transconductancia del transistor MOS de control

#### 4.5.1 Aplicación del transistor MOS de control en circuito comparador

Posteriormente con ayuda de un amplificador operacional (Op-Amp) comercial se probó el circuito mostrado en la figura 4.32, en la que se utiliza el Op-Amp como comparador. Se utilizó un amplificador operacional comercial, ya que el que se tiene en el chip no estaba dando los resultados esperados, aparentemente por algún daño en el componente.

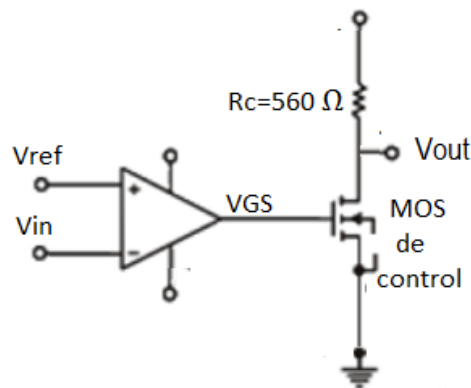


Figura 4.32: Arreglo experimental para aplicación del MOS de control como comparador

En la figura 4.32;  $V_{in}$  es el voltaje de entrada (rampa),  $V_{ref}$  el voltaje de referencia en el que el OP-Amp deberá cambiar de estado, y de esta forma hacer que el transistor MOS de control conduzca.

Para llevar a cabo dicha medición, se polarizó con 5 V al circuito, además se aplicó una rampa en  $V_{in}$  en el intervalo de 0 V hasta 5 V y un voltaje  $V_{ref}$  de referencia al que el OP-Amp deberá conmutar. Se realizó la medición para varios valores de voltaje. En la figura 4.33 se muestra el comportamiento para un voltaje de referencia de 2.5 V y en la figura 4.34 para un voltaje de referencia de 3.5 V.

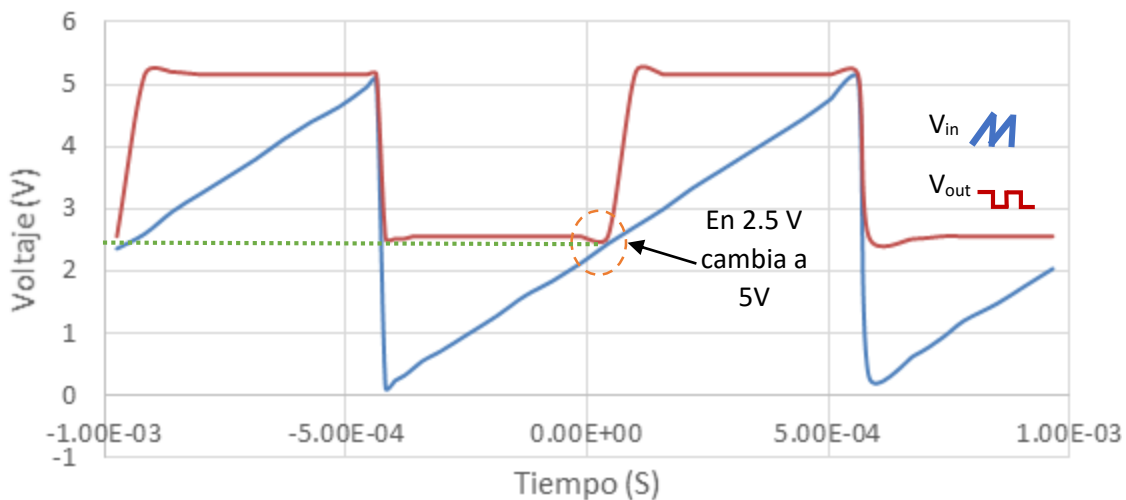


Figura 4. 33: Respuesta del comparador para un voltaje de referencia de 2.5 V

En la figura 4.33 se puede observar el correcto funcionamiento, ya que para un voltaje de referencia de 2.5 V, el MOS deja de conducir y hace el cambio de 2.5 V a 5 V en  $V_{out}$ , la caída es debida a la resistencia  $R_c$  conectada en el drenador del MOS de control (Fig. 4.32).

En la figura 4.34 se muestra la respuesta para un voltaje de referencia de 3.5 V. Tal como se indica en la figura, el cambio lo hace aproximadamente en ese valor. Se probó para otros valores de referencia y se determinó el intervalo en el que funciona adecuadamente como comparador, el cual va desde 0.3 V hasta 3.6 V.

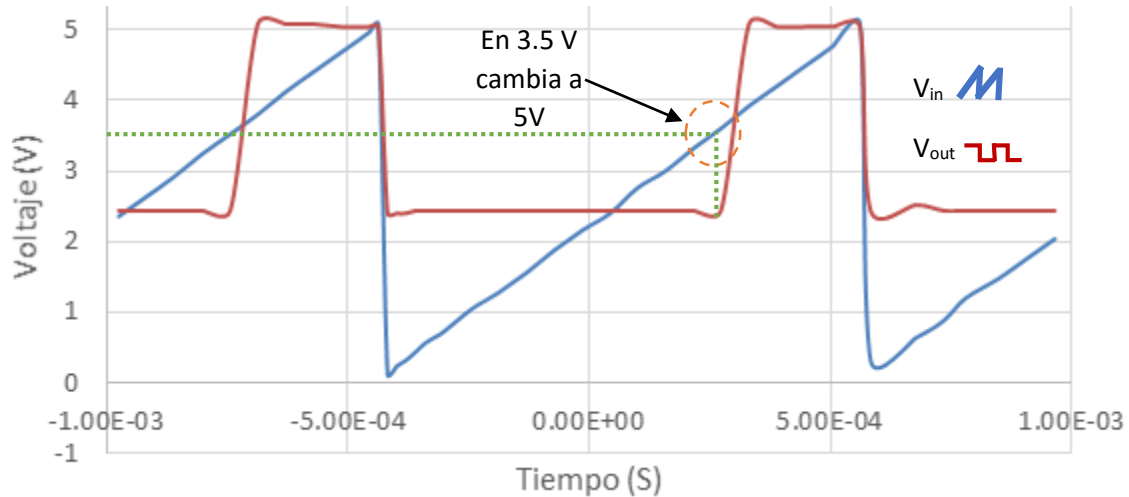


Figura 4. 34: Respuesta del comparador para un voltaje de referencia de 3.5 V

#### 4.6 Caracterización con máquina de puntas de la micro placa maquinada

Del trabajo realizado anteriormente [1], se tiene un chip sin encapsulado, al cual se le realizó micro maquinado, pero faltó hacer una caracterización adecuada de la micro placa caliente. Por lo que, como parte final de este trabajo, se realizó una caracterización del micro calefactor y micro sensor correspondiente al MOS sensor 2.

Debido a que este chip micro maquinado no estaba encapsulado, las mediciones se hicieron con ayuda de una máquina de puntas, para poder conectar a los pads correspondientes de cada componente.

En la figura 4.35 se muestra una foto tomada al chip después del proceso de micromaquinado, de la misma forma se etiqueta cada componente.

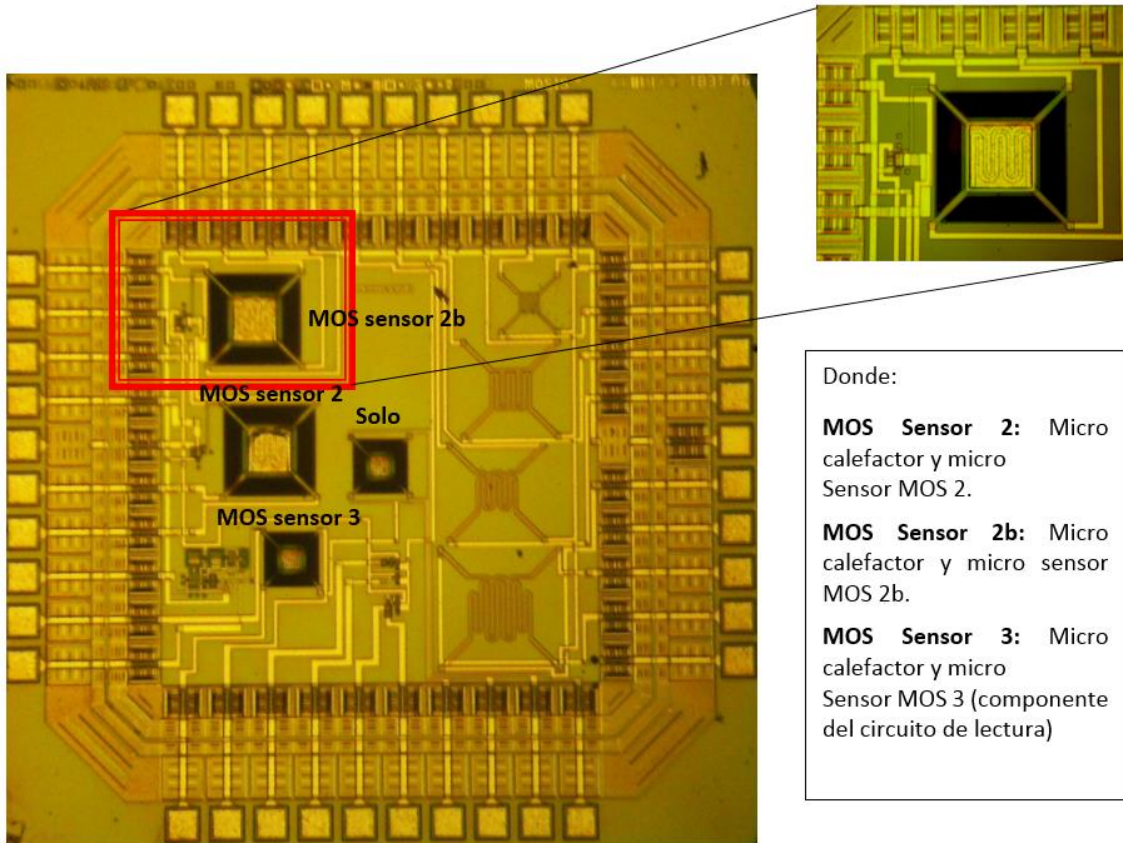


Figura 4. 35: Foto del chip después del proceso de micromaquinado.

Se intentó caracterizar los MOS sensor 2, 2b, ya que en el chip, que no está micromaquinado, estos componentes se caracterizaron; pero sólo se obtuvieron resultados esperados con el componente MOS sensor 2. Debido a factores desconocidos, en el MOS sensor 2b, se obtenían valores incoherentes en las mediciones, por lo que las mediciones se enfocaron al componente antes mencionado.

En la figura 4.36 se muestra el montaje utilizado para realizar las mediciones, en el cual se alimentó al micro calefactor con un barrido de voltaje desde 0 hasta 5 V, con pasos constantes de 0.2 V, y se registraron los valores de corriente que circulaban a través de éste. El micro sensor, se alimentó con una corriente constante de 10  $\mu\text{A}$ , de tal forma que conforme se calienta la micro placa, debido al aumento de voltaje en el micro calefactor, por efectos de conducción térmica, la resistencia del micro sensor aumenta, por lo que la caída de voltaje en dicho componente, también aumenta.

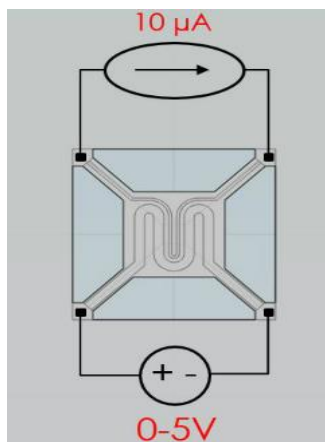


Figura 4. 36: Arreglo para la caracterización de la micro placa maquinada

En la tabla 4.6 se muestra el resultado de las mediciones del Sensor MOS 2:

Heater_V (V)	Heater_I (A)	R_H (Ohm)	Sensor_I (A)	Sensor_V (V)	R_S (Ohm)
0	-17.0661E-6	<b>447.7061</b>	10.0000E-6	3.9394E-3	<b>393.9366E+0</b>
0.2	446.7217E-6	<b>447.7061</b>	10.0000E-6	71.6844E-3	<b>7.1684E+3</b>
0.4	909.0076E-6	<b>440.0404</b>	10.0000E-6	139.3900E-3	<b>13.9390E+3</b>
0.6	1.3700E-3	<b>437.9590</b>	10.0000E-6	207.1455E-3	<b>20.7146E+3</b>
0.8	1.8268E-3	<b>437.9262</b>	10.0000E-6	274.6063E-3	<b>27.4606E+3</b>
1	2.2770E-3	<b>439.1740</b>	10.0000E-6	341.4780E-3	<b>34.1478E+3</b>
1.2	2.7200E-3	<b>441.1772</b>	10.0000E-6	407.7209E-3	<b>40.7721E+3</b>
1.4	3.1533E-3	<b>443.9843</b>	10.0000E-6	473.0175E-3	<b>47.3017E+3</b>
1.6	3.5741E-3	<b>447.6651</b>	10.0000E-6	536.9956E-3	<b>53.6996E+3</b>
1.8	3.9816E-3	<b>452.0844</b>	10.0000E-6	599.5600E-3	<b>59.9560E+3</b>
2	4.3733E-3	<b>457.3252</b>	10.0000E-6	660.3190E-3	<b>66.0319E+3</b>
2.2	4.7474E-3	<b>463.4124</b>	10.0000E-6	719.0211E-3	<b>71.9021E+3</b>
2.4	5.1036E-3	<b>470.2546</b>	10.0000E-6	775.5860E-3	<b>77.5586E+3</b>
2.6	5.4403E-3	<b>477.9170</b>	10.0000E-6	829.7094E-3	<b>82.9709E+3</b>
2.8	5.7556E-3	<b>486.4809</b>	10.0000E-6	881.0652E-3	<b>88.1065E+3</b>
3	6.0505E-3	<b>495.8301</b>	10.0000E-6	929.7007E-3	<b>92.9701E+3</b>
3.2	6.3243E-3	<b>505.9821</b>	10.0000E-6	975.4713E-3	<b>97.5471E+3</b>
3.4	6.5759E-3	<b>517.0359</b>	10.0000E-6	1.0182E+0	<b>101.8173E+3</b>
3.6	6.8085E-3	<b>528.7511</b>	10.0000E-6	1.0581E+0	<b>105.8082E+3</b>
3.8	7.0209E-3	<b>541.2382</b>	10.0000E-6	1.0950E+0	<b>109.4968E+3</b>
4	7.2205E-3	<b>553.9774</b>	10.0000E-6	1.1295E+0	<b>112.9459E+3</b>
4.2	7.4293E-3	<b>565.3265</b>	10.0000E-6	1.1648E+0	<b>116.4755E+3</b>
4.4	7.6459E-3	<b>575.4709</b>	10.0000E-6	1.2029E+0	<b>120.2932E+3</b>
4.6	7.8527E-3	<b>585.7879</b>	10.0000E-6	1.2404E+0	<b>124.0387E+3</b>
4.8	8.0291E-3	<b>597.8271</b>	10.0000E-6	1.2760E+0	<b>127.6012E+3</b>
5	8.2370E-3	<b>607.0163</b>	10.0000E-6	1.3147E+0	<b>131.4664E+3</b>

Tabla 4.6: Valores de voltaje y corriente medidos y valores de resistencia calculada.

[Optimización del diseño y funcionamiento de un sensor de gas MEMS basado en FG MOS]

De los datos mostrados en la tabla 4.6, se pueden obtener las 2 gráficas mostradas en las figuras 4.37 y 4.38, donde se grafican la resistencia del micro sensor en función del voltaje y la resistencia del micro calefactor en función del voltaje, respectivamente.

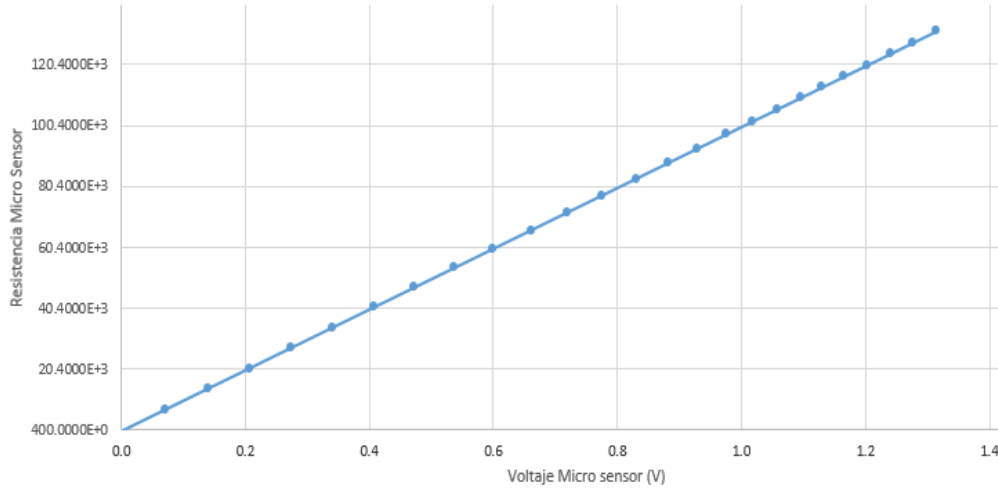


Figura 4.37: Resistencia en función del voltaje del micro sensor.

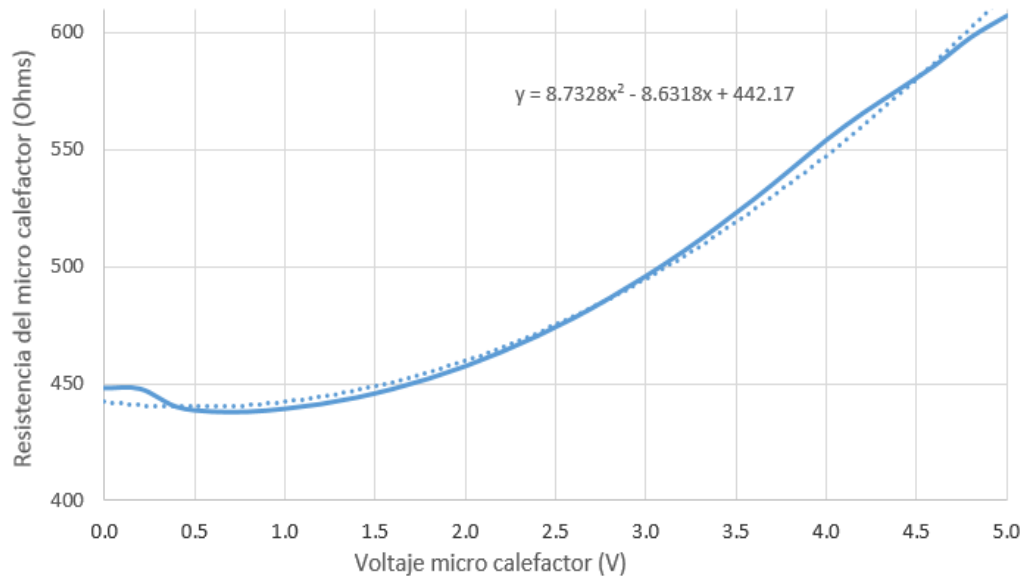


Figura 4.38: Resistencia en función del voltaje del micro calefactor.

Como se muestra en la figura 4.37 la resistencia en el micro sensor se eleva demasiado, en comparación con el valor de resistencia en el micro calefactor (ver figura 4.38). Si se comparan con los resultados de las mediciones para obtener el TCR en el chip que aún no se le hacía micromaquinado, sólo la medición del micro calefactor se asemeja a lo esperado, aunque en el rango de 0 - 0.5 V, hay un comportamiento anómalo en la curva

de resistencia, ya que se esperaría un aumento de resistencia y no un decremento, tal como sucede en este caso para voltajes menores a 1 V, la cual podría ser debida a la resistencia de contacto, ya que se encuentra implícita en la resistencia medida, y ésta, con el aumento de temperatura tenga un comportamiento distinto a la resistencia del micro calefactor. Como se muestra en la figura 4.38 se hace un ajuste de la curva obtenida y por medio de un binomio, el cual es mostrado en el mismo gráfico. Empleando esta ecuación se vuelve a hacer el cálculo de los valores de resistencia en función del voltaje y tomando un valor de TCR de  $7.77 \times 10^{-4} \text{ 1/ }^\circ\text{C}$ , obtenido en la caracterización de los micro calefactores (ver tabla 4.5) y haciendo uso de la ecuación 4.1, se calcula el valor de temperatura para cada valor de resistencia, donde se marca con un color gris en la tabla 4.7, la temperatura aproximada de operación esperada. Finalmente se calcula el valor de la potencia disipada; dichos valores se muestran en la tabla 4.7:

Heater_V	R_H	T (°C)	R <sub>aprox</sub>	Temperatura <sub>aprox</sub> (°C)	Potencia (W)
0.0	447	27.0	440	27	0.00E+00
0.2	448	29.0	439	24	9.12E-05
0.4	440	7.0	438	23	3.65E-04
0.6	438	1.0	439	24	8.21E-04
0.8	438	0.9	440	27	1.46E-03
1.0	439	4.5	441	32	2.27E-03
1.2	441	10.2	444	39	3.24E-03
1.4	444	18.3	447	48	4.39E-03
1.6	448	28.9	451	59	5.68E-03
1.8	452	41.6	455	72	7.12E-03
2.0	457	56.7	460	86	8.70E-03
2.2	463	74.3	466	103	1.04E-02
2.4	470	94.0	472	122	1.22E-02
2.6	478	116.0	479	143	1.41E-02
2.8	486	140.7	487	165	1.61E-02
3.0	496	167.6	495	190	1.82E-02
3.2	506	196.8	504	217	2.03E-02
3.4	517	228.6	514	245	2.25E-02
3.6	529	262.4	525	276	2.47E-02
3.8	541	298.3	536	308	2.70E-02
4.0	554	335.0	548	343	2.92E-02
4.2	565	367.7	560	379	3.15E-02
4.4	575	396.9	573	418	3.38E-02
4.6	586	426.6	587	458	3.60E-02
4.8	598	461.3	601	501	3.83E-02
5.0	607	487.7	617	545	4.05E-02

Tabla 4.7: Valores de resistencia, temperatura y potencia aproximados

[Optimización del diseño y funcionamiento de un sensor de gas MEMS basado en FG MOS]

De la tabla 4.7 se realiza una gráfica de la temperatura aproximada en función del voltaje en el micro calefactor, la cual se muestra en la figura 4.39.

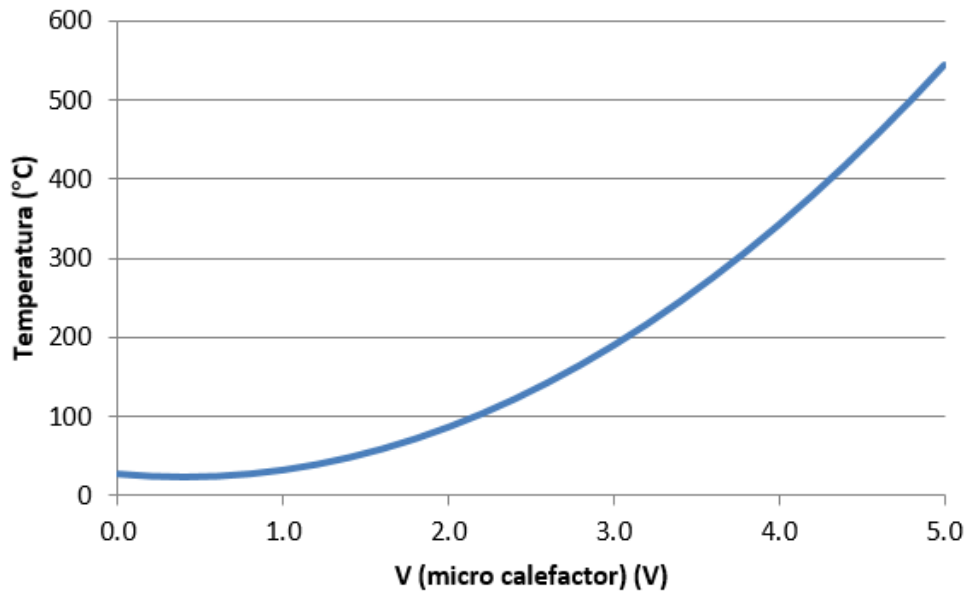


Figura 4.39: Temperatura aproximada en función del voltaje en el micro calefactor.

De los datos de la misma tabla se puede obtener una gráfica de eficiencia, la cual se muestra en la figura 4.40.

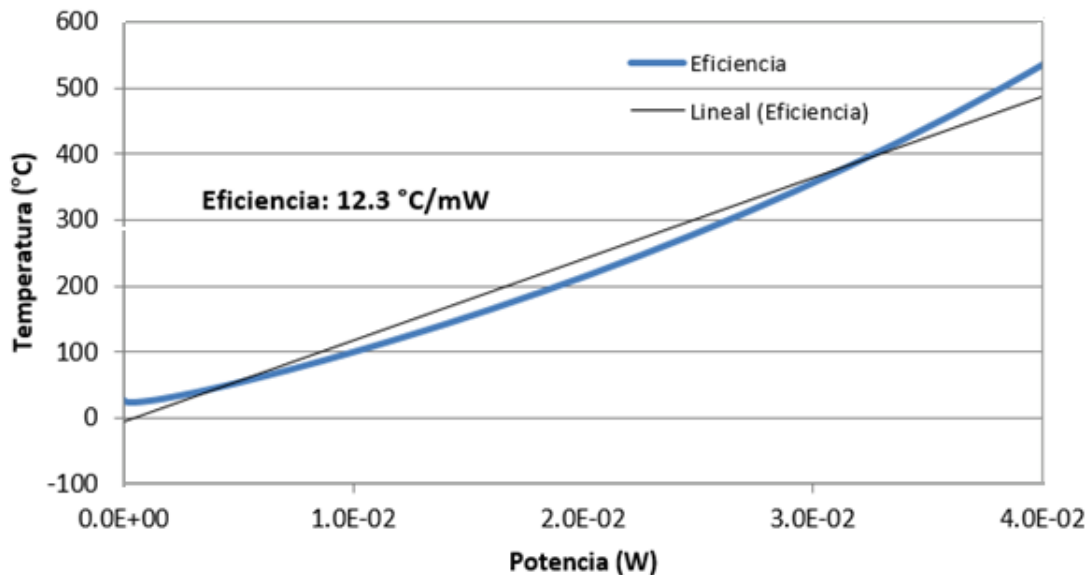


Figura 4.40: Curva de eficiencia



## 4.7 Discusión de resultados

De acuerdo a nuestras mediciones realizadas:

- Los valores obtenidos de TCR son comparables con los reportados en la literatura. Si bien, se tiene una variación, esto se puede atribuir a varios factores; ya que los valores de resistencia a temperatura ambiente son diferentes en cada componente debido a los diferentes diseños incluidos en el circuito integrado; aunque conservan la misma tendencia en la pendiente (TCR) [1], [8], [19], [23], por ser el mismo material. Cabe mencionar que al final, se hizo una extrapolación para determinar los valores de resistencia a temperaturas arriba de los 100 °C, ya que las mediciones sólo se hicieron hasta 100 °C y vale la pena mencionar también que el montaje utilizado para el control de temperatura externo no fue el más exacto, ya que aún se podría en un futuro mejorar y utilizar equipo más actual y con mejor precisión.
- Con lo obtenido de la caracterización de los transistores FGMOS, se muestra que se tiene carga residual almacenada en la compuerta flotante de dichos transistores, debido a los procesos de fabricación; se pudo establecer que la carga es aleatoria y diferente para cada uno. Además, se comprobó que la iluminación con luz ultra violeta si logra eliminar parcialmente la carga almacenada, sin importar qué tipo de carga, es decir, elimina tanto carga positiva, como negativa. El tiempo de iluminación dependerá de la cantidad de carga almacenada. En el caso de los chips caracterizados, 5 minutos no fueron suficientes para eliminar por completo la carga que se tenía en los FGMOS, pero sí se logró observar el desplazamiento de la curva de transconductancia, tal como se esperaba.
- Por otro lado, con lo obtenido con la caracterización del circuito de lectura, se muestra que se pudo comprobar lo predicho mediante simulaciones previas a dicha caracterización Aunque no se tenía disponible la película sensora, se encontró una buena alternativa para poder inducir un voltaje en la compuerta del

FGMOS contenido en el circuito de lectura y de esta forma lograr el efecto esperado en las curvas de transferencia. Esta alternativa permitió seguir conservando a la compuerta flotante como tal, como sería el caso cuando se tuviera la película sensora ya depositada.

- En la caracterización del chip micromaquinado no se obtuvieron los resultados esperados en los componentes medidos por diversos factores. Entre ellos, a la suciedad que pudiese tener el chip, o daño en algún componente, al igual que no se contaba con otro chip con proceso de micromaquinado, ni con una máquina de puntas a disposición para realizar más mediciones. Pero, con lo obtenido y mostrado en este trabajo, se puede decir que los resultados obtenidos para el micro calefactor, están dentro de los esperados.

## 5. Conclusiones

En el presente trabajo, se trató de mostrar el desarrollo de los puntos que llevan a la caracterización del prototipo de sensor de gas, que habían quedado pendientes en un trabajo previo, teniendo en cuenta que dicho trabajo puede servir como base para futuros desarrollos. Los pasos seguidos y los resultados obtenidos sirven como base tanto para el diseño de este tipo de sensores, así como para el procedimiento de caracterización que se sugiere para evaluar el desempeño del mismo. Este trabajo representa una contribución a la línea de investigación de los MEMS en el Grupo de Sistemas VLSI de la Sección de Electrónica del Estado Sólido.

El uso de programas de simulación, tales como; COMSOL Multiphysics, ACES y PSPICE, utilizados en este trabajo, muestran su utilidad en esta rama de investigación y amplían el panorama de los posibles resultados a obtener, tanto en la parte electro-térmica, así como en la de micromaquinado y pruebas eléctricas y de esta forma lograr una mejor interpretación de los resultados y sugerir ajustes para la optimización de resultados. Lo anterior, con base a la tecnología CMOS que se está utilizando para la fabricación de los prototipos.

De lo obtenido en este trabajo, en función de los objetivos planteados, se puede decir que:

- Se propone una optimización en el diseño del micro calefactor, ya que con los ajustes realizados y con ayuda de los programas de simulación, se puede afirmar que se logró disminuir la densidad de corriente sobre la estructura del micro calefactor. Así mismo, con los arreglos propuestos para dejar expuestas las diferentes áreas del substrato en el diseño, se logró adaptar el diseño que se tenía en la tecnología de 1.2  $\mu\text{m}$ , a la tecnología CMOS estándar disponible (0.5  $\mu\text{m}$ ), y de esta forma, poder continuar el estudio del sensor de gas MEM, ya que aún tiene aspectos a considerar y estudiar.
- Con los resultados obtenidos de las simulaciones en el software ACES, se reafirma la viabilidad de la adaptación del diseño de la micro placa caliente a la

*[Optimización del diseño y funcionamiento de un sensor de gas MEMS basado en FGMOS]*

tecnología de CMOS estándar de 0.5  $\mu\text{m}$ , y que podría realizarse el proceso de micromaquinado hasta con una mascarilla como la mostrada para la realización de la simulación en este trabajo, en dado caso que en un futuro al fabricar el chip, se cuente con una estructura similar. Esta propuesta es importante para poder seguir recurriendo a la tecnología CMOS estándar sin limitaciones.

- También, se puede decir, que con la ayuda de las simulaciones realizadas con COMSOL, se tiene un panorama muy amplio de las temperaturas que se pueden lograr con la micro placa caliente para un cierto valor de voltaje aplicado en las terminales del micro calefactor, así como visualizar la distribución térmica en distintas áreas cercanas a la zona micro maquinada. Además, se puede obtener el tiempo que le toma a la micro placa caliente alcanzar las temperaturas deseadas, así como los efectos que se tienen en la estructura debido a la corriente.
- Como resultado de las caracterizaciones realizadas a los diferentes componentes del sensor, se puede afirmar, que se logró comprobar de manera satisfactoria el correcto funcionamiento de los mismos, así como la obtención esperada del coeficiente térmico de resistencia de los diferentes componentes. Se comprobó que los transistores FGMOS en sus diferentes versiones (una y dos compuertas de control) operan como se anticipó en las simulaciones, con el inconveniente de que no se logró eliminar completamente la carga residual de fábrica. De la misma manera, el circuito de lectura funcionó apropiadamente y se comprobó que la estrategia de emular la carga debida a la inyección química a través de un voltaje acoplado, fue útil en lo que se llega al proceso del depósito de la película sensora sobre el chip, lo cual aún está pendiente.
- Los resultados obtenidos en el chip micromaquinado requieren de más estudio. Esto debido a que solo se contaba con una sola muestra y ésta presentó algunas inconsistencias en las caracterizaciones eléctricas, a diferencia de los chips no micromaquinados. Se requiere procesar más chips y repetir las mediciones para descartar daños posibles debidos al proceso de micromaquinado volumétrico.

## **Trabajo futuro**

Con lo realizado para el desarrollo del presente trabajo, se puede decir, que aún hay aspectos por revisar para la continuación del estudio del sensor de gas MEM basado en un FGMOS.

Con la fabricación del diseño adaptado a la tecnología CMOS estándar de 0.5  $\mu\text{m}$ , será necesario volver a caracterizar ciertos componentes, tales como los micro calefactores y micro sensores, transistores de compuerta flotante y demás componentes requeridos en el nuevo diseño, así como llevar a cabo diversos procesos de micromaquinado para la caracterización posterior de la micro placa caliente.

Se requiere mejorar el montaje utilizado para la medición del TCR, es decir, que sea lo más exacto posible en cuanto a la medición de temperatura a la que se encuentra el chip, para poder, además, realizar dichas mediciones a temperaturas mayores a las realizadas en este trabajo.

Para poder concluir con la evaluación del prototipo, se deberá hacer el depósito de la película sensible de óxido metálico, sobre la micro placa caliente y hacer la caracterización del circuito de lectura ahora ya con la presencia de dicha película.

Una vez teniendo las estructuras micromaquinadas, se puede realizar la caracterización del controlador de temperatura integrado, para comprobar el correcto funcionamiento del mismo y relacionar la temperatura de la micro placa caliente en función del voltaje aplicado al micro calefactor.

Como recomendación, al realizar el diseño completo, para fabricar el chip en la nueva tecnología, se deberá procurar dejar los transistores FGMOS independientes, es decir, que no compartan drenador y fuente, para que no se tengan los problemas que se tuvieron en este trabajo, ya que algunos transistores conducían debido a la carga contenida en la compuerta flotante. Hacer esto aunque se tengan pads internos y con

ayuda de una máquina de puntas realizar la caracterización. Así mismo, integrar un diseño como mínimo, de todo el sistema interconectado internamente y sólo poner pines externos para alimentación y señales de salida y entrada.

Como todo trabajo y diseño, aún la micro placa puede ser rediseñada, y poder adaptar todo el diseño a una tecnología de fabricación CMOS estándar más pequeña a la de 0.5  $\mu\text{m}$ . Aún se pueden hacer modificaciones al tamaño de la micro placa, la forma del micro calefactor y micro sensor, así como la reubicación de los mismos dentro de la micro placa.

## Referencias

- [1] Mendoza-Acevedo, S. (2012) "*Prototipo de sensor para gases con tecnología MEMS*", CINVESTAV, México DF.
- [2] Kaajakari V. (2009), "*Practical MEMS*".
- [3] Santana-Pérez, A.; Verdezoto-Carranco, G. (2011), "*Estudio del estado del arte, modelado y simulación de MEMS para diseño de un prototipo orientado al área de automatización y control*", Universidad politécnica del ejército, Ecuador.
- [4] Márquez D.; Cárdenas O., "*Estado del arte de los Sistemas Microeletromecánicos*". Revista Ciencia e Ingeniería, Vol. 27, No.3, Agosto-Noviembre, 2006 ISSN 1316-7081, pp. 109-117.
- [5] García-Martínez, L. (2010), "*Diseño y simulación de un micro acelerómetro de torsión usando un proceso MUMPS*". Facultad de Ingeniería, UNAM, México, DF.
- [6] Ochoa-Japa, J.; Cabrera-Morocho, L.; Ortega-Guazhima, M., (2012), "*Diseño, construcción e implementación de un sistema electroneumático para el inflado de los neumáticos para la conducción de personas con capacidades diferentes*". Universidad politécnica salesiana, Ecuador.
- [7] Santana-Pérez A.; Verdezoto-Carranco G., "*Simulación de MEMS para el diseño de un prototipo orientado al área de automatización y robótica*". IEEE ITC International Test Conference, 2010, Sangolquí, Ecuador, pp. 223-229.
- [8] Mendoza-Acevedo, S.; Reyes-Barranca, M.A., "*Study for the Micromachining Optimization of Micro Hotplates used in MEMS-CMOS Gas Sensors*" 8th International Conference on Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control (CCE), 2011, pp. 1048-1053,

[9] Quijano-Adrián, A. (2008), "*Microtecnologías; una breve visión actual*" Academia Nacional de Ciencias, Buenos Aires.

[10] E-CENTRO, página web. "*MOSFET de puerta flotante, historia, estructura, modelado, simulación y aplicaciones*".

[http://centrodeartigo.com/articulos-noticias-consejos/article\\_140976.html](http://centrodeartigo.com/articulos-noticias-consejos/article_140976.html)

[11] DIGITIMES, página web. "*Simon Sze and his invention of floating-gate NVW*", 2012.

<http://www.digitimes.com/news/a20120418PD211.html?mod=0>

[12] Siordia-Vásquez, X. (2004), "*Multiplicadores analógicos de bajo voltaje basados en espejos de corriente y transistores MOS de compuerta flotante*". ESIME Culhuacán IPN, México, DF.

[13] Medina-Vázquez, A. (2012), "*Retos sobre el modelado del transistor FGMOS de múltiples entradas en circuitos integrados*". Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingeniería, UDG, México.

[14] García, P. (2011), "*Desarrollo de placa sensora para monitorización de gases tóxicos*". Universidad Carlos III de Madrid, Escuela Politécnica Superior, España.

[15] Espinosa-Piragua, E. (2008), "*Desarrollo y fabricación de sensores basados en nanotubos de carbono para la detección de gases tóxicos*". Universitat Rovira I Virgili, España.

[16] Jack, C. (1999), "*Hazardous Gas Monitors, A practical Guide to Selection, Operation and Applications*", ATS AGRO, McGraw-Hill.

[17] Mendoza-Gutiérrez, A. (2013), "*Introducción al uso del software COMSOL Multiphysics*", Facultad de Ingeniería, Universidad Veracruzana, México.



- [18] Afridi, M.; Hefner, A.; Geist, J.; Ellenwood, A.; Varma, A.; Jacob, B., “*Microhotplate-Based Sensor Platform for Standard Submicron CMOS SoC Designs*”, Semiconductor Device Research Symposium, 2005 International, IEEE, 7-9 Dec., pp. 260-265.
- [19] Afridi, M. Y.; Suehle, S.; Zaghoul, M.; Berning, D., “A Monolithic CMOS Microhotplate-Based Gas Sensor System” IEEE, SENSORS JOURNAL, Vol. 2, Dec. 2002, pp. 644-655.
- [20] Belmonte, C.; Manzano, J.; Arbiol, J.; Cirera, A.; Puigcorbe, A.; Vila, A., “Micromachined twin gas sensor for CO and CO<sub>2</sub> quantification based on catalytically modified nano-SnO<sub>2</sub>”. Sensors and actuators B 114 (2006), April 2006, pp. 881-892.
- [21] Mendoza-Acevedo, S.; Reyes-Barranca, M.A.; Flores-Nava, L.M.; Ávila-García, A., “*Using a Floating-Gate MOS Transistor as a Transducer in a MEMS Gas Sensing System*”, Sensors ISSN 1444-8220, 18 Nov. 2010, pp. 10413-10434
- [22] Mendoza-Acevedo, S.; Reyes-Barranca, M.A.; Flores-Nava, L.M.; Ávila-García, A. “*Analysis of the potential upon the floating gate of an FGMOSFET used as a gas sensor*”, Sociedad Mexicana de Ciencia y Tecnología de Superficies y Materiales, Sep. 2008, pp. 5-9.
- [23] González-Vidal, J.; Reyes-Barranca, M.A.; Arriaga, W.C. “*Technological processes for Micro-Heater and Micro-Hot-Plate in the Implementation of a MEM gas sensor*”. 2nd International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ICEEE) and XI Conference on Electrical Engineering (CIE 2005), Mexico City, Sep. 7-9, 2005, pp. 440-443.