



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

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

Prototipo de Sensor para Gases con Tecnología MEMS

Tesis que presenta

Ing. Salvador Mendoza Acevedo

Para obtener el grado de

Doctor en Ciencias

En la especialidad de Ingeniería Eléctrica

Directores de Tesis: Dr. Mario Alfredo Reyes Barranca
Dr. Alejandro Ávila García

Ciudad de México, México

Agosto, 2012

PROTOTIPO DE SENSOR PARA GASES CON TECNOLOGIA MEMS

TABLA DE CONTENIDO

	<i>Página.</i>
ABSTRACT	i
AGRADECIMIENTOS	ii
OBJETIVOS	iii
RESUMEN	iv
CAPITULO I. ANTECEDENTES	1
I.1 Introducción	1
I.2 Sensores de Estado Sólido para Gases	2
I.3 Sistemas Micro Electro-Mecánicos	4
I.4 Conclusiones del Capítulo	6
I.5 Referencias	7
CAPITULO II. PROTOTIPO DE SENSOR PARA GASES CON TECNOLOGÍA MEMS-CMOS	9
II.1 Introducción	9
II.2 Principio de Funcionamiento	13
II.3 Descripción Física del Sensor para Gas	20
II.4 Resultados Esperados	23
II.5 Conclusiones del Capítulo	25
II.6 Referencias	26
CAPITULO III. SIMULACIONES	29
III.1 Introducción	29
III.2 Simulación Electro-Térmica	29
III.2.1 Simulaciones en 2D	34
III.2.2 Simulaciones en 3D	36
III.3 Diseño y Simulación del Sistema de Control de Temperatura	43
III.3.1 Descripción del Sistema de Control	45
III.3.2 Simulación del Controlador en SPICE	47
III.3.3 Simulación del Controlador con Simulink	50
III.4 Simulaciones de Maquinado y Mecánicas	55
III.5 Conclusiones del Capítulo	60
III.6 Referencias	61

CAPITULO IV. FABRICACIÓN DEL SENSOR PARA GASES	63	
IV.1	Introducción	63
IV.2	Tecnología CMOS	64
IV.3	Maquinado de la Micro Placa Caliente	65
IV.4	Maquinado Volumétrico	65
IV.5	Técnica Particular Utilizada	69
IV.6	Compatibilidad con el Proceso CMOS	71
IV.7	Proceso de Maquinado	80
IV.8	Resultados del Decapado	82
IV.9	Técnica Alternativa	85
IV.10	Depósito de la Película Sensora	87
IV.11	Conclusiones del Capítulo	88
IV.12	Referencias	89
CAPITULO V. REDISEÑO DE LA MICRO PLACA CALIENTE PARA OPTIMIZAR EL MAQUINADO	91	
V.1	Introducción	91
V.2	Conceptos Básicos	91
V.3	Maquinado de la Micro Placa Tradicional	93
V.4	Simulaciones de Decapado	94
V.5	Simulaciones Mecánicas	98
V.6	Resultados Experimentales	100
V.7	Layout Propuesto para la Micro Placa Caliente	105
V.8	Conclusiones del Capítulo	106
V.9	Referencias	107
CAPITULO VI. PRUEBAS Y CARACTERIZACION DE LOS COMPONENTES PRINCIPALES DEL SENSOR	109	
VI.1	Introducción	109
VI.2	Arreglo Experimental	109
VI.3	Micro Placa Caliente	119
VI.4	Caracterización del Controlador de Temperatura	121
VI.4.1	Transistor MOS de Control	121
VI.4.2	Op-Amp del Control de Temperatura	123
VI.5	Conclusiones del Capítulo	125
VI.6	Referencias	126
CAPITULO VII. CONCLUSIONES	127	
VII.1	Trabajo Futuro	129
VII.2	Productos	131
Anexo A	135	
Anexo B	137	
Anexo C	145	

ABSTRACT

Gas sensor structures using metal oxides as sensing layers are widely used, but commonly the resistance variation property of these layers are used to correlate this parameter with gas concentration.

Here, it is shown that the sensitivity of a Floating-gate MOSFET (FGMOSFET) upon ions derived from the chemical reaction either of reducing or oxidizing gases with the sensing layer, can be used also in gas detection. The charge produced by such chemical reaction can affect the voltage upon the floating gate.

An analysis of a reading circuit with an FG-MOS as the transducer is made, showing this approximation as a promising alternative for gas sensors. Also, the results from the characterization of an equivalent circuit using a conventional MOSFET, demonstrate that the electrochemical voltage due to the chemical reaction between the gas and the layer can be easily read.

Efforts are being made to monolithically integrate sensors together with controlling and signal processing electronics using standard technologies. This can be achieved with the demonstrated compatibility between available CMOS technology and MEMS technology. A very simple design can be made for fabrication of a monolithic gas sensing system, by using a standard technology, supported in a MEMS structure for thermal isolation purposes.

This work suggests a structure that can be designed and fabricated with standard CMOS technology compatible with MEMS that can use semiconducting metal oxides heated to temperatures up to 400 °C.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, al Dr. Mario Alfredo Reyes Barranca, por haberme aceptado para realizar este trabajo bajo su dirección, la confianza depositada en mí para desarrollar sus ideas y el apoyo para desarrollar las mías bajo su guía, siempre con su participación oportuna. Igualmente le agradezco las facilidades que siempre me otorgó para llevar a cabo este trabajo y todas las actividades propuestas alrededor del mismo. Igualmente, al Dr. Alejandro Ávila García, sin sus aportes y participación el punto medular de este trabajo no se hubiera logrado.

Así mismo, quisiera reconocer al grupo de VLSI, agradeciéndole al Dr. José Antonio Moreno, al Dr. Felipe Gómez, al Dr. Oliverio Arellano, al Ing. Emilio Rafael Espinoza y especialmente al M. en C. Luis Martín Flores Nava por participarme de sus conocimientos y experiencia siempre que lo he necesitado, auxiliándome más veces de las que puedo recordar.

Mis sinceros agradecimientos para los demás miembros de la Sección de Electrónica del Estado Sólido: investigadores, auxiliares, técnicos y personal administrativo. También debo extenderlos a mis compañeros, con quienes tuve muchas discusiones formativas y compartimos largas horas de estudio. Un agradecimiento muy especial al Dr. Francisco López, quien sin egoísmos ni distinciones me compartió su experiencia para comenzar mi trabajo y al Dr. Israel Álvarez Villalobos por animarme a ingresar al Cinvestav.

Por último, sin ser menos importante, a mi familia: mis padres y hermanas, sin sus palabras de aliento y ayuda al compartirles los logros y las frustraciones habidas durante el desarrollo de este trabajo doctoral, mucho de esto no habría sido tan satisfactorio.

OBJETIVOS

El desarrollo de este sensor para gas con tecnología MEMS persigue los siguientes objetivos:

- Usar un mecanismo de funcionamiento novedoso basado en el transistor MOS de compuerta flotante.
- Diseño monolítico, en el que todos los principales elementos funcionales se encuentren contenidos dentro de un mismo sustrato.
- Bajo consumo de potencia, adecuado para aplicaciones portátiles.
- Fabricado con tecnología CMOS comercialmente disponible.
- Post-procesado con alguna técnica de fabricación de MEMS compatible con la tecnología CMOS.

RESUMEN

Los sensores para gas usando óxidos metálicos como capas de detección son ampliamente utilizadas, pero comúnmente utilizan la variación de resistencia de estas capas como parámetro a correlacionar con la concentración de gas.

Aquí se muestra que la sensibilidad de un MOSFET de compuerta flotante (FGMOSFET) frente a iones derivados de la reacción química ya sea de reducción o de oxidación de gases con la capa sensora, puede utilizarse también en la detección de gas. La carga producida por dicha reacción química puede afectar el voltaje sobre la compuerta flotante.

Se realiza un análisis de un circuito de lectura con un FGMOS como transductor, mostrando esta aproximación como una alternativa prometedora para los sensores de gas.

La integración monolítica de sensores junto con electrónica de control y de procesamiento de señales utilizando tecnologías estándar de fabricación puede lograrse con la compatibilidad demostrada entre tecnología CMOS y tecnología MEMS. Puede hacerse un diseño muy simple para la fabricación de un sistema monolítico de detección de gas, utilizando una tecnología estándar, apoyada en una estructura de MEMS para fines de aislamiento térmico.

Este trabajo sugiere una estructura que puede ser diseñada y fabricada con tecnología CMOS estándar compatible con MEMS usando óxidos metálicos semiconductores calentados a temperaturas hasta 400 ° C.

I. Antecedentes



I. ANTECEDENTES.

I.1 Introducción.

Conocer el medio que nos rodea es una necesidad natural. Esta curiosidad ha llevado al desarrollo de medios para detectar una gran cantidad de variables del entorno, permitiendo realizar sistemas tecnológicos cada vez más complejos. Ya lograda la detección, la transducción, el monitoreo, el registro, el control y la automatización forman una cadena que permite mantener y regular estas variables en las condiciones ideales para su aplicación en los diversos procesos, tales como manufactura, seguridad e higiene, control industrial y ambiental, diagnóstico, calidad, instrumentos médicos, medios de transporte, etc. [1].

Estos procesos exigen actualmente que los dispositivos, instrumentos y equipos de instrumentación sean lo más pequeños posible, que requieran la menor energía, que soporten las condiciones de trabajo especificadas y que tengan las mejores características de medida y control.

Conjuntar todo lo anterior no es tarea fácil, pero el desarrollo tecnológico permite lograr un compromiso entre todas estas necesidades, especialmente en el área de microelectrónica. Es dentro de este campo de acción que se lleva a cabo el presente trabajo, donde se pretende aprovechar el conocimiento existente y la madurez adquirida actualmente con la tecnología CMOS comercialmente disponible, pero además, se trata de compaginar este conocimiento con la tecnología para la fabricación de dispositivos MEMS (Sistemas Micro Electro-Mecánicos, por sus siglas en inglés), y en particular, mediante el diseño y fabricación de un sensor de estado sólido para gas (Semiconductor Gas Sensor: SGS), para lograr una integración monolítica del sistema sensor.

Partiendo del interés de conocer la concentración de gases en un proceso dado, ya sea por cuestiones de seguridad o por cuestiones de control, este trabajo se enfoca al desarrollo de un sensor para gas, buscando incluir los requerimientos anteriormente mencionados. El prototipo desarrollado en el presente trabajo de tesis, pretende aprovechar las ventajas ofrecidas por los sensores de estado sólido para gas y los Sistemas Micro Electro-Mecánicos (MEMS) conjuntándolos con un mecanismo no

reportado anteriormente de detección de un gas particular en la atmósfera. Esta innovación aumenta la complejidad del trabajo presentado, pero al mismo tiempo devela una importante perspectiva para el desarrollo de nuevos sensores en las distintas áreas de aplicación.

I.2 Sensores de Estado Sólido para Gas.

Los sensores de estado sólido para gas son dispositivos basados en silicio en los cuales se integran las funciones sensoras y electrónicas en el mismo dado o chip.

Como estos dispositivos deben ser capaces de mantener un contacto físico directo con los gases que se desean analizar, no se han podido desarrollar sensores químicos basados en silicio ya que existen problemas tecnológicos que resolver. Una clasificación de los tipos de sensores de estado sólido para gas y el cambio físico útil para la detección de gas que utilizan, se muestra en la Tabla I.1 [2].

TIPO DE DISPOSITIVO	CAMBIO FÍSICO
Sensores de Óxido Semiconductor	Conductividad eléctrica
Sensores de Efecto de Campo: Diodos, transistores, capacitores	Función de trabajo, polarización eléctrica
Sensores Piezoeléctricos: QMB, SAW, cantiléver	Masa
Sensores Ópticos: Fibra óptica o capa delgada	Parámetros ópticos: SPR, reflexión, interferometría, absorción, fluorescencia, índice refractivo o longitud de ruta óptica
Sensores Catalíticos: Efecto Seebeck, pellistores, semistores	Calor o temperatura
Sensores Electroquímicos: potenciométricos o amperométricos	Fuerza electromotriz o corriente eléctrica en una célula electroquímica de estado sólido

Tabla I.1 Tipos de sensores de gas de estado sólido

El sensor para gases con tecnología MEMS compatible con la tecnología CMOS presentado se clasifica dentro de los sensores electroquímicos, en los que las especies químicas al reaccionar con un conductor electrónico o iónico, mediante el intercambio de cargas en la interfaz de una celda química, producen una señal eléctrica relacionada directamente con la concentración o presión parcial de la especie gaseosa.

Debido a que la salida es una fuerza electromotriz y que las mediciones se realizan con cero corriente, se considera a este sensor como potenciométrico.

Actualmente, la fabricación de este tipo de sensores se complementa con tecnologías de películas delgadas y micro maquinado, obteniendo de esta manera las micro placas calientes, que resultan ser estructuras vitales para el funcionamiento de tales dispositivos. Estas micro placas pueden ser de tipo membrana cerrada si el micro maquinado se realiza por la parte posterior del sustrato de silicio, eliminando el material casi en su totalidad a través del sustrato hasta formar una capa delgada que cubra el orificio practicado, o membrana suspendida si el micro maquinado se hace por el frente o el dorso del sustrato hasta obtener una capa delgada soportada por estructuras realizadas para tal fin. Las diferencias se muestran en la Figura I.1.

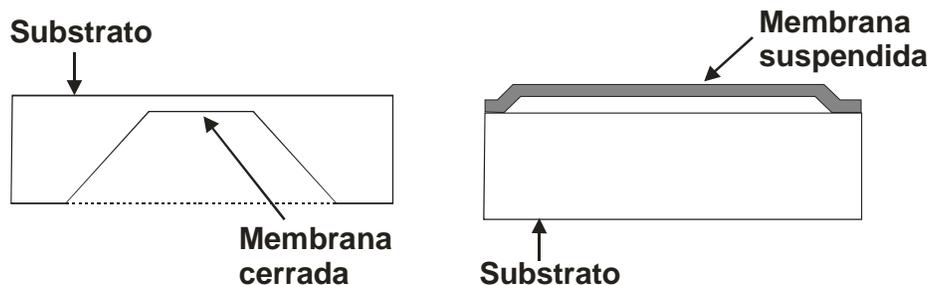


Fig. I.1. a) Membrana cerrada; b) Membrana suspendida.

Los avances en las técnicas de micro maquinado reportados hasta la fecha, han permitido integrar estas estructuras al procedimiento de fabricación de circuitos integrados y así conjuntar la electrónica necesaria para el acondicionamiento y tratamiento de señales con diversos tipos de estructuras sensoras.

I.3 Sistemas Micro Electro-Mecánicos.

Los Sistemas Micro Electro-Mecánicos (MEMS) son dispositivos diseñados para realizar una función específica mediante estructuras y mecanismos tridimensionales fabricados con un conjunto de procesos tecnológicos particulares englobados en el micro maquinado, así como con técnicas y herramientas ya probadas y usadas en la fabricación de circuitos integrados (microelectrónica).

Esos sistemas tienen en la actualidad un gran campo de aplicación, ya que sus funciones principales como sensores y actuadores a una escala micro y nanométrica han permitido la reducción del tamaño de instrumentos de medición. Así mismo, su desarrollo ha influido en diversas aplicaciones además de ser sensores y actuadores, tales como componentes ópticos para telecomunicaciones, dispositivos de RF, instrumentos analíticos, dispositivos biomédicos, sistemas ópticos de tratamiento de imágenes, micro fluídica, soporte mecánico, entre muchos otros usos [3].

Actualmente, se considera que un sistema de este tipo comprende la electrónica necesaria para el tratamiento y acondicionamiento de las señales obtenidas de los dispositivos transductores y enviadas a los actuadores tridimensionales micro fabricados, ya sea para aplicación en conversión analógica-digital, memorias, redes neuronales, etc.

Una de las formas de hacer la integración de los sensores junto a los circuitos de interface es por medio de micro módulos, con lo que generalmente los sensores/actuadores se encuentran fabricados en chips individuales mientras que la circuitería de interface se tiene en otro chip y posteriormente se incluyen en el mismo encapsulado, conectándolos ya sea mediante alambrado o alguna otra técnica de empaquetado. Esta técnica presenta la ventaja de que los diferentes chips pueden fabricarse independientemente con la tecnología individual más conveniente para cada uno de ellos. La principal desventaja es que el encapsulado de dichos sistemas puede ser complejo, caro y fuente de fallos debido a la posible baja repetibilidad del proceso de conexión entre elementos.

La alternativa es la realización de sistemas monolíticos, en la que en un solo sustrato se fabrican los circuitos de interface y los elementos sensores/actuadores, conjugándose en un solo proceso todos los pasos tecnológicos necesarios para obtener los dispositivos deseados. Las ventajas de este método son la disponibilidad comercial, disminución de fallas, reducción de área de sustrato necesaria, compatibilidad entre los elementos sensores y de tratamiento de señal, reproducibilidad y fácil encapsulado [4].

Sin embargo, los elementos de sensado o actuado están limitados a ser fabricados con técnicas y materiales compatibles con los circuitos electrónicos del sustrato, por lo tanto, el diseño geométrico de estos elementos electro-mecánicos también está limitado por dichas técnicas.

Los tipos de MEMS son tan variados como sus aplicaciones, las cuales incluyen sensores biológicos, químicos, ópticos, térmicos, de presión, posición y aceleración; por otro lado, también se tienen actuadores como capacitores variables, micro tenazas, micro válvulas, micro espejos, etc.

El desarrollo de tales sistemas ha llegado a producir sistemas inteligentes que incluyan procesamiento de señales y sistemas de control automático, logrando laboratorios en chip (System On Chip: SoC), contenidos monolíticamente en silicio.

Así mismo los MEMS incluyen estructuras tridimensionales complejas, móviles en muchos casos, que requieren ensamblado y que generalmente son fabricadas con técnicas no estándares en diversos materiales. Todo esto depende de la aplicación final del sistema. Ejemplos de estos desarrollos son micro engranes, micro motores, micro turbinas y micro componentes ópticos, entre muchos más, con aplicaciones que comprenden a la industria automotriz, de seguridad, aeroespacial, salud, manufactura, telecomunicaciones, etc.

Conjuntando las técnicas adecuadas de micro maquinado con la tecnología de detección de gas de estado sólido, en este trabajo se presenta un prototipo de sensor para gas el cual tiene diferencias importantes con los dispositivos actuales.

Tales diferencias eliminan algunas de las desventajas que presentan algunos de los tipos de sensores indicados anteriormente en la Tabla 1 y por su diseño, la fabricación se facilita enormemente.

El trabajo presentado en este documento ha permitido desarrollar diversas líneas de investigación debido a la gama de aplicaciones identificadas en los dispositivos MOS de compuerta flotante, al observar y simular su comportamiento bajo distintas condiciones de operación, fabricación y post-proceso. En otras palabras, la innovación que se pretende mostrar en esta tesis, tiene que ver con una aplicación que no se ha reportado con el transistor MOS de compuerta flotante, el cual aprovecha los productos de la reacción química que se lleva a cabo entre una película de óxido metálico y un gas oxidante o reductor. Esto puede ser aprovechado para modificar las características corriente-voltaje del transistor y de esa manera, correlacionar el parámetro físico (concentración de gas en este caso) con un voltaje o corriente eléctrica, a diferencia del método que tradicionalmente se emplea en los sensores comerciales, que es a través de la medición de la variación de la resistividad de la película sensora.

I.4 Conclusiones del Capítulo.

Por lo tanto, el desarrollo aquí presentado cubre aspectos de modelación, diseño, tecnológicos y caracterización, dirigidos a lograr un prototipo de sensor semiconductor para gas que aprovecha los conceptos de la microelectrónica y la tecnología MEMS, lo que en la literatura han llamado CMOS-MEMS. De esta manera, se pretende a su vez dejar establecidas las bases de una metodología de diseño y fabricación de MEMS en el Laboratorio de Sistemas VLSI de la Sección de Electrónica del Estado Sólido del Departamento de Ingeniería Eléctrica, a partir de la cual se pueda consolidar una línea de investigación con un futuro prometedor.

I.5 Referencias.

1. Hsu, T.-R., *MEMS & Microsystems*. New York, USA: McGraw-Hill. 2002.
2. S. Capone, et al., *Solid State Gas Sensors: State of the Art and Future Activities*. Journal of Optoelectronics and Advanced Materials. **5**(5): 2003, p. 1335-1348.
3. Brand, O., Ed. *Advanced Micro & Nanosystems. CMOS-MEMS*. Ed. O. Brand and G.K. Fedder. Vol. 2. WILEY-VCH: Weinheim, Germany. 2005.
4. P. Malcovati and F. Maloberti, *Interface Circuitry and Microsystems*, in *MEMS: A practical guide to design, analysis and applications*, O.P. J.G Korvink, Editor. Springer: Heidelberg, Germany. 2006.

II. Prototipo de Sensor para Gases con Tecnología MEMS Compatible con CMOS



II. PROTOTIPO DE SENSOR PARA GASES CON TECNOLOGÍA MEMS COMPATIBLE CON CMOS

II.1 Introducción.

Los micro sensores son dispositivos que detectan la existencia e intensidad de ciertas variables físicas o químicas como temperatura, presión, fuerza, radiación, luz, flujo magnético y composiciones químicas, entre otras, siendo suficientemente sensibles y exactos con muestras mínimas. Tales dispositivos generalmente están formados por un elemento sensible y una unidad transductora. Las relaciones funcionales entre estas componentes se muestran en la Fig II.1, donde se observa que alguna de las variables mencionadas anteriormente será la señal de entrada para el elemento sensible y la unidad transductora convertirá esta información a una señal de salida útil para su aplicación.

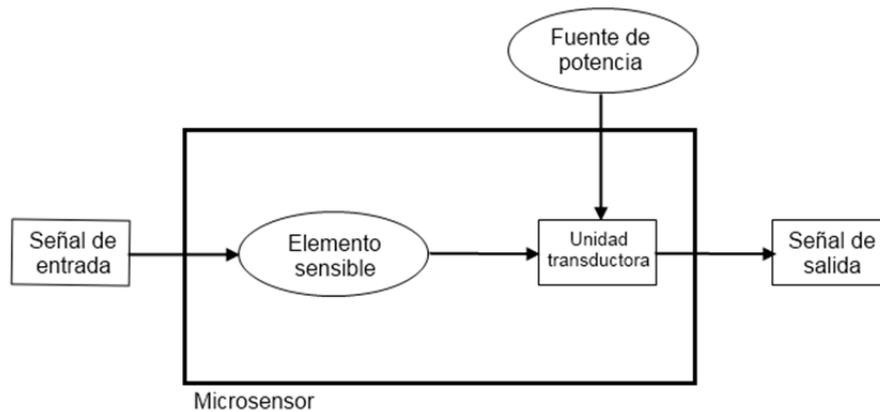


Fig. II.1 Relaciones funcionales entre elementos de un micro sensor.

En el caso de los sensores químicos, el elemento sensible está sujeto a diversos factores que afectan su comportamiento y deberán tomarse en cuenta para el diseño de este componente del sistema y así como para la selección de materiales para su fabricación; algunos de ellos son los siguientes:

Reversibilidad. Esta característica implica que la respuesta de un sensor corresponde sólo a una concentración del material analizado sin que dependa de exposiciones previas o cómo se alcance la concentración del material analizado

Sensibilidad y sensibilidad cruzada. La primera se define como la relación entre el cambio en la señal del sensor y el cambio en la concentración del material analizado. La sensibilidad cruzada se refiere a las contribuciones de otros materiales en la respuesta total del sensor.

Selectividad/especificidad. Es la capacidad de un sensor a responder ante todo a una sola especie a analizar en la presencia de otras especies.

Límite de detección y límite de determinación. El límite de detección (LOD) corresponde a una señal igual a k veces la desviación estándar del ruido presente con un valor típico de $k=3$. Los valores por encima del LOD indican la presencia del material a analizar mientras que por debajo indican que éste no es detectable. El límite de determinación implica información cualitativa, es decir, que la señal puede ser atribuida a un material específico.

De acuerdo con las características descritas anteriormente, un sensor químico usualmente consiste en una película sensitiva y un transductor. Durante la interacción con una especie, las propiedades fisicoquímicas de la película cambiarán reversiblemente. Estos cambios son detectados por el transductor y son traducidos a una señal eléctrica para su posterior acondicionamiento y uso [1].

Con el sensor para gases presentado, mediante la utilización de una película escogida entre los óxidos metálicos [2], se busca detectar la presencia de gases reductores u oxidantes midiendo la variación del voltaje de umbral de un transistor MOS con compuerta flotante, la cual estará conectada a la película mencionada con la particularidad de que esta película deberá calentarse por arriba de los 200°C para que se pueda llevar a cabo una reacción química entre ella y el gas a medir. Así mismo, se requiere de circuitería de acondicionamiento de las señales dentro del chip, obtenidas del sensor para gas, además de un sistema de control de temperatura para la micro placa caliente, sobre la que se encuentra la película de óxido metálico que detecta el gas; además, esta circuitería deberá operar a temperatura ambiente, lo cual introduce el problema de que el sistema debe ser diseñado de tal forma que, las temperaturas de operación de un elemento y otro sean compatibles en un mismo substrato con dimensiones micrométricas.

Este sensor es clasificado como MEMS debido al post-proceso de micro maquinado al que debe ser sometido para obtener la estructura suspendida donde se ubicará la película sensora permitiendo que un fluido pase a través del sistema para ser analizado.

La Fig. II.2 muestra los componentes principales y el comportamiento general del sensor para gases con tecnología MEMS compatible con CMOS.

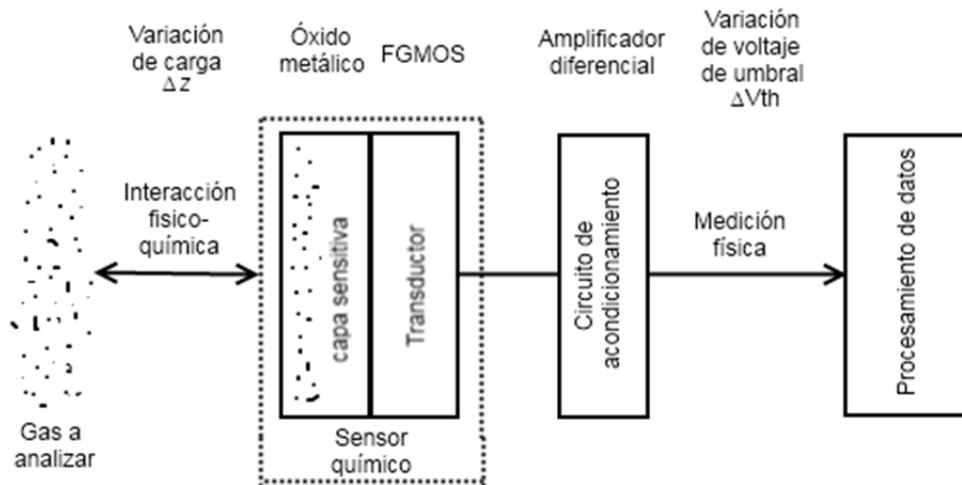


Fig. II.2 Sensor para gases basado en un transistor MOS con compuerta flotante.

Con el concepto propuesto se busca desarrollar un prototipo de Sensor para gas que cumpla con los siguientes objetivos:

- Monolítico.
- Bajo consumo de potencia.
- Poca área de silicio.
- Fabricado con tecnología CMOS comercialmente disponible.
- Compatible con post procesos de micro maquinado de MEMS.

Estos fines se derivan de la aplicación de este sensor y de las posibilidades tecnológicas disponibles que faciliten realizar un sensor para gases que pueda ser portátil, alimentado con baterías, que ocupe poco espacio y resulte novedoso tecnológicamente, además de económicamente viable.

Un Sistema Integrado cumpliría con estos propósitos, ya que en él se encuentran los elementos sensores y la circuitería necesaria para el tratamiento de las señales de entrada, además reduce efectos parásitos por interconexiones entre módulos y deberá ser reproducible; todo esto orientado en beneficio del desempeño del sistema. Sin embargo, esta forma de abordar los objetivos presenta limitaciones, como la necesidad de diseñar con pocos post procesos compatibles (decapado o depósito de materiales), características de fabricación (espesor de las capas, concentraciones de impureza y reglas de diseño), el tamaño de los dispositivos y su desempeño. La complejidad general del sistema presenta entonces desafíos que son puntos críticos en el desarrollo de este proyecto.

La selección de un proceso CMOS disponible comercialmente presenta diversas ventajas como:

- Integración monolítica de sensores y sus circuitos asociados
- Es económicamente accesible
- Es posible tener una compatibilidad con procesos de micro maquinado MEMS

Aunque existen limitantes como la selección de materiales y el método predefinido de fabricación de los componentes CMOS, la flexibilidad y versatilidad que presenta el proceso seleccionado son suficientes para cumplir con los objetivos descritos anteriormente.

Es posible entonces, tener dentro de un solo chip un sensor completamente integrado gracias a la miniaturización: amplificación, auto-prueba y calibración, reducción de interferencias, etc. [3].

Para lograr estos objetivos se han realizado todo un conjunto de simulaciones, experimentos y mediciones que validen el funcionamiento y aplicación del sensor presentado.

El sistema está compuesto por dos partes principales: la micro placa caliente y el circuito de lectura. La micro placa caliente es una estructura realizada por procesos de

fabricación de MEMS de volumen o sustrato, que permitirá aislar térmicamente la zona de sensado, en donde estará depositada la película de óxido metálico, otorgando además soporte mecánico a esta última [4].

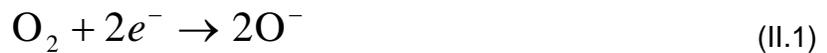
El aislamiento térmico entre la micro placa y el resto del sustrato es necesario, ya que la película sensora debe mantenerse a una alta temperatura, lo cual afecta a los demás dispositivos en el sustrato [5], lo cual se logra, como se demostrará más adelante, con el micro maquinado de la micro placa. Para mantener la temperatura de trabajo de la micro placa caliente, un circuito de control de la misma está incluido en el diseño.

La variación de concentración del gas es convertida por el circuito de lectura en una señal eléctrica adecuada para su acondicionamiento y uso en lazos de control de los diversos procesos.

II.2 Principio de funcionamiento.

Partiendo de un dispositivo de esta naturaleza, el sensor para gas propuesto tiene un enfoque novedoso sobre otros sensores de gases ya que un transistor MOS de compuerta flotante (FGMOS) puede ser utilizado como transductor aprovechando la carga derivada de la reacción química entre el gas a detectar, ya sea oxidante o reductor, y la película sensora de óxido metálico, por ejemplo. Este principio se ha usado en sensores de pH en soluciones líquidas, fabricados con tecnología especializada y comercial [6, 7].

Cuando una reacción redox toma lugar en la interfaz gas-película sensora, la reacción química libera electrones, como se muestra en las ecuaciones siguientes:



La ec. II.1 describe la adsorción de oxígeno del aire en la película sensora; este fenómeno se favorece con la temperatura, característica que se utilizará más adelante para el diseño del sensor. Las ecuaciones II.2 y II.3 muestran los mecanismos de reacción frente a un gas reductor y uno oxidante, respectivamente, observándose los electrones liberados. Esta carga genera un potencial electroquímico (E), cuya magnitud es dependiente de la concentración de gas, y este potencial se transfiere entonces a la compuerta flotante del transistor. Este potencial está dado por la ecuación de Nernst [8]:

$$E = E_0 - \frac{RT}{zF} \ln K \quad (II.4)$$

Donde E_0 es el potencial en condiciones estándar, R es la constante universal de los gases ideales (8.314 J/K mol), z es el número de cargas elementales, F es la constante de Faraday (96485 C/mol), K es una constante de equilibrio entre la actividad de los reactivos y los reactantes, y T es la temperatura (K). Por lo tanto, este potencial puede ser agregado o sustraído de la compuerta flotante. Este modelo ayuda a sustentar el principio que se muestra en este trabajo, ya que este potencial producido por las reacciones químicas mostradas anteriormente, se agregará a la compuerta flotante cuando la estructura del sensor para gas se configure adecuadamente. De esta manera, y en función de la concentración del gas medido, es posible correlacionar esta magnitud con la corriente de salida de un FGMOS, lo cual se comprueba y se reporta en el presente desarrollo.

Considerando que está presente un cambio de carga en la compuerta flotante, entonces el voltaje de umbral del FGMOS cambiará de acuerdo a la concentración de gas presente. Esta modalidad para introducir o extraer carga de la compuerta flotante del dispositivo es diferente a la normalmente empleada como lo es tunelamiento por Fowler-Nordheim o electrones calientes y se llamará de aquí en adelante como *inyección química* por la naturaleza de generación de la carga, a diferencia de las anteriores que son inyecciones electrónicas.

Esta alternativa de sensado requiere de experimentación para validarla, así como del desarrollo de dispositivos para su aplicación y es parte fundamental del desarrollo de este trabajo de tesis.

Como se mencionó anteriormente, el mecanismo pensado para realizar el sensado requiere del cambio de la carga en un transistor MOS de compuerta flotante que funcionará como transductor. Los experimentos y simulaciones desarrollados para esta validación se describirán en los capítulos respectivos.

El transistor MOS de compuerta flotante (FGMOS) es un dispositivo basado en el transistor MOS convencional, obtenido cuando se agrega una capa conductiva entre la compuerta (G) y el canal. Esta capa adicional, llamada compuerta flotante (FG) debe estar aislada del ambiente para cumplir con su función. Esta estructura permite que existan no sólo una compuerta externa, si no múltiples, llamadas ahora compuertas de control (CG), acopladas a la compuerta flotante por medio de una capacitancia correspondiente a cada CG [9].

La FG se acopla entonces al canal a través de la capacitancia formada por el óxido de compuerta, existiendo también las demás capacitancias pertenecientes a un MOS convencional. Los valores de todas estas capacitancias dependen de las áreas de las CG, FG y canal, principalmente. Un diagrama de la configuración de FGMOS de n compuertas de control se muestra en la Fig. II.3.

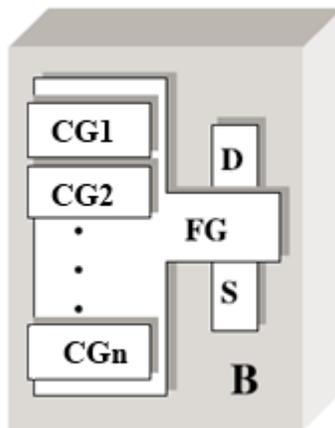


Fig. II.3 Estructura general de un FGMOS.

Los efectos más sobresalientes de una FG sobre el canal influyen directamente en el voltaje de umbral del dispositivo. Como en el transistor ordinario, un voltaje de polaridad y magnitud apropiados en la compuerta flotante causará la condición de inversión en el canal y el dispositivo permitirá la conducción. Una característica del FGMOS que vale la pena resaltar, es que la FG tiene la capacidad de sumar los voltajes presentes en las CG y reflejarlo en el canal, aunque debido a las capacitancias entre la CG, la FG y el canal existe una reducción del valor del voltaje aplicado en las CGs, la cual está determinada por el coeficiente de acoplamiento definido por estas capacitancias.

El voltaje en la FG es entonces el equivalente al voltaje de compuerta de un transistor convencional. Además del acoplamiento capacitivo y del efecto de suma de los voltajes de las CGs en la FG, la carga neta en la misma también influye en el voltaje de umbral, aumentando este parámetro cuando se transfieren electrones a la FG y disminuyendo cuando se extraen de la FG, permaneciendo la carga en la FG mientras no se aplique algún método externo que la modifique, es decir, se comporta como una memoria no volátil.

Esta característica permite usar al FGMOS en dos modos eléctricos principales: las aplicaciones digitales, tales como memorias no volátiles y las analógicas, como bloque de construcción de redes neuronales, amplificadores y otros.

Además de la contribución del voltaje aplicado a las compuertas de control sobre la compuerta flotante, en la práctica se puede llegar a tener también un voltaje presente debido a la presencia de carga aleatoria. La carga aleatoria inicial es resultado del proceso de fabricación de los dispositivos y puede ser removida casi en su totalidad por diversos métodos, como iluminación con UV y estructuras de descarga durante la fabricación [10].

La carga en la compuerta flotante para un FGMOS de n compuertas de control se puede definir como:

$$Q_{FG} = \sum_{i=1}^n (V_i - V_{FG}) C_i + (V_S - V_{FG}) C_S + (V_D - V_{FG}) C_D + (V_B - V_{FG}) C_B \quad (II.5)$$

Donde C_S , C_D y C_B son las capacitancias parásitas de fuente, drenador y sustrato con los correspondientes voltajes V_S , V_D , y V_B , con el voltaje en cada compuerta de control V_i con su correspondiente capacitancia C_i .

Por lo tanto, el voltaje en la compuerta flotante es:

$$V_{FG} = \frac{\sum_{i=1}^n V_i C_i + V_S C_S + V_D C_D + V_B C_B - Q_{FG}}{\sum_{i=1}^n C_i + C_S + C_D + C_B} \quad (II.6)$$

Estos dispositivos se realizan con procesos CMOS estándar comercialmente disponibles que contengan por lo menos dos capas de polisilicio. La primera capa formará la FG mientras que la segunda capa definirá la compuerta de control. Debido al aislamiento de la FG, la carga en ella permanecerá por mucho tiempo sin fugas, siempre y cuando no se establezcan los mecanismos de inyección como el tunelamiento Fowler-Nordheim o electrones calientes. La Fig. II.4 muestra la estructura junto con su símbolo esquemático.

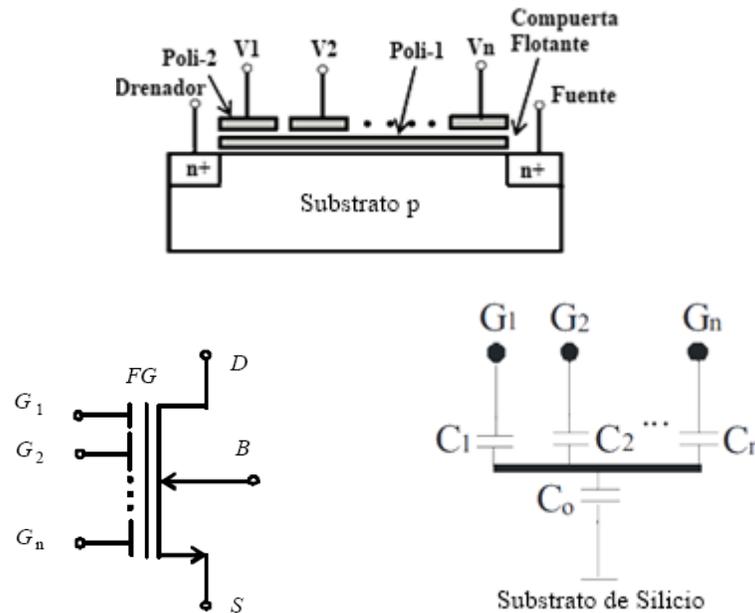


Fig. II.4 FGMOS, símbolo esquemático y equivalente capacitivo.

De acuerdo con la Ec. II.6, el voltaje en la compuerta flotante es función de la carga en esta estructura entre otros factores, por lo que un cambio en esta carga se reflejará en un cambio en la corriente de drenador para un voltaje de compuerta de control fijo, debido al cambio del voltaje de umbral provocado por esta carga.

Si este parámetro se modifica por medios externos al dispositivo, es posible utilizarlo como transductor para correlacionar un tipo de energía con otro. Por ejemplo, la corriente de drenador puede relacionarse con la magnitud del estímulo aplicado al sensor para su uso en sensores de variados tipos, al integrarse junto con el FGMOS elementos de acondicionamiento de señales, para tener el sistema completo.

La corriente de drenador del FGMOS en la región lineal está definida como:

$$I_D = \beta \left[(V_{GS} - V_T) V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2} \right] \quad (II.7)$$

Donde β es el parámetro de transconductancia y V_T es el voltaje de umbral del dispositivo MOS, por lo que se puede ver que la corriente del FGMOS se verá modificada cuando a su vez, el voltaje de umbral V_T sea modificado por algún medio. En el caso del sensor para gas, esta modificación se deberá a la llamada inyección química.

Cabe hacer notar que en el FGMOS se manejan dos conceptos de voltaje de umbral: a) voltaje de umbral efectivo; y b) voltaje de umbral intrínseco. El voltaje de umbral efectivo será aquel voltaje aplicado en la(s) compuerta(s) de control con el que se forme completamente el canal, es decir, cuando $V_{CG}=V_T$, y el voltaje de umbral intrínseco, V_{TFG} , será aquel voltaje presente específicamente en la compuerta flotante con el que se forme el canal. Como se había comentado anteriormente, la compuerta flotante es un nodo de suma de una fracción de los voltajes aplicados en las compuertas de control, y esto es debido al divisor de voltaje creado con elementos capacitivos y que deriva en el concepto de Coeficiente de Acoplamiento. El voltaje de umbral intrínseco en función del coeficiente de acoplamiento, se puede deducir a partir de la ecuación II.5, despejando para V_{FG} y considerando que $V_S=V_D=V_B=0$ y que $V_{CG}=V_T$. De esta manera, se tiene que:

$$V_{TFG} = \frac{C_{FG}}{C_T} V_T - \frac{Q_{FG}}{C_T} \quad (II.8)$$

Donde C_T es:

$$C_T = \sum_{i=1}^n C_i + C_S + C_D + C_B \quad (II.9)$$

De (II.8) se puede ver que el voltaje de umbral intrínseco es también una fracción del voltaje de umbral efectivo. Por lo tanto, al obtener el voltaje de umbral a partir de la gráfica de transconductancia, éste corresponderá al voltaje de umbral efectivo y bastará multiplicarlo por el coeficiente de acoplamiento para obtener el voltaje de umbral intrínseco. Además, de la ecuación II.5 se tiene que el voltaje aplicado en cada compuerta de control, reflejado en la compuerta flotante se ve influenciado por el Coeficiente de Acoplamiento:

$$V_{CGi} = k_i V_i \quad (II.10)$$

Donde k_i es el coeficiente de acoplamiento para cada compuerta de control:

$$k_i = \frac{C_i}{C_T} \quad (II.11)$$

Entonces, como se muestra en las ecuaciones anteriores [11, 12], la modificación de la carga en la FG cambiará la característica de corriente en el transistor y si se considera que existe una inyección química, el resultado será una modificación en los parámetros eléctricos del FGMOS, lo cual se puede aprovechar para emplearlo como un sensor.

Por el efecto de suma de los voltajes ponderados aplicados a las compuertas de control del FGMOS, es posible realizar un experimento con dispositivos discretos con el fin de obtener mediciones y observar el comportamiento de los dispositivos. No es posible usar directamente un transistor MOS de compuerta flotante, ya que la misma naturaleza de la compuerta flotante evita cualquier medición directamente en ese punto.

Revisando las ecuaciones anteriores, se observa que para reproducir un comportamiento similar con un transistor convencional, es suficiente con conectar capacitores a la compuerta. Cada uno de estos capacitores servirá como una compuerta de control, con un factor de acoplamiento determinado por el valor del capacitor, tal como se indica en las ecs. II.10 y II.11. La Fig. II.5 muestra el equivalente de un FGMOS usando componentes discretos no integrados.

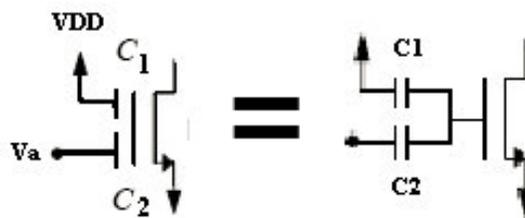


Fig. II.5 FGMOS y equivalente.

Se observa de la figura II.5 que los capacitores \$C_1\$ y \$C_2\$ forman dos compuertas de control, de tal forma que en la compuerta del dispositivo discreto se tenga una fracción de la suma de tales voltajes en el nodo que en la contraparte integrada sería la compuerta flotante.

Todas estas consideraciones servirán para diseñar y realizar experimentos con dispositivos no integrados con el fin de demostrar el mecanismo de funcionamiento del sensor para gas propuesto.

II.3 Descripción física del sensor para gas.

Como se mencionó anteriormente, las estructuras básicas de este dispositivo son la micro placa caliente con su respectivo control de temperatura y el circuito de lectura y acondicionamiento de señal. Cada una de ellas está constituida a su vez por partes más

elementales que requieren de una integración correcta para lograr que el sensor para gas propuesto se realice de la forma prevista y entregue los resultados esperados.

La micro placa caliente está constituida por una membrana suspendida fabricada principalmente con SiO_2 [13-16]. Contenidas dentro de dicha membrana se encuentran dos resistencias de polisilicio (Polisilicio 1) en la misma capa y a poca distancia una de otra; una de ellas será un micro calefactor para llevar la micro placa a una cierta temperatura, mientras que la otra resistencia trabajará como un sensor formando parte de un controlador de la temperatura de dicha micro placa. Esta estructura será explicada con mayor detalle en los capítulos III y IV.

Por encima de la primera capa de polisilicio y separada por una delgada capa de $0.07 \mu\text{m}$ de SiO_2 , se deposita otra capa de polisilicio (Polisilicio 2) la cual estará conectada a la compuerta flotante del FGMOS; sobre ella se depositará la película sensitiva al gas que se quiere detectar. La Fig. II.6(a) muestra un corte transversal de la micro placa con las capas descritas así como el espesor correspondiente a cada capa, según la tecnología empleada, mientras que la Fig. II.6(b) muestra el corte transversal de la estructura completa.

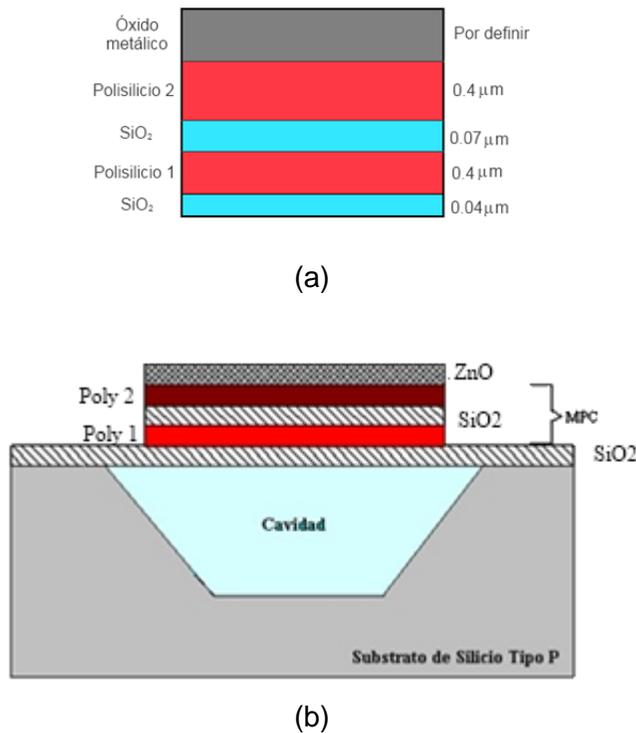


Fig. II.6(a). Capas de la micro placa caliente, (b). Sección transversal del sensor para gas.

El arreglo general del sensor para gas es el mostrado en la Fig. II.7(a) y Fig. II.7(b). La micro placa caliente, encima de la cavidad en el substrato, soporta a la película sensitiva y la mantiene a la temperatura de operación. La capa de polisilicio 2 está unida a la compuerta flotante de polisilicio 1 por medio de pistas metálicas interconectando las diferentes capas, como se puede apreciar en la Fig. II.7 (b). El transistor MOS de compuerta flotante forma parte del circuito de lectura y acondicionamiento de señal. Este circuito es un espejo de corriente con el FGMOS como carga en el que se comparan los voltajes de compuerta de un transistor convencional y el de compuerta flotante, los cuales tienen la misma relación de aspecto geométrico y de corriente de drenador y establecen una relación entre el voltaje de drenador del FGMOS con la carga almacenada en éste. En la salida se encuentra un amplificador de fuente común [17].

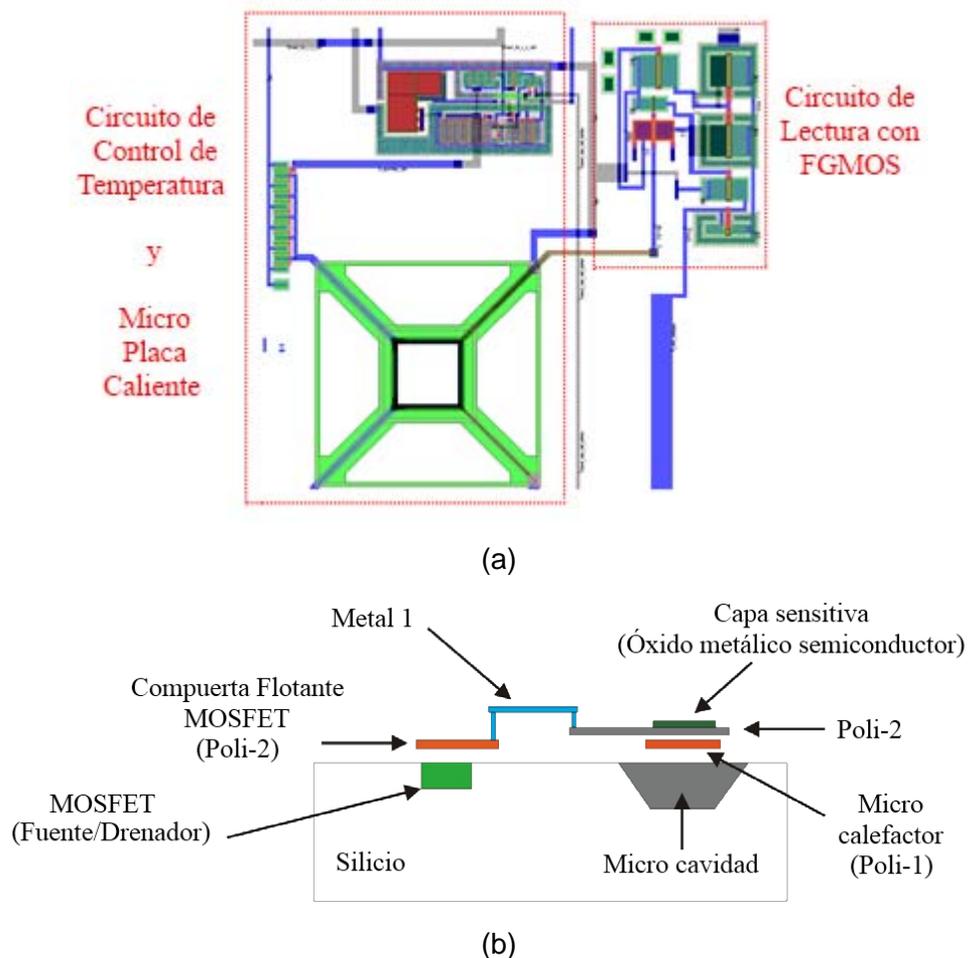


Fig. II.7(a) Arreglo general del sensor para gas. Vista superior;
 (b) Arreglo general del sensor para gas. Vista lateral.

II.4 Resultados esperados.

De la integración de este dispositivo se espera una respuesta comparable a la que entregan los sensores de gases resistométricos cuando son expuestos a diferentes concentraciones del gas a medir en la atmósfera. Una respuesta típica de este tipo de sensores se muestra en la Fig. II.8 [18].

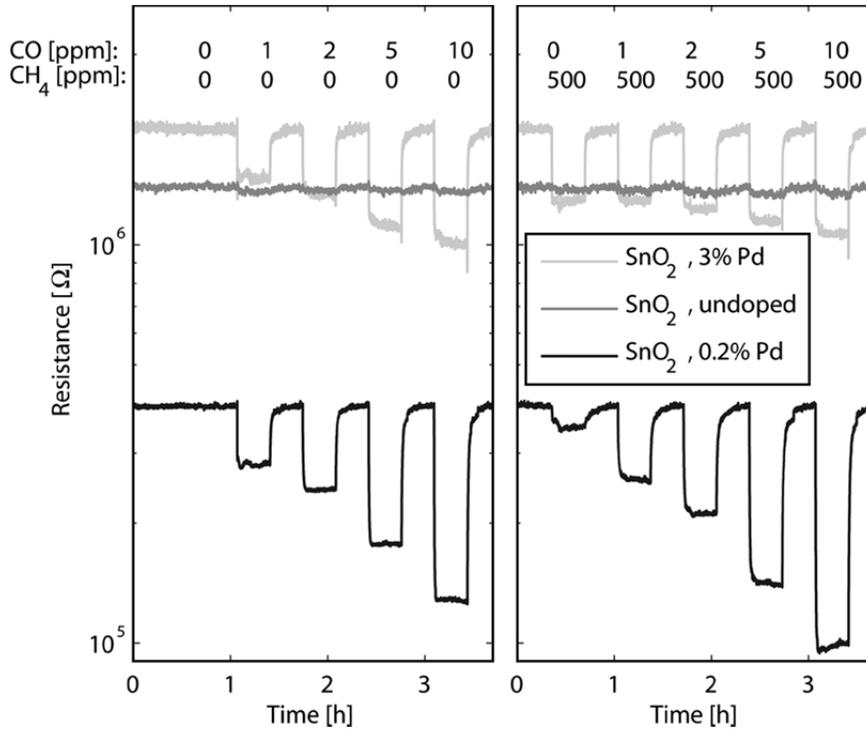


Fig. II.8 Respuesta de sensor resistométrico.

En los sensores resistométricos, el efecto de la interacción del gas a medir con la película sensora se traduce en un cambio en la resistencia de ésta última, proporcional a la concentración del gas en la atmósfera.

Para el sensor para gases FGMOS presentado, se observaría una respuesta parecida a la mostrada en la figura anterior, en la que sería la carga y no la resistencia, la que indique la presencia del gas a detectar. Esta carga deberá ser proporcional a la concentración del gas de interés para poder ser utilizado como medio de sensado.

De acuerdo con el mecanismo de funcionamiento que rige al sensor propuesto, la carga transferida a la compuerta flotante del FGMOS, a través del inyector químico

formado por la película sensitiva y la extensión de la compuerta flotante en la micro placa caliente, tendrá una relación directa con la concentración del gas presente en el ambiente.

Esta carga transferida modificará el voltaje de umbral (V_T) del FGMOS de acuerdo a la naturaleza de la misma, disminuyendo el V_T si la carga es positiva y viceversa si la carga es negativa, como se muestra en la Fig. II.9, característica que se ha observado en otros tipos de dispositivos [19].

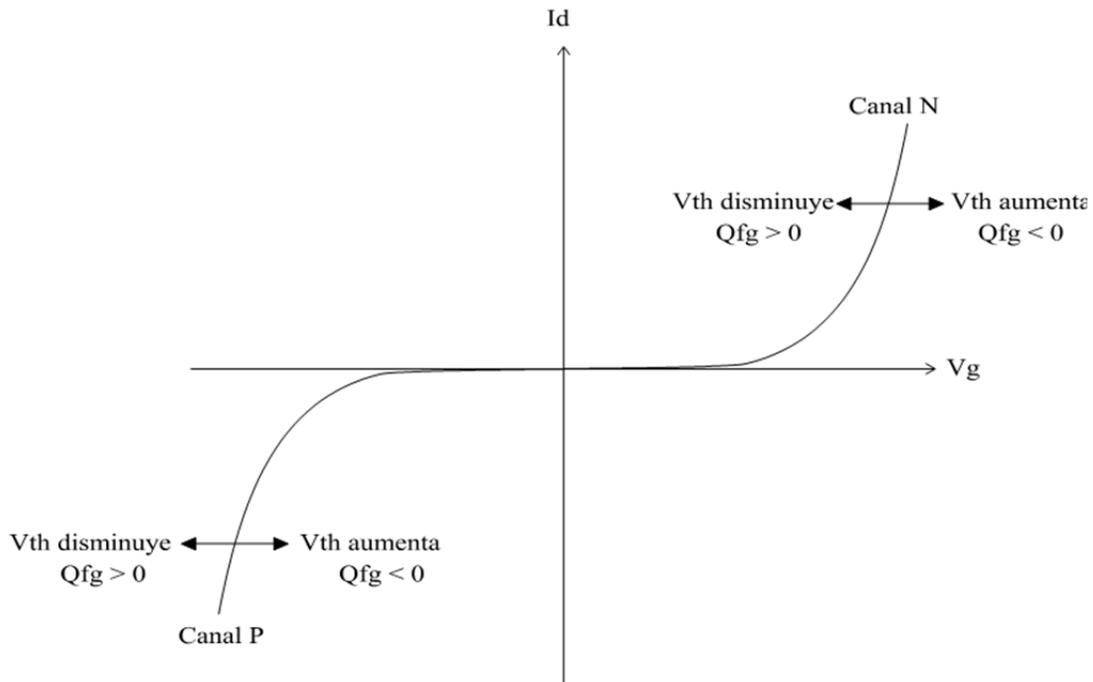


Fig. II.9 Modificación del voltaje de umbral del FGMOS ante una carga en la compuerta flotante visto con la curva de transconductancia del MOS.

Verificando que hay transferencia de carga debido a la reacción, el cambio de esta característica eléctrica del FGMOS puede ser usado para determinar la concentración de algún gas de interés en la atmósfera. Mediante un circuito de lectura y acondicionamiento de señal adecuado para este caso, será posible obtener una lectura con diversas aplicaciones y usos.

II.5 Conclusiones del Capítulo.

Es importante recalcar la diferencia de transducción propuesta con respecto a lo normalmente empleado con muchos de los sensores de gas comerciales. En estos últimos, la correlación de la concentración del gas se hace basado en la variación de la resistencia de la película sensible con la temperatura como parámetro y por otro lado, el sensor para gas propuesto y que emplea al transistor MOS de compuerta flotante, basa su correlación en la variación de corriente de un transistor MOS, la cual es una aplicación novedosa para este tipo de dispositivos microelectrónicos. En los capítulos siguientes se describirán a profundidad los elementos que conforman a este sensor y la integración entre ellos para lograr un prototipo funcional.

II.6 Referencias.

1. A. Hierlemann and H. Baltes, *Semiconductor-based Chemical Microsensors*, in *MEMS: a practical guide to design, analysis and applications.*, O.P. J. G. Korvink, Editor. Springer: Heidelberg, Germany. 2006.
2. Barsan, N., D. Koziej, and U. Weimar, *Metal oxide-based gas sensor research: How to?* Sensors and Actuators B: Chemical. **121**(1): 2007, p. 18-35.
3. P. Malcovati and F. Maloberti, *Interface Circuitry and Microsystems*, in *MEMS: A practical guide to design, analysis and applications*, O.P. J.G Korvink, Editor. Springer: Heidelberg, Germany. 2006.
4. Tabata, O. *pH-controlled TMAH Etchants For Silicon Micromachining.* in *Solid-State Sensors and Actuators, 1995 and Eurosensors IX.. Transducers '95. The 8th International Conference on.* 1995, p. 83-86.
5. Sedky, S., *Post-Processing Techniques for Integrated MEMS*: Artech House. 2006.
6. Y. L. Chin, et al., *A novel SnO₂/Al discrete gate ISFET pH sensor with CMOS standard process.* Sensors and Actuators B. **75**: 2001, p. 36-42.
7. Bausells, J., et al., *Ion-sensitive field-effect transistors fabricated in a commercial CMOS technology.* Sensors and Actuators B: Chemical. **57**(1-3): 1999, p. 56-62.
8. M. J. Madou and S.R. Morrison, *Chemical sensing with solid state devices.* Boston USA: Academic Press. 1989.
9. Topór-Kaminski, L. and P. Holaj, *Multiple-input floating-gate MOS transistor in analogue electronics circuits.* Bulletin of the Polish Academy of Sciences. **52**(3): 2004, p. 251-256.
10. Rodríguez-Villegas, E., M. Jiménez, and R.G. Carvajal, *On Dealing With the Charge Trapped in Floating- Gate MOS (FGMOS) Transistors* IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs. **54**(2): 2007, p. 156-160.
11. Sehgal, R. and S.S. Rajput, *A low voltage 8-bit digital-to-analog converter using floating gate MOSFETs.* Analog Integr. Circuits Signal Process. **56**(3): 2008, p. 199-203.
12. Rajput, S., S. Jamuar, and S. Sharma, *Floating-gate MOS Structures and Applications.* IETE Tech Rev. **25**(6): 2008, p. 338-345.
13. B. Guo, et al., *A monolithic integrated 4 X 4 tin oxide gas sensor array with on-chip multiplexing and differential readout circuits.* Solid-State Electronics. **51**: 2007, p. 8.

14. M. Y. Afridi, et al., *A Monolithic CMOS Microhotplate-Based Gas Sensor System*. IEEE Sensors Journal. **2**(6): 2002, p. 644-655.
15. S. Capone, et al., *Solid State Gas Sensors: State of the Art and Future Activities*. Journal of Optoelectronics and Advanced Materials. **5**(5): 2003, p. 1335-1348.
16. S. Semancik, et al., *Microhotplate platforms for chemical sensor research*. Sensors and Actuators B. **77**: 2001, p. 579-591.
17. Tavira, A., *Análisis térmico y diseño de los circuitos de control y de lectura de un sensor de gas MEM.*, Tesis de Maestría, Cinvestav, 2007
18. U. Frey, et al., *A Digital CMOS Architecture for a Micro-Hotplate Array*. IEEE Journal of Solid-State Circuits. **42**(2): 2007, p. 10.
19. Morrison, S.R., *Chemical Sensors*, in *Semiconductor Sensors* S.M. Sze, Editor. John Wiley & sons. 1994.

III. Simulaciones



III. SIMULACIONES.

III.1 Introducción.

Debido a la complejidad del sistema propuesto que conformará el sensor para gas MEMS-CMOS, es necesaria la simulación previa a la fabricación de los diferentes componentes. Se llevaron a cabo simulaciones eléctricas, electro-térmicas, térmicas, mecánicas, de maquinado y de control, buscando obtener un cuadro lo más completo posible del comportamiento del sistema y proceder por lo tanto a la fabricación con tecnología CMOS estándar.

Con estas bases previas, se puede proceder con más confianza al diseño final del prototipo del sensor para gas, correspondiente al diseño topológico necesario para el envío a fabricación con una tecnología estándar CMOS del chip, además de asegurar la compatibilidad de procesos MEMS-CMOS. Igualmente, estas simulaciones darán la pauta de las caracterizaciones que se le habrán de realizar al circuito integrado una vez fabricado, como las que se reportarán mas adelante.

III.2 Simulación electro-térmica.

El proceso de simulación del sistema comenzó con el análisis electro-térmico de la micro placa caliente. Como se describió anteriormente, esta estructura contiene al calefactor y al sensor de temperatura, fabricados en polisilicio. El polisilicio, material con el que están fabricados tanto el micro calefactor como el sensor, tiene un valor de resistividad dependiente de la temperatura a la que se encuentra, con un *Coefficiente Térmico de Resistencia* (TCR) particular del material.

El TCR se puede medir experimentalmente calentando de forma externa al calefactor y midiendo a su vez la resistencia de la estructura, para un rango de temperatura dado, mediante su característica corriente-voltaje, I-V, es decir, se mide la corriente que fluye a través de una resistencia hecha de polisilicio a la cual se le aplica una diferencia de potencial, mientras se encuentra a la temperatura de medición. En general, dicho coeficiente es lineal, por lo que entrega una relación fácilmente utilizable para los cálculos.

Debido a que existe una dependencia entre la resistencia del calefactor y la temperatura a la que se encuentra, también se puede tener un cambio de resistencia empleando el efecto Joule, con el cual se logra un calentamiento del polisilicio al hacer pasar una corriente eléctrica y como el efecto Joule resultante de calentar la micro placa por medios eléctricos, se genera un aumento en la resistencia y en consecuencia una disminución de la corriente. Es por este acoplamiento de variables electro-térmicas que la temperatura final de la micro placa para una polarización dada, no se obtiene directamente al aplicar una diferencia de potencial a las terminales de la resistencia.

Como ya se ha mencionado, la micro placa está formada por dos elementos principales que son el micro calefactor y el sensor de temperatura. El polisilicio del que están hechos tiene ciertas propiedades de las cuales se puede sacar ventaja para su uso dentro del sistema de control electrónico de temperatura. Para comenzar, la relación entre el cambio de resistencia del polisilicio con respecto a la temperatura se puede expresar de la siguiente manera [1, 2]:

$$\frac{R - R_0}{R_0} = TCR(T - T_0) \quad (III.1)$$

$$R(T) = R_0(1 + TCR\Delta T) \quad (III.2)$$

Donde T_0 es la temperatura ambiente y R_0 la resistencia base a temperatura ambiente. La constante TCR , así como la resistencia R_0 se pueden determinar experimentalmente a partir de estructuras de prueba integradas en el chip del prototipo.

Una vez que se conoce la relación entre temperatura y resistencia, se puede emplear al polisilicio como un elemento sensor de temperatura. En cuanto al micro calefactor, al aplicarle un voltaje entre sus terminales, se logra un calentamiento gracias al efecto Joule, lo que aumenta su temperatura y en consecuencia su respectiva resistencia, como se muestra en la Fig. III.1.

En esta figura se han graficado las resistencias calefactora y sensora respecto a la temperatura alcanzada por las mismas mediante un calentamiento proporcionado por un medio externo y realizando una medición I-V de cada resistencia, cuidando de no inducir

un error debido al efecto Joule utilizando una polarización excesiva al tomar las mediciones de resistencia del micro calefactor y sensor de temperatura.

Para el polisilicio, el TCR es positivo, ya que la resistencia aumenta proporcionalmente con el aumento de temperatura. En la caracterización realizada a las estructuras de prueba se ha obtenido un valor de TCR de $8.84 \times 10^{-4} / ^\circ\text{C}$.

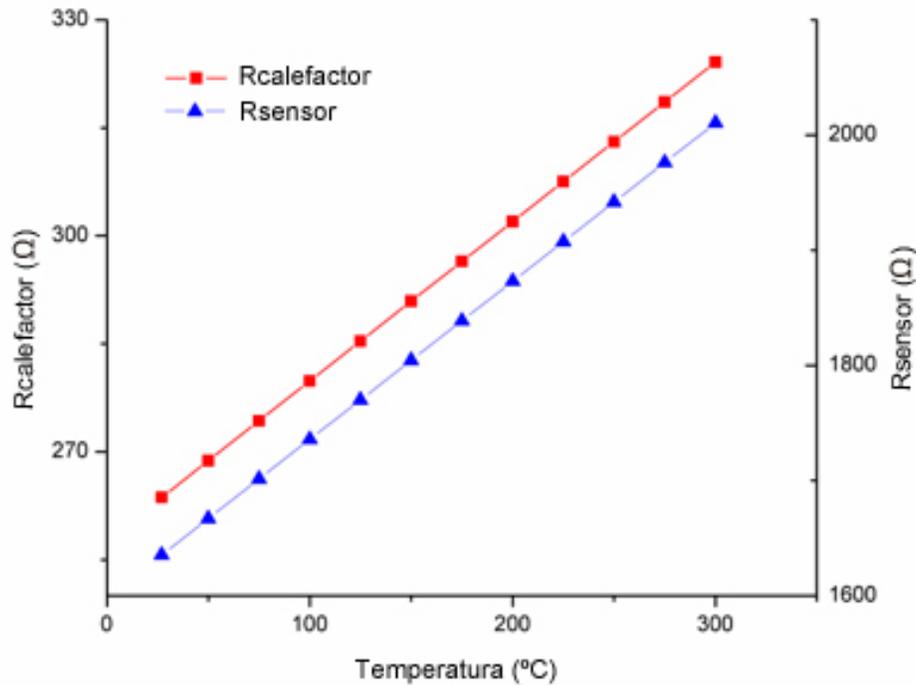


Fig. III.1. Dependencia de la resistencia con la temperatura para la resistencia calefactora y la resistencia sensora.

Relacionando la ecuación del TCR con la polarización aplicada al calefactor, es posible obtener la potencia demandada por este dispositivo. Del calentamiento Joule, que es una función de la potencia demandada por la micro placa caliente, se obtiene que:

$$P = \frac{V^2}{R(T)} \quad (\text{III.3})$$

Donde P es la potencia, V es la polarización aplicada y R(T) es la resistencia dependiente de la temperatura, determinada por la Ec. III.2. Con esta ecuación III.3 es posible graficar la potencia demandada por el dispositivo para alcanzar una temperatura dada.

La Fig. III.2 muestra esta gráfica, en la que se observa el comportamiento lineal de la potencia demandada debido al cambio de la resistencia respecto a la temperatura que alcanza el micro calefactor al ser polarizado adecuadamente. En este caso, se tiene una demanda de $1.243 \mu\text{W}/^\circ\text{C}$, la cual resulta en una alta eficiencia, al menos teóricamente.

Por el comportamiento del material del micro calefactor, una polarización dada resultará en una temperatura estable después de un cierto tiempo en el que logra un equilibrio. Este hecho hace posible ajustar la potencia a un valor dado para que el micro calefactor alcance la temperatura de operación deseada. Por ejemplo, de la Fig. III.2 se puede ver que para operar la micro placa a 200°C , se requerirá aplicar alrededor de 1.6mW , lo cual es muy poco y se cumpliría con uno de los objetivos de diseño, que es lograr una baja disipación de potencia.

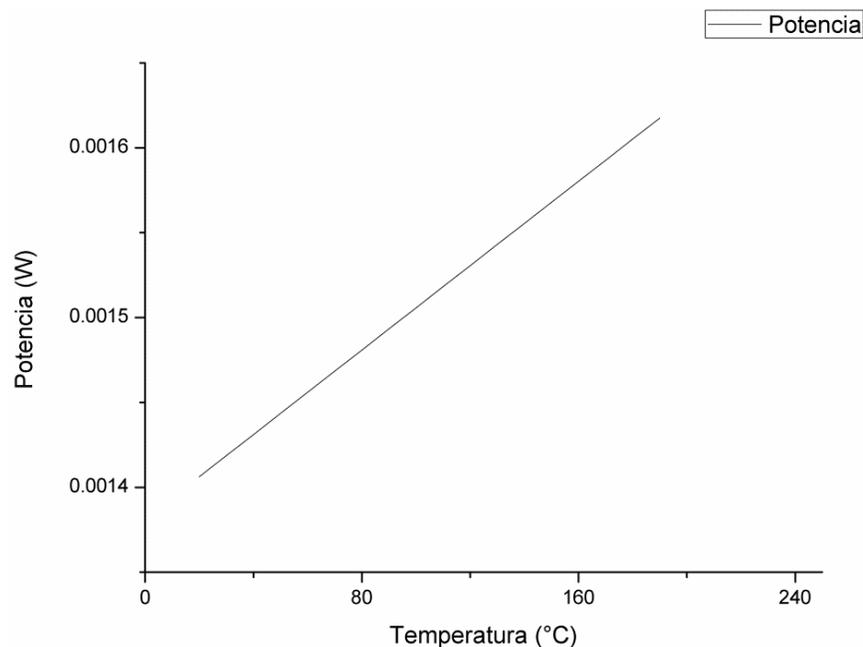


Fig. III.2. Potencia demandada por el micro calefactor.

Debido a la proximidad del sensor con el calefactor, tal como se muestra en la Fig. III.3, la temperatura del sensor cambiará junto con la del calefactor, lo que implica que se debe considerar el acoplamiento térmico entre ambos elementos, en función de los materiales que configuran a la estructura, es decir, las propiedades térmicas del polisilicio, el óxido de silicio y los contactos metálicos de interconexión, dado que son los elementos empleados en la fabricación de circuitos integrados CMOS, con los que se fabricó el

prototipo y con el propósito de lograr la compatibilidad con la tecnología de micro maquinado.

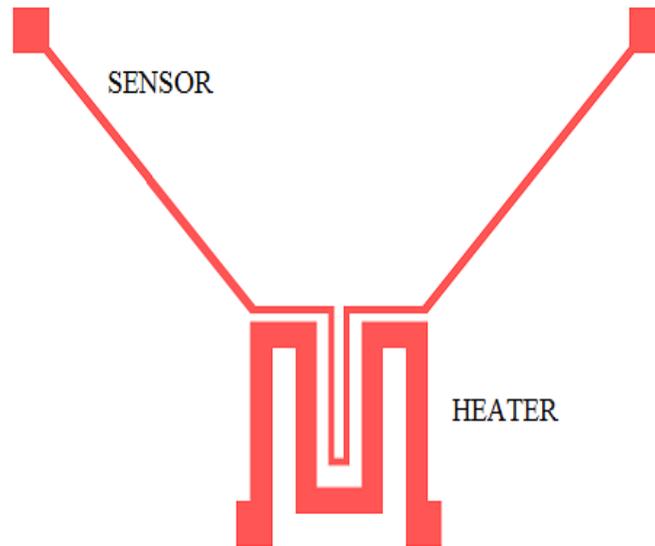


Fig. III.3. Geometría del calefactor y el sensor hechos con silicio policristalino.

La inercia térmica de todos estos materiales en conjunto, así como la geometría y resistencia de la estructura calefactora es lo que establece el tiempo de respuesta térmica del micro calefactor y del sensor, durante el calentamiento como durante el enfriamiento, que es precisamente lo que se quiere analizar en este sistema, cuando es operado con el circuito controlador de temperatura propuesto. Las características de la micro placa caliente se resumen en la Tabla III.1.

Elemento	Dimensión (μm)
Lado de la membrana	200
Lado de área activa	100
Ancho del calefactor	10
Ancho del sensor de temperatura	3
Espesor de óxido de silicio de soporte	0.6
Espesor de polisilicios	0.4
Espesor de pasivación	0.6

Tabla III.1 Geometría del calefactor y el sensor hechos con silicio policristalino.

Empleando el software L-Edit de Tanner, y considerando los valores tecnológicos de la tecnología CMOS con la que se fabricarán los prototipos (Ver Apéndice B) se realizó el diseño topológico mostrado en la Fig. III.3. Los criterios sobre los que se basó el diseño mostrado fueron: mínima resistencia, poca área, respetar las reglas de diseño de la tecnología (AMI 1.5 micras, pozo N, doble polisilicio y doble metal, para este caso) y cercanía entre el sensor y el micro calefactor. Los valores teóricos a temperatura ambiente de las resistencias sensoras y calefactoras son $1.6 \text{ k}\Omega$ y $263 \text{ }\Omega$ respectivamente.

Partiendo de las consideraciones anteriores y del diseño geométrico propuesto, a continuación se puede establecer la estructura completa, agregando los materiales que conforman la micro placa, para realizar finalmente las simulaciones electro-térmicas.

Utilizando software de análisis por el método de elemento finito (COMSOL®) se determina el comportamiento de la estructura con el medio que lo rodea, ya que se incluyen las características físicas de cada material que compone al dispositivo. Se realizaron simulaciones de las estructuras en 2D y 3D, obteniéndose una serie de datos necesarios para simulaciones posteriores.

III.2.1 Simulaciones en 2D.

Este análisis permite optimizar los elementos que forman la micro placa caliente para generar una estructura que cubra requerimientos no sólo de desempeño, sino de confiabilidad.

Estas simulaciones tienen como objetivo entregar un comportamiento estático y dinámico de la micro placa caliente cuando está polarizada con diferentes valores de voltaje. La Fig. III.4 muestra una vista superior de una simulación realizada a esta estructura para determinar la temperatura que alcanza la micro placa caliente a diferentes polarizaciones en distintos lugares de la estructura, como se indica.

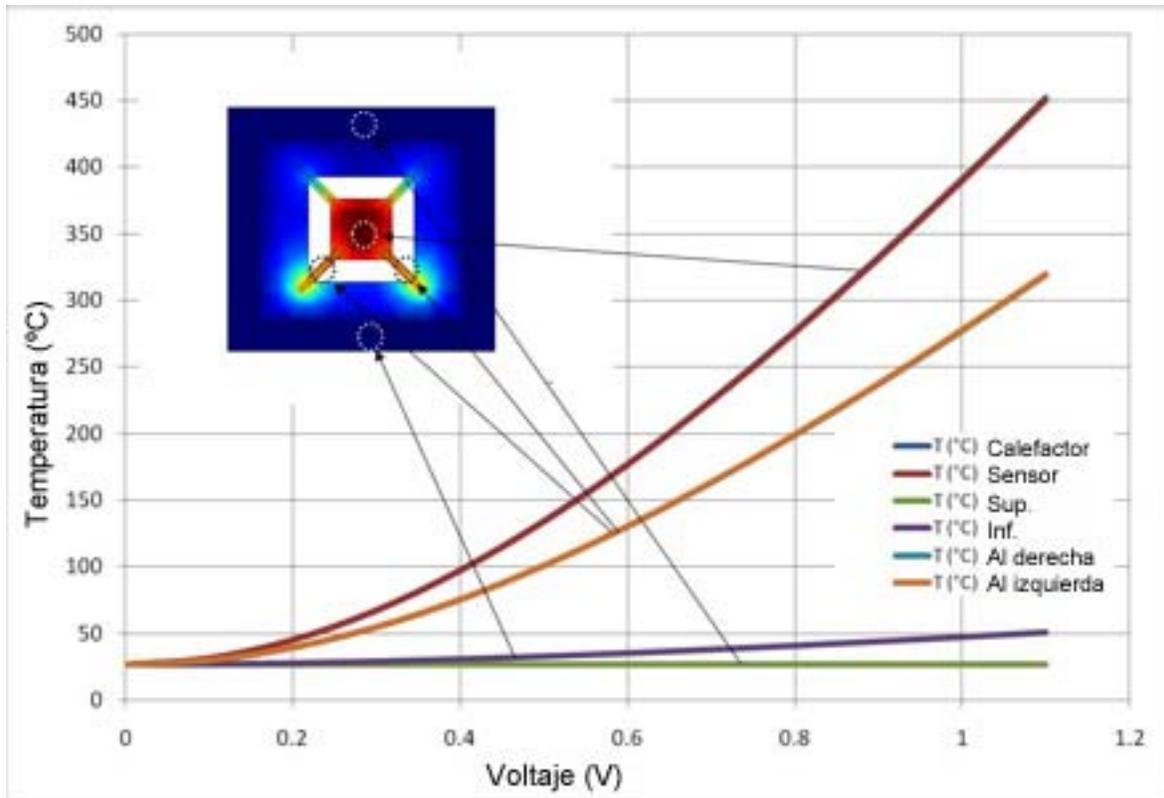


Fig. III.4. Vista 2D de la micro placa caliente. Análisis electro-térmico.

El objetivo principal de este análisis es la definición del alcance térmico del micro calefactor una vez realizado el micro maquinado.

De esta manera es posible determinar, además de la eficiencia de aislamiento térmico, lo apropiado de las geometrías propuestas, el rango de temperaturas alcanzadas y sus correspondientes voltajes, así como la optimización de la potencia consumida.

Dentro de los diferentes análisis realizados, se generó una geometría 2D del corte transversal de la micro placa para determinar por medio de simulación, el efecto del calentamiento sobre el fondo del micro foso, como se muestra en la Fig. III.5. Estas simulaciones permiten relacionar la temperatura del sustrato con la profundidad del foso.

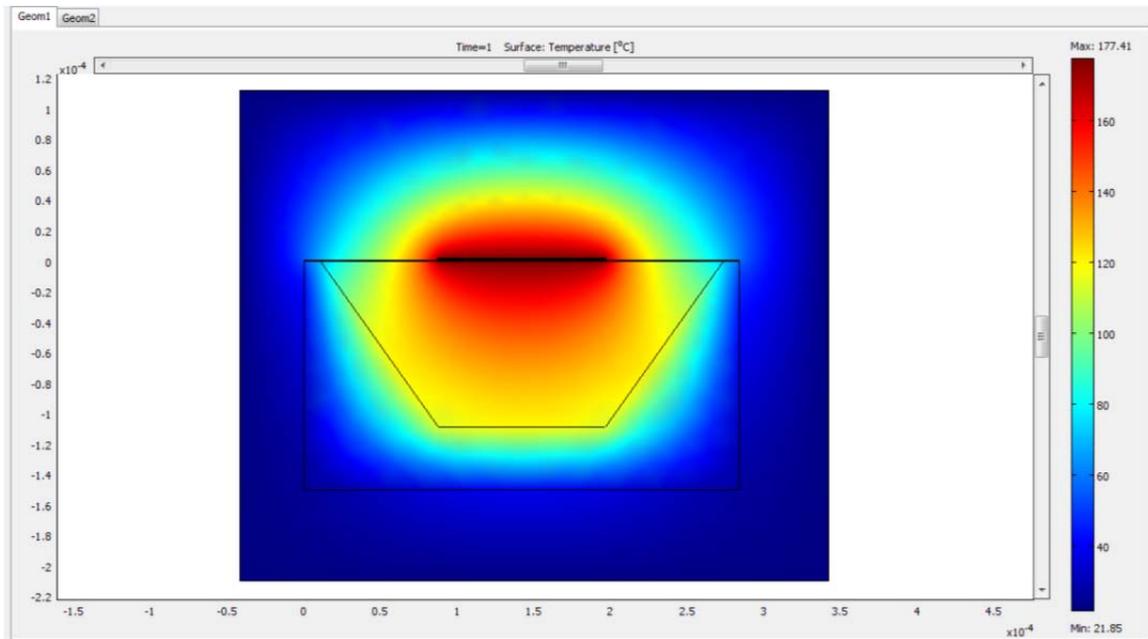


Fig. III.5. Sección transversal para el análisis térmico.

Las condiciones de simulación en 2D de la micro placa caliente empleando COMSOL, son las resumidas en la tabla siguiente:

SUBDOMINIO	MATERIAL	CONDICIONES DE FRONTERA
Micro calefactor	Polisilicio	Temperatura, 250 °C
Sensor	Polisilicio	Continuidad térmica
Soporte	SiO ₂	Continuidad térmica
Pistas	Aluminio	Continuidad térmica

Tabla III.2 Condiciones de análisis para COMSOL.

III.2.2 Simulaciones en 3D.

Tomando como base los diseños previos de micro placas calientes, se dibujaron nuevas geometrías propuestas para la micro placa, con variaciones en la forma del micro calefactor y del sensor, con el fin de cambiar los valores de resistencia de los mismos y lograr un mejor desempeño para el circuito de control. Se realizó también el análisis de densidad de corriente para las variaciones en la forma del calefactor, particularmente en las esquinas de la estructura.

Cuando estas esquinas forman un ángulo recto, la densidad de corriente en la esquina interior de la pista es mayor que en otras partes del conductor. Este efecto causará daños en un plazo largo de tiempo, pudiendo afectar la vida útil del dispositivo debido a la electromigración. En el caso del calefactor, se simuló este efecto para la geometría ilustrada en la figura III.3.

La figura III.6 muestra la densidad de corriente en el calefactor cuando está polarizado a 3 V. Se observan en las esquinas interiores que esta densidad es mucho mayor que en todo el demás conductor.

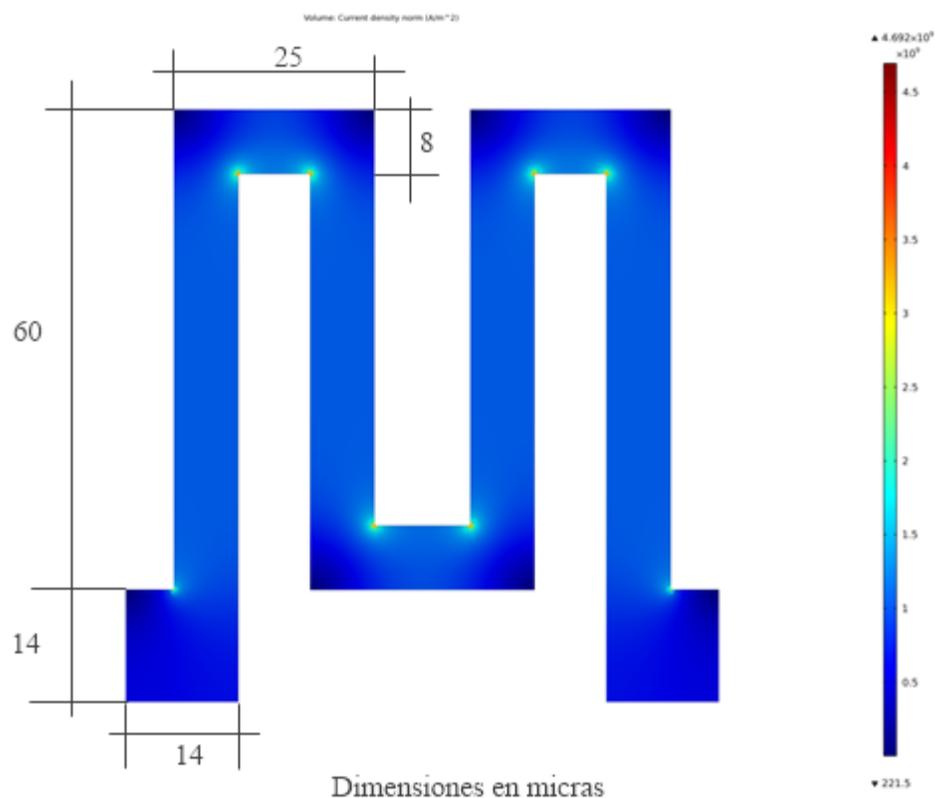


Fig. III.6. Densidad de corriente en el micro calefactor.

En el detalle de la figura III.7 la esquina interna alcanza el mayor valor de densidad de corriente ($4.692 \times 10^9 \text{ A/m}^2$); en estos puntos es donde se produce la electromigración.

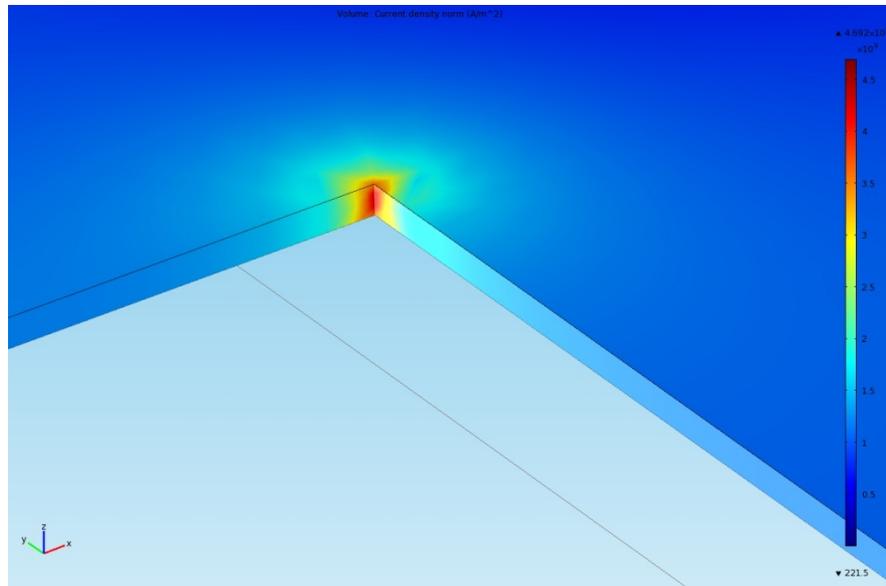


Fig. III.7. Detalle de la esquina interna del micro calefactor.

Se realizaron también simulaciones para geometrías de calefactores con las esquinas redondeadas, en las que disminuye la densidad de corriente en esos puntos respecto a la geometría original. Esto se muestra en la figura III.8, en la que la geometría tiene las esquinas ligeramente redondeadas. Las dimensiones son las mismas que en la Fig. III.6.

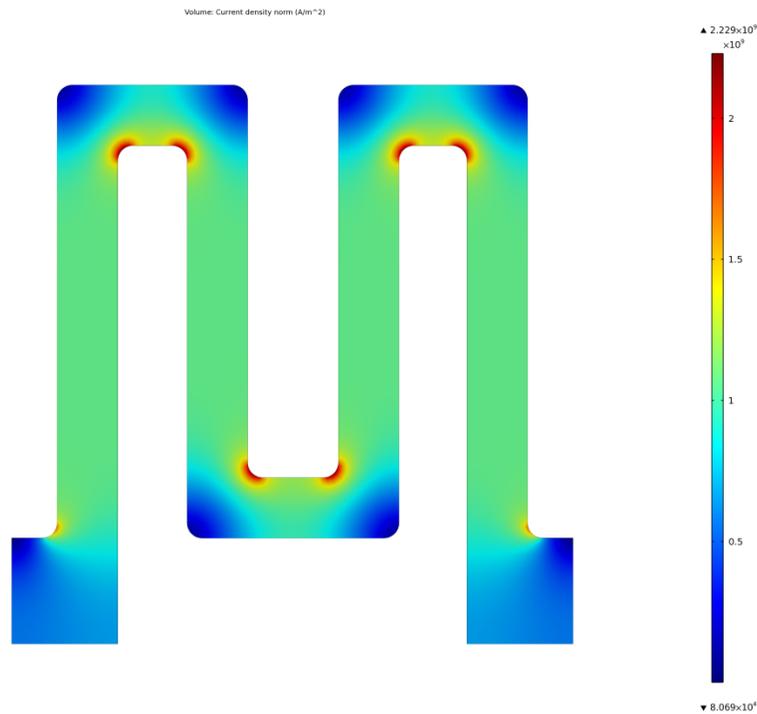


Fig. III.8. Geometría modificada del micro calefactor.

Igualmente, en el detalle de la figura III.9 se observa que el valor máximo de la densidad de corriente ha disminuido a $2.229 \times 10^9 \text{ A/m}^2$ aunque se localiza en áreas más grandes de la estructura.

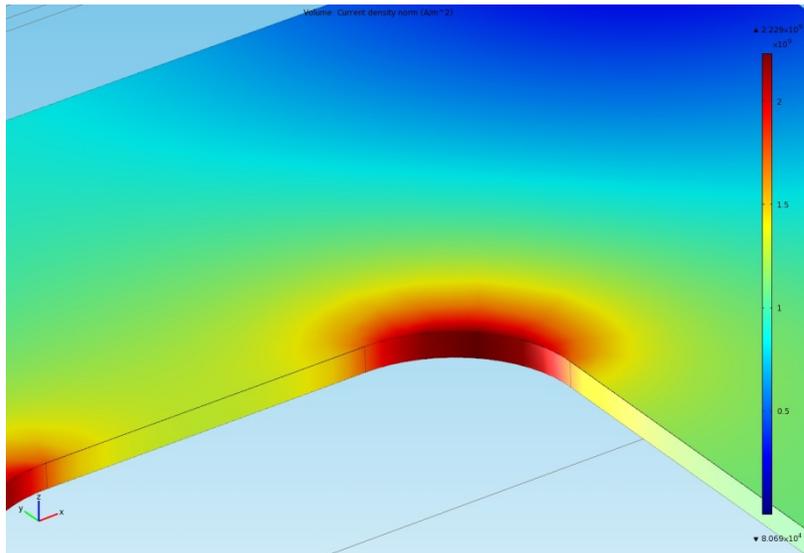


Fig. III.9. Detalle de la geometría modificada.

Finalmente, las esquinas del calefactor se redondearon completamente y se disminuyó aún más el valor máximo de la densidad de corriente, como se muestra en la figura III.10.

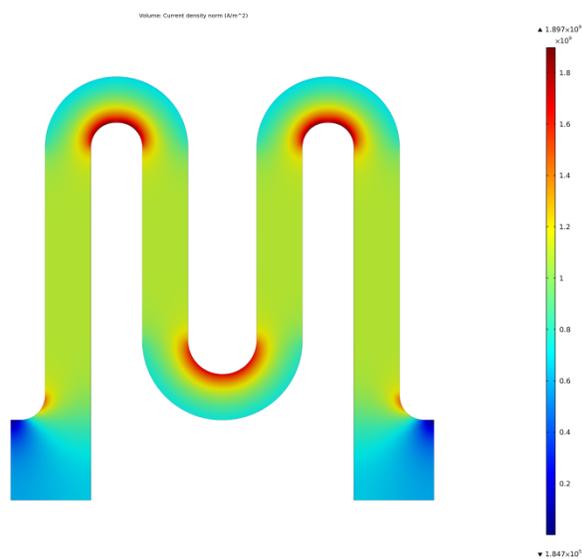


Fig. III.10. Geometría de micro calefactor redondeado.

En el detalle de esta geometría, mostrado en la figura III.11, el valor máximo es de $1.897 \times 10^9 \text{ A/m}^2$ en la curva interna de la estructura.

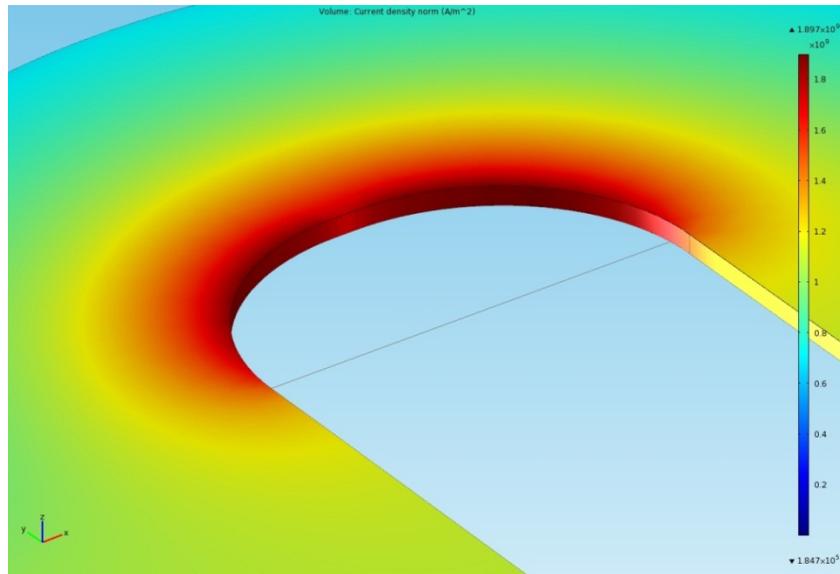


Fig.III.11. Detalle del micro calefactor redondeado.

En las tres simulaciones, el valor de la densidad de corriente en la estructura, exceptuando los puntos de interés detallados anteriormente, se mantiene alrededor de $1 \times 10^9 \text{ A/m}^2$, indicando que los cambios en la geometría afecta sólo a las esquinas internas.

Generando un modelo en software de diseño 3D, se exportó la geometría de la micro placa caliente a COMSOL, en donde se definieron los materiales y los subdominios de forma adecuada, tal como se hiciera en los modelos 2D.

En ejemplos similares se realizó la simulación térmica también en 3D donde se muestra la distribución de temperatura en toda la estructura. Es necesario detallar la geometría para llevarla lo más cercano posible al modelo real y lograr resultados más certeros.

La figura III.12 muestra uno de los modelos desarrollados para su análisis en la etapa de definición de la geometría en 3D, usando herramientas de diseño asistido por computadora. Con este modelo geométrico se obtendrán los resultados del análisis electro-térmico, después de haber definido los materiales de los que se conforma cada

elemento del modelo y las condiciones físicas en las que se encuentran. Este estudio consiste en polarizar el micro calefactor y obtener valores de temperatura y corriente en diferentes puntos de la estructura.

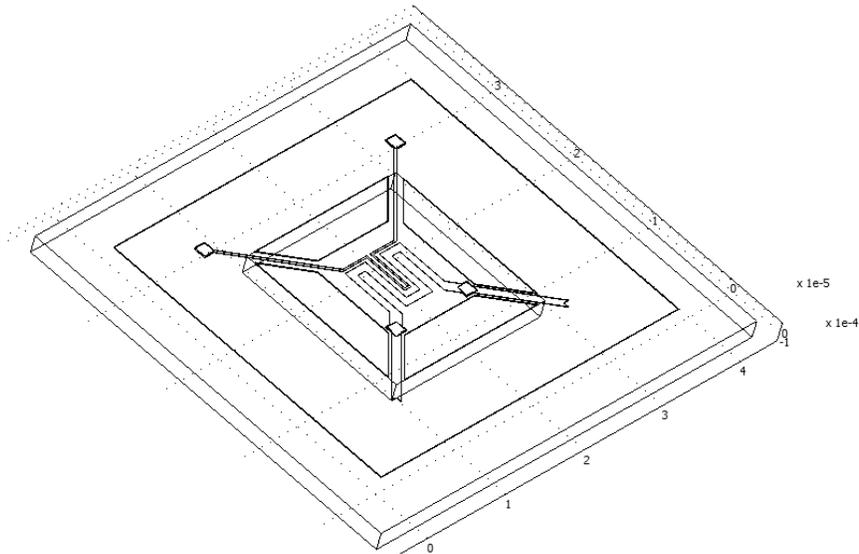


Fig. III.12. Modelo tridimensional de la micro placa caliente.

La simulación dinámica resulta en una serie de datos indicando el comportamiento transitorio de la estructura al estímulo eléctrico. La figura III.13 muestra la estructura tridimensional completa, incluyendo el substrato con el micro foso formado.

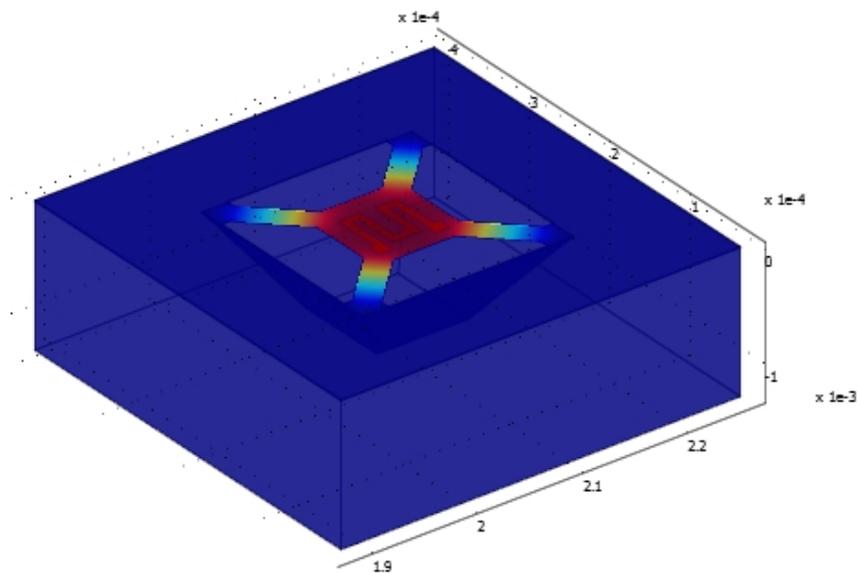


Fig. III.13. Modelo tridimensional en COMSOL de la micro placa.

En la figura anterior se observa que el área estudiada es una zona del sustrato de silicio en la que se encuentra la micro placa caliente sobre la cavidad fabricada con post proceso MEMS.

Esta micro placa se encuentra polarizada, por lo que la zona central de la misma se encuentra a mayor temperatura que el sustrato que la rodea, el cual se mantiene a temperatura ambiente. La cavidad aísla adecuadamente al sustrato de la temperatura alcanzada por la micro placa [3], además de aumentar la eficiencia térmica del dispositivo debido a su pequeña masa térmica. En conclusión, se puede observar que se puede integrar la electrónica de control y acondicionamiento de señal alrededor de la micro placa, sin la preocupación de que la temperatura de operación de esta última se propague hacia los circuitos. Por lo tanto, es posible una integración monolítica del sensor con esta tecnología CMOS. Sin embargo, aún falta demostrar que el micro maquinado puede ser compatible, lo cual se demostrará en capítulos subsecuentes.

Desde el punto de vista del análisis transitorio, las figuras III.14 y III.15 muestran los resultados de simulaciones de calentamiento y enfriamiento a diferentes polarizaciones.

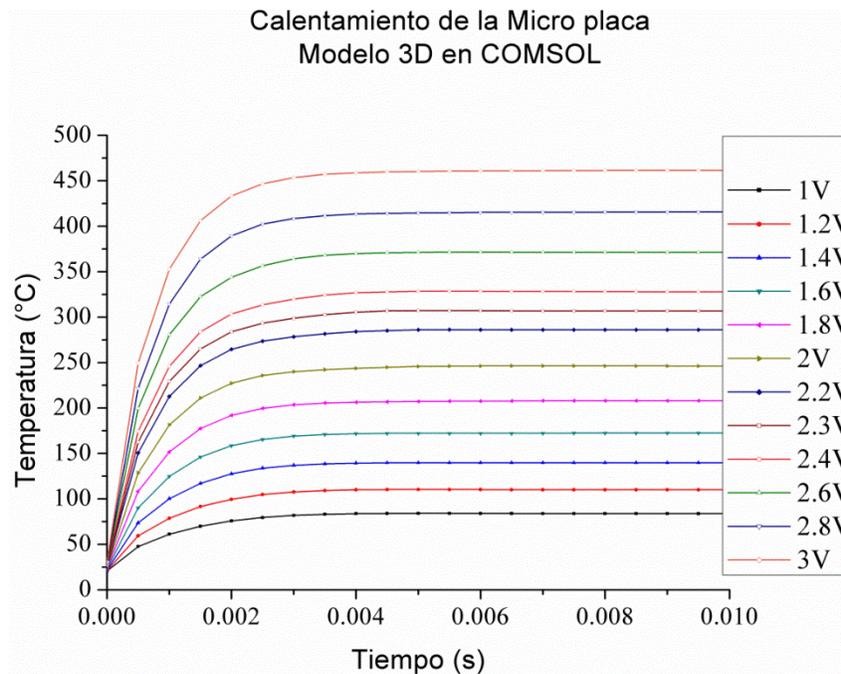


Fig. III.14. Calentamiento de la micro placa en función del tiempo.

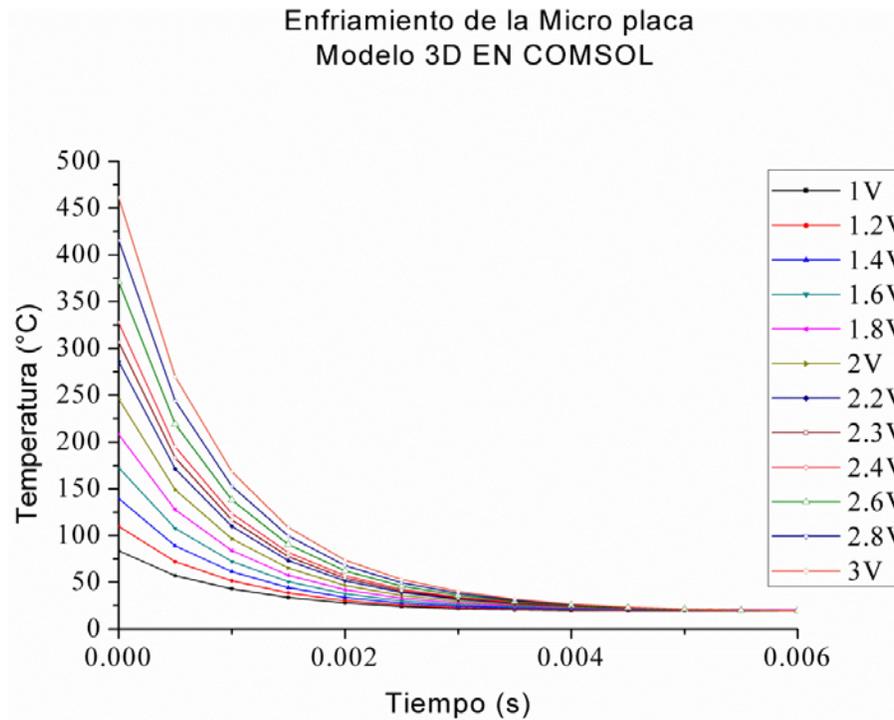


Fig. III.15. Enfriamiento de la micro placa en función del tiempo.

De la información contenida en las figuras anteriores, es posible obtener modelos matemáticos para el posterior análisis y simplificación de las simulaciones del sistema de control de temperatura, principalmente [4], lo cual se explica en la siguiente sección.

III.3 Diseño y simulación del sistema de control de temperatura.

La temperatura de la micro placa debe ser controlable, para operarla a la temperatura en que mejor se desempeñe la película sensible al gas a medir. Esta es la función del circuito de control de temperatura. Por lo tanto, es importante su diseño y optimización para que el funcionamiento sea el adecuado, lo cual se logra con una simulación en diferentes condiciones de operación, principalmente en el régimen dinámico.

En la práctica, tanto el micro calefactor como el sensor tienen un tiempo de respuesta de calentamiento y de enfriamiento propio del material y de su geometría, que a su vez dependen de diversos factores, como el estímulo eléctrico y térmico dado, así como del medio que los rodea.

Una característica del polisilicio es que es un material que aumenta su resistencia con un aumento de temperatura, lo cual en la práctica puede ser usado a favor de la operación del sistema, sin embargo desde el punto de vista de simulación, esta propiedad presenta un obstáculo difícil de resolver con métodos tradicionales.

Para este caso, cuando la resistencia está simultáneamente en función del tiempo y la temperatura, la descripción exacta del circuito se hace difícil, empleando solo simuladores como el PSPICE, ya que no es posible considerar al mismo tiempo una simulación del efecto Joule del micro calefactor y su acoplamiento térmico con el sensor.

Una alternativa para poder resolver esta inconveniencia, es que se pueden obtener resultados básicos del desempeño del sistema mediante simulaciones sucesivas, que consideren cada una valores individuales de resistencia obtenidas con un simulador de sólidos basado en análisis por elementos finitos y posteriormente conjuntar los resultados de cada simulación, para finalmente obtener el comportamiento dinámico del sistema.

Sin embargo, esta opción no es la óptima, pues equivale a tener que hacer una simulación punto a punto, con el consecuente incremento en tiempo y recursos computacionales, para obtener solamente uno de muchos casos que se deben considerar en el análisis del sistema, además de no ser una simulación en función del tiempo, propiamente dicha. Por lo tanto, la optimización del circuito controlador tomaría demasiado tiempo, haciendo complejo el análisis y poco eficiente el uso de recursos.

Esto lleva entonces a explorar otras estrategias que entreguen el resultado esperado rápidamente y de manera más exacta, tomando en cuenta las diferentes condiciones de operación del sistema y el medio que lo rodea.

Para esto, se pueden utilizar paquetes que contengan módulos que se enlacen entre sí, para realizar la tarea deseada en poco tiempo y basados en modelos cercanos a la realidad. Estos paquetes serían COMSOL, PSPICE, SLPS y Simulink de MatLab.

III.3.1 Descripción del sistema de control.

El sistema de control de temperatura presenta ciertos requisitos para su diseño y operación como son tener un bajo consumo de potencia además de ocupar poca área de silicio en el chip e integración monolítica del sensor junto con la electrónica.

Este sensor se puede fabricar con cualquier tecnología comercial que por lo menos ofrezca dos capas de polisilicio y dos capas de aluminio.

Una ventaja en el empleo de esta tecnología es que permite la compatibilidad con el micro maquinado con decapantes anisotrópicos, como el hidróxido de tetrametilamonio (TMAH), resultando en un decapado preferencial en el substrato de silicio para obtener de esta manera la membrana suspendida en la que se encuentra la micro placa caliente.

El diseño topológico o layout del sensor integrado se muestra en la figura III.16 donde se han señalado los tres bloques que componen al sistema sensor para gas:

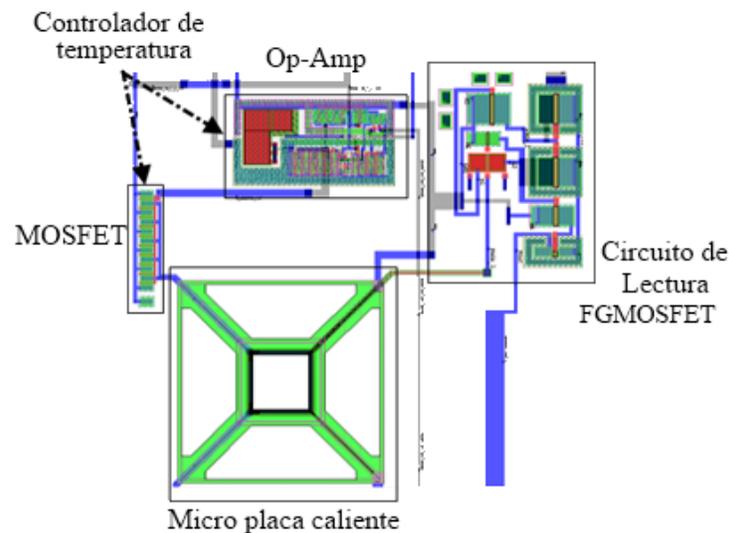


Fig. III.66. Layout del sensor integrado.

Para la regulación de la temperatura en una micro placa caliente realizada con post procesos MEMS compatibles con tecnología CMOS, se propone un control análogo proporcional, basado en un amplificador operacional (Op-Amp) [5-7]. El esquemático del sistema del que se parte para realizar las simulaciones básicas de comportamiento del controlador, se muestra en la figura III.17.

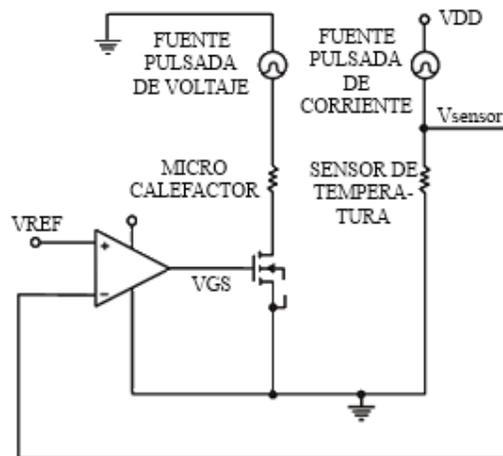


Fig. III.17. Esquemático del controlador de temperatura empleado en el sensor para gas.

Aprovechando el TCR del polisilicio obtenido anteriormente, se diseñan los dos elementos (sensor y micro calefactor) como se muestra en la figura III.3. De esta forma, se pueden conectar para formar parte de un controlador de temperatura que se compone de un op-amp, que recibe una retroalimentación de voltaje correspondiente a la caída de voltaje en el sensor de temperatura, que es comparada con un voltaje de referencia (set point), y un transistor MOS, que abrirá o cerrará el circuito de alimentación del micro calefactor.

Al polarizar al sensor con una fuente de corriente constante, el cambio de resistencia debido a la transmisión de calor por conducción por parte del micro calefactor, provocará una variación de la caída de voltaje en el sensor. Es por esto que esta variable es adecuada para completar el lazo de control y compararla con el voltaje de referencia. Por otro lado, el micro calefactor se polariza con una fuente de voltaje pulsado de amplitud fija.

Cuando el voltaje de referencia está por encima del voltaje del sensor de temperatura, la salida del op-amp estará en nivel alto y por lo tanto el transistor MOS conducirá, estableciendo una corriente a través de la micro placa y por efecto Joule, la temperatura de ésta aumentará a partir de la temperatura ambiente. La temperatura del sensor subirá gradualmente al mismo tiempo que su valor de resistencia, variando correspondientemente la caída de voltaje, la cual será comparada con el voltaje de referencia establecido según la temperatura final deseada en la micro placa. En el

momento en que ambos voltajes sean iguales, el op-amp cambiará de estado y apagará al MOS de control. Este ciclo se repetirá de acuerdo al comportamiento dinámico de enfriamiento y calentamiento de la micro placa para mantener la temperatura alrededor de un punto de operación. Esta temperatura se deberá mantener hasta que sea cambiado el voltaje de referencia para establecer cualquier otra temperatura dentro de los límites físicos y mecánicos de la membrana.

III.3.2 Simulación del controlador en SPICE.

Se simuló inicialmente en SPICE el circuito de control de temperatura para la micro placa caliente utilizada en el prototipo de sensor para gas MEMS. Para facilitar el análisis dinámico del circuito controlador, se empleó un circuito equivalente para considerar el acoplamiento térmico entre el calefactor y el sensor, y además que fuera posible tomar en cuenta la constante de tiempo del sistema electro-térmico.

Se substituyó la micro placa caliente por una fuente de voltaje dependiente de voltaje, y al sensor de temperatura por un circuito RC, donde R es la resistencia térmica y C la capacitancia térmica del polisilicio del sensor. La constante de tiempo de este circuito debe ser consistente con la constante de tiempo del comportamiento térmico de la micro placa. Del análisis por elementos finitos realizado anteriormente, resultó una constante de tiempo para el calentamiento y otra para el enfriamiento, por lo que el circuito equivalente contiene dos resistencias que corresponden a estos valores.

Para el calentamiento el valor de R es de 770Ω , para el enfriamiento es de 950Ω y el valor de C es de $1\mu\text{F}$; se usó un $VDD=1.5\text{V}$. Este circuito permite observar el comportamiento transitorio del sistema, tomando la caída de voltaje en el capacitor como la temperatura alcanzada por el sistema y como voltaje de referencia para la fuente dependiente E1 y es al mismo tiempo el voltaje de retroalimentación hacia el op-amp.

Por otro lado, el transistor MOS usado como elemento final del control, es sustituido por un par de transistores p y n que permiten la carga y descarga (calentamiento y enfriamiento) del capacitor respectivamente, cuando cambia el estado de la salida del op-amp. Por la misma razón, se usan dos resistencias, R6 y R7: una para considerar el

calentamiento y otra para el enfriamiento. El circuito equivalente empleado se muestra en la figura III.18.

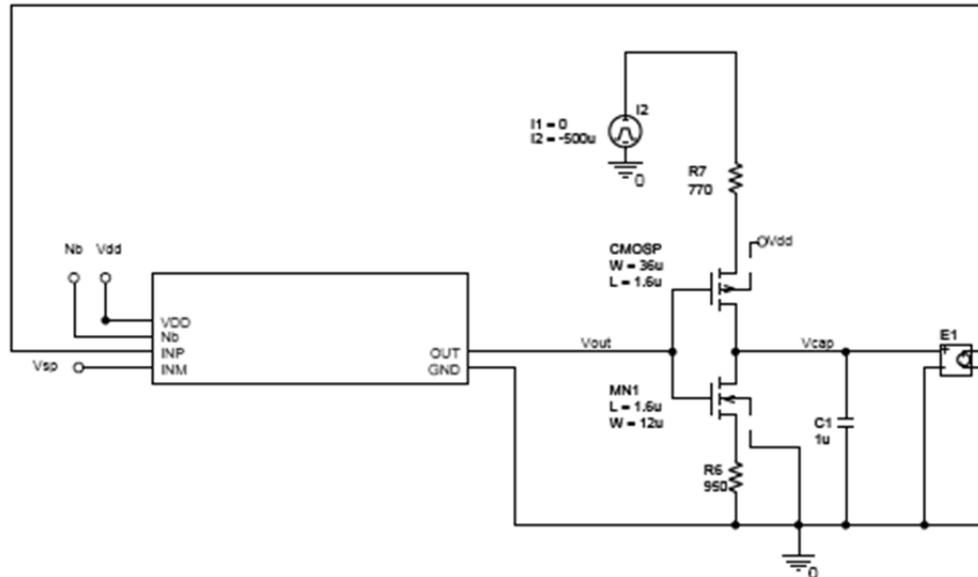


Fig. III.18. Circuito equivalente.

Los resultados del análisis transitorio de este circuito muestran que el control mantendrá la polarización en el calefactor hasta que el voltaje en el sensor alcanza el valor de referencia, que para el caso ilustrado es de 0.8V. En el momento en el que el voltaje en la compuerta del MOS, VGS, es igual al voltaje de referencia, la polarización al micro calefactor cesa. De acuerdo con el enfriamiento del calefactor, esta polarización se activará de nuevo manteniendo la temperatura del calefactor en el rango de operación.

Este comportamiento se muestra en la figura III.19, donde el voltaje en el sensor, designado por la línea roja, se elevará hasta llegar al set point, punto en el que se mantendrá estabilizado gracias a la acción de control del op-amp. En azul, la polarización del par de transistores se observa apagada hasta que se llega al set point en el capacitor, momento en el que la polarización permite la descarga del capacitor, simulando un enfriamiento. Esta polarización se mantendrá oscilando para mantener la temperatura de la micro placa caliente estable alrededor de un valor dado.

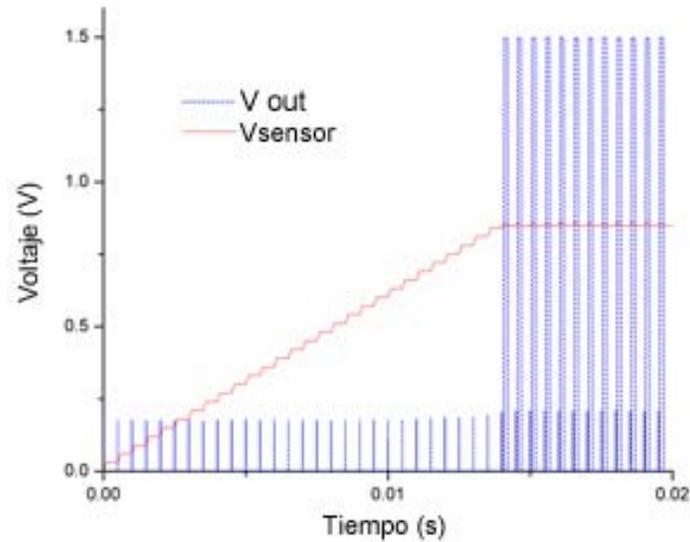


Fig. III.19. Resultados del circuito equivalente.

Para completar este resultado, se simuló el circuito original utilizando un análisis variando la temperatura de las resistencias calefactora y sensora, fijando la temperatura de los demás dispositivos a 27°C. El barrido de temperatura de 27°C a 300°C con pasos de 1°C permite obtener el comportamiento del sistema cuando el voltaje en el sensor se aproxima al voltaje de referencia debido al cambio de temperatura, notando que es independiente del tiempo. Los resultados de esta simulación se muestran en la figura III.20.

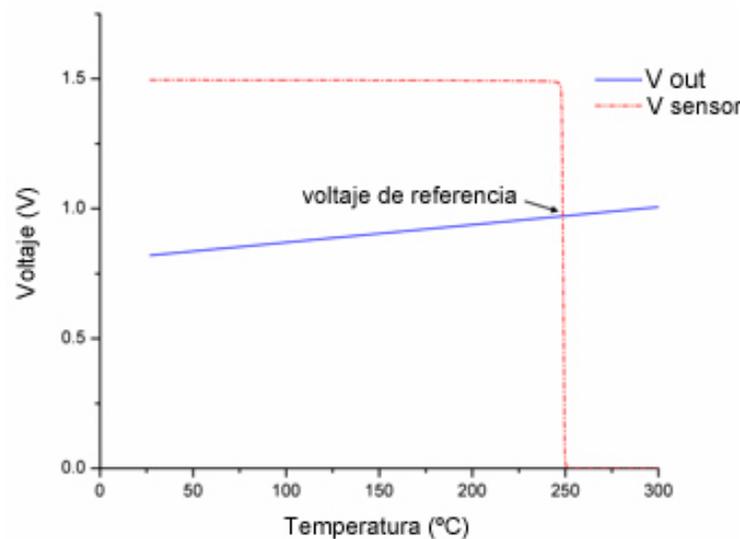


Fig. III.20. Resultados del barrido de temperatura a partir de la simulación de circuito de la Fig. III.17.

De la figura III.20 se puede observar que cuando el voltaje del sensor es igual al voltaje de referencia, las entradas del op-amp son iguales, y en consecuencia su salida tiene un nivel bajo, de tal forma que el transistor MOS de control cambia de estado interrumpiendo la alimentación del calefactor. Se considera entonces, en una primera aproximación, que el sistema de control funciona correctamente para la función de calentamiento y enfriamiento del calefactor.

Por otro lado, habrá que hacer notar que SPICE presenta una limitante en la simulación del sistema de control de temperatura, ya que no es posible modelar directamente el acoplamiento electro-térmico entre el calefactor y el sensor, por lo que una simulación transitoria como la mostrada anteriormente en la figura III.20 no toma en cuenta de manera directa la influencia del calentamiento del calefactor sobre la resistencia del sensor, y en consecuencia, el resultado de la simulación no es por completo consistente con el comportamiento real del sistema.

Entonces, para considerar este acoplamiento térmico se requiere de otras herramientas, de tal forma que se pueda realizar la simulación de manera más realista y en función de los parámetros de los elementos y materiales empleados en el sistema electro-térmico y del circuito de control.

III.3.3 Simulación del controlador con Simulink.

Para poder simular el comportamiento del controlador en función del tiempo, es decir, analizar cómo actuará el sistema frente a los cambios en la temperatura de la micro placa, es necesario seguir una estrategia que permita llevar al modelo de SPICE a un ambiente dinámico que pueda considerar cambios deseados y no deseados de temperatura, en el tiempo, la cual no es una tarea que se pueda desarrollar de manera aislada con SPICE. Una forma de lograr este propósito es apoyándose en la plataforma para simulación de multidominios, Simulink®, mediante la utilización del bloque de integración SLPS y manejando el comportamiento electro-térmico de la micro placa por medio de bloques de función. Para esto, el circuito descrito en SPICE debe ser modificado para que funcione adecuadamente con el bloque SLPS [8].

La propuesta que se reporta da resultados adecuados si se eliminan las resistencia sensora y su fuente de alimentación, dejando solamente el op-amp, el transistor de control y la resistencia calefactora conectados a fuentes de voltaje en el circuito de SPICE, como se muestra en la figura III.21.

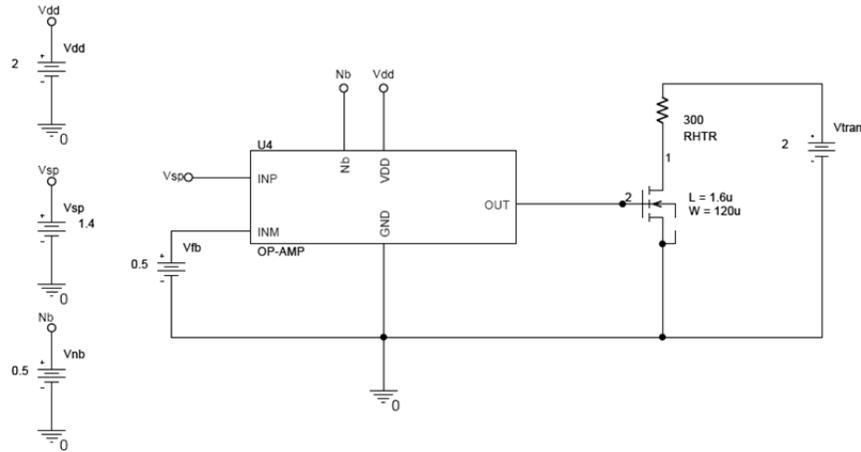


Fig. III.21. Circuito de SPICE para la simulación en Simulink.

Mediante este procedimiento, el bloque SLPS utiliza el perfil de simulación de SPICE y los archivos de salida de este mismo análisis. Las fuentes de alimentación y el modelo de la micro placa serán externos a este bloque en ambiente Simulink.

Esta simulación, que contendrá a todos los elementos de la micro placa y su controlador, deberá ajustarse a las condiciones de las simulaciones previas. En la Tabla III.3 se muestran los valores usados:

VALORES DE LAS VARIABLES PARA SIMULACION	
VARIABLE	VALOR
V_{dd}	1.5V
V_{nb}	0.6V
V_{trans}	3V
V_{sp}	0.971V

Tabla III.3 Valores de las variables de simulación en Simulink.

Los valores anteriores corresponden a los requerimientos iniciales de bajo consumo, alimentando el circuito con $V_{DD}=1.5V$, un voltaje de compensación del op-amp $V_{nb}=0.6V$, la polarización de la resistencia calefactora $V_{trans}=3V$ y el voltaje de referencia para mantener la temperatura de la micro placa en $250^{\circ}C$, $V_{sp}=0.971V$. Este voltaje resulta de la relación entre la temperatura y la resistencia determinada por la Ec. III.1.

Inicialmente, en ambiente Simulink se ha simulado un controlador on-off junto con los bloques de función que contienen el modelo de la micro placa, es decir, el comportamiento térmico de la misma y la conversión de la temperatura a voltaje, de acuerdo al TCR y la corriente aplicada a la resistencia sensora; esta simulación permite comprobar los modelos desarrollados para la micro placa, la conversión y su desempeño dinámico. La figura III.22 muestra esta configuración.

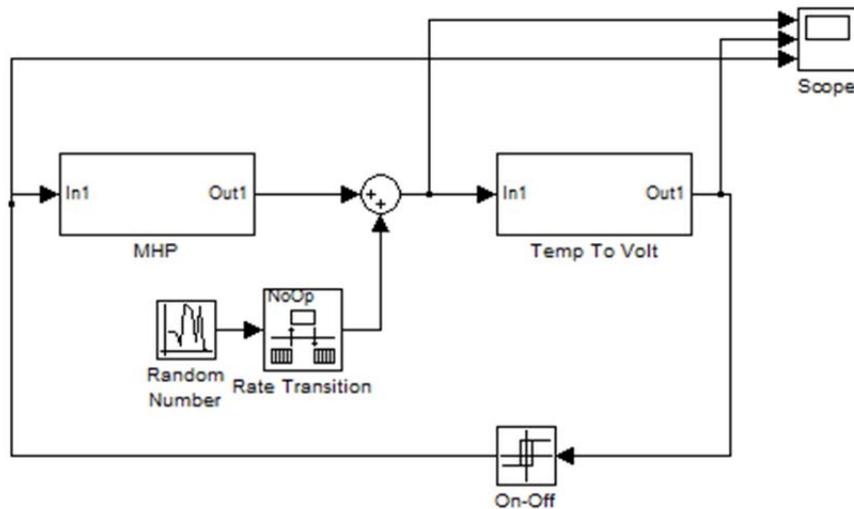


Fig. III.22. Configuración On-Off.

Posteriormente, utilizando el bloque de integración SLPS con el perfil de simulación y archivos de salida de SPICE dentro de Simulink bajo las condiciones de polarización descritas en la Tabla III.3, es posible integrar ambas simulaciones dentro de un solo proceso que permita observar el comportamiento del circuito de control propuesto. El diagrama a bloques se muestra en la figura III.23. En este diagrama se encuentran todas las entradas del sistema, es decir, las polarizaciones para el micro calefactor, el sensor y el op-amp; un bloque de inversión de la señal, el bloque conteniendo el comportamiento de la micro placa caliente, las perturbaciones ambientales y la conversión de temperatura alcanzada hacia voltaje.

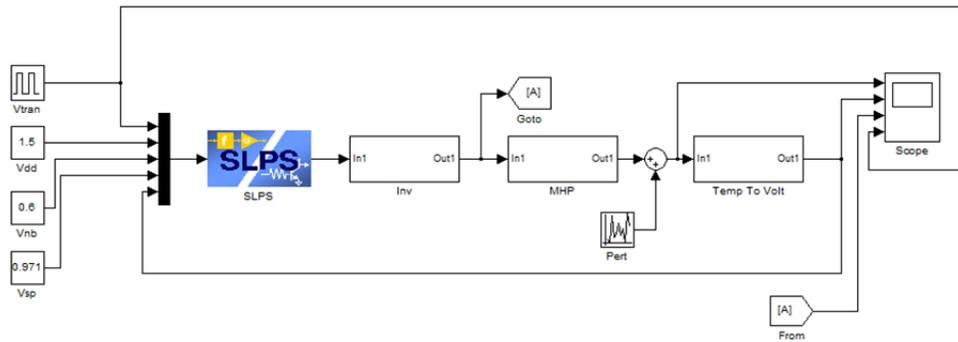


Fig. III.23. Diagrama a bloques en Simulink.

Ambas simulaciones contienen las perturbaciones con la finalidad de observar el comportamiento del controlador ante los efectos del ambiente de operación del sensor para gas, ya que al estar expuesto a la atmósfera, factores externos pueden alterar la temperatura de la micro placa, principalmente los cambios en la temperatura ambiental en la que se encuentre el sensor. Por un lado, la simulación correspondiente al diagrama mostrado en la figura III.22 presenta el comportamiento esperado de la micro placa y el controlador. Cuando la temperatura del calefactor llega al valor determinado por el voltaje de referencia, el sistema de control la mantiene en lo posible, haciendo que la salida del op-amp determine la conducción del transistor de control. La temperatura de la micro placa para este caso se muestra en la figura III.24.

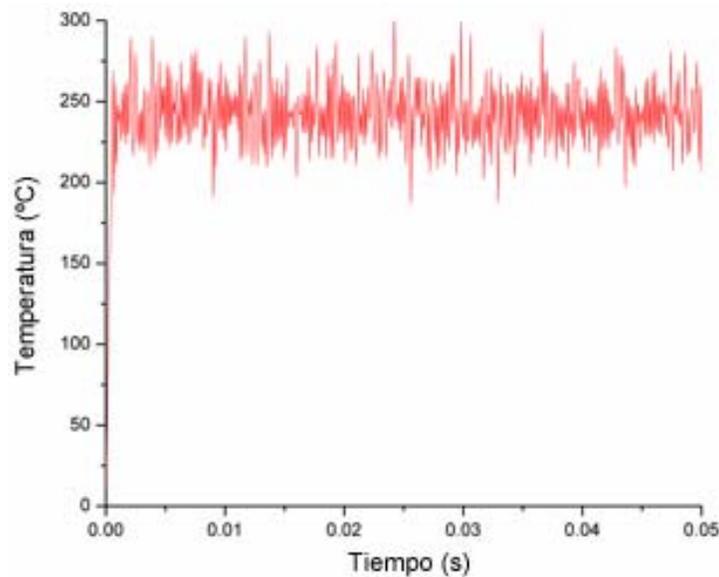


Fig. III.24. Temperatura en la micro placa, circuito sin SLPS.

Como se observa, la temperatura del sistema se mantendrá oscilando alrededor de los 250 °C, llegándose a esta temperatura en un tiempo muy corto, debido a las dimensiones de las estructuras diseñadas. Y por el otro lado, al incluir el bloque de integración SLPS, tal como se presenta en la figura III.23, el controlador presenta un comportamiento semejante al anterior, manteniendo la temperatura alrededor de los 250 °C, observándose esto en la figura III.25.

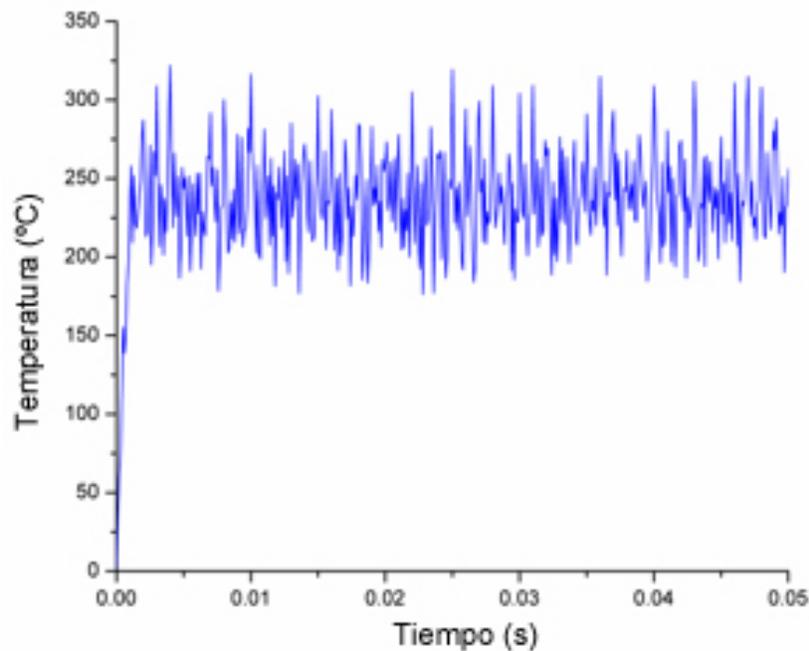


Fig. III.25. Temperatura en la microplaca, circuito con SLPS.

Las diferencias entre las dos simulaciones son causadas por dos factores, el primero de ellos es por la naturaleza aleatoria de las perturbaciones, las cuales se escogieron así para mostrar la capacidad del controlador para mantener la temperatura; el segundo factor es la fuente pulsada que alimenta al calefactor en la segunda simulación. Esta fuente reduce el consumo de potencia del circuito, así como también ofrece un factor de protección a la resistencia calefactora.

III.4 Simulaciones de maquinado y mecánicas.

Otra simulación que se tuvo posibilidad de realizar, se refiere al decapado anisotrópico de las estructuras. Esto permite valorar anticipadamente la evolución del micro maquinado tratando de reproducir las condiciones reales del aparato empleado en la práctica.

Esto es posible gracias al paquete llamado AnisE®, de IntelliSense, el cual permite introducir datos como el material del substrato, su orientación cristalina, el tipo de decapante anisotrópico, la concentración empleada del mismo así como la temperatura del proceso y el material empleado como mascarilla, por ejemplo el SiO_2 .

Con la posibilidad de aplicar software de simulación de maquinados, se obtiene la forma final de la estructura en la solución usada para el decapado. Incluso, acoplándolo con otro módulo llamado IntelliFab, se pueden generar las mascarillas necesarias para simular el proceso tecnológico de fabricación del circuito integrado.

Aun más, este programa computacional permite definir el tipo de dopados de silicio, tipo de oxidación (húmeda o seca), metalizaciones, tiempos, etc. Esto permite determinar un tiempo aproximado de maquinado, además de permitir las modificaciones en el diseño geométrico de la micro placa, verificar el comportamiento general del maquinado y tener una idea, mediante un proceso animado, de cómo procede la fabricación de la estructura bajo simulación, lo cual resulta bastante ilustrativo y de mucha utilidad para definir el diseño final del prototipo.

Para el caso del sensor para gas MEMS basado en FGMOS, la micro placa caliente fue simulada, tomando en cuenta las dimensiones de la misma, como se muestra en la figura III.26 siguiente.

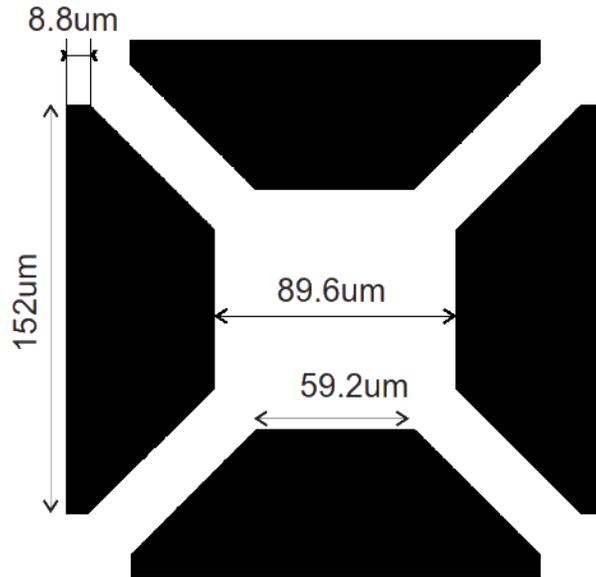


Fig. III.26. Dimensiones de la micro placa.

El objetivo principal de esta simulación fue determinar el tiempo aproximado de maquinado bajo las condiciones de proceso. Las condiciones del proceso de decapado del substrato de silicio mediante TMAH para obtener la membrana suspendida que forma la micro placa caliente se concentran en la tabla Tabla III.4.

VARIABLE	VALOR
Temperatura	80 °C
Concentración de TMAH	10%

Tabla III.4 Condiciones de proceso.

Después de dibujar la mascarilla siguiendo las acotaciones indicadas anteriormente, se dispone la simulación para que, en un bloque del substrato definido, en este caso silicio cristalino orientación <100>, se lleve a cabo el micro maquinado mediante el decapante seleccionado con las condiciones deseadas. Este software en particular, calcula las tasas de ataque para los diferentes planos cristalinos del substrato para obtener un resultado que se aproxime lo más posible a la realidad incluyendo efectos de sobre ataque lateral, compensaciones en esquinas y orientación de planos [9].

En la figura siguiente, se muestra el bloque de sustrato en gris y la mascarilla en líneas rosas.

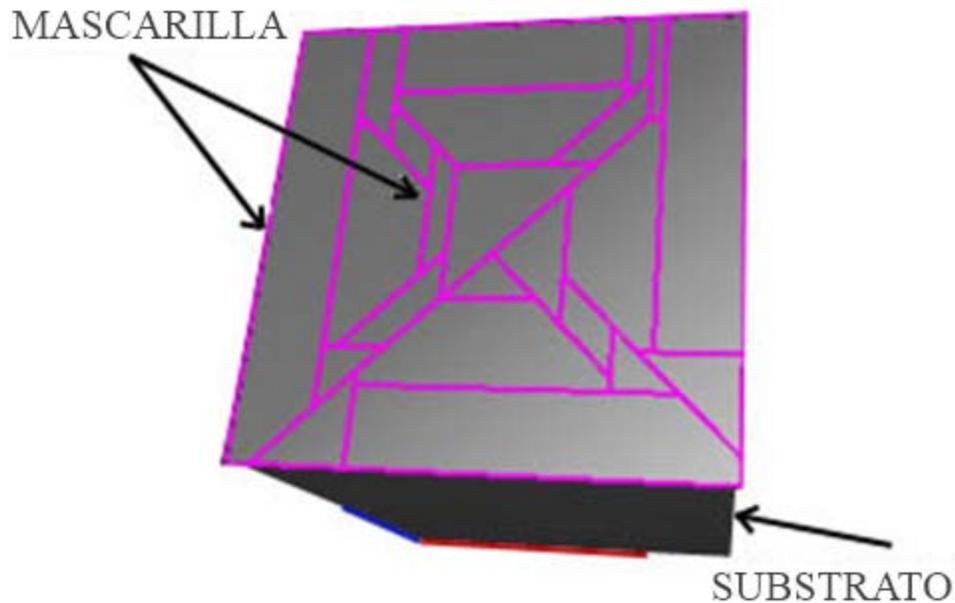


Fig. III.27. Simulación de maquinado en AnisE

Estas líneas rosas indican las zonas en las que el sustrato no entrará en contacto con el decapante, por lo que será protegido y no se decapará, obteniéndose entonces una forma tridimensional en el sustrato dependiente de la mascarilla.

Para este caso, se busca que esta forma tridimensional sea un micro foso con forma de pirámide cuadrangular truncada, con una estructura de SiO_2 por encima, que al mismo tiempo será soporte de la micro placa caliente y mascarilla para el proceso de decapado.

La figura III.28 (a) a (e) muestran el progreso de la simulación en incrementos de 25 minutos hasta llegar a los 100 minutos, en el que se considera que el decapado ha sido terminado.

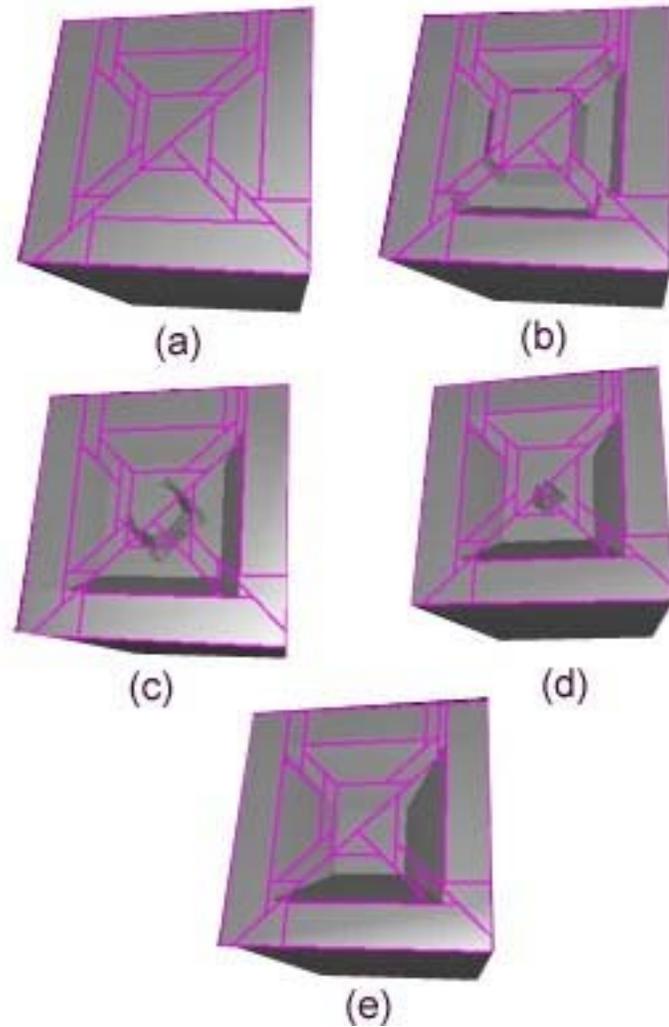


Fig. III.28. Maquinado en diferentes intervalos de tiempo.

Se observa en esta serie de imágenes la liberación de los soportes y el decapado por debajo de la membrana que formará la micro placa, reduciéndose los restos de substrato bajo la misma hasta que desaparecen y se obtiene la cavidad deseada.

Ya teniendo la estructura completamente liberada, es necesario para el análisis de la estructura realizar simulaciones mecánicas. Para las membranas suspendidas, los soportes deberán de ser capaces de sostener la parte central de la misma, en donde estarán localizados otros elementos funcionales.

En el caso presentado aquí, estos elementos funcionales son el micro calefactor y el sensor de temperatura, encontrados en un nivel de polisilicio, la compuerta flotante, el

siguiente nivel de polisilicio y finalmente una película de óxido metálico. Todos estos elementos aumentan el peso que debe ser soportado por la membrana. Los indicadores importantes para la simulación mecánica de la membrana deseada son la deformación máxima y la tensión máxima [10-12].

Mediante el análisis por elemento finito proporcionado por el software COMSOL, se simuló el comportamiento de la membrana suspendida obtenida mediante la geometría anteriormente descrita, como parámetro para este análisis se calculó el peso de la membrana, el cual debe ser soportado por ella misma.

Se indicaron como anclajes los extremos de los soportes y el área que rodea a la membrana; se mantuvo libre la estructura restante, siendo el propósito principal de este estudio determinar la deformación y la tensión existentes, como se mencionó anteriormente.

Dentro del estudio se verificó la deformación, así como la tensión Von Mises, se le aplicó una fuerza igual al peso de la membrana (~ 121 pN) considerando el material de la membrana, SiO_2 , y su espesor, ~ 390 nm. En este estudio se obtuvo una deformación máxima es de 6.357×10^{-15} μm , con una tensión máxima de 1.229×10^{-3} MPa, cuyo valor es menor que el límite elástico para el material, que para el óxido de silicio de 55 MPa. La figura siguiente muestra los resultados de esta simulación.

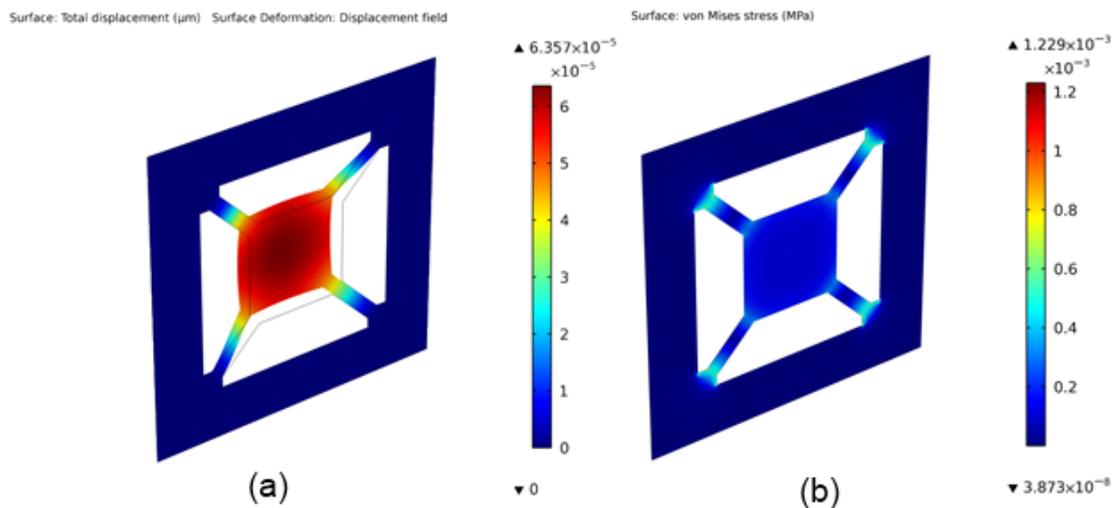


Fig. III.28. Análisis mecánico en COMSOL.

La figura III.28 (a) muestra que la deformación máxima se encuentra en la parte central de la membrana, ya que esta zona se encuentra libre sobre la cavidad formada por el decapado.

La figura III.28 (b) indica que según la simulación, la tensión máxima se encuentra en las uniones de los soportes con los bordes de las ventanas sobre el sustrato y con la parte central, sin embargo, esta tensión no llega al límite de deformación permanente del material.

III.5 Conclusiones del Capítulo.

El conjunto de simulaciones presentado en este capítulo define la viabilidad del prototipo de sensor para gas MEMS basado en FGMOS. Cada uno de los componentes de este sensor ha sido simulado bajo condiciones de proceso, por lo que se ha obtenido una idea clara del comportamiento de todos los elementos funcionales del sistema y en algunos casos, la interacción entre ellos.

Debido a la complejidad propia del sensor determinada por los requisitos que se desea cumplan, integrarlo todo en una sola simulación no es posible, sin embargo, la capacidad de los diferentes programas de análisis permiten obtener resultados que indican claramente que es factible realizar un sensor con el mecanismo de funcionamiento descrito anteriormente.

III.6 Referencias.

1. Xu, L., *Micro-Hotplate Based Gas Sensor System in CMOS*, in *Micro- and Nanotechnology Laboratory Course*. 2007.
2. M. Y. Afridi, et al., *A Monolithic CMOS Microhotplate-Based Gas Sensor System*. *IEEE Sensors Journal*. **2**(6): 2002, p. 644-655.
3. Tabata, O. *pH-controlled TMAH Etchants For Silicon Micromachining*. in *Solid-State Sensors and Actuators, 1995 and Eurosensors IX.. Transducers '95. The 8th International Conference on*. 1995, p. 83-86.
4. Vázquez-Acosta, E.N., et al. *Simplified modeling and simulation for physical systems circuit design on a multiphysics software exportable to a multi-domain platform*. in *Electrical Engineering Computing Science and Automatic Control (CCE), 2010 7th International Conference on*. 2010, p. 525-530.
5. D. Barrettino, et al. *A Micro-Hotplate-Based Monolithic CMOS Thermal Analysis System*. in *29th European Solid-State Circuits Conference . ESSCIRC '03*. Estoril, Portugal. 2003, p. 329 - 332.
6. Barrettino, D., et al. *A smart single-chip micro-hotplate-based chemical sensor system in CMOS-technology*. in *Circuits and Systems, 2002. ISCAS 2002. IEEE International Symposium on*. 2002, p. II-157-II-160 vol.2.
7. Mendoza-Acevedo, S., et al. *Design considerations for monolithic integration of a micro hotplate temperature controller in a MEMS gas sensor*. in *Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control (CCE), 2009 6th International Conference on*. 2009, p. 1-5.
8. Mendoza-Acevedo, S., et al. *Micro-hot plate temperature control circuit design for a MEMS gas sensor, by interfacing multiphysics and multidomain software*. in *Electrical Engineering Computing Science and Automatic Control (CCE), 2010 7th International Conference on*. 2010, p. 519-524.
9. Madou, M.J., *Fundamentals of Microfabrication*. 2nd ed: CRC-Press. 2001, 723.
10. Ashaf, M.W., S. Tayyaba, and N. Afzulpurkr. *Tapered tip hollow silicon microneedles for transdermal drug delivery*. in *Mechanical and Electronics Engineering (ICMEE), 2010 2nd International Conference on*. 2010, p. V1-469-V1-473.
11. Sharaf, R., et al. *On the Design of an Electronic Mosquito: Design and Analysis of the Micro-needle*. in *2003 International Conference on MEMS, NANO and Smart Systems ICMENS'03*. Banff, Alberta, Canada. 2003, p. 32-35.

12. Najafi, K. and J.F. Hetke, *Strength characterization of silicon microprobes in neurophysiological tissues*. Biomedical Engineering, IEEE Transactions on. **37**(5): 1990, p. 474-481.

IV. Fabricación del Sensor de Gas



IV. FABRICACION DEL SENSOR PARA GAS

IV.1 Introducción.

El sensor para gas presentado deberá ser fabricado posteriormente al diseño y al conjunto de simulaciones realizadas. Como se ha mencionado, uno de los objetivos principales del desarrollo de este trabajo es utilizar tecnología de fabricación CMOS comercialmente disponible, que cumpla con las características necesarias para realizar los dispositivos integrados dentro del sistema. Esta condición rige también el método de fabricación de MEMS a utilizar, ya que dicho proceso debe ser compatible con la tecnología de circuitos integrados en función de los materiales y dispositivos de los que está formado el chip [1].

Estas características son:

- Tecnología CMOS.
- Contar con por lo menos dos capas de polisilicio.
- Substrato de silicio monocristalino orientación <100>.
- Substrato no epitaxial.
- Posibilidad de lograr zonas de substrato expuestas, sin pasivación.
- Substrato oxidado por la parte posterior.

La tecnología CMOS es necesaria debido al tipo de circuitería que se busca integrar en el sensor. Las dos capas de polisilicio son requeridas por el transistor MOS de compuerta flotante (FGMOS), dispositivo central del sensor y además para realizar el micro calefactor y el sensor de temperatura dentro de la micro placa caliente.

El tipo de substrato es importante porque los métodos de micro maquinado están desarrollados para ciertas condiciones, sobre las que se ha diseñado la estructura tridimensional.

La orientación del substrato define la anisotropía del decapado, así como las formas finales que se obtienen en el proceso mientras que el proceso de decapado define la isotropía.

Las obleas epitaxiales evitan el correcto micro maquinado, como se explicará más adelante.

Igualmente para el micro maquinado, es necesario que sea posible dejar expuesto el substrato para que entre en contacto con la solución decapante utilizada en el proceso, por este mismo motivo es necesario que el dorso del substrato esté protegido contra el decapante.

La fabricación del sensor se compone de tres etapas: 1) realización del chip de silicio conteniendo todo el sistema, 2) el micro maquinado de la micro placa caliente mediante algún método adecuado, y 3) el depósito de la película sensora de óxido metálico seleccionada para la aplicación.

IV.2 Tecnología CMOS.

Esta tecnología comprende una serie de procesos de diseño y fabricación de circuitos integrados que permite realizar transistores MOS tipo p y tipo n sobre el mismo substrato, muchas veces usados en pares para obtener el comportamiento deseado de los dispositivos. Al ser una de las tecnologías más comerciales, está disponible para un amplio rango de usuarios a través de diversos servicios multiproyecto de fabricación [2].

Las etapas tecnológicas de dicha tecnología son extensas y complejas [3], por lo que no se abordará de forma exhaustiva en el presente trabajo, sin embargo se hace notar que esta tecnología se escogió para la fabricación del chip que será la base del sensor para gas presentado.

Precisamente debido a su disponibilidad y amplia aplicación, el diseño y fabricación de MEMS se ha apoyado en esta tecnología para desarrollar diversos dispositivos [4-6]. El atractivo principal es la capacidad de integrar en un mismo substrato la circuitería analógica y/o digital a la estructura tridimensional en forma de interfaces, circuitos de control o de acondicionamiento de señales.

Es necesario tomar en cuenta los materiales y procesos a los que se somete un chip CMOS durante su fabricación para conocer y entender las limitaciones presentadas frente

al diseño y fabricación de los MEMS, ya que no siempre son compatibles en procesos o condiciones de operación [7, 8].

IV.3 Maquinado de la micro placa caliente

Una micro placa caliente es una estructura tridimensional cuyo fin es mantener alguna zona del circuito integrado a una cierta temperatura mayor que la del ambiente. Para lograr esto se depende del efecto Joule causado por la polarización de resistencias fabricadas dentro de la estructura, como se ha descrito en el capítulo II.

Existen diferentes diseños y métodos de fabricación de micro placas calientes, según el proceso de maquinado que se decida usar. Los objetivos de la micro placa diseñada para el sensor para gas presentado, recordando el propósito de realizar una integración monolítica empleando tecnología CMOS, son los siguientes.

- Disminuir la masa térmica a calentar, reduciendo la potencia necesaria para alcanzar la temperatura de operación adecuada.
- Proveer soporte mecánico a la película sensitiva.
- Aislar térmicamente al circuito integrado de la zona caliente.
- Permitir un micro maquinado adecuado.

Para cumplir con los objetivos del prototipo de sensor para gas diseñado en este trabajo, se propone fabricar una micro placa caliente de tipo membrana suspendida; las técnicas para realizar tales estructuras tridimensionales se dividen en 2 grupos: 1) maquinado volumétrico, con las subdivisiones de maquinado húmedo o seco, ya sea isotrópico o anisotrópico y 2) maquinado superficial, estos son los métodos comerciales principales para el micro maquinado.

IV.4 Maquinado volumétrico.

El maquinado volumétrico se refiere al decapado del sustrato, generalmente de silicio, por cualquier lado de la oblea.

En el micro maquinado húmedo, las características deseadas son esculpidas en el volumen de materiales tales como silicio, cuarzo, SiC, GaAs, InP y Ge y se realiza ya sea por decapantes independientes de la orientación (isotrópicos) o bien dependientes de ella (anisotrópicos). Esta tecnología utiliza tinajas de líquido como herramienta principal y es aplicada principalmente a silicio monocristalino.

El decapante húmedo isotrópico más común es el HNA, compuesto por ácido fluorhídrico, ácido nítrico y ácido acético en diferentes proporciones [9]. La velocidad de ataque de este decapante depende de su composición. Estas soluciones mantienen una tasa de ataque consistente hacia todas las direcciones del sustrato, independientemente de la orientación del mismo. Las aplicaciones de estos decapantes son variadas y pueden ser alternadas con otras técnicas para obtener estructuras complejas.[10, 11]

La técnica más usada para liberar estructuras como las membranas y los puentes (como la aquí considerada) es el maquinado húmedo anisotrópico, el cual ataca los planos cristalinos con diferentes velocidades de ataque y una dirección preferencial de decapado, obteniendo de esta manera estructuras con superficies limitadas por los planos cristalinos que resultan menos atacados por la solución. Es de gran importancia considerar que el ataque a los diferentes planos cristalinos depende de la composición exacta del decapante y de la temperatura del proceso.

Por otro lado, la fabricación de estas estructuras puede ser realizada con técnicas de micro maquinado volumétrico de MEMS, de dos formas principales: 1) el maquinado posterior, en la que el decapado se produce por la cara trasera de la oblea, siendo necesario atravesar por completo el espesor de la misma para liberar la membrana, y 2) el maquinado frontal, en el que el decapado se realiza por la cara anterior de la oblea, siendo necesario indicar y obtener espacios abiertos en los que el silicio entre en contacto con la solución decapante, así como para lograr motivos de soporte para la micro placa.

Este proceso se apoya de materiales que sirven de protección a la superficie que no se desea atacar, los cuales son empleados como mascarillas, tales como el dióxido de silicio (SiO_2) y el nitruro de silicio (Si_3N_4), que no son atacados por los decapantes anisotrópicos. Estos dos materiales son también parte de los elementos empleados durante la fabricación de los circuitos integrados CMOS, por lo que también ayuda a

conservar la compatibilidad entre la tecnología CMOS y la tecnología de micro maquinado para los MEMS. Como complemento a esta compatibilidad, la definición de las áreas a maquinar se define con procesos de fotolitografía rutinariamente empleados en la fabricación de los circuitos integrados.

Particularmente, el maquinado anisotrópico forma las estructuras deseadas al decapar más rápido ciertas direcciones en comparación con otras. Cuando se realiza correctamente, este decapado genera formas geométricas limitadas por planos cristalográficos perfectamente definidos y de maquinado más lento. Esta técnica resuelve los problemas asociados con la falta de control de la dimensión lateral presente en el maquinado isotrópico, aunque no está exenta de problemas como los siguientes: es lenta, con una velocidad de maquinado aproximada de $1 \mu\text{m}/\text{min}$ o menos, requieren de temperatura de proceso de entre 80 y 115 °C, limitando las opciones de enmascaramiento, teniéndose además que la velocidad de ataque sea dependiente de la temperatura.

Existe una amplia variedad de decapantes anisotrópicos para cada material a grabar. Para determinar el más adecuado para el proceso deseado hay diferentes puntos a considerar como: facilidad de manejo, toxicidad, velocidad de decapado, topología deseada de la superficie del fondo, compatibilidad con los circuitos integrados, tope del decapado, selectividad sobre otros materiales, material de enmascaramiento y espesor de la máscara.

En esta técnica es comúnmente usado el hidróxido de potasio (KOH) para maquinados posteriores por su alta velocidad de ataque al silicio[12], utilizando algún medio para proteger la cara frontal de la oblea, pues ataca de forma importante al SiO_2 y Al, las cuales son capas normalmente usadas en la fabricación de circuitos integrados y se debe cuidar de no dañarlas [13]. Esto es importante si se busca compatibilidad de procesos tecnológicos, lo cual ayuda además a reducir costos de producción al no tener que agregar pasos de fabricación adicionales que sean costosos.

El uso de otras soluciones alcalinas, como los compuestos de hidróxido de amonio, son una alternativa. Para esto es usado el hidróxido de tetrametil amonio (TMAH) y la etilendiamina pirocatecol (EDP). Estos compuestos pueden ser formulados para aumentar

la selectividad reduciendo el daño hacia el aluminio, haciendo posible el maquinado frontal en obleas con circuitos CMOS [14, 15].

La solución TMAHW ((CH₃)₄NOH+H₂O) es una de las más útiles para trabajar sobre silicio. Esta solución no se descompone a temperaturas por debajo de los 130°C, no es tóxica, es barata y de fácil manejo. También exhibe una excelente selectividad sobre las máscaras de óxido y nitruro de silicio, siendo recomendable previamente retirar con HF la capa de óxido nativo del silicio antes de intentar un maquinado con TMAHW.

Con una solución a 90°C y 22% en peso de TMAH se observa una tasa de decapado en superficies de silicio con orientación (100), de 1 µm/min, 1.4 µm/min para planos (110) y una relación anisotrópica AR(100)/(111) de entre 12.5 y 50.

Una concentración por encima del 22% en peso es preferible, ya que una concentración menor produce rugosidad en la superficie decapada, sin embargo, una concentración mayor resulta en un ataque más lento y una relación anisotrópica menor, por lo que se requiere encontrar un compromiso entre estas dos condiciones, para lograr un maquinado óptimo para los propósitos deseados. Se han estudiado las características decapantes de TMAHW con pH controlado. Para obtener una tasa baja de decapado de aluminio (0.01 micras por minuto), valores de pH por debajo de 12 para TMAHW al 22% en peso son requeridos. Esta tasa puede ser reducida también agregando polvo de silicio a la solución. La tasa de ataque para el TMAHW comienza a reducirse para niveles de contaminación de boro de aproximadamente $1 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ y decae por un factor de 40 para $2 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$ [16].

Aprovechando lo anterior, la definición correcta de las estructuras fabricadas con estos métodos se puede controlar principalmente de dos formas. La más sencilla es el paro controlado por dopado, en el que los substratos altamente contaminados con impurezas tipo p o n tienen una velocidad de ataque muy reducida comparada con silicio de baja contaminación. Esta característica hace que el uso de obleas epitaxiales sea impráctico para la fabricación de MEMS basados en maquinado volumétrico. Para el HNA, esta velocidad es superior y para EDP y TMAHW, se reduce significativamente. La otra técnica es el paro electroquímico, la cual requiere una oblea con una baja contaminación y que tiene formada una unión p-n. Mientras la oblea se encuentra en la solución

decapante, ésta se polariza con una fuente de voltaje constante. En estas condiciones, el decapado se realiza de forma normal hasta que alcanza la interface de la unión p-n, donde se detiene [17].

Se tienen también alternativas de decapado seco, como el maquinado isotrópico seco de silicio, que se realiza con difluoruro de xenón (XeF_2), con la cual se tiene excelente selectividad frente al aluminio, dióxido de silicio, nitruro de silicio y fotoresina. La velocidad de ataque del silicio depende de la orientación cristalina de la superficie a decapar, con valores típicos de $1\mu\text{m}/\text{min}$. La variante gaseosa de maquinado anisotrópico se realiza usualmente por decapado por iones reactivos (RIE) en sistemas asistidos por plasma.

Modificando las variables del proceso, éste puede ser isotrópico o anisotrópico, siendo en algunos casos independiente de la dirección cristalina del sustrato pues la anisotropía se origina de la dirección del bombardeo de iones. El maquinado volumétrico utiliza principalmente radicales libres de flúor y SF_6 como gas de proceso, agregándose clorofluorocarbonos para aumentar la anisotropía. También es usado el decapado profundo por iones reactivos (DRIE) por medio de plasma de alta densidad, alternando el depósito de polímeros en las paredes verticales, por lo que solo las superficies horizontales son atacadas obteniéndose relaciones de aspecto muy variadas [18].

IV.5 Técnica particular utilizada.

La estructura tridimensional descrita ha sido fabricada mediante el proceso de micro maquinado volumétrico anisotrópico en húmedo post CMOS en una solución de agua e hidróxido de tetrametil-amonio (TMAH-W). Con agregados de ácido silícico ($\text{Si}(\text{OH})_4$) y peroxisulfato de amonio ($(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$), APS, se reduce el daño causado por la solución en el aluminio expuesto y mejora el acabado general del maquinado. Es importante mencionar que el aluminio es el metal empleado en la fabricación de los circuitos integrados CMOS y que estará presente en los chips.

El maquinado volumétrico frontal de la micro placa se realizó mediante una solución de Hidróxido de Tetra-Metil Amonio y agua (TMAHW), con concentración de 5 y 10 % en peso de TMAH. Esta solución produce un decapado anisotrópico debido a que la tasa de ataque es diferente para los diversos planos cristalinos del sustrato. Para sustratos

orientación $\langle 100 \rangle$, se obtiene un foso piramidal invertido, limitado por los planos (111) del substrato, con un ángulo de 54.74° respecto de la superficie de la oblea, como se muestra en la figura IV.1. Debido a que la tasa de ataque del TMAHW es muy baja para el SiO_2 , este material es comúnmente usado para definir áreas del substrato de silicio expuesto.

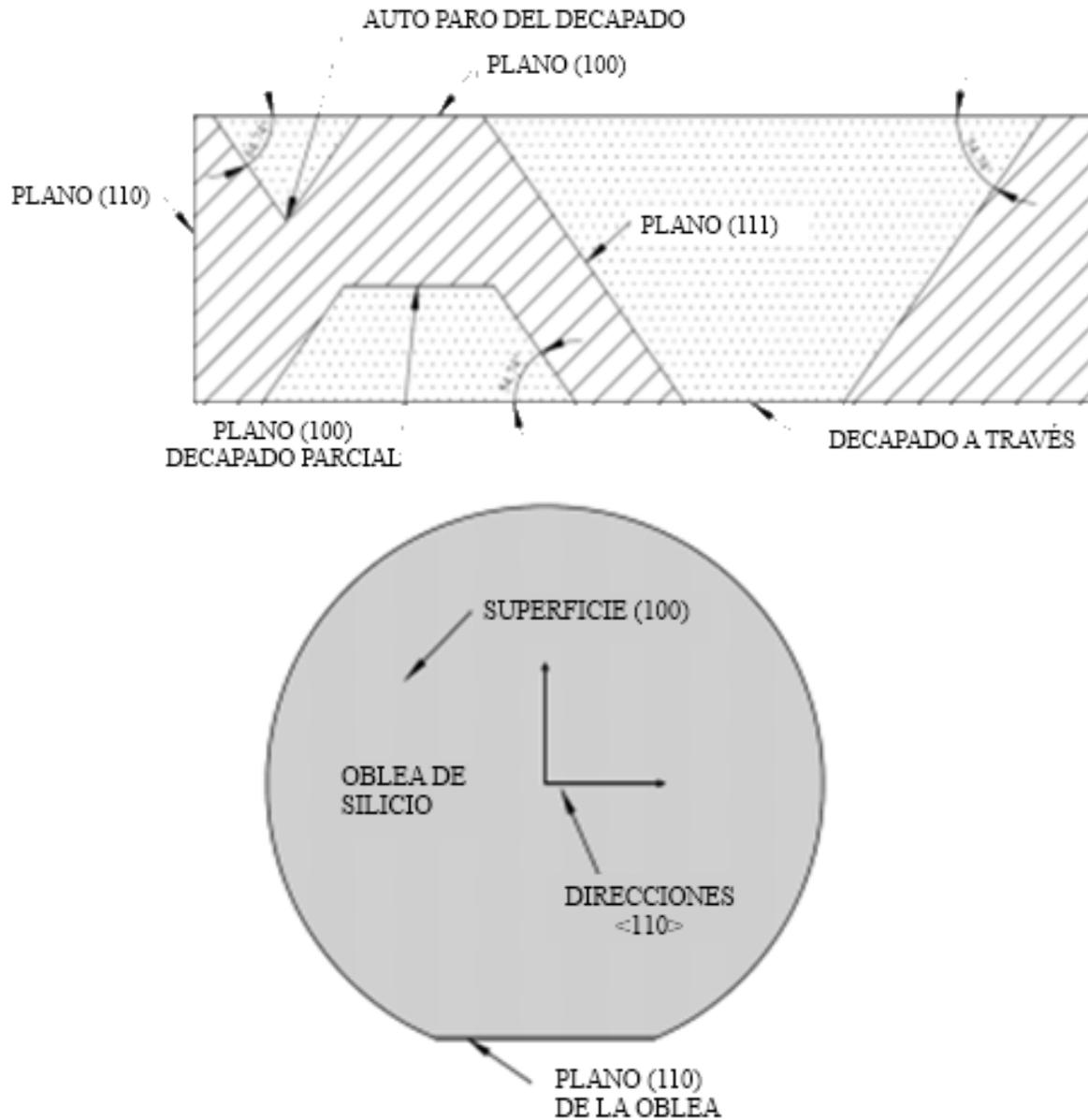


Fig. IV.1. Maquinado anisotrópico del substrato de silicio.

El foso piramidal obtenido tendrá una base rectangular o cuadrangular, alineada con el plano (110) del substrato, de dimensiones establecidas por las longitudes máximas de la abertura determinada por el SiO_2 , como se muestra en la figura IV.2.

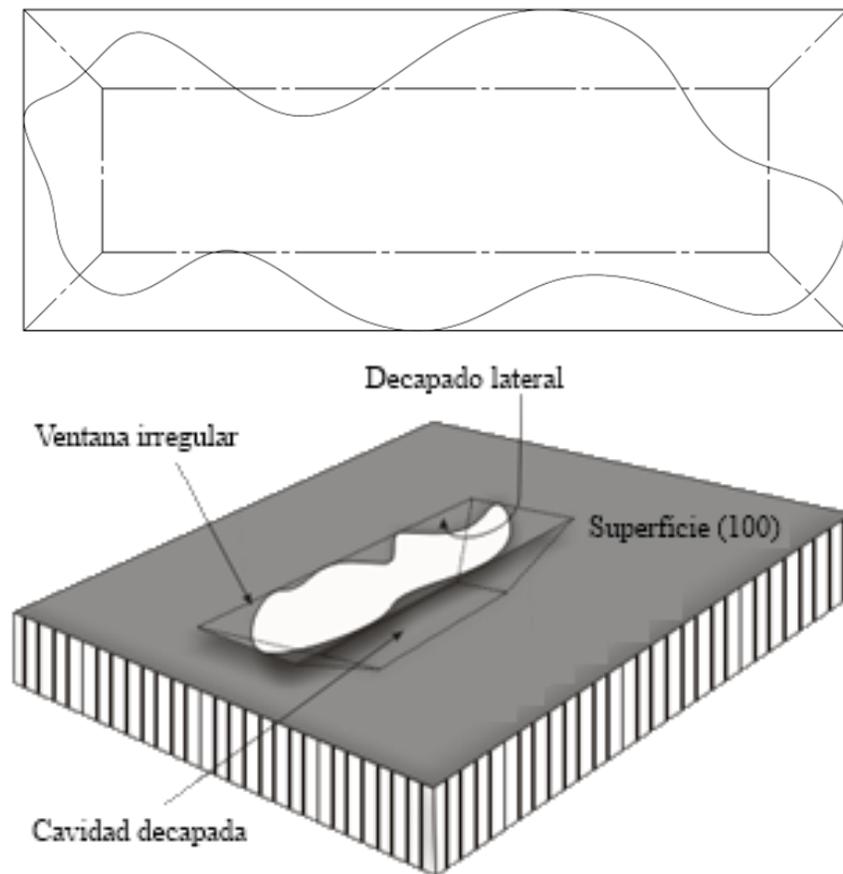


Fig. IV.2. Maquinado resultante en una abertura aleatoria.

IV.6 Compatibilidad con el proceso CMOS.

Debido a que la etapa de decapado será posterior a la fabricación del chip, es necesario considerar la compatibilidad del proceso MEMS con los materiales que componen las diversas estructuras del chip. La fig. IV.3 (a-f) muestra la secuencia de depósito de las capas y el material respectivo de las mismas que forman la estructura principal del sensor para gas, es decir, el transistor FGMOS conectado a un área activa de polisilicio sobre una micro placa caliente.

Este proceso es común para la fabricación de circuitos integrados, sin embargo, debido a que las reglas de diseño de la tecnología particular escogida, algunas acciones no pueden ser llevadas a cabo de forma directa. En el caso presentado y que se muestra en la figura señalada antes, las dos capas de polisilicio no pueden conectarse entre sí

mediante una capa de vía o contacto. Ya que la compuerta del FGMOS está en la capa de Poli1 y el área activa de polisilicio, donde se depositará la película sensora, se encuentra en la capa de Poli2, se presenta un inconveniente tecnológico. La solución es unirlos mediante una pista metálica, lo cual está permitido por las reglas de diseño. Esta pista se conecta mediante vías al poli2 y al poli1, formando la conexión necesaria para el funcionamiento del sensor. Este procedimiento se muestra en la figura IV.3 (e-f).

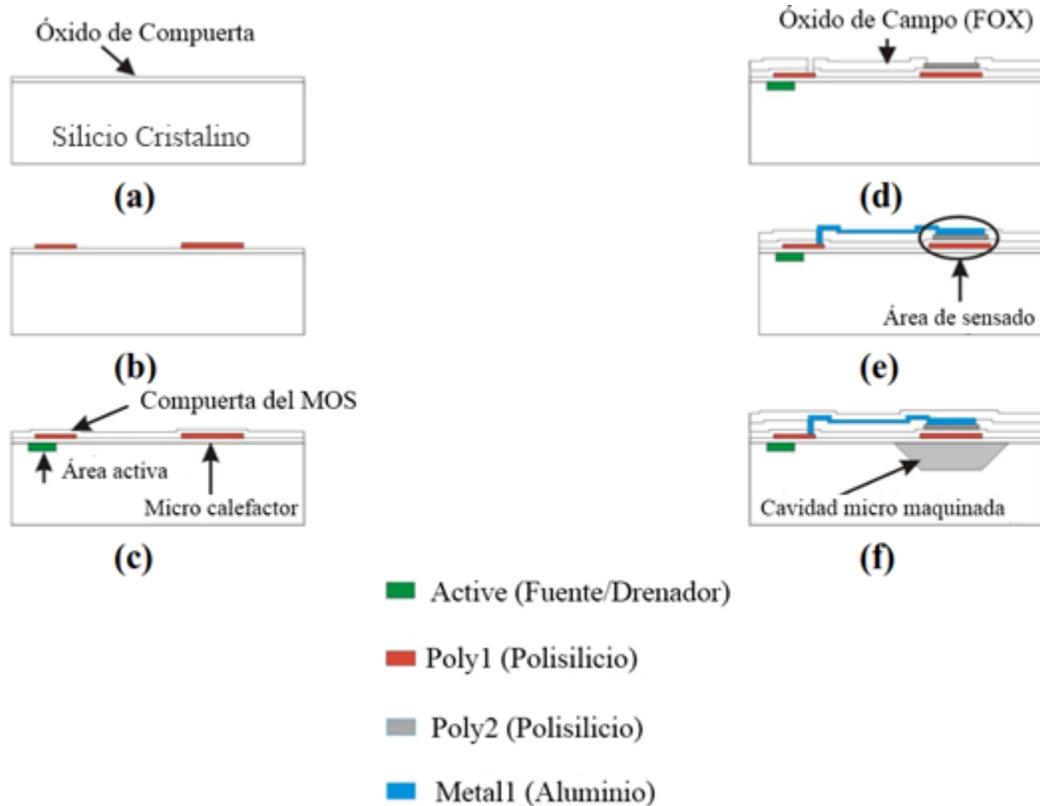


Fig. IV.3. Etapas de fabricación del sensor FGMOS.

Como se mencionó anteriormente, una característica crítica es la posibilidad de indicar y definir áreas del sustrato de silicio expuesto para formar las estructuras deseadas. Por el diseño de la micro placa es necesario que exista una selectividad de la solución para reducir en lo posible el ataque químico al aluminio. Este metal es el usado para realizar conexiones dentro del chip, por lo que finalmente quedará expuesto al ambiente sin la protección que ofrece la pasivación, como parte de las terminales requeridas por el chip (pads) para ser conectado al encapsulado.

En la etapa de dibujo del diseño geométrico, la definición de las áreas que quedarán expuestas a la solución decapante se indica mediante una serie de capas dentro del software de diseño que representan un paso tecnológico.

En este caso se ha usado L-Edit de Tanner para realizar el layout del chip. Para definir la micro placa, ya que se han indicado las capas que la forman, se requiere dibujar la geometría en las siguientes capas para asegurar que el silicio del substrato no tendrá ningún otro material por encima. La Fig. IV.4 muestra un corte transversal de la micro placa caliente y las áreas expuestas del substrato, tal como se requieren para el post-proceso MEMS de micro maquinado.

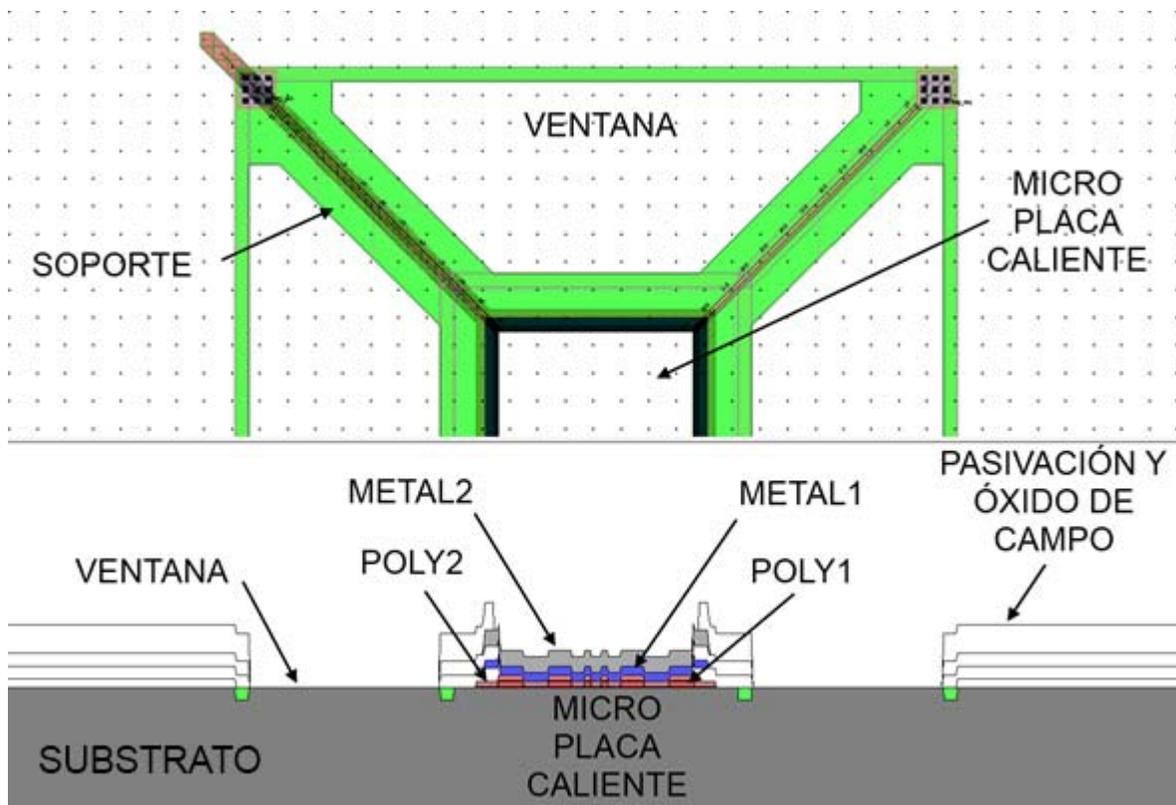
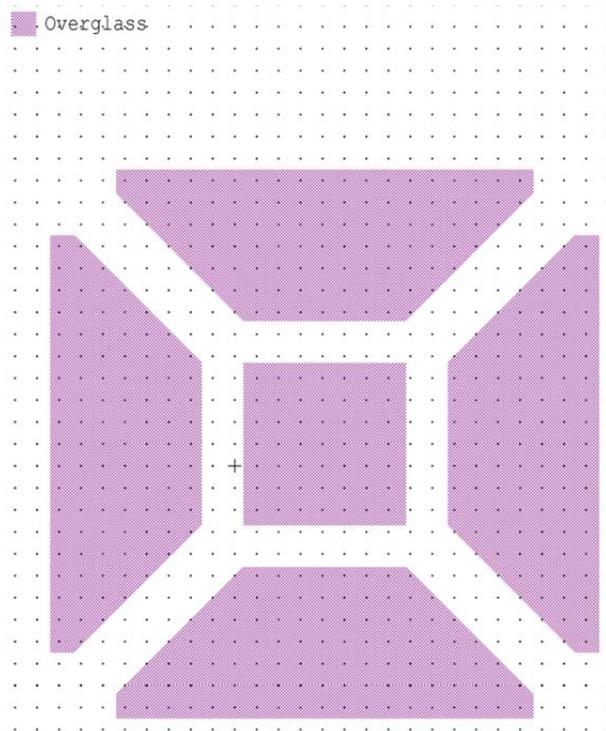


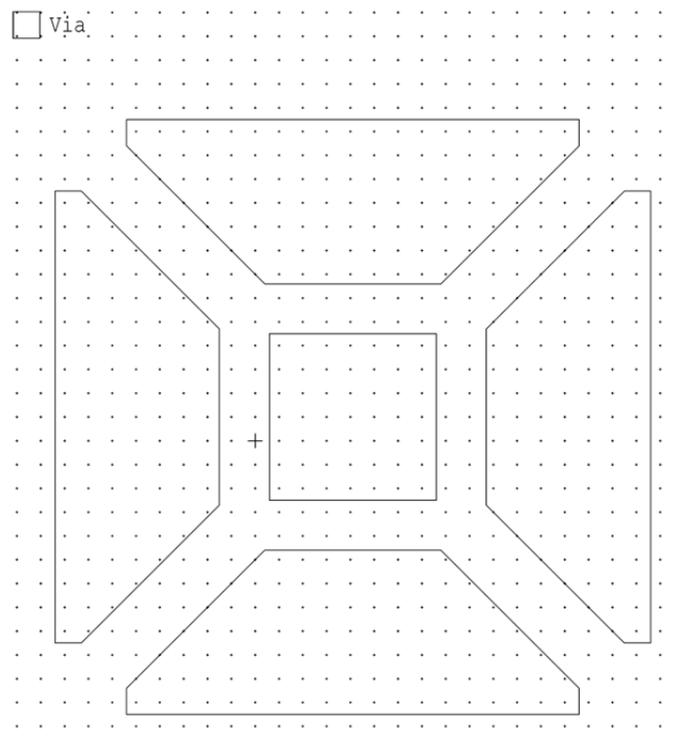
Fig. IV.4. Corte transversal de la micro placa caliente y membrana suspendida.

Se observa el substrato de silicio sin pasivación ni óxido de campo sobre las ventanas, mientras que en las demás áreas de la estructura funcionan como mascarilla y protección durante el decapado. Las geometrías para obtener las ventanas se enlistan e ilustran a continuación (en algunas se muestra la capa Via como referencia):

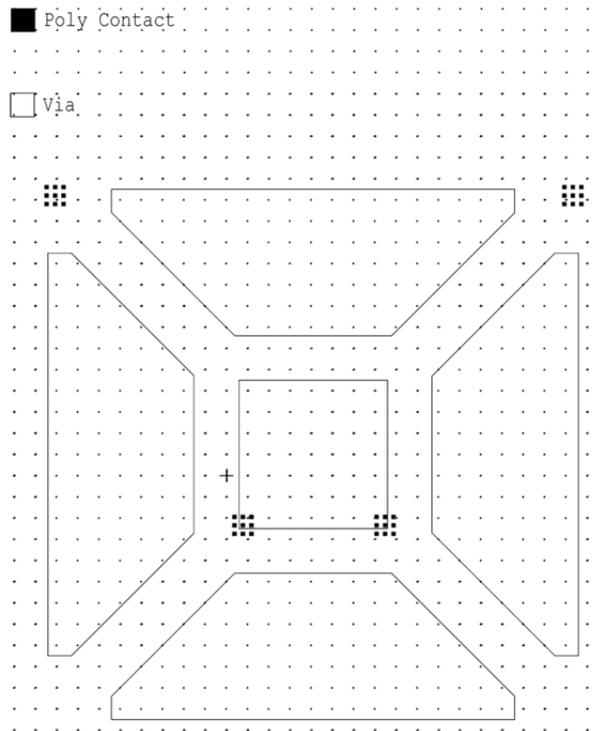
Overglass: Pasivación



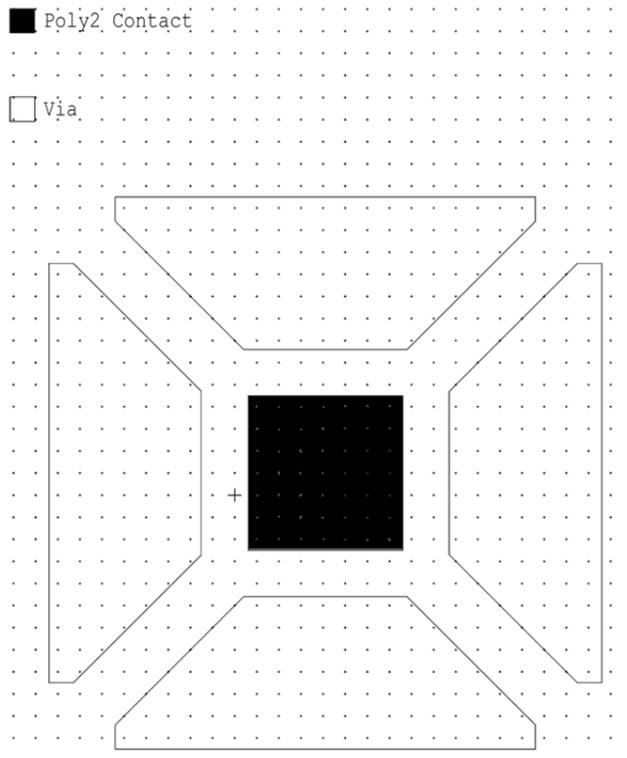
Via: Definición de conexión entre Metal1 y Metal2



Poly Contact (Definición de Conexión entre Poly1 y Metal1-2)

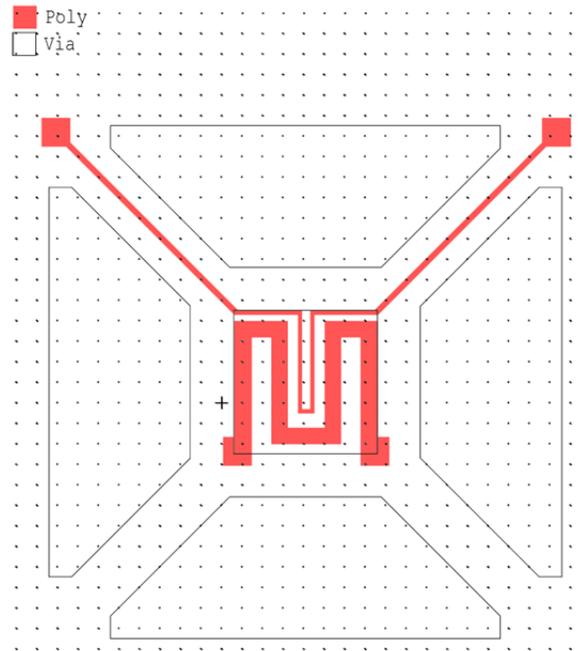


Poly2 Contact (Definición de Conexión entre Poly2 y Metal1-2)

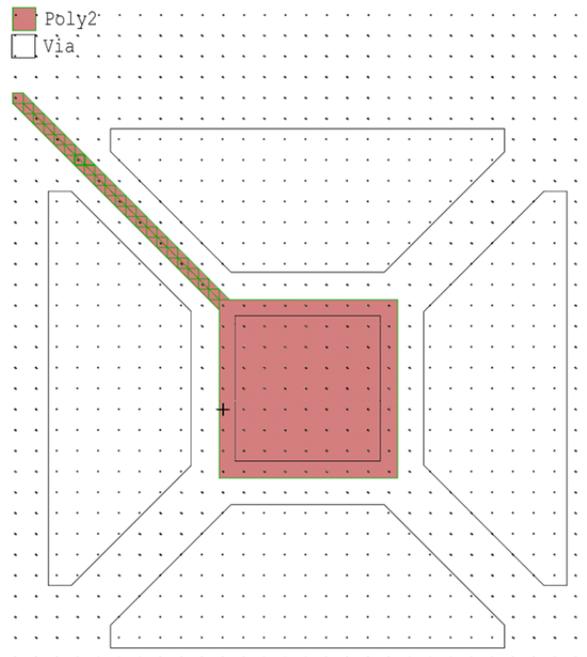


Igualmente, las geometrías necesarias para la micro placa caliente y que definen las capas que la forman son las siguientes:

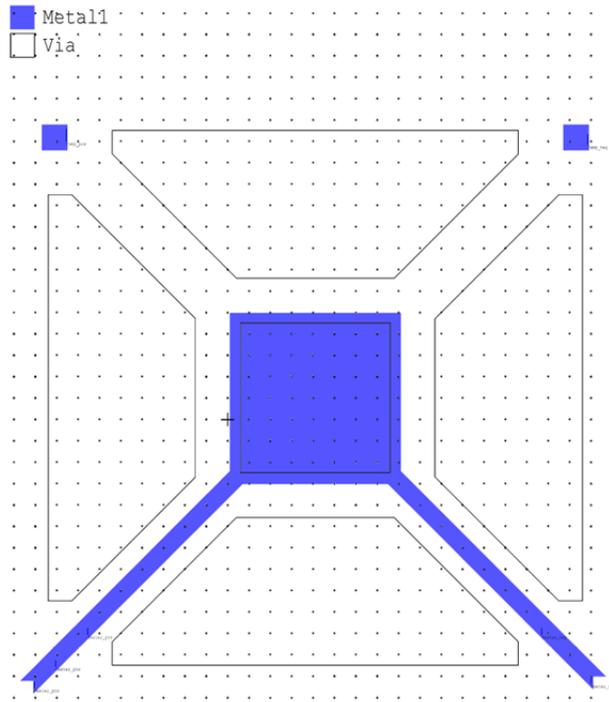
Poly1



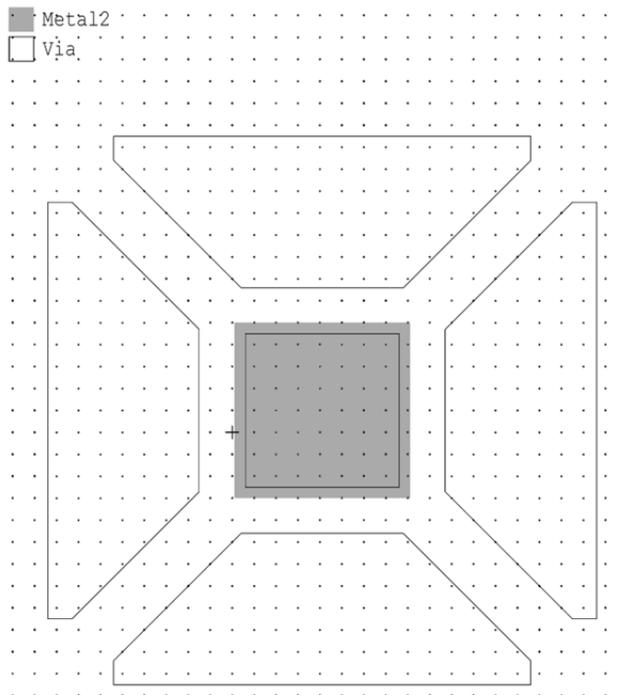
Poly2



Metal1

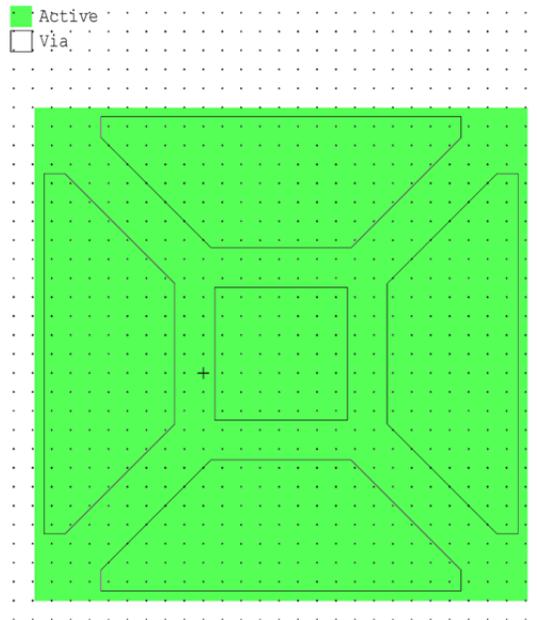


Metal2

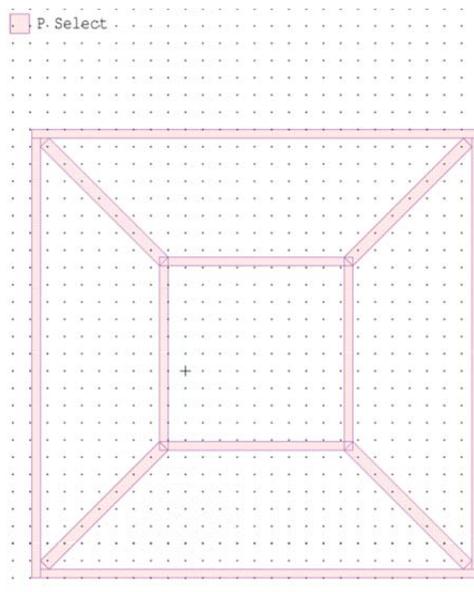


Es necesario incluir en el diseño una protección ante el decapado lateral que siempre se obtiene con los procesos de micro maquinado. Para la estructura presentada, esta protección es una contaminación tipo p del substrato en un marco rodeando el perímetro de la membrana y otro rodeando la micro placa caliente. En el diseño topológico, esta estructura se indica con dos capas:

Active (Definición de área de contaminación *n* o *p*)



P-select (Tipo de contaminación)



El chip fabricado por Mosis en tecnología AMI de $0.8\mu\text{m}$ se muestra en las figuras siguientes, en las que se observan claramente las micro placas calientes y las áreas de silicio expuesto definidas por las capas geométricas descritas anteriormente.

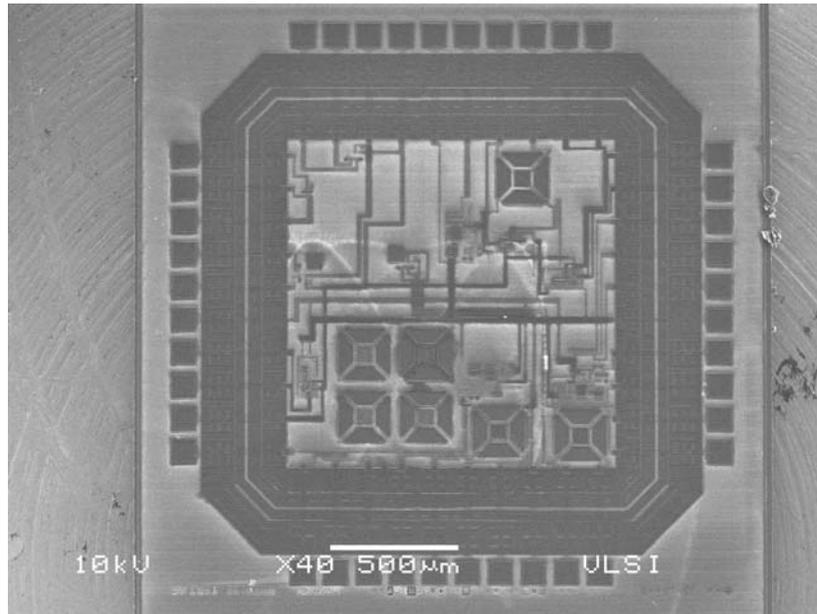


Fig. IV.5. Fotografía SEM del chip fabricado

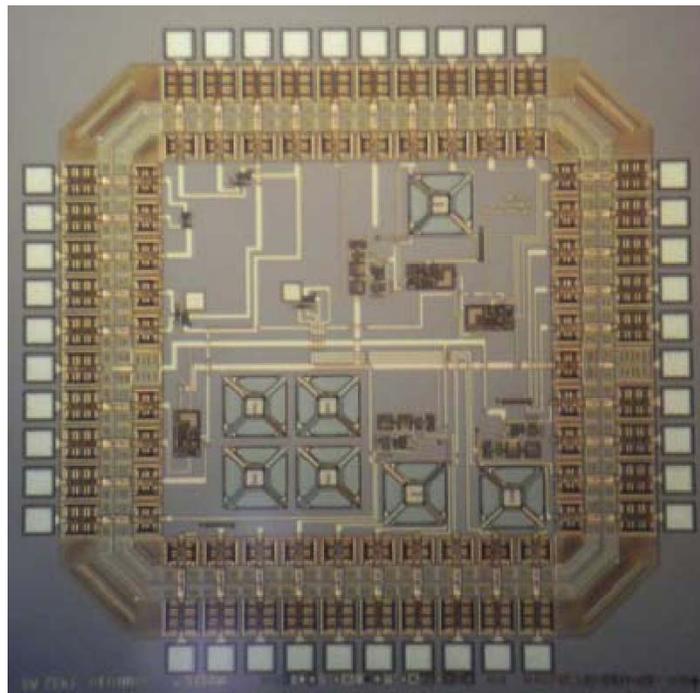


Fig. IV.6. Fotografía en microscopio óptico del chip fabricado.

La solución escogida de TMAHW puede ser modificada de tal forma que presente esta selectividad, aunque es un proceso complejo [19]. Se han utilizado diversas formulaciones con resultados muy variados, siendo la más estable una solución de TMAH y agua al 5.5%, con 43.5 g/l de ácido silícico y 13.6 g/l de APS.

Así mismo, es posible utilizar ceras comerciales cuyo objetivo es recubrir y proteger áreas para evitar el ataque del sustrato con la solución empleada. Como se ha mencionado es necesario tener un pH de 11.5 a 12 para lograr que la solución sea selectiva y no ataque al aluminio, esto sin perder velocidad en el ataque al silicio. El mecanismo que protege al aluminio sugiere que se forma un recubrimiento en la superficie de este material debido a los aditivos agregados al TMAH. Este recubrimiento es resistente a la solución, por lo que la tasa de ataque al aluminio es reducida considerablemente [20, 21].

Sin embargo, el resultado del proceso de decapado mediante TMAH con agregados para aumentar la selectividad hacia el aluminio es muy variable y en general no es repetitivo. Debido a esta característica, se ha realizado una técnica alternativa de micro maquinado junto con modificaciones geométricas a la micro placa caliente, lo cual se describirá más adelante.

Estos cambios a la geometría están orientados a reducir en lo posible el tiempo que el chip permanecerá dentro de la solución decapante [22]. Las modificaciones están basadas en las características cristalográficas del sustrato y la nueva geometría propuesta será aplicada en diseños posteriores. Se piensa que reducir el tiempo de maquinado junto con el uso de cera permitirán lograr un proceso repetible y confiable para la fabricación de la micro placa.

IV.7 Proceso del maquinado.

Dentro de las ventajas del TMAH se encuentra el manejo relativamente sencillo de la solución. El montaje de un sistema para realizar este tipo de decapados es simple, comprendido por un recipiente que pueda ser calentado a la temperatura de proceso, un

medio para llevarlo a esa temperatura, agitación, condensación de la solución y soporte de las muestras.

Para el caso que se presenta, se utilizó un baño marca Nichiryo con rango de temperatura de 5°C a 100°C, un vaso de cuarzo con condensador y un soporte de teflón. En este soporte se han hecho ranuras en las que se colocan portaobjetos de vidrio. Estos equipos y materiales se muestran en la figura IV.7.

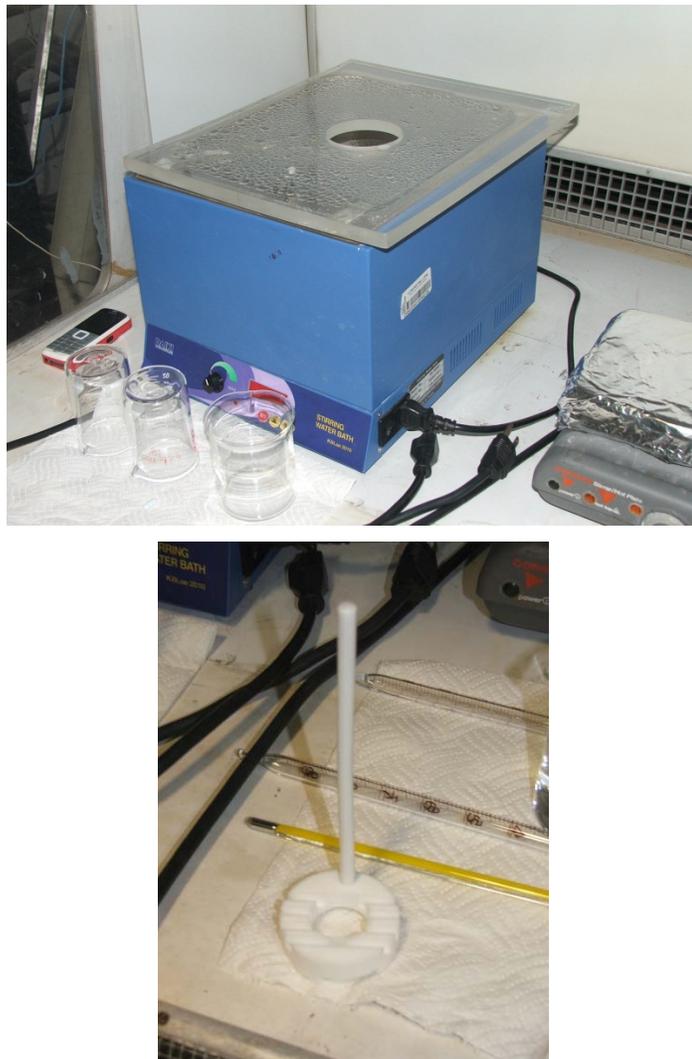


Fig. IV.7. Baño y soporte para muestras.

En estos portaobjetos se ha pegado el chip a procesar mediante cianoacrilato, secados a 60 °C durante una hora. Con este método el chip permanece adherido sin

problema al portaobjetos durante el proceso de decapado dentro de la solución y facilita su manejo; el montaje se muestra en la figura IV.8.

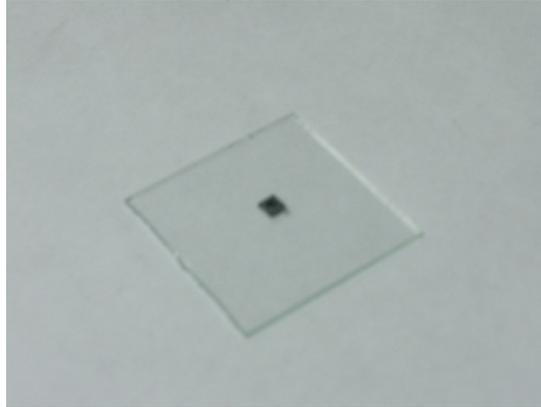


Fig. IV.8. Chip adherido al soporte de vidrio.

Siguiendo el procedimiento descrito detalladamente en el Anexo A, se calienta la solución en el baño y cuando se comprueba que se alcanzó la temperatura deseada, se introduce la muestra previamente preparada. En este mismo procedimiento se indica la forma de manejar la muestra posteriormente al maquinado para su caracterización, alambrado o empaquetado.

IV.8 Resultados del decapado.

Inicialmente, las muestras resultaban poco maquinadas y con extensos daños. Las superficies del sustrato mostraron una rugosidad inconsistente con los resultados reportados, ya que no presentaban las superficies dictadas por la cristalografía. Los daños en algunos casos consistieron en el deterioro de alguno de los soportes de la membrana.

Estos soportes están rodeados de SiO_2 , por lo que debería de estar completamente protegidos contra la solución decapante. Es posible que en esos soportes en particular se presentó un defecto en la fabricación de dichas estructuras que permitiera a la solución entrar en contacto con los materiales embebidos en los soportes, dañándolos y debilitándolos.

La figura IV.9 muestra los resultados obtenidos en la primera etapa de estudio del decapado.

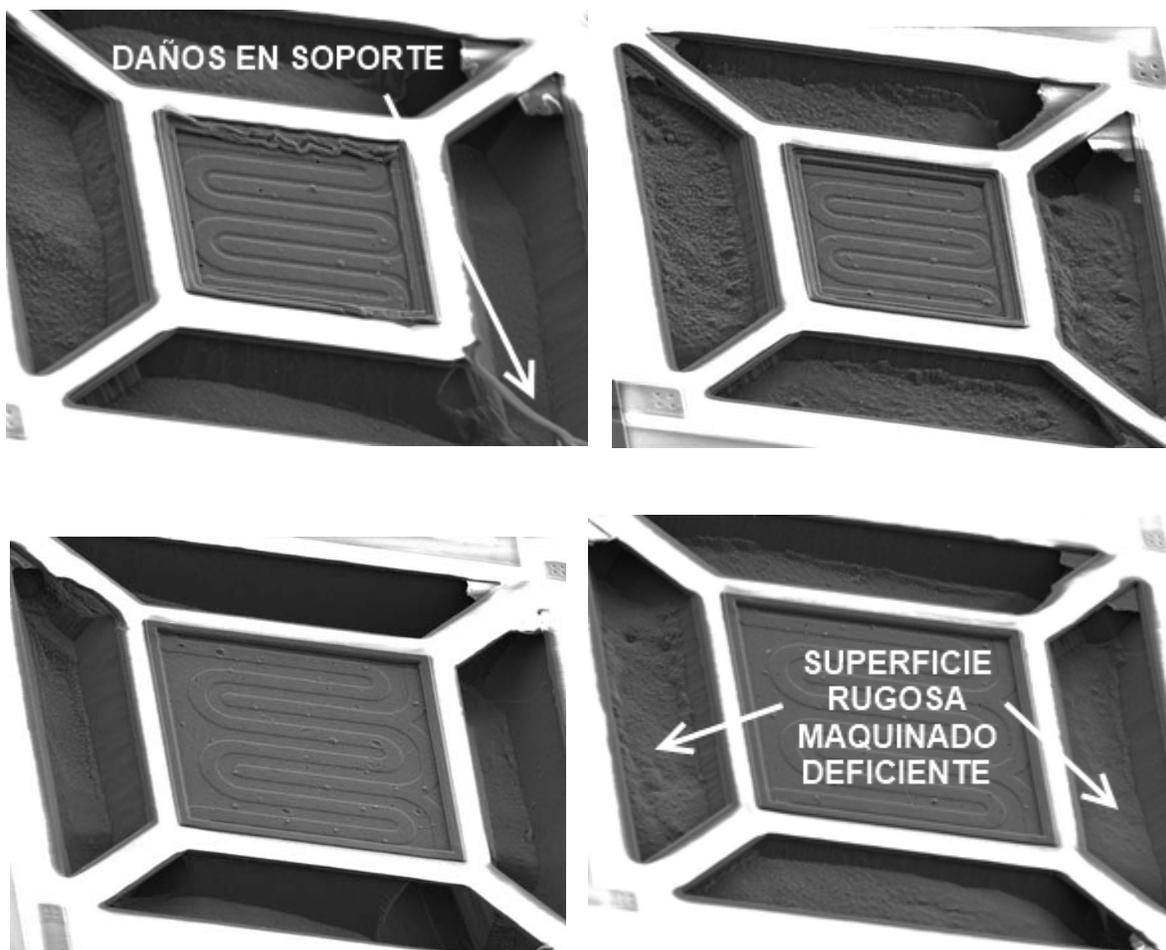


Fig. IV.9. Primeras pruebas de decapado con daños extensos.

Después de una serie de pruebas de maquinado en substratos de silicio con una capa de SiO_2 para mejorar el soporte de las muestras y el procedimiento de maquinado, los resultados de procesar un chip fueron más prometedores, con un decapado definido correctamente con las orientaciones cristalográficas, consistente incluso con las simulaciones realizadas anteriormente.

Estas pruebas derivaron en una serie de modificaciones al procedimiento de maquinado para completarlo adecuadamente, ya que el manejo de muestras de silicio oxidado es diferente al manejo de un chip. Las primeras son más fáciles de manipular debido a su tamaño, mientras que el chip requiere de cuidados y herramientas extras,

además de pasos de limpieza previos al maquinado que en otros casos no son necesarios. La figura IV.10 muestra estos resultados.



Fig. IV.10. Decapado correcto.

Estas muestras presentaban daños en el aluminio expuesto en mayor o menor medida, pero suficiente para que resultara afectada la capa de polisilicio 2 en la micro placa caliente, lo cual la vuelve inútil para los propósitos de este trabajo.

IV.9 Técnica alternativa.

Como se ha mencionado, la baja repetibilidad del micro maquinado con TMAH presenta un obstáculo a salvar. Durante una estancia en el Centro Nacional de Microelectrónica-Instituto de Microelectrónica de Barcelona (INM-CNM) en España, se procesaron dos chips conteniendo micro placas calientes listas para el maquinado mediante Decapado por Iones Reactivos (RIE).

Éstos fueron procesados de forma isotrópica y se logró liberar a los soportes de la micro placa y debido al ataque lateral, la masa de sustrato bajo la micro placa se ha reducido. Las figuras IV.11, IV.12 y IV.13 muestran imágenes SEM de dicho proceso.

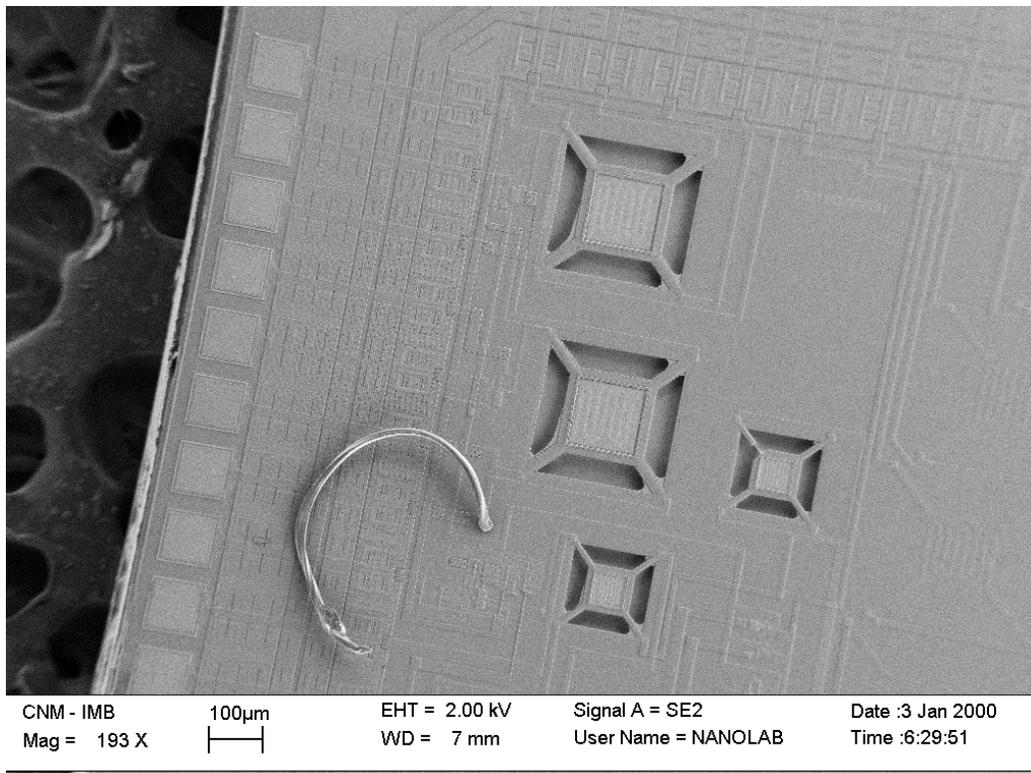


Fig. IV.11. Decapado isotrópico con RIE.

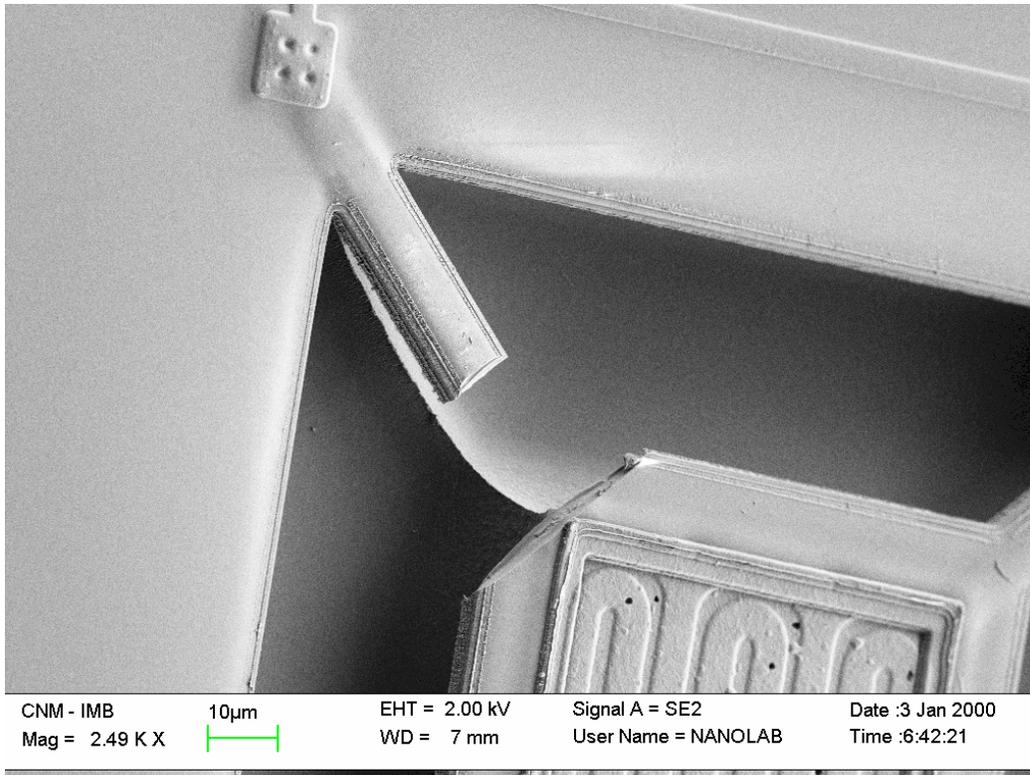


Fig. IV.12. Detalle del decapado isotrópico.

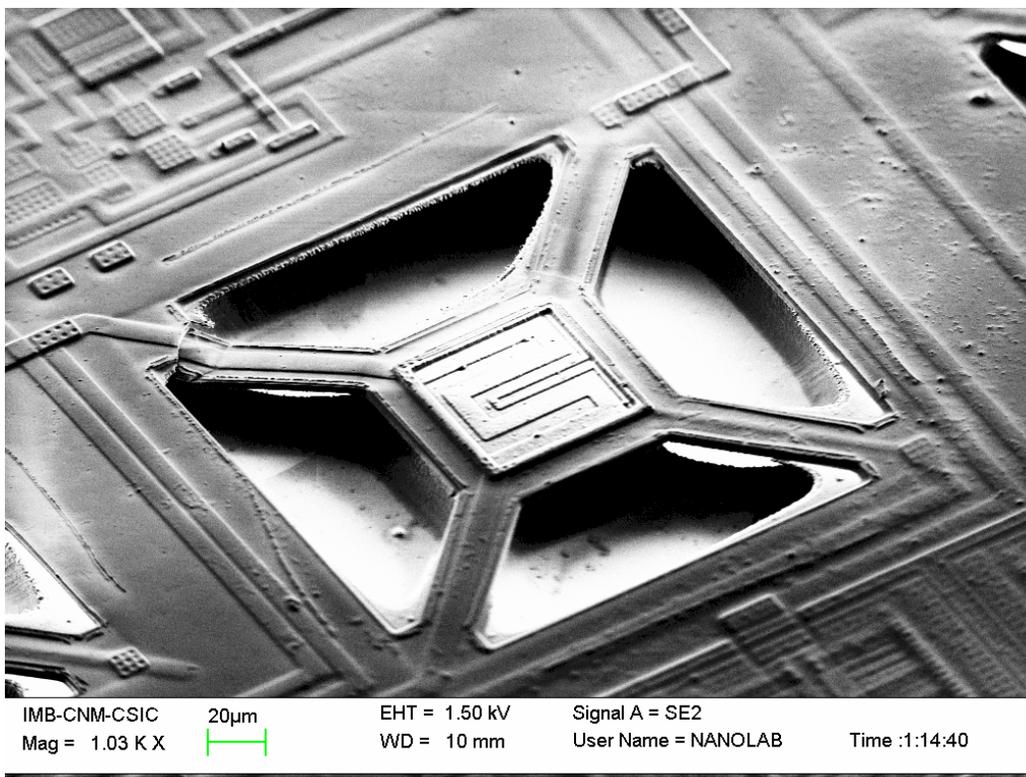


Fig. IV.13. Micro placa caliente decapada con RIE.

Partiendo de estas estructuras procesadas de esa manera, si se realiza entonces un decapado anisotrópico posterior con TMAH, se espera que la micro placa quede completamente liberada.

Dados los resultados aquí presentados, se requirió de un estudio específico para optimizar el proceso de micro maquinado, con el objetivo de reducir el tiempo de exposición del sustrato, pero que permitiera la liberación completa de la micro placa, mediante el empleo del TMAH. Este estudio se presenta en el siguiente capítulo.

IV.10 Depósito de la película sensora.

Este paso es el último necesario para completar el sistema que compone al sensor para gas MEMS. El método de depósito de la película sensora dependerá de su tipo, calidad y materiales; las opciones posibles son las siguientes:

- Rocío químico [23]
- Sol-Gel
 - Spin coating[24], Dipping [25], Goteo[26]
- Sputtering
- Descarga Incandescente

Dependiendo de la película usada, puede ser requerido un recocido. Debido a que el circuito integrado no debe calentarse más allá de 400 °C por los posibles daños causados a los componentes de aluminio dentro del chip, el recocido usado en los métodos termoquímicos queda limitado si se piensa calentar todo el chip. Los primeros dos métodos son más baratos y de implementación más sencilla que los demás.

Debido a que este sensor cuenta con una micro placa caliente cuya temperatura puede ser controlada, es posible realizar un recocido local, sólo en el área de la membrana, logrando las características deseadas para la película a usar. Principalmente se piensa en películas de óxido metálico conductor, basadas en óxido de zinc, de estaño o hierro, con impurificaciones que mejoran el desempeño de dichas películas.

IV.11 Conclusiones del Capítulo.

La fabricación de un dispositivo de esta clase conlleva una serie de procesos que no pueden ser todos controlables. Muchos factores durante la integración CMOS caen en esta categoría, por lo que se hace necesario aprovechar las reglas de diseño determinadas por la fábrica para lograr el diseño deseado. Las limitaciones que esto presenta obligan a innovar y definir alternativas para que al final del proceso se tenga un resultado útil. Los post-procesos necesarios para realizar un sistema como el presentado también deben ser analizados y probados para asegurar que sean compatibles entre sí.

En las fases intermedias de desarrollo de un SoC como el presentado, las pruebas de fabricación toman una parte importante del tiempo, ya que la variedad de muestras disponibles define el número de estudios que permitan afinar la técnica a utilizar. Estos análisis conjuntan también un valioso acervo de experiencias que derivan en procedimientos y manuales para realizar estos procesos en dispositivos posteriores que requieran la aplicación de las técnicas descritas.

La variedad tecnológica de procesos disponibles que permiten lograr un mismo fin hace que este análisis sea también un trabajo complejo, que deberá ser realizado durante la optimización de sistemas y diseños como el aquí descrito.

IV.12 Referencias

1. Tilmans, H.A., et al., *CMOS foundry-based micromachining*. J. Micromech. Microeng. **6**(1): 1996, p. 122.
2. Baker, R.J., H.W. Li, and D.E. Boyce, *CMOS Circuit Design, Layout, and Simulation*. 2nd ed: Wiley-IEEE Press. 2007.
3. Wolf, S. and R.N. Tauber, *Silicon Processing for the VLSI Era: Process Technology*. Vol. 1: Lattice Press. 1999.
4. Haris, M. and Q. Hongwei. *A CMOS-MEMS piezoresistive accelerometer with large proof mass*. in *Nano/Micro Engineered and Molecular Systems (NEMS), 2010 5th IEEE International Conference on*. 2010, p. 309-312.
5. Huikai, X. and G.K. Fedder. *A CMOS-MEMS lateral-axis gyroscope*. in *Micro Electro Mechanical Systems, 2001. MEMS 2001. The 14th IEEE International Conference on*. 2001, p. 162-165.
6. Oz, A. and G.K. Fedder. *CMOS-compatible RF-MEMS tunable capacitors*. in *Microwave Symposium Digest, 2003 IEEE MTT-S International*. 2003, p. A97-A100 vol.1.
7. Baltes, H., et al. *CMOS MEMS - present and future*. in *Micro Electro Mechanical Systems, 2002. The Fifteenth IEEE International Conference on*. 2002, p. 459-466.
8. Witvrouw, A. *CMOS-MEMS Integration: Why, How and What?* in *Computer-Aided Design, 2006. ICCAD '06. IEEE/ACM International Conference on*. 2006, p. 826-827.
9. Brand, O., Ed. *Advanced Micro & Nanosystems. CMOS-MEMS*. Ed. O. Brand and G.K. Fedder. Vol. 2. WILEY-VCH: Weinheim, Germany. 2005.
10. Stoeber, B. and D. Liepmann, *Arrays of hollow out-of-plane microneedles for drug delivery*. *Microelectromechanical Systems, Journal of*. **14**(3): 2005, p. 472-479.
11. Jin-Chern, C., et al. *Using novel MEMS EEG sensors in detecting drowsiness application*. in *Biomedical Circuits and Systems Conference, 2006. BioCAS 2006. IEEE*. 2006, p. 33-36.
12. Virginia-Semiconductor, I., *Wet-Chemical Etching and Cleaning of Silicon*. *Journal of Crystal Growth*. **22401**(January).
13. O.Tabata. *Anisotropy and Selectivity Control of TMAH*. in *Micro Electro Mechanical Systems, MEMS 98*. Heidelberg , Germany 1998, p. 229 - 233

14. Madou, M.J., *Fundamentals of Microfabrication*. 2nd ed: CRC-Press. 2001, 723.
15. Sullivan, P., B.W. Offord, and M.E. Aklufi, *Tetra-Methyl Ammonium Hydroxide (TMAH) Preferential Etching for Infrared Pixel Arrays*, C.A. Naval Warfare Systems Center San Diego, Editor. Defense Technical Information Center: Ft. Belvoir. 2000.
16. G. T. A. Kovacs, N. I. Maluf, and K.E. Petersen, *Bulk Micromachining of Silicon*. PROCEEDINGS OF THE IEEE. **86**(8): 1998, p. 1536-1551.
17. Hsu, T.-R., *MEMS & Microsystems*. New York, USA: McGraw-Hill. 2002.
18. Seidl, K., et al. *CMOS-based high-density silicon microprobe for stress mapping in intracortical applications*. in *Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), 2010 IEEE 23rd International Conference on*. 2010, p. 35-38.
19. Tabata, O. *pH-controlled TMAH Etchants For Silicon Micromachining*. in *Solid-State Sensors and Actuators, 1995 and Eurosensors IX.. Transducers '95. The 8th International Conference on*. 1995, p. 83-86.
20. G. Yan, et al., *An improved TMAH Si-etching solution without attacking exposed aluminum*. *Sensors and Actuators A: Physical*. **89**(1-2): 2001, p. 135-141.
21. N. Fujitsuka, et al., *Aluminum Protected Silicon Anisotropic Etching Technique using TMAH with an Oxidizing Agent and Dissolved Si*. *R&D Review of Toyota CRDL*. **39**(2): 2004, p. 34-40.
22. Mendoza-Acevedo, S., et al., *Release Optimization of Suspended Membranes in MEMS*, in *Micromachining Techniques for Fabrication of Micro and Nano Structures*, M. Kahrizi, Editor. InTech: Croatia. 2012.
23. Ferro, R., et al., *Gas-sensing properties of sprayed films of (CdO)_x(ZnO)_{1-x} mixed oxide*. *Sensors Journal, IEEE*. **5**(1): 2005, p. 48-52.
24. Schneider, T., et al. *Platinum-doped nanogranular-tin dioxide layers prepared by spin-coating from colloidal dispersions as basis for gradient gas sensor micro arrays*. in *Sensors, 2004. Proceedings of IEEE*. 2004, p. 196-197 vol.1.
25. Kalyan Chakravarthi, M. and B. Bharath. *DIP coated thick films of ZNO and its ethanol sensing properties*. in *Mechatronics and its Applications (ISMA), 2012 8th International Symposium on*. 2012, p. 1-5.
26. Puigcorbé, J., et al., *Thermo-mechanical analysis of micro-drop coated gas sensors*. *Sensors and Actuators A: Physical*. **97–98**(0): 2002, p. 379-385.

V. Rediseño de la Micro Placa Caliente para Optimizar el Maquinado



V. REDISEÑO DE LA MICRO PLACA CALIENTE PARA OPTIMIZAR EL MAQUINADO.

V.1 Introducción.

De los resultados obtenidos del maquinado de la micro placa caliente, se observaron efectos negativos sobre el aluminio expuesto en la superficie del chip, como ya se mostró en el capítulo anterior. Debido a la conveniencia de tener estructuras MEMS en chips CMOS, estos efectos deben ser minimizados en lo posible [1-4]. Los métodos químicos que se han presentado anteriormente y reportados en la literatura [5-7] no han entregado los resultados más convenientes para el propósito de este trabajo, por lo que se han buscado alternativas que reduzcan dicho daño, el cual tiene una importante dependencia del tiempo de proceso en el que el chip se encuentra sumergido en la solución decapante.

Basándose en conceptos cristalográficos y en la manera en la que el TMAH actúa durante el decapado de silicio, la geometría de la membrana suspendida que forma la micro placa caliente afecta el tiempo de maquinado, se obtuvo una mejora usando una geometría específica, comparada con otras opciones. Este conocimiento de la influencia de las características geométricas de los elementos a maquinar ayudará al diseño y a optimizar el proceso de decapado y reducir los posibles daños al aluminio.

V.2 Conceptos básicos.

Como ya se ha mencionado, el proceso con TMAH produce un decapado anisotrópico, en el que diferentes planos cristalográficos son atacados con diferente velocidad. En general, las tasa de ataque para los planos $\{100\}$, $\{110\}$ y $\{111\}$ son las más comunes, aunque otras orientaciones también son útiles durante el proceso [8].

La geometría definida en la máscara que formará la capa protectora del sustrato que no debe ser atacado determinará la forma final del maquinado, por lo que el diseño de la misma debe considerarse cuidadosamente para incluir motivos de compensación que permitan obtener la estructura deseada al concluir el decapado. Una de las características más importantes es la forma en la que el decapado se desarrolla en las esquinas de la geometría, ya sean cóncavas o convexas.

Para el TMAH, cuando las esquinas cóncavas están alineadas con un plano $\{100\}$, el decapado se detendrá cuando las caras con plano $\{111\}$ coinciden, es decir, en el vértice formado por un plano $\{100\}$. Las esquinas convexas generarán planos $\{111\}$ también, pero en el vértice de los planos adyacentes el decapado continúa por debajo de la esquina formada por la máscara, atacando otros planos y liberando la estructura definida de esta forma. La figura muestra un cantiléver donde las esquinas correspondientes se indican [9].

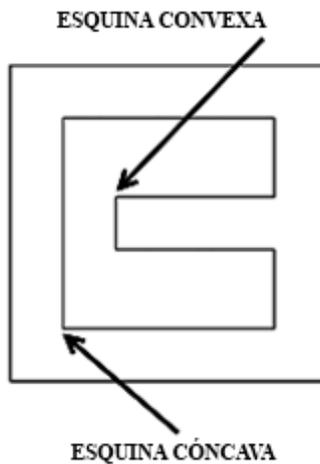


Fig. V.1. Esquinas cóncavas y convexas.

Así mismo, el decapado anisotrópico muestra un efecto de auto alineación respecto a los planos cristalográficos que sólo depende de las dimensiones máximas en 2 ejes de la ventana abierta en la máscara, como se muestra en la figura, donde una abertura irregular resulta en una cavidad bien definida.

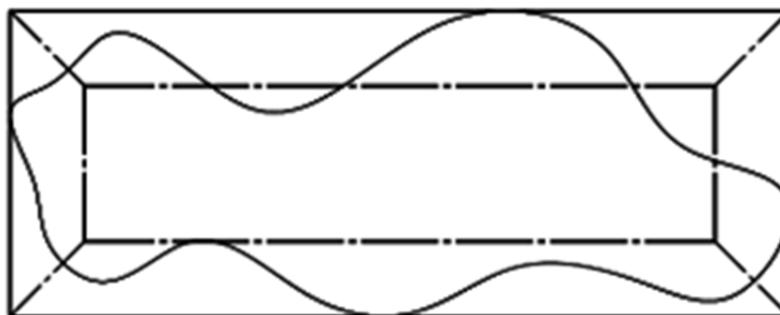


Fig. V.2. Abertura aleatoria y cavidad resultante.

Como se ha mencionado, cuando los motivos se alinean con los planos $\{100\}$, se obtendrán paredes verticales correspondientes a planos $\{100\}$.

V.3 Maquinado de la micro placa tradicional.

La geometría más común para una micro placa en membrana suspendida se muestra en la figura V.3. Se observa que la parte central de la estructura está alineada con los planos $\{110\}$ del sustrato, mientras que los soportes forman un ángulo de 45° y 135° respecto a la referencia horizontal, por lo tanto alineados con las direcciones $\langle 100 \rangle$. Esta inclinación permite que otros planos queden expuestos a la solución decapante, acelerando el proceso y liberando los soportes.

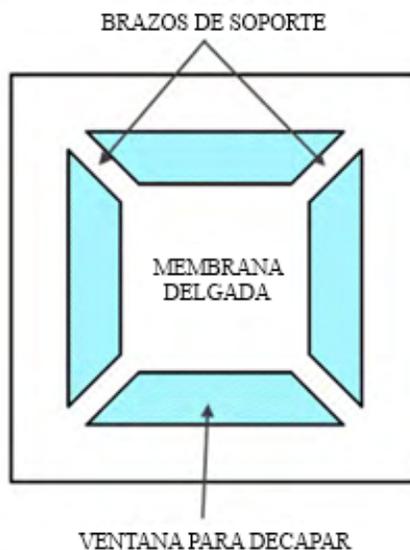


Fig. V.3. Membrana suspendida tradicional.

Sin embargo, después de este punto, la velocidad del decapado decae, pues la parte central de la membrana es alcanzada, delimitada por planos $\{111\}$, con la menor tasa de ataque. En este momento el decapado procede como con una esquina convexa, decapándose por debajo de la máscara atacando los planos que se generan en la esquina.

Por lo tanto, analizando la geometría y los principales planos expuestos generados, existen alternativas en las que se logren planos expuestos con una mayor tasa de ataque. Por ejemplo, la reducción de planos $\{111\}$ expuestos tendrá como consecuencia una reducción del tiempo de decapado.

Con este objetivo, se estudiaron alternativas geométricas para el diseño de la membrana suspendida, primero mediante simulación y posteriormente con experimentos.

V.4 Simulaciones de decapado.

Las características consideradas para este estudio fueron a) el ancho de los soportes, b) dimensiones de la membrana y c) orientación de la membrana respecto a los planos cristalinos. Usando el software AnisE de Intellisuite, se analizaron las modificaciones a estas características y sus efectos en el maquinado.

La geometría base (A) para la membrana suspendida se muestra en la figura V.4, con una relación simple entre las dimensiones de sus diferentes elementos. Para las simulaciones se consideró un sustrato de silicio orientación $\{100\}$ y el material de máscara fue exclusivamente dióxido de silicio.

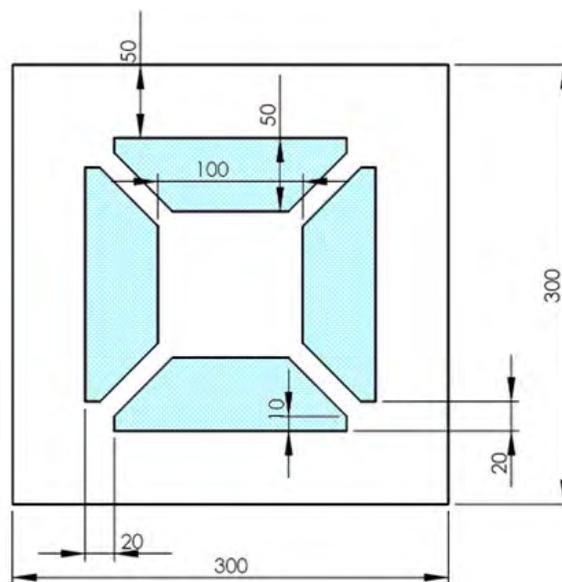


Fig. V.4. Dimensiones de la membrana suspendida base, denominada Geometría A.

Primero, si el ancho de los soportes se incrementa, se reducirá el traslape necesario entre las áreas decapadas por debajo de los soportes, lo cual permite que la membrana sea liberada. De otra forma, sólo se obtendrán cuatro cavidades rectangulares separadas. Debido al decapado lateral que siempre existe, este traslape se puede mantener al mínimo, garantizando que los soportes serán liberados. Este traslape se muestra en la figura V.5 como las zonas mas oscuras.

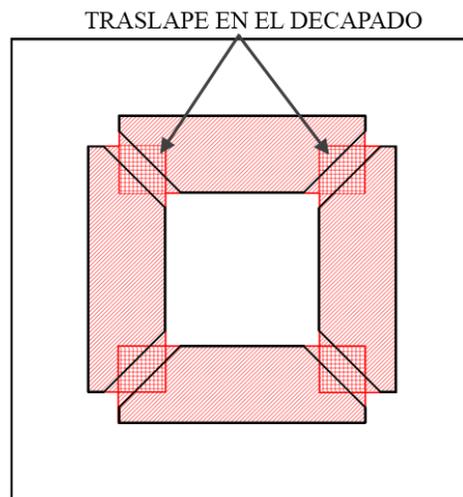


Fig. V.5. Traslapes en la membrana base.

Un decapado por 102 minutos se determinó para obtener una membrana completamente liberada de acuerdo con la simulación para la geometría A, con una profundidad de la cavidad de $\sim 80 \mu\text{m}$. En esta geometría, el traslape se extiende sólo en los soportes. Cuando éstos son liberados, el substrato bajo la membrana presenta planos $\{111\}$ a la solución decapante, con las mismas dimensiones de la membrana.

Por lo tanto, se concluye que los planos generados bajo las esquinas del substrato y bajo la membrana, son los contribuyentes principales del decapado, ya que los planos mencionados anteriormente tienen una tasa de ataque reducida.

Considerando esto, se probó otra geometría (geometría B) que incluye traslapes importantes y evita características geométricas paralelas o perpendiculares a la dirección

$\langle 111 \rangle$ que generaría planos $\{111\}$. Se esperaba una reducción del tiempo de maquinado con estas modificaciones, mostradas en la figura V.6.,

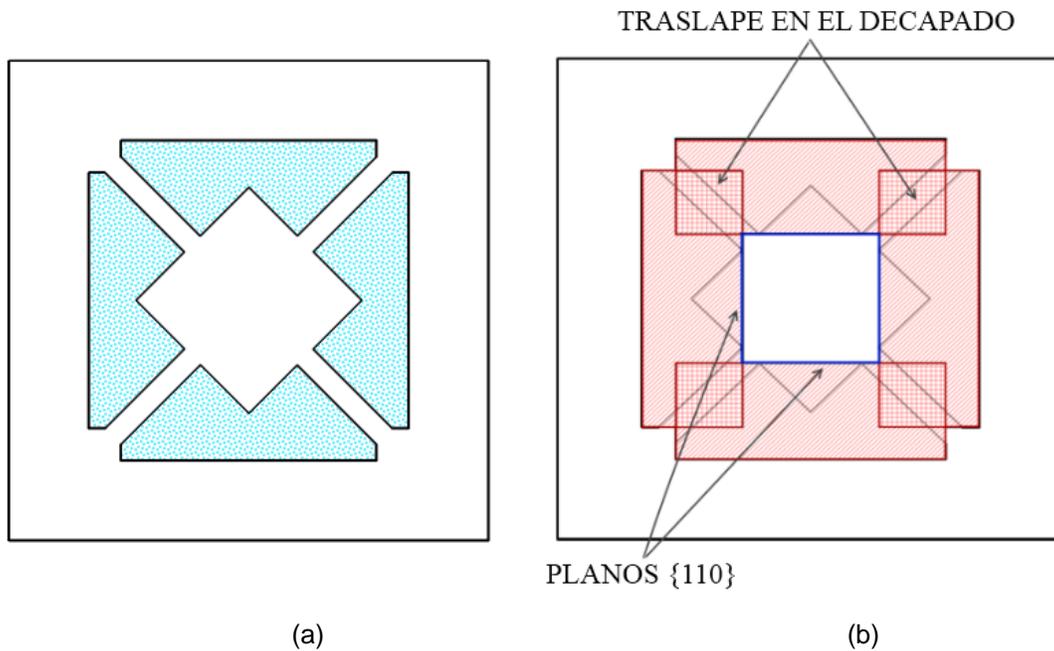


Fig. V.6. a) Geometría B. b) Traslapes en la geometría B.

Como se observa, la parte central de la membrana fue girada 45° con respecto al plano $\{110\}$ de referencia, manteniendo la misma área. El resultado obtenido de la simulación de esta nueva geometría tuvo una reducción del 18% en el tiempo de maquinado ya que la membrana fue liberada en 82 minutos.

Una particularidad de esta geometría es la reducción de planos $\{111\}$ expuestos, ya que con esta alternativa, los bordes paralelos o perpendiculares a los planos $\{110\}$ se evitaron y se redujo el volumen de silicio a decapar debajo de la membrana después de la liberación de los soportes.

Se exploró Una geometría distinta mostrada en la figura V.7 (geometría C). La diferencia con las anteriores es que no sólo la membrana esta girada 45° con respecto al plano de referencia si no que los soportes están alineados con los bordes de la membrana. Después de la simulación, se obtuvo una reducción del 27% en el tiempo de decapado con respecto a la Geometría A, liberándose en 75 minutos.

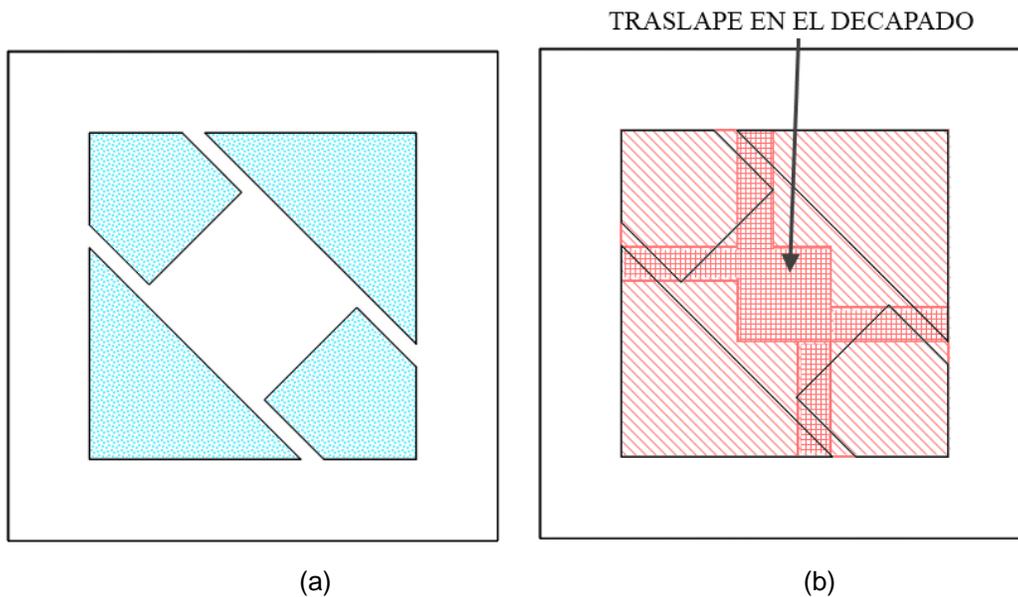


Fig. V.7. a) Geometría C. b) Traslapes en la geometría C.

La razón del aumento de la eficiencia en el decapado se atribuye a que esta geometría tiene menos planos $\{111\}$ generados en el perímetro de la membrana, permitiendo que el silicio del substrato sea decapado desde el principio del proceso, no hasta que los soportes han sido liberados, como se muestra en los traslapes de la figura anterior.

De acuerdo con la simulación, la cavidad tiene aproximadamente $56 \mu\text{m}$ de profundidad. La diferencia de profundidades entre las geometrías puede ser ocasionada por la exposición de planos $\{110\}$ más grandes que junto con otros tienen mayores tasas de ataque.

Una alternativa a esta última geometría se presenta en la figura V.8, en la que se agregaron soportes adicionales a los presentes en la geometría C. Esta variante, identificada como geometría D, tiene los soportes extras para dar soporte mecánico extra a la membrana. Después de la simulación, esta modificación no mostró mejoras en el tiempo de decapado, ya que se liberó con las mismas condiciones que la geometría C, aunque las diferencia de áreas con traslapes son evidentes en la figura.

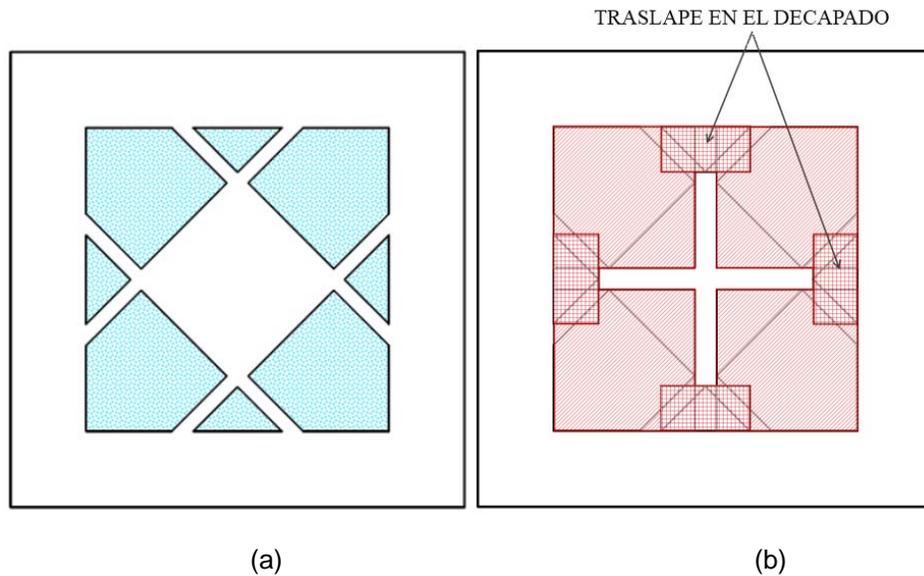


Fig. V.8. a) Geometría D. b) Traslapes en la geometría D.

Aunque no hay traslapes al centro de la membrana, sólo permanece un pequeño volumen de sustrato bajo la membrana, el cual puede ser decapado rápidamente debido a su poca sección y a los diferentes planos presentes en los vértices de la membrana y los soportes.

V.5 Simulaciones mecánicas.

Mediante análisis por elemento finito hecho con COMSOL se simuló el comportamiento mecánico de las membranas suspendidas en las diferentes geometrías descritas anteriormente. Como objetivo principal se definió determinar la deformación y la tensión que existe en estas geometrías alternativas. Con este fin los extremos de los soportes se establecieron como fijos e inmóviles mientras que la estructura restante se estableció como libre de movimientos para hacer evidentes los efectos del peso de las membranas sobre ellas mismas.

La geometría A es la más usada y reportada, por lo que sirve como referencia para la comparación. En el capítulo de Simulaciones, se ha descrito ampliamente el análisis realizado a esta geometría, ya que es la propuesta para el sensor de gas presentado. Las demás geometrías serán comparadas aquí para resaltar la importancia del rediseño y sus

efectos sobre el maquinado. Para esta simulación se analizarán la deformación y la tensión de Von Mises para determinar alguna falla mecánica en alguna estructura, por lo que se usará el peso correspondiente a cada membrana como estímulo, así como el material del que están hechas (SiO_2) y su espesor ($\sim 390\text{nm}$).

Para la geometría B se obtuvo una deformación máxima de $7.38 \times 10^{-7} \mu\text{m}$ y una tensión de Von Mises de $1.523 \times 10^{-5} \text{MPa}$, valor que está muy por debajo del límite elástico para el SiO_2 . Los resultados se muestran en la figura V.9.

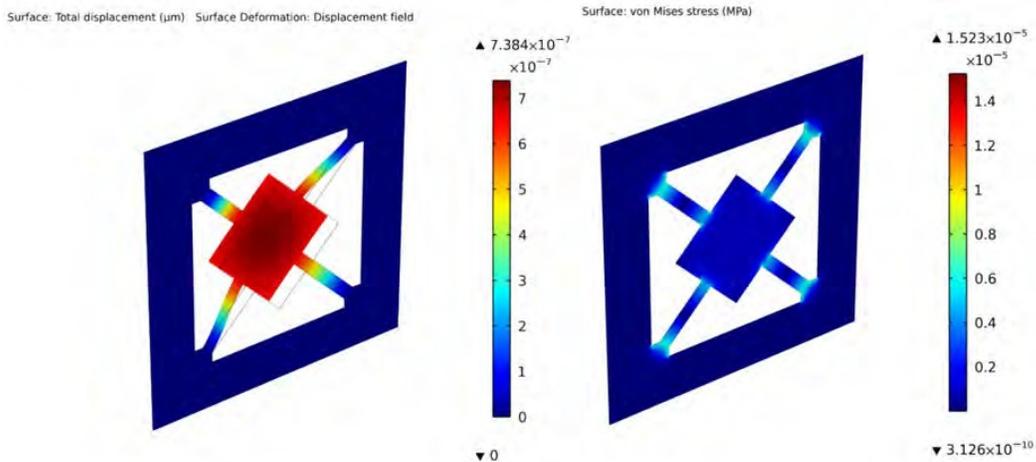


Fig. V.9. Deformación y tensión máximas en Geometría B.

La geometría C presentó una deformación de $2.952 \times 10^{-5} \mu\text{m}$ con una tensión máxima de $1.161 \times 10^{-3} \text{MPa}$, indicando un buen diseño desde la perspectiva mecánica. La figura V.10 muestra los resultados de esta simulación.

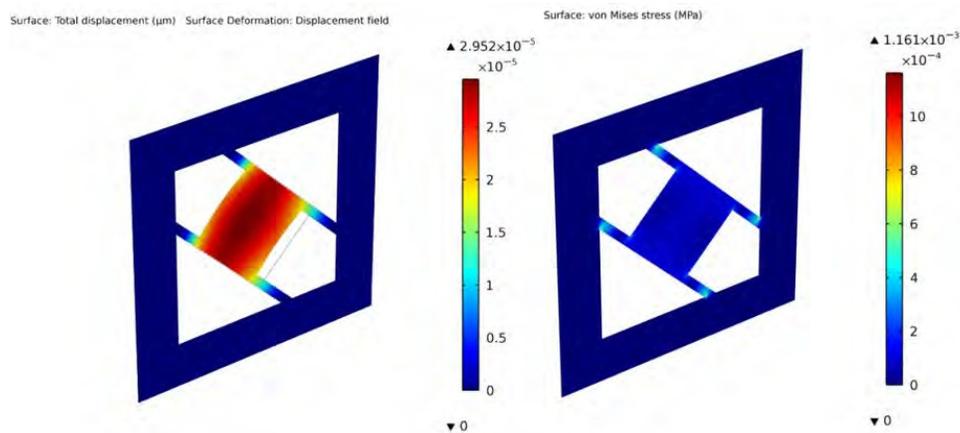


Fig. V.10. Deformación y tensión máximas en Geometría C.

La geometría D, con los soportes extras, muestra una deformación máxima de $2.403 \times 10^{-4} \mu\text{m}$ una tensión máxima de $0.01 \times 10^{-3} \text{ MPa}$ localizada cerca de las uniones de los soportes al marco exterior. La figura V.11 muestra los resultados obtenidos tras la simulación con COMSOL.

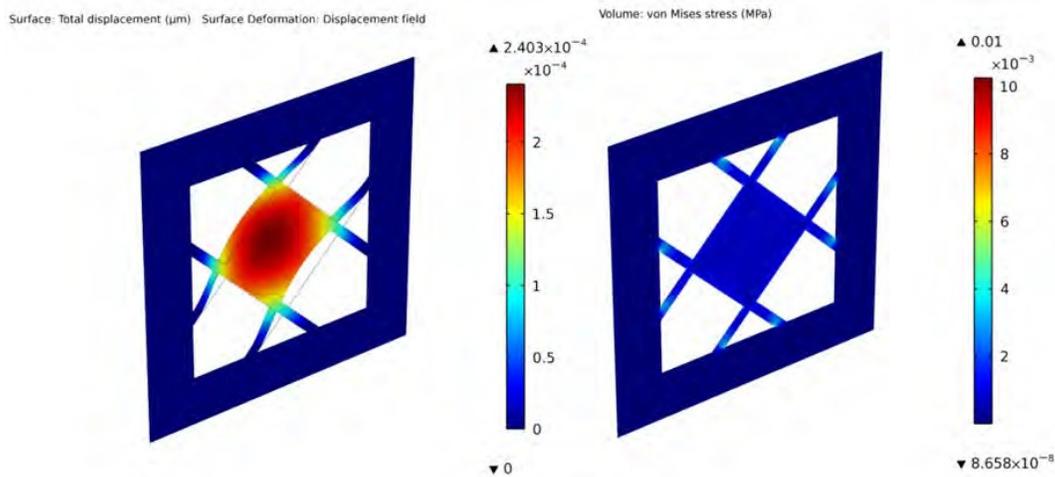


Fig. V.11. Deformación y tensión máximas en Geometría D.

Se puede concluir entonces que la geometría D muestra la mayor deformación pero la mínima tensión, por lo que es la más adecuada para el rediseño de la micro placa caliente.

V.6 Resultados experimentales.

Se prepararon substratos de silicio con una capa de dióxido de silicio de $\sim 390 \text{ nm}$. Las geometrías de prueba anteriores A, C, y D fueron definidas con fotolitografía. Después se realizó un decapado en 100 ml de solución TMAW al 10% a 80°C con 1.36 g de APS, en periodos de 25, 50, 75 y 102 minutos.

Las muestras fueron revisadas con microscopio óptico para verificar el decapado. La figura V.12 muestra el avance del decapado de la geometría A en la que la forma característica del substrato está presente al centro de la membrana, causada por el ataque anisotrópico (extremo izquierda), para los tiempos de decapado de 25, 50, 75 y 102 minutos.

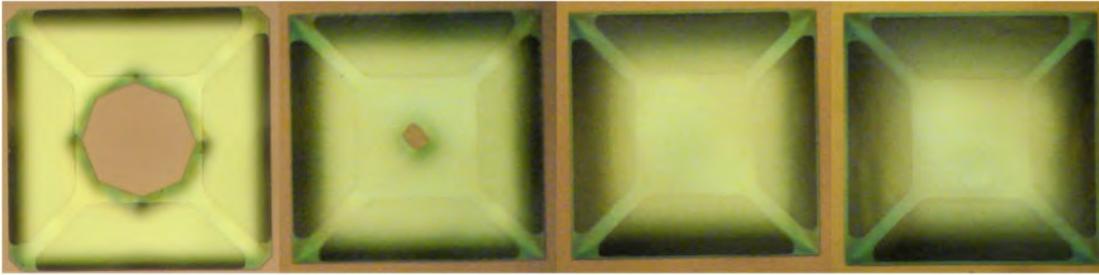


Fig. V.12. Maquinado de la geometría A.

Para la geometría C, la figura V.13 muestra el progreso del decajado para 25, 50 y 75 minutos, donde se forman los planos característicos.

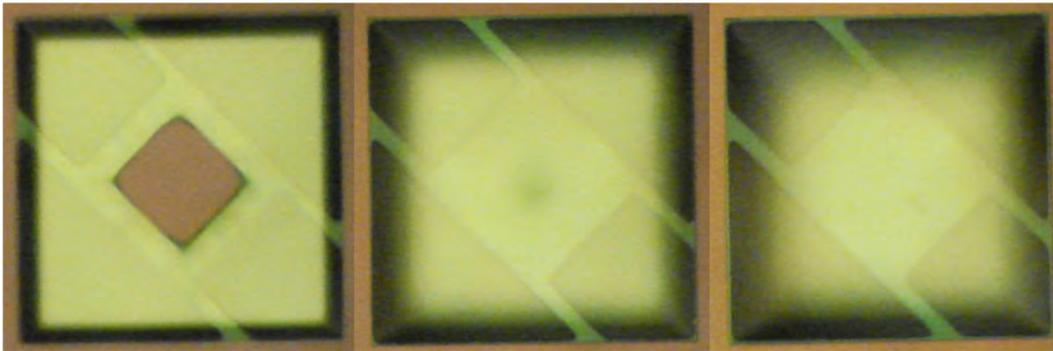


Fig. V.13. Maquinado de la geometría C.

De la misma forma se procesó la geometría D en TMAH, la figura V.14 muestra fotografías tomadas a las muestras hechas en los tiempos especificados y se observa la rápida formación del fondo plano buscado.

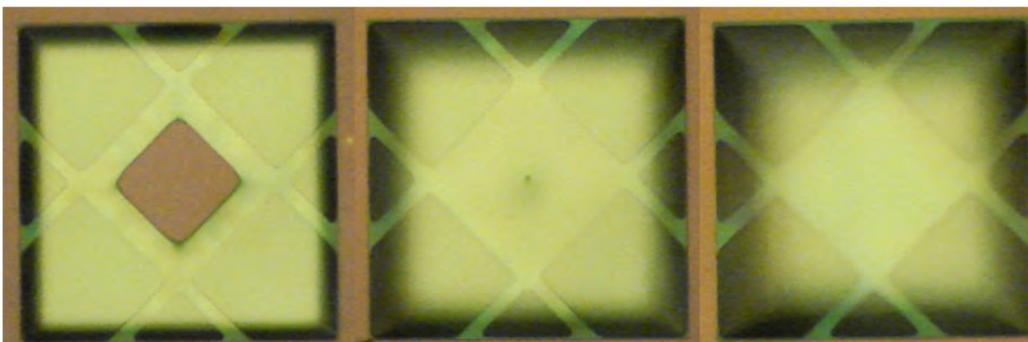


Fig. V.14. Maquinado de la geometría D.

Los resultados del decapado experimental son discutidos y comparados con las simulaciones previas (izq.) e imágenes SEM (der.).

Geometría A.

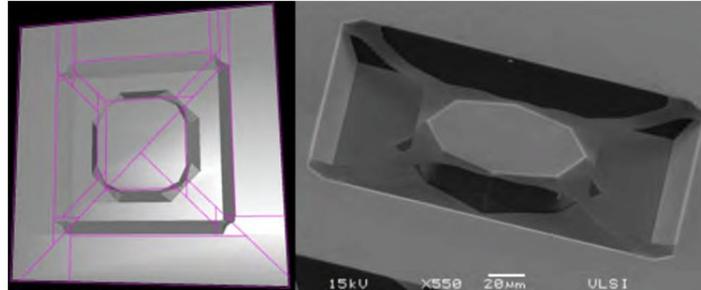


Fig. V.15. 25 minutos. Aquí puede verse que los soportes están completamente liberados pero el substrato bajo la membrana se comienza a atacar en las esquinas.

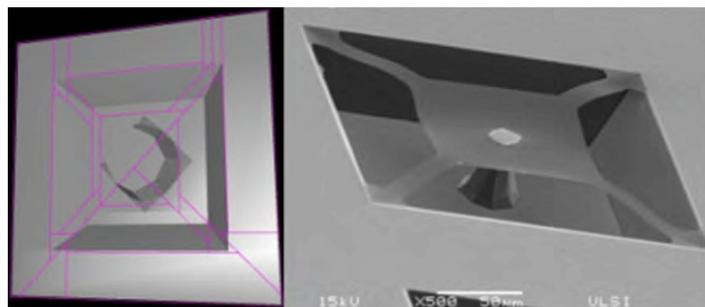


Fig. V.16. 50 minutos: Posteriormente, los planos $\{111\}$ generados por líneas paralelas o perpendiculares a planos $\{110\}$ están completamente reducidos, pero existe contacto entre la membrana y el substrato.

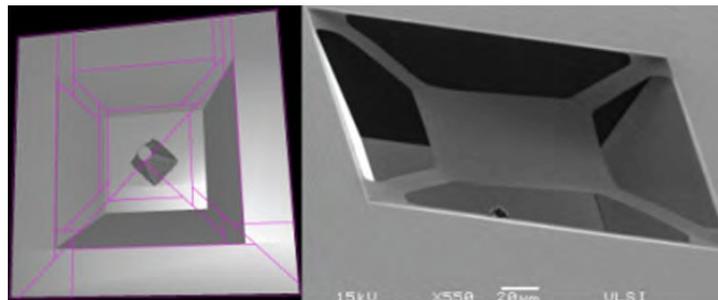


Fig. V.17. 75 minutos: Después de este tiempo, se forma una pirámide cuadrangular en el centro de la membrana, con planos que se decaparán totalmente.

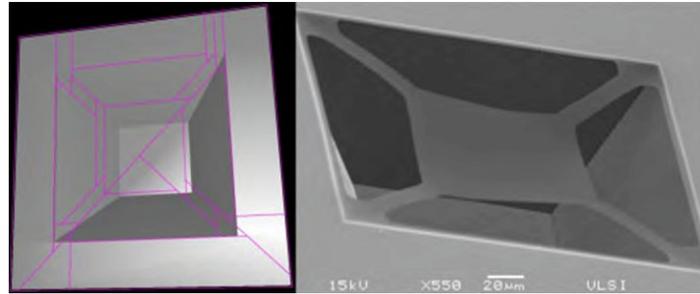


Fig. V.18. 102 minutos: Finalmente, la membrana ha sido liberada totalmente con una cavidad de fondo plano (100).

Geometría C.

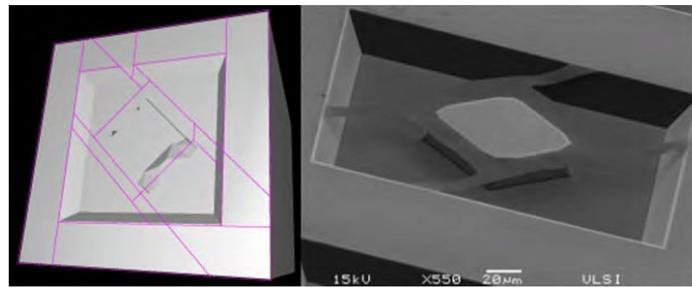


Fig. V.19. 25 minutos: Con esta geometría, inicialmente los soportes son liberados exponiendo planos {110} con alta tasa de ataque.

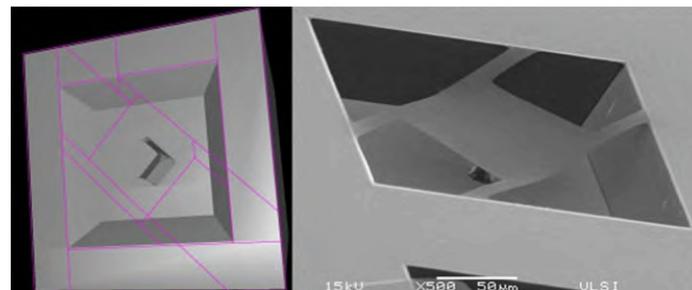


Fig. V.20. 50 minutos: Se observa una columna de caras {110} se forma al centro de la membrana, por lo que el decapado continúa fácilmente.

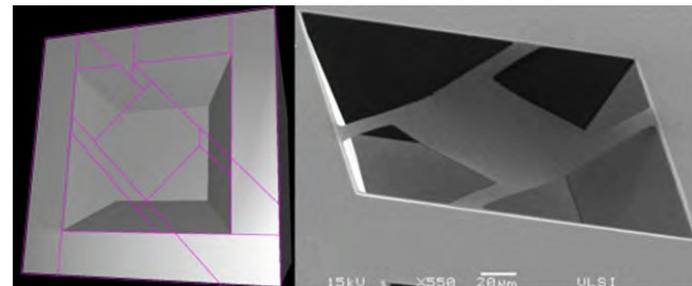


Fig. V.21. 75 minutos: Finalmente la membrana ha sido completamente liberada, la cavidad tiene un fondo liso.

Geometría D.

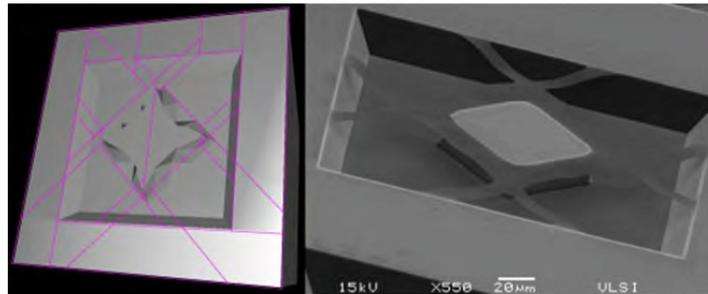


Fig. V.22. 25 minutos: Con esta geometría, los soportes son liberados pero se forma una estructura compleja debajo de la membrana con esquinas convexas que reducen la velocidad del maquinado.

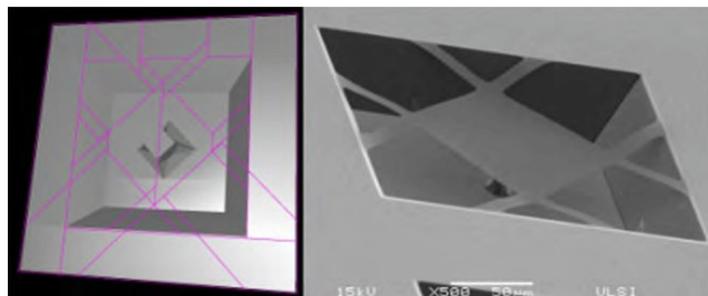


Fig. V.23. 50 minutos: En el sustrato de esta geometría se observa una columna de caras {110} tal como en la geometría anterior, con tasas de ataque altas.

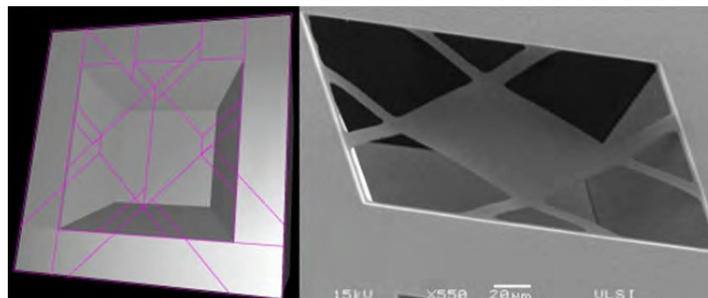


Fig. V.24. 75 minutos: La membrana ha sido completamente liberada, la cavidad tiene también un fondo liso.

Comparando las imágenes anteriores, los resultados de la simulación y los experimentos son muy parecidos, aunque hay una diferencia entre el tiempo de maquinado predicho por la simulación y el experimental, causado muy probablemente por características del maquinado no consideradas por el software AnisE respecto a las condiciones reales de proceso, variaciones de temperatura, pH de la solución y la

saturación de la misma durante el decapado. Sin embargo, este último sigue el comportamiento mostrado por las simulaciones. La tabla V.1 condensa estas diferencias.

DECAPADO DE MEMBRANAS SUSPENDIDAS			
Estructura	Tiempo de decapado (minutos)		
	Simulado	Experimental	Diferencia
Geometría A	102	~90	-11.7%,
Geometría C	75	~72	-4%
Geometría D	75	~72	-4%

Tabla V.1. Resumen de la comparación entre resultados de decapados por simulación y experimentales.

V.7 Layout propuesto para la micro placa caliente.

De estos resultados se ha diseñado un nuevo layout para la micro placa caliente usada en el sensor de gas, basada en la geometría D descrita anteriormente. Esta micro placa contendrá los mismo elementos que el diseño anterior. La figura V.25 muestra el layout propuesto en el que se definen las áreas donde se debe garantizar que el substrato de silicio queda expuesto a los decapantes [10].

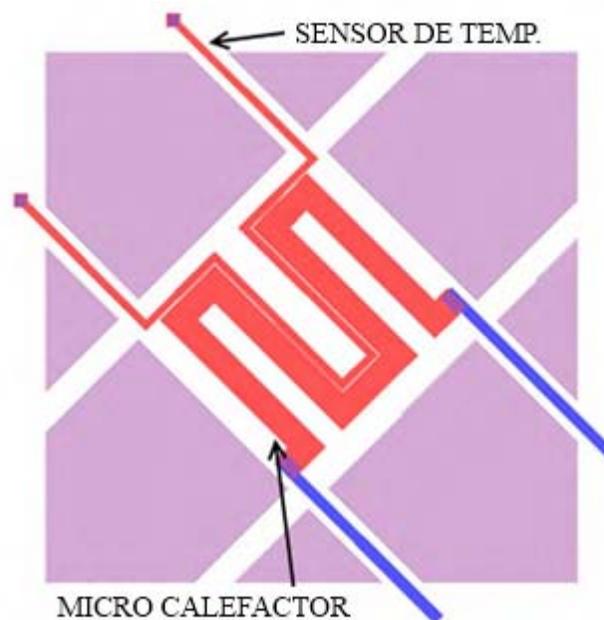


Fig. V.25. Layout propuesto para la micro placa caliente.

Se espera entonces que este diseño ayude a reducir el daño al aluminio expuesto durante el proceso de fabricación. Las indicaciones dadas en este capítulo pueden también ser aplicadas al diseño de otras estructuras MEMS aprovechando las características de anisotropía que ofrecen las soluciones decapantes, especialmente para procesos que deban ser compatibles con la electrónica asociada a esas estructuras MEMS.

V.8 Conclusiones del Capítulo.

Mediante la revisión de los conceptos básicos de los procesos de micro maquinado, se han encontrado alternativas útiles para el análisis de los resultados del decapado anisotrópico. La consideración de los criterios presentados en este capítulo en el planteamiento de estructuras MEMS puede hacer que las propiedades tridimensionales deseadas se obtengan de forma más precisa, rápida y predecible, en función del diseño geométrico de las mascarillas y su orientación respecto al sustrato. Se ha mostrado de forma teórica y experimental que aplicando los criterios de diseño descritos el tiempo de maquinado de una micro placa caliente puede reducirse sustancialmente, efecto que puede extrapolarse a otras estructuras, tales como voladizos (cantilever), electrodos, agujas, entre otros.

V.9 Referencias

1. Baltes, H., et al. *CMOS MEMS - present and future*. in *Micro Electro Mechanical Systems, 2002. The Fifteenth IEEE International Conference on*. 2002, p. 459-466.
2. Hsu, T.-R., *MEMS & Microsystems*. New York, USA: McGraw-Hill. 2002.
3. Fedder, G.K. *CMOS-based Sensors*. in *Sensors*. United States of America. 2005, p. 125-128.
4. Brand, O., Ed. *Advanced Micro & Nanosystems. CMOS-MEMS*. Ed. O. Brand and G.K. Fedder. Vol. 2. WILEY-VCH: Weinheim, Germany. 2005.
5. Tabata, O. *pH-controlled TMAH Etchants For Silicon Micromachining*. in *Solid-State Sensors and Actuators, 1995 and Eurosensors IX.. Transducers '95. The 8th International Conference on*. 1995, p. 83-86.
6. N. H. Tea, et al., *Hybrid Postprocessing Etching for CMOS-Compatible MEMS*. *Journal of Microelectromechanical Systems*. **6**(4): 1997, p. 363-372.
7. G. Yan, et al., *An improved TMAH Si-etching solution without attacking exposed aluminum*. *Sensors and Actuators A: Physical*. **89**(1-2): 2001, p. 135-141.
8. Madou, M.J., *Fundamentals of Microfabrication*. 2nd ed: CRC-Press. 2001, 723.
9. G. T. A. Kovacs, N. I. Maluf, and K.E. Petersen, *Bulk Micromachining of Silicon*. *PROCEEDINGS OF THE IEEE*. **86**(8): 1998, p. 1536-1551.
10. J. C. Marshall, et al., *High-Level CAD Melds Micromachined Devices with Foundries*. *IEEE Circuits & Devices*. **8**(6): 1992, p. 10-15.

VI. Pruebas y Caracterización de los Componentes Principales del Sensor



VI. Pruebas y caracterización de los componentes principales del sensor.

VI.1 Introducción.

La prueba más importante en el desarrollo del sensor de gas es la verificación del mecanismo de funcionamiento del mismo para comprobar que un cambio en la concentración de un gas puede relacionarse con el cambio en el voltaje de umbral de un FGMOS mediante la interacción de una película sensora y el gas a medir. Este objetivo llevó a desarrollar experimentos partiendo de las simulaciones descritas anteriormente.

Igualmente, se hicieron caracterizaciones de otros componentes en chips ya fabricados y encapsulados, los cuales se integraron como elementos individuales en el diseño final del chip mencionado, como elementos individuales precisamente para esta caracterización, así como algunos otros elementos incluidos en un sistema más completo e integrado para pruebas del sensor completo.

Dentro de estos componentes se encuentra el transistor de control de la alimentación de la micro placa caliente, el amplificador operacional del controlador de este mismo dispositivo, la resistencia calefactora y sensora de la micro placa caliente, así como otras estructuras de tipo auxiliar, específicamente una que comprende una técnica para eliminar la carga que se encuentra en los transistores FGMOS de forma aleatoria al ser fabricados [1].

VI.2 Arreglo experimental.

Para la verificación del mecanismo de funcionamiento del sensor de gas, se diseñó un arreglo experimental que permitiera esta verificación. Recordando las ecuaciones que describen el comportamiento del FGMOS (ecs. II.7 a II.11), la compuerta flotante realiza una suma de los voltajes aplicados en las compuertas de control, ya sea en valores positivos o negativos.

Para un transistor MOS ordinario, esto se puede representar aplicando fuentes de voltaje en serie con la terminal de compuerta. En este arreglo está claro que no existirá un

factor de acoplamiento, pero el comportamiento en la compuerta será comparable, ya que en ese punto se aplicará la suma de los valores de las fuentes de acuerdo a su signo.

Es necesario identificar los estímulos a los que se someterá el sensor de gas y su contraparte experimental para poder determinar su equivalencia. En la figura VI.1 se indican estos estímulos en el arreglo con un FGMOS de un amplificador básico.

En el sensor de gas FGMOS, existirá una polarización fuente-drenador del FGMOS (V_{DD}), una en la compuerta de control (V_{in}) y la carga transferida por la reacción entre la película sensora y el gas (V_{sen}). La polarización en la compuerta de control es necesaria para sintonizar la salida del transistor en el punto de mayor ganancia.

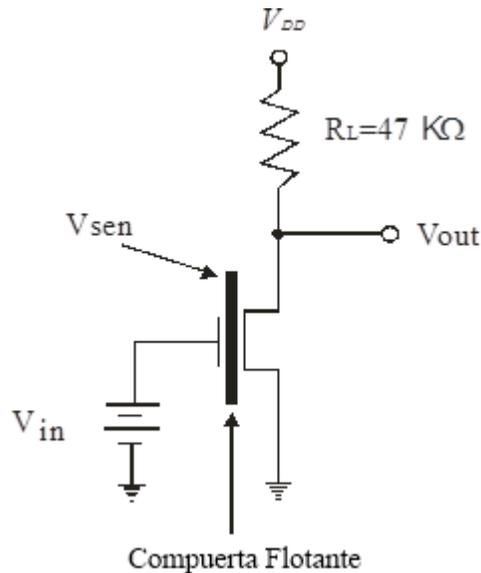


Fig. VI.1. Estímulos en el arreglo experimental con FGMOS.

Para el diseño del experimento, se realizó una simulación en PSPICE aumentando la carga en la FG en pasos de voltaje constantes positivos y negativos [2]. El resultado de dicha simulación muestra el desplazamiento de la curva de transferencia del amplificador con FGMOS.

Se puede observar que al considerar un potencial como el predicho por la ecuación de Nernst debido a la reacción química, sobre la compuerta flotante, se tiene un

desplazamiento de la curva de transferencia del amplificador, y dependiendo de si ese voltaje es negativo o positivo, la curva se desplaza hacia la derecha o hacia la izquierda, respectivamente.

La figura VI.2 muestra el comportamiento simulado de un FGMOS con dos compuertas de control (usando el modelo del Anexo C) para obtener la característica I-V cuando una carga variable se encuentra en la compuerta flotante, $I_d^{1/2}$ vs V_{gate1} , cuando $V_{gate2} = 1.5$ V. Se hace variar V_{sensor} como el voltaje derivado de la reacción química, en un rango de 0 V a -2 V con pasos de 0.1 V.

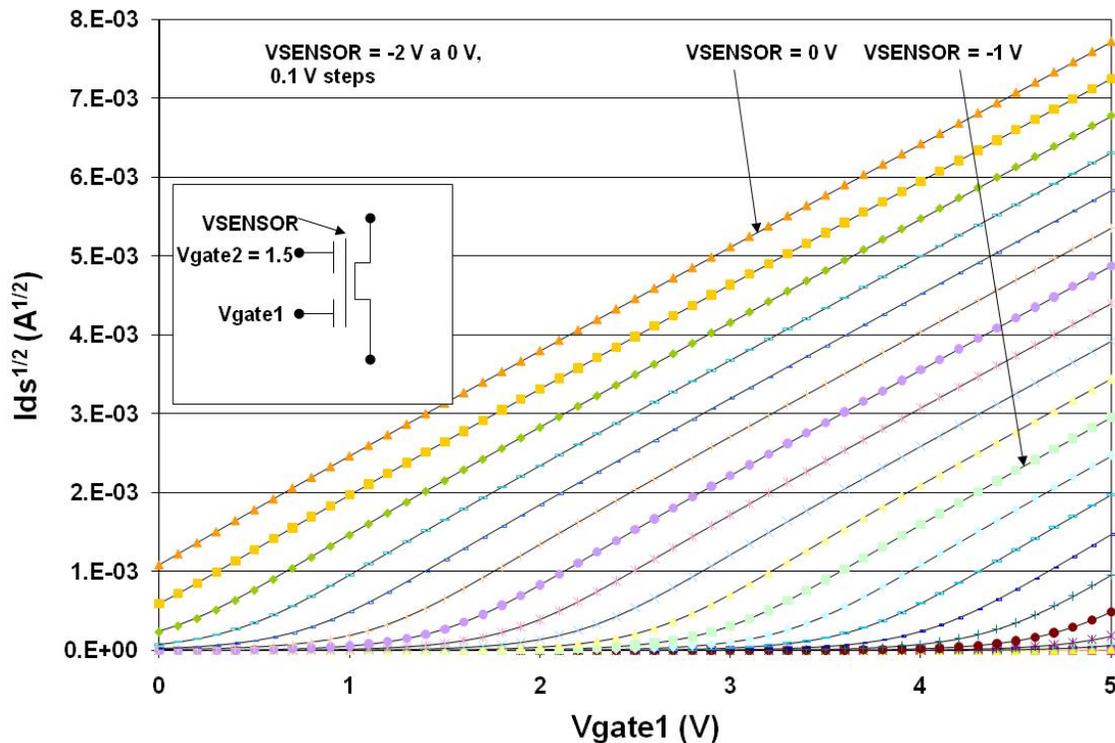


Fig. VI.2. Simulación del efecto electroquímico con un FGMOS de dos compuertas de control.

Ya que la curva de transconductancia del FGMOS cambiará con la carga en la compuerta flotante, es posible incluir este dispositivo en la configuración presentada en un amplificador simple, como se ha descrito brevemente en el capítulo II. La figura VI.3 muestra este circuito de lectura.

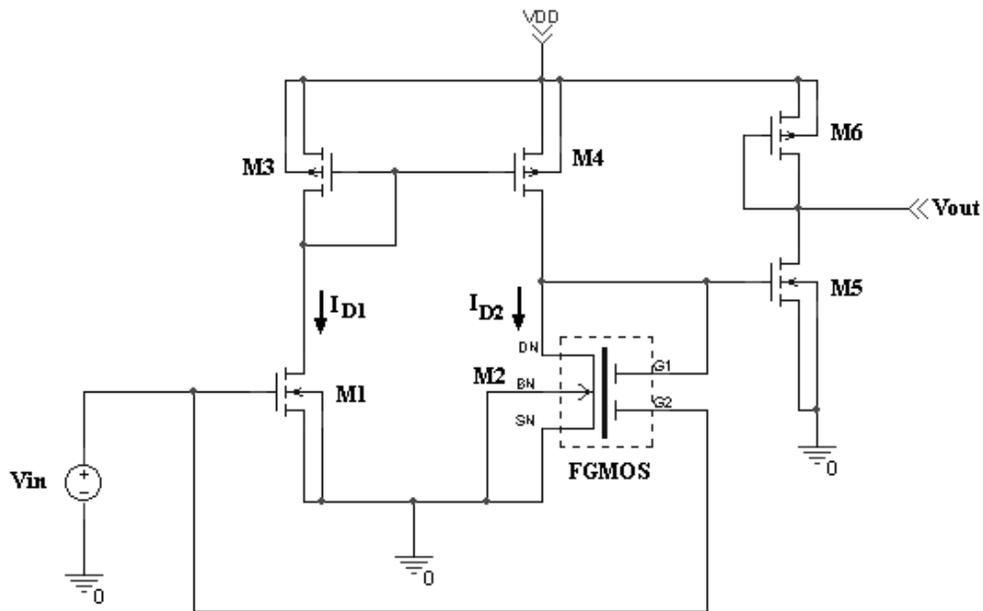


Fig. VI.3. Circuito de lectura FGMOS.

El arreglo es un amplificador de voltaje de dos etapas con entrada diferencial de la que el FGMOS forma parte. V_{in} es un voltaje aplicado para ajustar el punto de operación del amplificador y lograr la ganancia máxima.

Entonces, es posible realizar una simulación considerando un voltaje variable arbitrario V_{sensor} , para evaluar el desempeño de un circuito de esta clase expuesto a un ciclo de diversas concentraciones del gas a sensor. Esta simulación se muestra en la figura VI.4. En esta simulación se supone un voltaje de DC inducido en la compuerta flotante con valor mínimo de 0.1 V y máximo de 0.3 V representando también un ciclo hipotético de monitoreo de gas de 12,000 ppm a 200 ppm de hidrógeno.

Para lograr la máxima ganancia, es necesario determinar mediante una curva de transferencia la región de voltaje en la que la señal de salida no esté distorsionada,

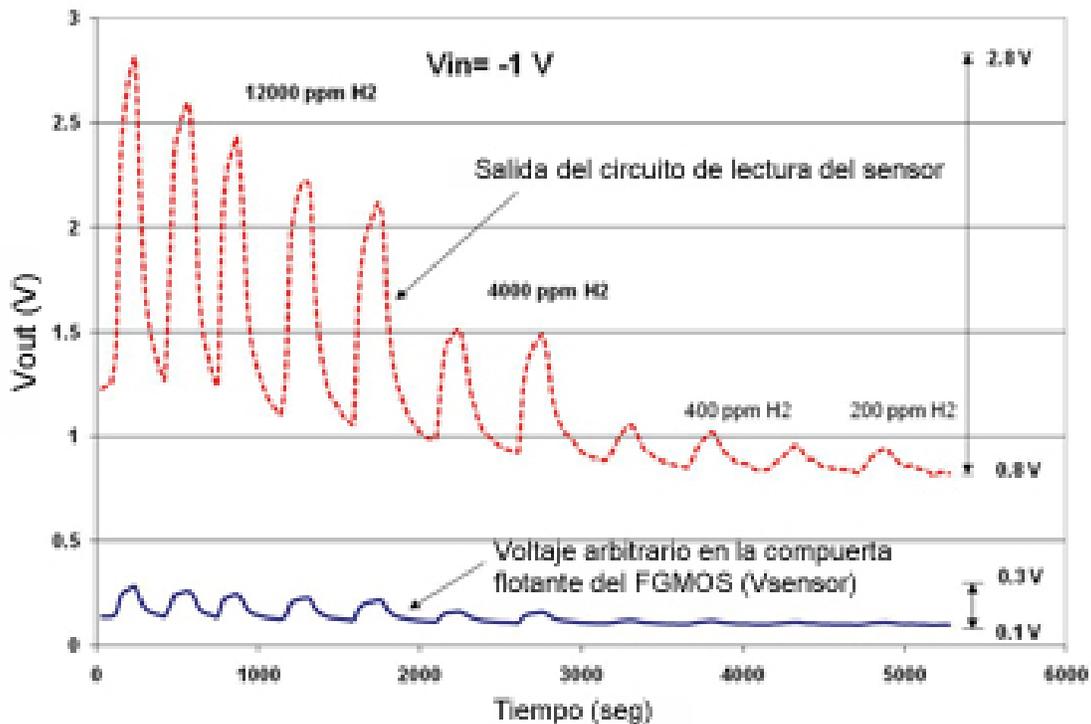


Fig. VI.4. Comportamiento del circuito de lectura frente a un estímulo arbitrario.

Con el arreglo experimental, se trató de reproducir este comportamiento aunque con la consideración de que no se conoce de antemano la magnitud y sentido del voltaje que pudiera llegar a generar la reacción química con el gas empleado, que en este caso fue propano.

Sin embargo, dado que el objetivo es validar el principio de funcionamiento del sensor descrito, se puede comentar que si se tiene un desplazamiento de la curva de transferencia, como lo predice la simulación, sería un indicativo de que efectivamente se tiene la inyección química con la que se modifica el voltaje de umbral del FGMOS.

Además, también se puede confirmar que la validación es real aun cuando se haya empleado un MOS convencional. La figura VI.5 muestra una simulación de un FGMOS con variaciones constantes en la carga de la compuerta flotante, usando un modelo adecuado. (Ver Anexo C).

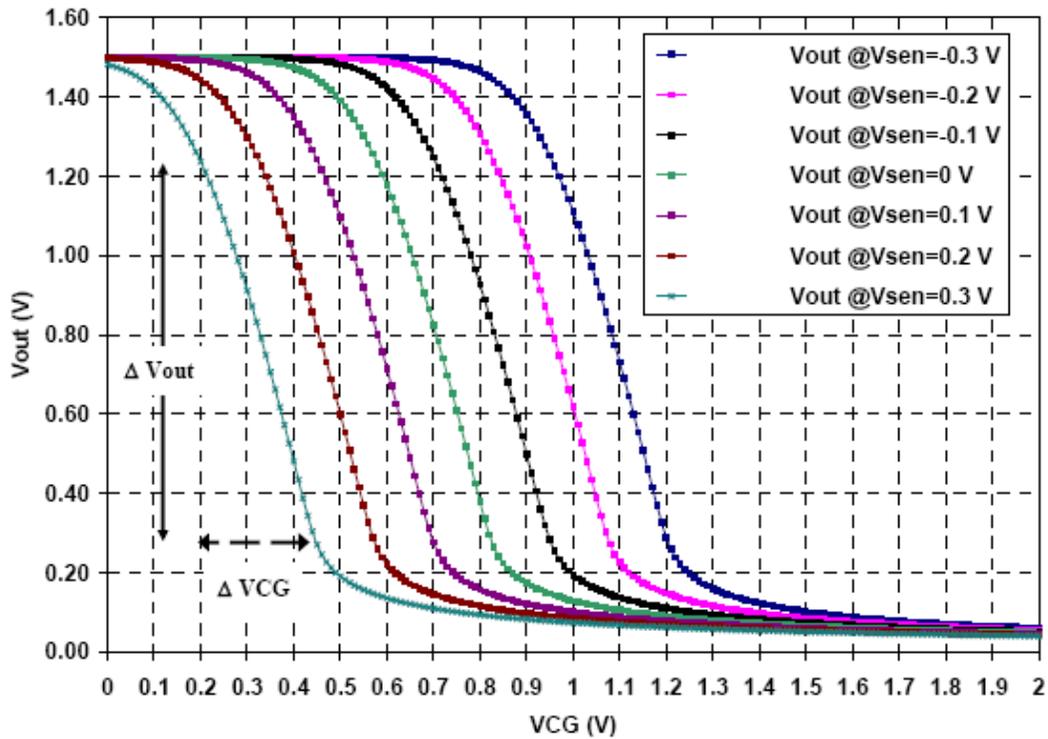


Fig. VI.5. Variación constante de carga en la compuerta flotante.

En el arreglo experimental, la polarización fuente-drenador en el transistor convencional discreto permanece, mientras que la compuerta de dicho transistor se conecta a la película sensora en serie y esta última con una fuente de voltaje, también en serie, tal como se muestra en la figura VI.6.

La película estaba depositada sobre un portamuestras de 2cm x 2cm y contaba con dos contactos metálicos. Uno de estos contactos se conectó a la compuerta del MOS convencional y la otra terminal se conectó a una fuente de DC.

En el circuito de la figura VI.6, la película está representada por la resistencia en serie con la compuerta. Será esta película la que deberá presentar un voltaje que se suma con V_{in} , cuando se presente la reacción química.

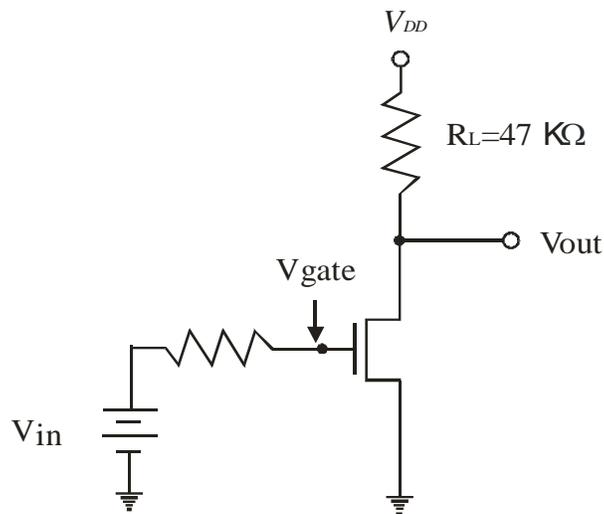


Fig. VI.6. Circuito experimental con dispositivos discretos.

De acuerdo a las mediciones realizadas al circuito de la figura VI.6, cuyos resultados se presentan en la figura VI.7, indican que tanto las ecuaciones indicadas anteriormente, así como el razonamiento presentado y los resultados, validan el experimento anterior, demostrando que es posible utilizar este fenómeno como variable que relaciona la presencia y concentración de un gas particular en la atmósfera con el comportamiento de un transistor de compuerta flotante.

La figura VI.7 muestra resultados de la exposición a propano de una película de hematita (Fe_2O_3)-pirrol ($\text{C}_4\text{H}_5\text{N}$), la cual se mantuvo dentro de una cámara hermética a 30°C manteniendo un 50% de humedad.

La película seleccionada tiene una alta resistencia inicial, que junto con la típica resistencia de la compuerta del MOSFET, evita corrientes de fuga y asegura una medición correcta del potencial presente en la película sensora cuando la reacción química se está llevando a cabo.

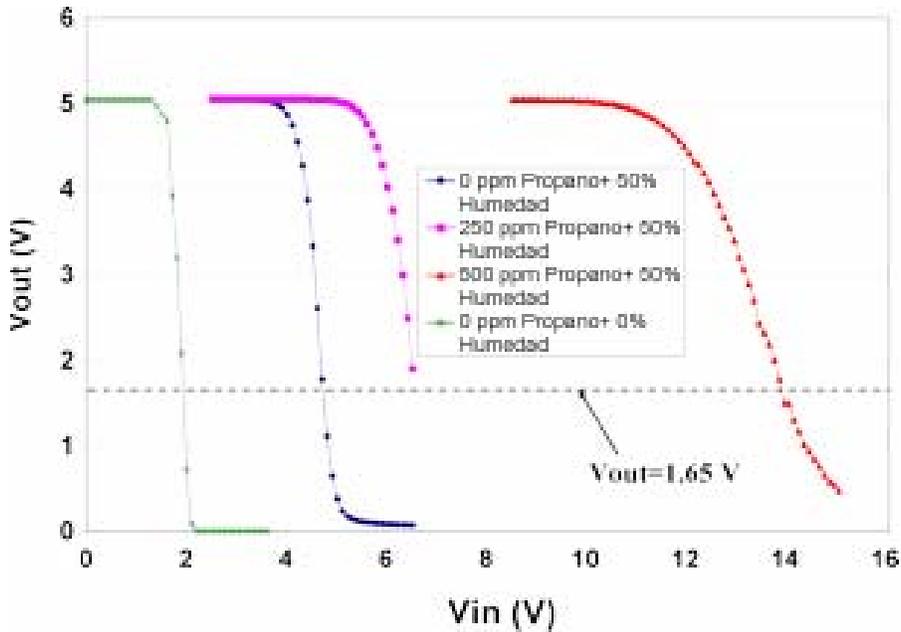


Fig. VI.7. Resultados experimentales.

Como se observa de la figura VI.3, la caída de voltaje en la película sensora está dada por la diferencia entre el voltaje en la compuerta del MOSFET y V_{in} :

$$V_{sen} = V_{gate} - V_{in} \quad (.1)$$

donde V_{gate} es el voltaje de compuerta en el MOSFET con respecto a tierra. Ya que el voltaje de salida V_{out} depende de la ganancia del amplificador, es aconsejable tomar la lectura de V_{gate} al punto de operación con ganancia más alta, $V_{out}=1.65$ V como se muestra en la figura VI.4. Además, en el arreglo experimental se tiene posibilidad de monitorear el voltaje V_{gate} , por lo que de la figura anterior, con $V_{out}=1.65$ V, los potenciales electroquímicos derivados son:

CONCENTRACIÓN DE PROPANO	POTENCIAL ELECTROQUÍMICO
0 ppm + 50% humedad	-2.824 V
250 ppm + 50% humedad	-4.33 V
500 ppm + 50% humedad	-10.53 V

Tabla VI.1. Potenciales derivados de la concentración de gas.

Graficando estos valores se obtiene la figura VI.8 en la que se observa la tendencia de las mediciones. Al no ser lineal la variación de la carga en la compuerta flotante mientras, se hace necesario considerar el punto de operación más adecuado para la medición deseada, ya que habrá rangos de concentración en los que la señal de salida puede estar distorsionada o no presentar señal alguna.

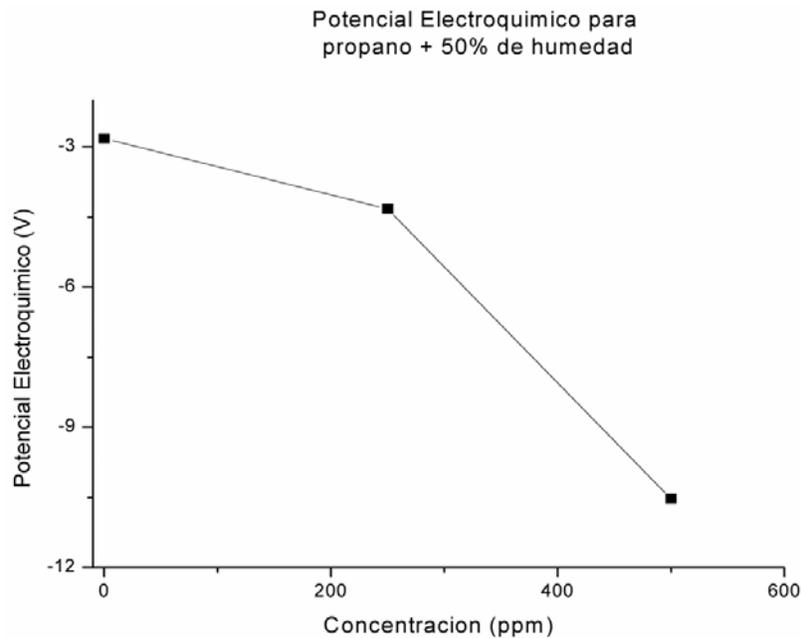


Fig. VI.8. Potencial electroquímico experimental.

Estas diferencias son consecuencia de la reacción química entre la película de hematita-pirrol y el gas medido, propano en este caso. El usar esta configuración de amplificador, para medir V_{gate} y usando la Ec. VI.1 es suficiente para determinar el potencial electroquímico. Sin embargo, es evidente que esto no puede hacerse en un transistor FGMOS, ya que no hay manera de medir directamente el potencial en la compuerta flotante, por lo tanto hay que utilizar un medio indirecto, el cual se explica a continuación.

De la figura VI.2 se puede deducir la siguiente relación:

$$V_{out} = G \times V_{in} + V_{sen} \quad (.2)$$

donde G es la ganancia del amplificador. Usando el punto de operación donde la ganancia es mayor y midiendo el correspondiente voltaje V_{out} , entonces V_{sen} puede ser determinado también para un sensor basado en un FGMOS. Tomando el punto de operación de cada curva, resulta efectivamente en los potenciales supuestos en la compuerta flotante, probando que la Ec. VI.2 y el método usado son confiables, tal como se muestra en la tabla VI.2.

Esta tabla está basada en la Fig. VI.2, en la que se ha tomado la ganancia máxima $G_{max}=0.8$ y el voltaje de salida $V_{out}@G_{max}=0.6$ V. Entonces, leyendo el punto de operación de cada curva en la gráfica mencionada, resulta efectivamente en el voltaje propuesto para la compuerta flotante, de acuerdo a la Ec. VI.2 [3].

Vout (V)	VCG (V) @ Gmax	Vsen (V)
0.6	0.625	0.1
0.6	0.5	0.2
0.6	0.373	0.3
0.6	0.876	-0.1
0.6	1.0039	-0.2
0.6	1.13	-0.3

Tabla VI.2. Voltajes en la FG derivados con la Ec. VI.2.

En el capítulo II se describió brevemente un circuito de lectura basado en el FGMOS, que conectado a la estructura fabricada en polisilicio 2 dentro de la micro placa caliente, formarán la parte medular del sensor de gas propuesto.

Con la primera fase de la fabricación del sensor de gas completada y sin necesidad de llevarlo a la segunda fase de fabricación, es posible caracterizar algunos de sus componentes, tales como el TCR del polisilicio y la resistencia del micro calefactor y sensor de temperatura en la micro placa caliente, así como el comportamiento del Op-Amp y del MOS del sistema de control de temperatura.

VI.3 Micro placa caliente

Como se mencionó en el capítulo II, la micro placa caliente es una estructura formada por un calefactor, y en su caso, un sensor de temperatura encapsulados en un sustrato dieléctrico, aislada del sustrato por medio de una cavidad.

Para el sensor presentado, el calefactor está fabricado en polisilicio, al igual que el sensor de temperatura. Dentro de sus diferentes propiedades, se tiene que la resistividad de este material cambia con la temperatura a la que se encuentra, ya sea causada por efecto Joule o por medios externos.

Con el chip ya fabricado, una caracterización básica es la obtención del Coeficiente Térmico de Resistencia (TCR) de las resistencias dentro de la micro placa. Con un chip ya montado y alambrado en un empaque DIP cerámico, se procede a calentar todo el encapsulado a una temperatura conocida usando un medio externo. A cada punto determinado de temperatura se mide la resistencia de la estructura para obtener el comportamiento del dispositivo y obtener la información requerida [4].

Los resultados de esta caracterización se muestran en la tabla VI.2 para diferentes sensores y calefactores contenidos en el chip 1:

ESTRUCTURA	RESISTENCIA R(T)	$\alpha(1/^\circ\text{C})$
H1	2.41T+2.67E3	8.84E-4
H2	2.2T+2.53E3	8.53E-4
H3	4.89T+2.33E3	8.82E-4
S2	0.727T+943	7.58E-4
S3	0.965T+1.14E3	8.3E-4
S4	0.776T+852	8.82E-4

Tabla VI.2. TCR de sensores y calefactores.

Para el chip 2, en el que las micro placas son todas de las mismas dimensiones, las mediciones de resistencia se muestran en las figuras VI.9 y VI.10:

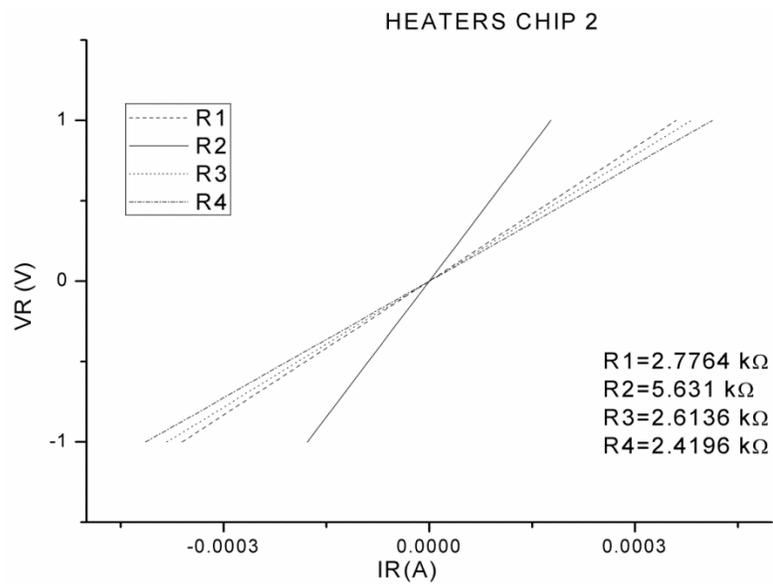


Fig. VI.9. Valores de resistencia de calefactores en el chip 2.

En la figura VI.9 se observa una desviación importante en uno de los calefactores, marcado como R2. La figura VI.10 muestra la resistencia medida de los sensores de temperatura, con una desviación en S2, sensor correspondiente a R2 en la micro placa, lo que podría indicar un problema durante la fabricación que resulte en esas variaciones de resistencia.

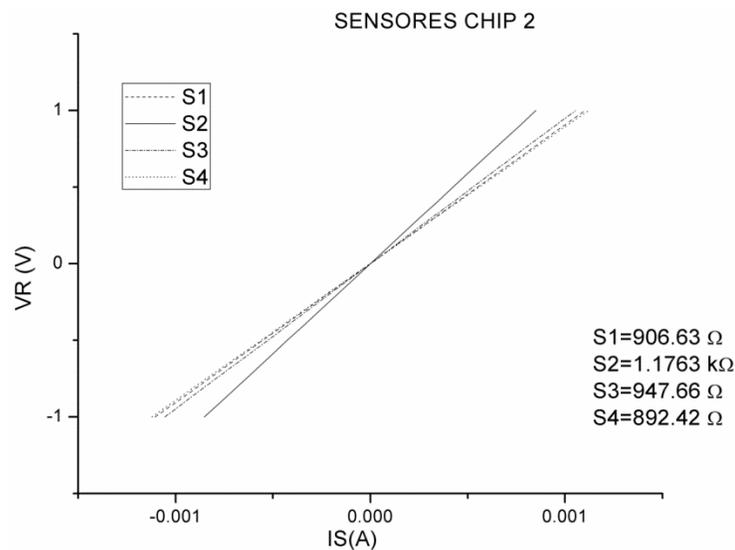


Fig. VI.10. Resistencia de los sensores de temperatura en chip 2.

VI.4 Caracterización del controlador de temperatura.

La caracterización de este sistema se basa en la serie de pruebas realizadas a los componentes por separado y en lo posible a los elementos en conjunto. En los chips fabricados se encuentran estos componentes de forma individual y también integrados entre si, tal como se utilizarán en la aplicación del sensor de gas. Los dispositivos caracterizados son el transistor MOS de control y el amplificador operacional.

VI.4.1 Transistor MOS de control.

El transistor MOS de control en este circuito funciona como un interruptor que permitirá la conducción de corriente a través de la resistencia calefactora en la micro placa caliente. Para esto es necesario que pueda manejar el valor de corriente demandado por el calefactor. Este valor dependerá de la resistencia que tenga el calefactor a la temperatura deseada, ya que el voltaje de polarización es fijo mientras que la resistencia del calefactor es variable debido al TCR del material que la compone. Para los diferentes valores de resistencias calefactoras, manejar una corriente de $500 \mu\text{A}$ es suficiente. Las dimensiones de este transistor son $L=1.6\mu\text{m}$ y $W=120\mu\text{m}$. El layout de este dispositivo se muestra a continuación.

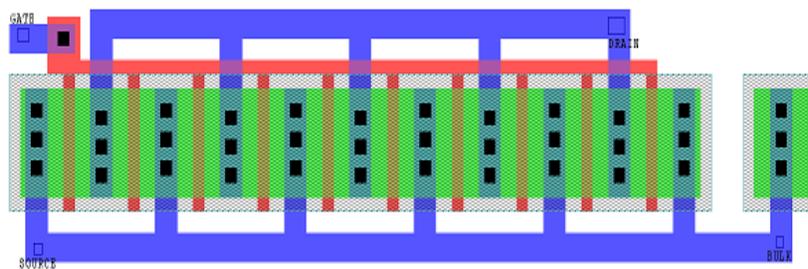


Fig. VI.11. Transistor MOS de control.

Las curvas características de este dispositivo son las siguientes:

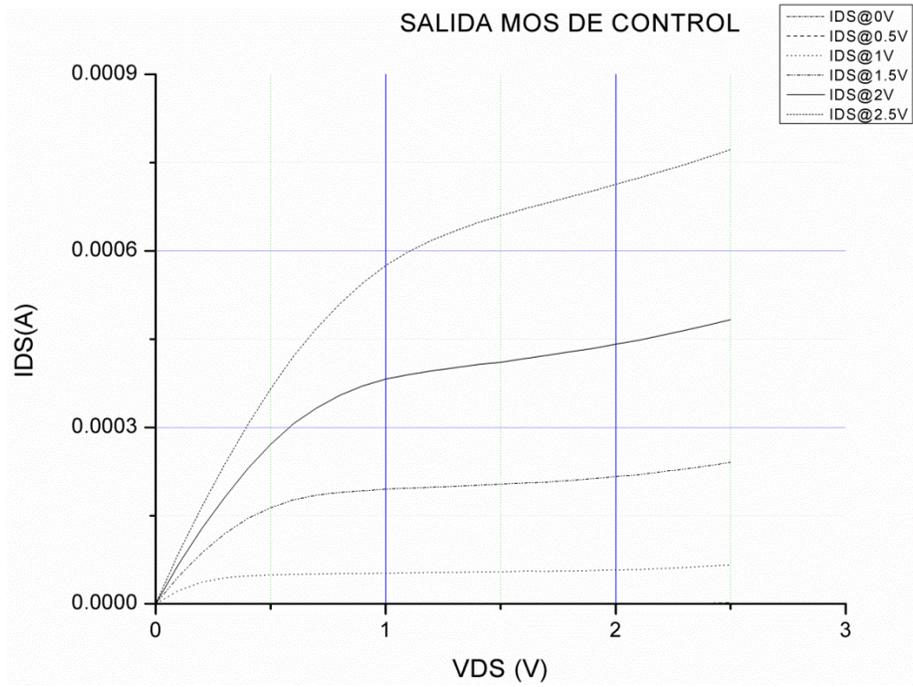


Fig. VI.12. Curvas de salida del MOS de control.

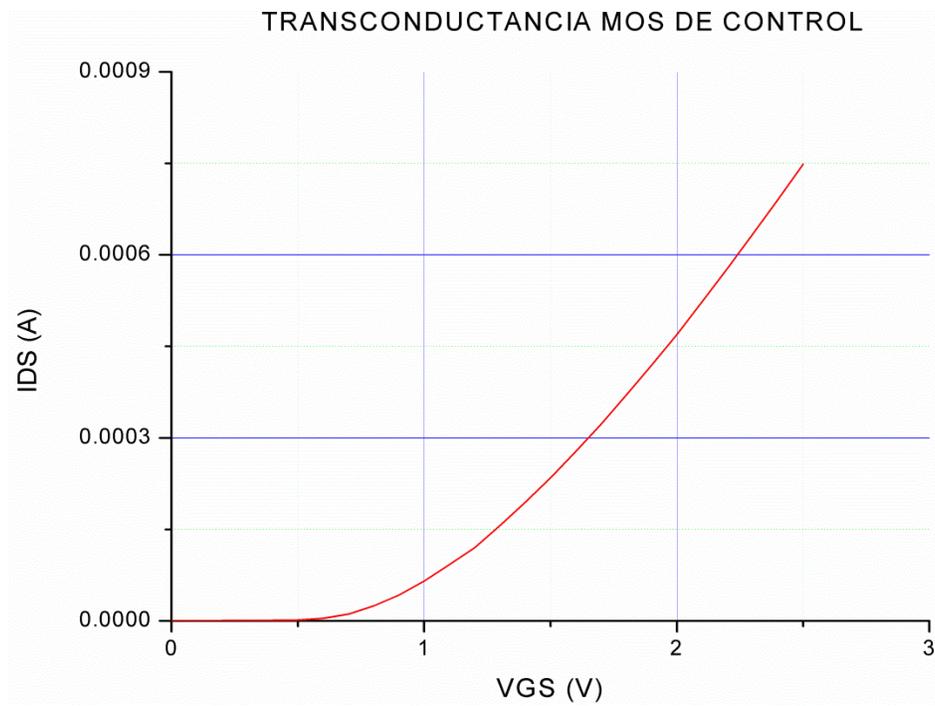


Fig. VI.13. Curva de transconductancia del MOS de control.

VI.4.2 Op-Amp del control de temperatura.

El amplificador operacional integrado en el chip que formará parte del control de temperatura de la micro placa también fue caracterizado. Inicialmente, se conectó como amplificador inversor con una ganancia de 10, con $R_{in}=10K\Omega$, $R_f=100k\Omega$ y $V_{in}=200\text{ mVpp}$, como se muestra en la figura siguiente.

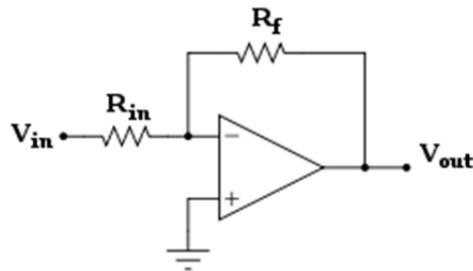


Fig. VI.14. Configuración de amplificador inversor.

De esta configuración se obtuvieron las siguientes curvas de ganancia y fase.

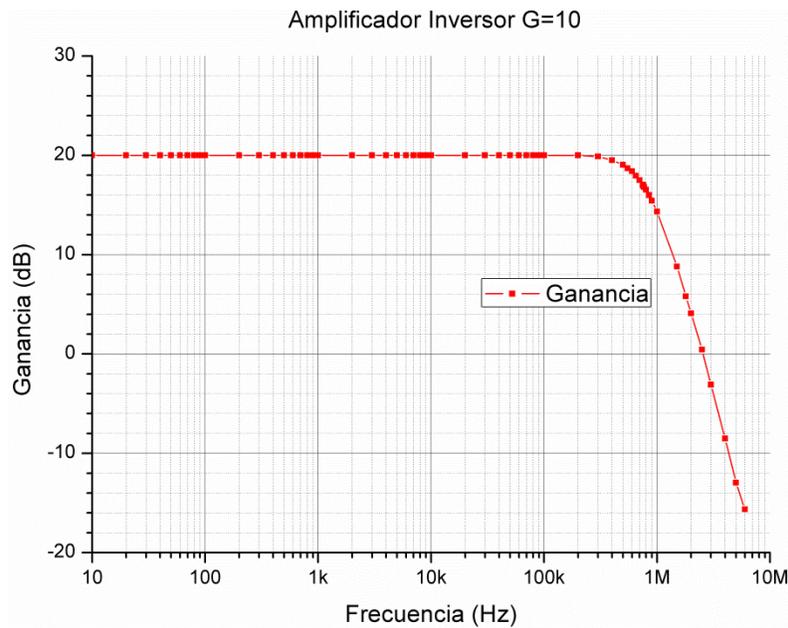


Fig. VI.15. Ganancia de la salida del inversor.

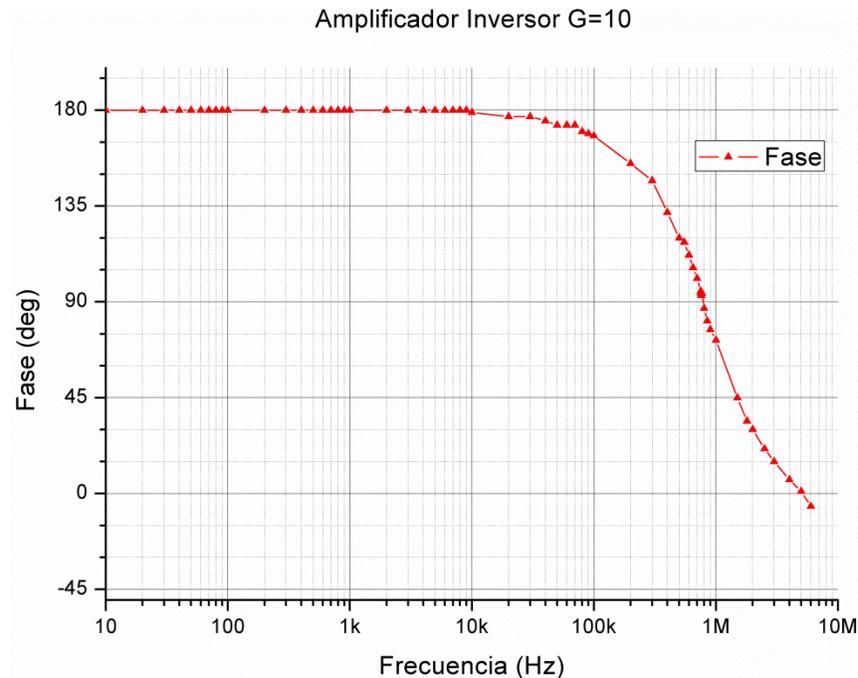


Fig. VI.16. Fase del amplificador inversor.

En las curvas anteriores se observa una frecuencia de corte de 752kHz, valor por encima de la frecuencia de operación del sistema de control de temperatura. Este amplificador tiene una ganancia de lazo abierto de 70dB, ancho de banda de 10MHz. En cuanto a estabilidad, su margen de fase es de 100 °.

Posteriormente se conectó al opamp el transistor descrito en el apartado anterior, para comprobar el funcionamiento del amplificador operacional como comparador, como se muestra en la figura siguiente, con $R_c=560\Omega$, polarización de 5 V, V_{in} y V_{ref} los voltajes a comparar.

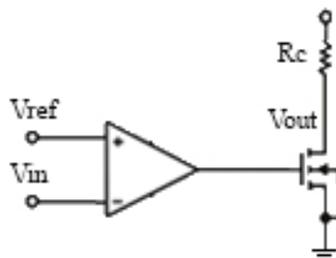


Fig. VI.17. Arreglo experimental para el opamp como comparador.

V_{in} es una rampa de 0 a 5V, mientras que V_{ref} es un voltaje de referencia al que el opamp debe cambiar de estado y por lo tanto hacer que el transistor conduzca. V_{out} deberá cambiar de 2.5V, la caída debida a R_c , a 5V, indicando que el transistor conduce. La figura siguiente muestra el comportamiento del arreglo cuando el voltaje de referencia se fija a 2.5V. El rango en el que funciona adecuadamente como comparador es de 0.48V a 4.95V.

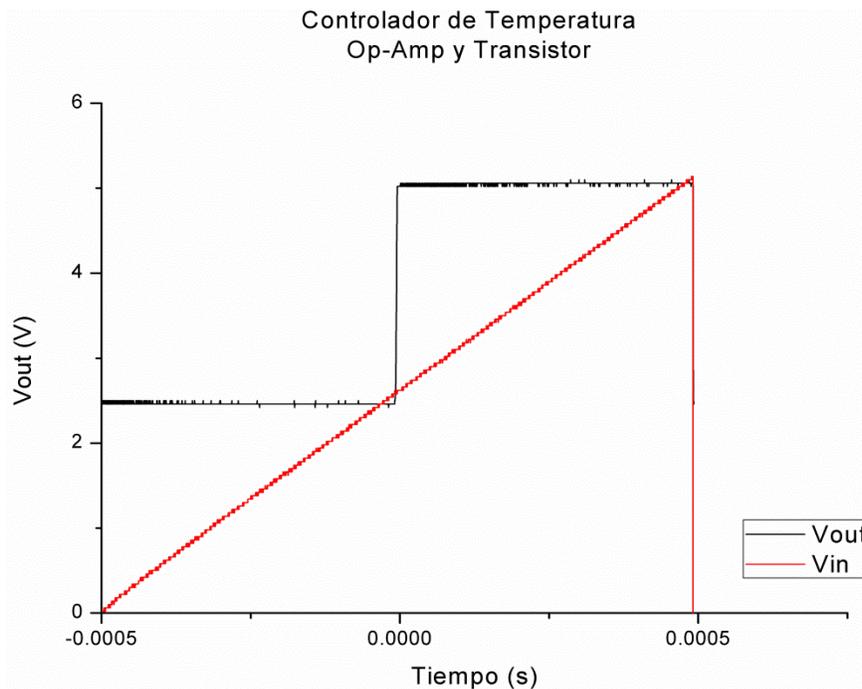


Fig. VI.18. Comportamiento del comparador.

VI.5 Conclusiones del Capítulo.

Las pruebas a los componentes del sensor de gas descrito a lo largo de este trabajo han presentado resultados alentadores. Especialmente el arreglo experimental que permite demostrar el efecto de la reacción entre la película sensora y el comportamiento del FGMOS, ya que esto abre una serie de posibilidades de aplicación que no se habían explorado anteriormente. Todo este conjunto de pruebas indica la factibilidad de lograr un sensor de gas usando los principios explicados anteriormente.

VI.6 Referencias.

1. Rodríguez-Villegas, E., M. Jiménez, and R.G. Carvajal, *On Dealing With the Charge Trapped in Floating- Gate MOS (FGMOS) Transistors* IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs. **54**(2): 2007, p. 156-160.
2. Reyes-Barranca, M.A., et al., *Floating gate MOSFET circuit design for a monolithic MEMS GAS sensor*, in *Proceedings of the 22nd Annual Symposium on Integrated Circuits and System Design: Chip on the Dunes*. ACM: Natal, Brazil. 2009, p. 1-6.
3. Reyes Barranca, M.A., et al., *Using a Floating-Gate MOS Transistor as a Transducer in a MEMS Gas Sensing System*. Sensors. **10**(11): 2010, p. 10413-10434.
4. Afridi, M., et al., *Microhotplate-Based Sensor Platform for Standard Submicron CMOS SoC Designs*, in *2005 International Semiconductor Device Research Symposium*: Washington DC, USA. 2005, p. 260-261.

VII. Conclusiones



VII. Conclusiones

Durante el desarrollo de este trabajo se han expuesto los desafíos encontrados y cómo se han atacado para lograr el sensor de gas CMOS-MEMS. Estas acciones han derivado en logros paralelos al diseño, simulación, fabricación y pruebas del sensor de gas. El uso de programas de simulación específicos y sus combinaciones, procedimientos de proceso, arreglos experimentales, selección de equipos y materiales son algunas de las acciones emprendidas. Todas ellas tienen un rango de aplicación muy amplio y permiten el crecimiento de las líneas de investigación propuestas y existentes dentro del área.

El proyecto presentado en este documento sirve también como base para perfeccionar un protocolo de diseño de dispositivos tan complejos como un SoC que integre MEMS, en el que diversas disciplinas deben ser tomadas en cuenta para lograr un prototipo funcional.

Los componentes del sensor de gas han sido entonces diseñados, simulados, rediseñados y en su caso, probados experimentalmente. De los resultados obtenidos se concluye que un SoC de esta naturaleza funcionará con ajustes y modificaciones mínimas, orientadas principalmente a la determinación de polarizaciones, tecnología disponible y procesos de back-end, como el alambrado, empaquetado/encapsulado y pruebas.

Este estudio ha arrojado los siguientes logros:

- Comprobar exitosamente el principio novedoso de funcionamiento del sensor de gas usando un FGMOS como transductor, mediante el diseño y realización de un experimento que lo demostrara adecuadamente, soportado por fundamentos teóricos y simulaciones. Este principio establece el también novedoso concepto de inyección química en dispositivos FGMOS. De los resultados obtenidos, se han ideado líneas de investigación que exploran las posibilidades encontradas a dispositivos sensores basados en FGMOS, ya sean piezoeléctricos, mecánicos, químicos, entre otros, los cuales se encuentran en proceso de desarrollo.

- Realizar simulaciones en COMSOL, un software que no se había utilizado previamente, obteniéndose modelos de gran complejidad tanto en 2D como 3D, especificando adecuadamente las condiciones físicas de simulación debido al profundo análisis hecho al sistema electro-térmico doblemente acoplado encontrado en la micro placa caliente.
- El establecimiento en la SEES de una metodología de diseño, fabricación y caracterización de sistemas CMOS-MEMS, que son compatibles gracias a la utilización de tecnologías CMOS estándar, complementada con el post-proceso de micro maquinado empleando, por un lado, técnicas alternativas de diseño topológico derivadas de las reglas de diseño de las fábricas de silicio, y por el otro, técnicas adaptadas de micro maquinado superficial que eviten o reduzcan el daño de las capas empleadas en la fabricación de los circuitos integrados CMOS.
- El estudio y perfeccionamiento de procedimientos de maquinado anisotrópico en húmedo con TMAHW, fortaleciendo la línea de investigación sobre MEMS que se desarrolla actualmente en la sección, esto incluye también equipos, materiales y métodos relacionados con el micro maquinado, así como alternativas de maquinado, soluciones utilizables, sustitutos y equivalencias de materiales, diseño de soportes y manejo de muestras.
- El planteamiento de estructuras MEMS-CMOS mediante software de diseño geométrico que cumplan con los requerimientos del post-proceso, utilizando los recursos con los que se cuentan para ello y satisfaciendo los objetivos propuestos.
- La simulación de procesos de fabricación y maquinado anisotrópico en húmedo usando IntelliSuite y AnisE, con los que se encontraron alternativas no reportadas anteriormente para el diseño de estructuras MEMS.

- Adaptación y modificación de programas computacionales, métodos de análisis y equipos de pruebas para realizar las simulaciones y caracterizaciones necesarias y cumplir con los objetivos propuestos, especialmente la combinación COMSOL-MatLab-PSpice.

VII.1 Trabajo futuro.

Del desarrollo del trabajo necesario para realizar el sensor de gas presentado, se han identificado proyectos de diversas naturalezas y diferentes objetivos, así como completar y optimizar este sensor de gas.

Las vertientes principales se enfocan, por un lado, a la optimización del circuito de lectura de la señal generada por el sistema sensor para identificar correctamente la especie gaseosa detectada; y por otro lado, la vertiente es la aplicación de otras técnicas de micro maquinado para la fabricación del sensor de gas; finalmente, la experimentación con diferentes películas que permitan detectar distintos gases o las mezclas de ellos.

Optimización del circuito de lectura.

Para el circuito de lectura, se ha desarrollado una alternativa basada igualmente en la aplicación del FGMOS como medio de transducción, dentro de una red neuronal que pueda determinar la concentración del gas de interés de forma precisa y confiable, así como una mezcla de gases, tal como se ha propuesto para otros sensores.

Técnicas alternas para el micro maquinado.

Se ha presentado en el capítulo referente a la fabricación, un decapado para liberar la micro placa caliente mediante RIE. Los resultados de este proceso son prometedores, aunque debido a que la micro placa fue planeada desde el inicio para ser maquinada mediante un proceso anisotrópico, el uso de RIE en estos diseños provoca problemas y no cumple completamente con los objetivos. Para utilizar plenamente este proceso isotrópico en seco, el diseño de la micro placa debe modificarse para adecuarse a las capacidades de este tipo de decapado.

Igualmente, teniendo los recursos necesarios, es posible realizar una membrana, ya sea completa o suspendida, mediante el maquinado por el dorso de la oblea. Esta alternativa puede realizarse mediante procesos húmedos isotrópicos, anisotrópicos o en seco.

Rediseño de la micro placa caliente.

Como se ha expuesto en el capítulo V, la micro placa caliente puede ser rediseñada siguiendo los conceptos expuestos en ese capítulo. Este rediseño debe incluir modificaciones al micro calefactor y sensor para disminuir los efectos de la corriente sobre las estructuras, verificación de los valores de resistencia para mantener la eficiencia térmica, reubicación de contactos y pistas metálicas; este rediseño deberá incluir la realización de mascarillas para post-procesos de maquinado y depósito de películas sensoras.

Películas semiconductoras utilizables.

Aunque las películas de óxido semiconductor son las más usadas, existen alternativas basadas en polímeros conductores que podrían ser aplicables, algunas sin la necesidad de calentamiento, por lo que el diseño de un sensor de gas basado en estos materiales no necesitaría del maquinado de una micro placa caliente. Tanto las películas poliméricas como las de óxido metálico semiconductor deberán de ser caracterizadas adecuadamente para definir su aplicación en un sensor de gas con las características del presentado.

Empaquetado/encapsulado.

Este paso definirá la técnica más adecuada para el montaje del chip conteniendo el sensor de gas. Esta técnica determinada debe considerar la aplicación del integrado, ya sea para caracterización, en la que se tendrá en cuenta el equipo de suministro de gas y terminales de conexión para instrumentos de medición; aplicación propuesta, que incluye el montaje específico del chip en un aparato de mayor tamaño; uso de métodos como flip-chip, alambrado en empaques de diferentes tamaños y formas; protección contra el ambiente de trabajo; en conjunto, la definición del dispositivo para su aplicación final.

VII.2 Productos.

Participación en congresos

1. XXVIII Annual Meeting International Conference on Surfaces, Materials and Vacuum 2008, Sociedad Mexicana de Ciencia y Tecnología de Superficies y Materiales.

29 de Septiembre-3 de Octubre 2008, Veracruz, Ver.

- *Analysis of the potential upon the floating gate of an FGMOSFET used as a gas sensor.*

Presentación Oral.

- *Design considerations for monolithic integration of a micro hotplate temperature controller of a MEMS gas sensor.*

Póster.

2. SBCCI09, 22nd Symposium on Integrated Circuits and Systems Design.

31 de agosto al 3 de septiembre de 2009, Natal, Brasil.

- *Floating Gate MOSFET Circuit Design for its use in a Monolithic MEMS Gas Sensor.*

Presentación Oral.

3. CCE 2009, 6th International Conference on Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control.

10 al 13 de noviembre de 2009, Toluca, Estado de México.

- *Design considerations for monolithic integration of a micro hotplate temperature controller in a MEMS gas sensor.*

Presentación Oral.

4. CCE 2010, 7th International Conference on Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control.

8 al 10 de septiembre de 2010, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.

- *Micro-hot plate temperature control circuit design for a MEMS gas sensor, by interfacing multiphysics and multidomain software.*

Presentación Oral.

- *Simplified modeling and simulation for physical systems circuit design on a multiphysics software exportable to a multi-domain platform.*

Presentación Oral.

5. CCE 2011, 8th International Conference on Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control.

26 al 28 de octubre de 2011, Mérida, Yucatán.

- Study for the Micromachining Optimization of Micro Hotplates used in MEMS-CMOS Gas Sensors.

Presentación Oral.

Publicaciones.

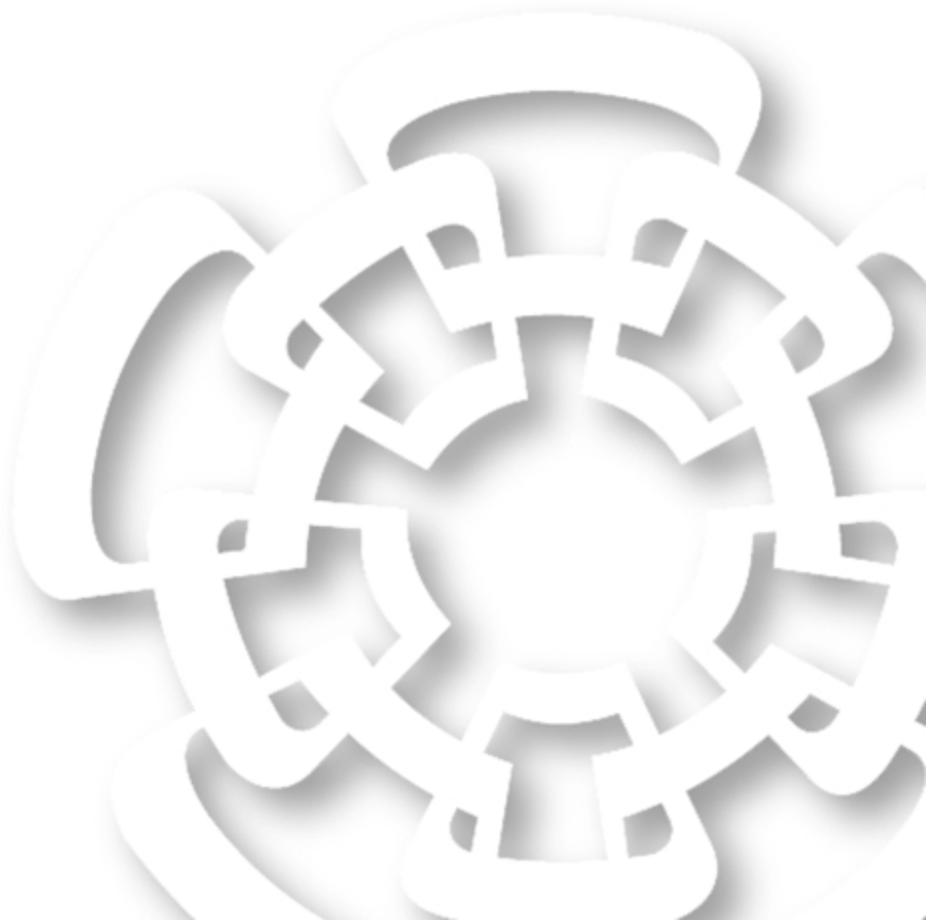
1. Reyes-Barranca M. A., Mendoza-Acevedo S., Flores-Nava L. M., Ávila-García A., Gopar-Castillo A. A., González-Vidal J. L., “*Analysis of the potential upon the floating gate of an FGMOSFET used as a gas sensor.*” **Revista Superficies y Vacío 21(3) 5-9, septiembre de 2008.**
2. Reyes-Barranca M. A., Mendoza-Acevedo S., Flores-Nava L. M., Ávila-García A., Gopar-Castillo A. A., González-Vidal J. L., “*Floating gate MOSFET circuit design for a monolithic MEMS GAS sensor.*” **Proceedings of the 22nd Annual Symposium on Integrated Circuits and System Design: Chip on the Dunes 2009, SESSION: Sensor design. Article No.: 39, ISBN: 978-1-60558-705-9**
3. Mendoza-Acevedo, S.; Reyes-Barranca, M.A.; Flores-Nava, L.M.; Ávila-García, A.; González-Vidal, J.L., “*Design considerations for monolithic integration of a micro hotplate temperature controller in a MEMS gas sensor.*” **Proceedings of the 6th International Conference on Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control (CCE), 2009, , vol., no., pp.1-5, 10-13 Jan. 2009, doi: 10.1109/ICEEE.2009.5393567**

4. Mendoza-Acevedo, S.; Reyes-Barranca, M.A.; Vázquez-Acosta, E.N.; Flores-Nava, L.M.; Ávila-García, A., “*Micro-hot plate temperature control circuit design for a MEMS gas sensor, by interfacing multiphysics and multidomain software.*” **Proceedings of the 7th International Conference on Electrical Engineering Computing Science and Automatic Control (CCE), 2010, , vol., no., pp.519-524, 8-10 Sept. 2010**, doi: 10.1109/ICEEE.2010.5608596
5. Vázquez-Acosta, E.N.; Reyes-Barranca, M.A.; Mendoza-Acevedo, S.; González-Vidal, J.L., “*Simplified modeling and simulation for physical systems circuit design on a multiphysics software exportable to a multi-domain platform.*” **Proceedings of the 7th International Conference on Electrical Engineering Computing Science and Automatic Control (CCE), 2010, , vol., no., pp.525-530, 8-10 Sept. 2010**, doi: 10.1109/ICEEE.2010.5608593
6. Reyes Barranca, M.; Mendoza-Acevedo, S.; Flores-Nava, L.; Ávila-García, A.; Vázquez-Acosta, E.; Moreno-Cadenas, J.; Casados-Cruz, G., “*Using a Floating-Gate MOS Transistor as a Transducer in a MEMS Gas Sensing System.*” **Sensors 2010, 10(11), 10413-10434**, doi:10.3390/s101110413.
7. Mendoza-Acevedo, S.; Reyes-Barranca, M.A., “*Study for the micromachining optimization of micro hotplates used in MEMS-CMOS gas sensors.*” **Proceedings of the 8th International Conference on Electrical Engineering Computing Science and Automatic Control (CCE), 2011, , vol., no., pp.1-6, 26-28 Oct. 2011**, doi: 10.1109/ICEEE.2011.6106689

8. Mendoza-Acevedo S., Reyes-Barranca M. A., Vázquez-Acosta E. N., Moreno-Cadenas J. A. and González-Vidal J. L. “*Release Optimization of Suspended Membranes in MEMS.*” **Micromachining Techniques for Fabrication of Micro and Nano Structures**, Editor: M. Kahrizi, InTech, Croatia 2012, ISBN 978-953-307-906-6

9. Vázquez-Acosta E. N., Mendoza-Acevedo S., Reyes-Barranca M. A., Flores-Nava L. M., Moreno-Cadenas J. A. and González-Vidal J.L. “*Performance evaluation of a temperature control stage used on a Semiconductor Gas Sensor 3D electro-thermal model through Simulink.*” **Technology and Engineering Applications of Simulink**, Editor: S. C. Chakravarty, InTech, Croatia, 2012, ISBN: 979-953-307-640-8

Anexo A



Anexo A

PROCEDIMIENTO DE MICROMAQUINADO CON TMAH (Sullivan, Offord, Aklufi)

PREPARACIÓN DE BASES Y SOPORTES

Manipular todas las bases y soportes con guantes.

Realizar en campana de extracción.

Colocar bases y soportes en vaso con xileno caliente en cantidad suficiente para cubrirlos adecuadamente durante

10min.

En el mismo vaso, ponerlos en ultrasonido durante 5min.

Colocar bases y soportes en vaso con acetona en cantidad suficiente para cubrirlos adecuadamente durante 10min.

En el mismo vaso, ponerlos en ultrasonido durante 5min.

Enjuagar con agua desionizada en cascada.

Secar con nitrógeno.

PREPARACIÓN DE MUESTRAS

Adherir muestra a soporte de vidrio con cianoacrilato.

Secar en horno a 60C por 1hr.

Sumergir en xileno a 70-80°C durante 10 min.

Poner en ultrasonido por 5 min.

Sumergir en acetona durante 15 min.

Enjuagar con agua DI

Sumergir en Solución X1 a 60°C durante 15 min.

Enjuagar con agua DI

Sumergir en solución X1 a 60°C durante 10 min. Colocar en ultrasonido 5min.

Enjuagar con agua desionizada en cascada por 2min.

Sumergir en HF al 10% en vaso de nalgene durante 30s.

Enjuagar con agua desionizada (DI) por 2min inmediatamente antes de la inmersión en la solución de TMAH.

Solución X1

• Agua desionizada, peróxido de hidrógeno e hidróxido de amonio en proporción 5:1:1 respectivamente.

PREPARACIÓN DE LA SOLUCIÓN DECAPANTE

Solución A

1. Colocar agitador magnético de teflón en el contenedor de solución decapante de 2000ml limpio y seco.

2. Colocar en baño agitador.

3. Pesar aproximadamente 50gr de ácido silícico en un vaso de precipitados de 180ml. Secar a 90C durante 5 minutos. Anotar peso y agregar a contenedor de solución decapante.

4. Pesar ácido silícico adicional para llevar el total de ácido silícico (SA) a 67gr, secar y agregar al contenedor de solución decapante.

5. Medir 300ml de TMAH al 25% en vaso pyrex de 2000ml y agregar a contenedor de solución decapante.

6. Medir 1200ml de agua DI en vaso pyrex de 2000ml y agregar a contenedor de solución decapante.

7. Agitar contenedor de solución decapante hasta que el ácido silícico se disuelva.
8. Colocar unidad condensadora y sonda de temperatura en su lugar y comenzar flujo de agua a través del condensador.
9. Ajustar el agitador a 200rpm; la sonda de temperatura a 80C. La solución estará turbia.
10. La solución se aclarará en 1hr aproximadamente cuando alcance 80C.

Solución B

1. Pesar 7gr de persulfato de amonio (APS) en vaso de precipitados pyrex de 50ml.
 2. Medir 40ml de TMAH al 25% en otro vaso de precipitados pyrex de 50ml.
 3. Agregar los 7gr de persulfato de amonio al vaso de 50ml de TMAH y agitar para disolver completamente el persulfato de amonio
 4. Verter la solución de TMAH-APS al contenedor de solución decapante después de que la solución TMAH-SA alcance 80C.
 5. Esperar 30min a que la solución se estabilice antes de colocar las muestras.
- Este método da una razón de ataque estimada de 1µm/min para volúmenes pequeños de silicio removido.

Notas: Modificar la cantidad de APS; 7, 14 o 21gr de acuerdo al volumen de silicio a decapar y la protección de las muestras en la parte posterior. Es posible sustituir los 67gr de SA por 24gr de silicio en polvo malla 100 (SiP).

SOLUCION		1	2	3
TMAH 25%		340ml	340ml	340ml
AGUA DI		1200ml	1200ml	1200ml
% TMAH		5.5	5.5	5.5
SILICIO	AS	43.5gr/l	43.5gr/l	43.5gr/l
	SiP	15.6gr/l	15.6gr/l	15.6gr/l
APS		4.5g/l	9g/l	13.6gr/l
RAZON DE ATAQUE		1µm/min	1µm/min	1µm/min

Anexo B



Anexo B**Parámetros de la tecnología AMIS 1.5 μm .**

MOSIS WAFER ACCEPTANCE TESTS

RUN: T83T
 TECHNOLOGY: SCN15
 microns

VENDOR: AMIS
 FEATURE SIZE: 1.6

Run type: SKD

INTRODUCTION: This report contains the lot average results obtained by MOSIS from measurements of MOSIS test structures on each wafer of this fabrication lot. SPICE parameters obtained from similar measurements on a selected wafer are also attached.

COMMENTS: SCNA16_AMIS

TRANSISTOR PARAMETERS	W/L	N-CHANNEL	P-CHANNEL	UNITS
MINIMUM Vth	4.0/1.6	0.59	-1.03	volts
SHORT Idss Vth Vpt	20.0/1.6	187 0.55 10.0	-69 -0.98 -10.0	$\mu\text{A}/\mu\text{m}$ volts volts
WIDE Ids0	20.0/1.6	< 2.5	< 2.5	$\text{pA}/\mu\text{m}$
LARGE Vth Vjbkd Ijlk Gamma	50/50	0.59 16.6 <50.0 0.64	-0.93 -14.8 <50.0 0.48	volts volts pA $\text{V}^{0.5}$
K' ($U_0 \cdot C_{ox} / 2$) Low-field Mobility		35.4 647.91	-11.6 212.31	$\mu\text{A}/\text{V}^2$ $\text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$

COMMENTS: Poly bias varies with design technology. To account for mask bias use the appropriate value for the parameter XL in your SPICE model card.

	Design Technology			XL (um)
	-----			-----
	SCN (lambda=0.8)			0.00
POLY2 TRANSISTORS	W/L	N-CHANNEL	P-CHANNEL	UNITS
MINIMUM	4.8/3.2			
Vth		0.93	-1.17	volts
SHORT	9.6/3.2			
Vth		0.92	-1.13	volts
LARGE	28.8/28.			
Vth		0.93	-1.12	volts
K' (Uo*Cox/2)		21.1	-6.5	uA/V^2
FOX TRANSISTORS	GATE	N+ACTIVE	P+ACTIVE	UNITS
Vth	Poly	>15.0	<-15.0	volts
BIPOLAR PARAMETERS	W/L	NPN		UNITS
2X1	2X1			
Beta		124		
V_early		41.7		volts
Vce,sat		0.2		volts
2X2	2X2			
Beta		125		
V_early		41.4		volts
Vce,sat		0.2		volts
2X4	2X4			
Beta		129		
V_early		41.2		volts
Vce,sat		0.2		volts
2X8	2X8			
Beta		125		
V_early		41.4		volts
Vce,sat		0.2		volts
BVceo		13.5		volts
BVcbo		30.0		volts
BVebo		8.1		volts

PROCESS PARAMETERS	N+	P+	POLY	POLY2	PBASE	M1	M2	UNITS
Sheet Resistance	53.2	77.3	25.9	21.4	2236.0	0.05	0.03	ohms/sq
Contact Resistanc	54.3	42.6	24.9	15.5			0.05	ohms
Gate Oxide Thickness	316							angstrom

PROCESS PARAMETERS	N_W	UNITS
Sheet Resistance	1533	ohms/sq
Contact Resistance		ohms

CAPACITANCE PARAMETERS	N+	P+	POLY	POLY2	M1	M2	N_W	UNITS
Area (substrate)	290	304	37	37	24	16	112	aF/um ²
Area (N+active)			1094	696	52	27		aF/um ²
Area (P+active)			1079	690				aF/um ²
Area (poly)				581	46	23		aF/um ²
Area (poly2)					47	23		aF/um ²
Area (metall)							38	aF/um ²
Fringe (substrate)	73	157			30	26		aF/um
Fringe (poly)					60	43		aF/um
Fringe (metall)							55	aF/um
Overlap (N+active)			256					aF/um
Overlap (P+active)			265					aF/um

CIRCUIT PARAMETERS			UNITS
Inverters	K		
Vinv	1.0	1.78	volts
Vinv	1.5	2.06	volts
Vol (100 uA)	2.0	0.42	volts
Voh (100 uA)	2.0	4.31	volts
Vinv	2.0	2.25	volts
Gain	2.0	-15.42	
Ring Oscillator Freq.			
DIV64 (31-stg,5.0V)		40.32	MHz
Ring Oscillator Power			
DIV64 (31-stg,5.0V)		1.50	uW/MHz/gate

T83T SPICE LEVEL3 parameters are available for classroom instructional purposes but not for actual IC design work.

```

*
* DATE: Apr 21/08
* LOT: T83T                WAF: 9102
* DIE: N_Area_Fring       DEV: N3740/10
* Temp= 27
.MODEL MN1 NMOS (                                LEVEL = 3
+ TOX      = 3.16E-8                NSUB    = 1.076635E16    GAMMA  = 0.7683227
+ PHI      = 1                      VTO     = 0.6139639    DELTA  = 0.6363466
+ UO       = 540.5166232            ETA     = 7.102441E-4    THETA  = 0.0725637
+ KP       = 7.372278E-5            VMAX    = 2.603588E5    KAPPA  = 0.5
+ RSH      = 22.1568863            NFS     = 5.567912E11    TPG    = 1
+ XJ       = 3E-7                   LD      = 8.001696E-15  WD     = 6.432153E-7
+ CGDO     = 2.56E-10              CGSO    = 2.56E-10    CGBO   = 1E-10
+ CJ       = 2.872567E-4            PB      = 0.8226187    MJ     = 0.5
+ CJSW     = 1.141246E-10          MJSW    = 0.05        )

```

```

*
* DATE: Apr 21/08
* LOT: T83T                WAF: 9102
* DIE: P_Area_Fring       DEV: P3740/10
* Temp= 27
.MODEL CMOSP PMOS (                                LEVEL = 3
+ TOX      = 3.16E-8                NSUB    = 1E17        GAMMA  = 0.4983453
+ PHI      = 0.7                    VTO     = -0.9427842  DELTA  = 0.3016627
+ UO       = 101.6231199            ETA     = 1.439377E-4  THETA  = 0.1285575
+ KP       = 2.421504E-5            VMAX    = 1.341191E5  KAPPA  = 50
+ RSH      = 0                      NFS     = 5.548753E11  TPG    = -1
+ XJ       = 2E-7                   LD      = 1.00095E-14  WD     = 9.558722E-7
+ CGDO     = 2.65E-10              CGSO    = 2.65E-10    CGBO   = 1E-10
+ CJ       = 3.018089E-4            PB      = 0.8          MJ     = 0.4534709
+ CJSW     = 1.586951E-10          MJSW    = 0.0859905  )

```

T83T SPICE BSIM3 VERSION 3.1 PARAMETERS

SPICE 3f5 Level 8, Star-HSPICE Level 49, UTMOST Level 8

```

* DATE: Apr 21/08
* LOT: T83T                WAF: 9102
* Temperature_parameters=Default
.MODEL MN1 NMOS (
+VERSION = 3.1            TNOM    = 27            TOX    = 3.16E-8
+XJ      = 3E-7          NCH    = 7.5E16          VTH0   = 0.5532293
+K1      = 0.9035181    K2    = -0.0643307      K3     = 2.5479002
+K3B     = -2.8027479   W0    = 3.208573E-6    NLX    = 2.437748E-8
+DVT0W   = 0           DVT1W  = 0           DVT2W  = 0
+DVT0    = 0.7417824   DVT1   = 0.4992713    DVT2   = -0.4963435
+U0      = 668.7098806  UA    = 1.606939E-9    UB     = 1.161183E-18
+UC      = 2.084488E-11 VSAT   = 1.15642E5     A0     = 0.5520578
+AGS     = 0.0735062   B0    = 2.123316E-6    B1     = 5E-6
+KETA    = -3.240368E-3 A1    = 0           A2     = 1
+RDSW    = 3E3         PRWG   = -0.0295407    PRWB   = -0.0293523
+WR      = 1          WINT   = 6.860525E-7    LINT   = 2.905606E-7
+XL      = 0          XW    = 0           DWG    = -2.112208E-8
+DWB     = 2.909887E-8 VOFF   = -0.0475545    NFACTOR = 0.7389868
+CIT     = 0          CDSC   = 2.230152E-6    CDSCD  = 2.587466E-6
+CDSCB   = 1.055349E-4 ETA0    = -0.0329209     ETAB   = -6.587451E-3
+DSUB    = 5.634216E-3 PCLM   = 0.1186109    PDIBLC1 = 0.0110461
+PDIBLC2 = 3.644817E-3 PDIBLCB = -0.1         DROUT  = 0.0795384
+PSCBE1  = 2.153596E9  PSCBE2 = 5.005E-10    PVAG   = 0.2222499
+DELTA   = 0.01       RSH    = 53.2         MOBMOD  = 1
+PRT     = 0          UTE    = -1.5         KT1    = -0.11
+KT1L    = 0          KT2    = 0.022        UA1    = 4.31E-9
+UB1     = -7.61E-18  UC1    = -5.6E-11     AT     = 3.3E4
+WL      = 0          WLN    = 1           WW     = 0
+WWN     = 1          WWL    = 0           LL     = 0
+LLN     = 1          LW     = 0           LWN    = 1
+LWL     = 0          CAPMOD = 2           XPART  = 0.5
+CGDO    = 2.56E-10   CGSO   = 2.56E-10    CGBO   = 1E-9
+CJ      = 2.823234E-4 PB     = 0.99         MJ     = 0.547221
+CJSW    = 1.292241E-10 PBSW   = 0.99        MJSW   = 0.1
+CJSWG   = 6.4E-11   PBSWG  = 0.99        MJSWG  = 0.1
+CF      = 0          )
*

```

```

.MODEL CMOSP PMOS (
+VERSION = 3.1          TNOM = 27          LEVEL = 7
+XJ = 3E-7            NCH = 2.4E16        TOX = 3.16E-8
+K1 = 0.4513608      K2 = 2.379699E-5      VTH0 = -0.8476404
+K3B = -2.2238332    W0 = 9.577236E-7     K3 = 13.3278347
+DVT0W = 0           DVT1W = 0           NLX = 1E-6
+DVT0 = 2.8137786    DVT1 = 0.7604621    DVT2W = 0
+U0 = 236.8923827    UA = 3.833306E-9     DVT2 = -0.052421
+UC = -1.08562E-10   VSAT = 1.159861E5    UB = 1.487688E-21
+AGS = 0.259481      B0 = 3.299132E-6     A0 = 0.9443065
+KETA = 9.832612E-4  A1 = 0               B1 = 5E-6
+RDSW = 3E3          PRWG = 0.0729646     A2 = 0.364
+WR = 1              WINT = 7.565065E-7  PRWB = -0.1851255
+XL = 0              XW = 0               LINT = 1.415433E-7
+DWB = 3.857544E-8   VOFF = -0.0877184   DWG = -2.13917E-8
+CIT = 0             CDSC = 2.924806E-5   NFACTOR = 0.2508342
+CDSCB = 1.091488E-4 ETA0 = 0.25103       CDSCD = 1.497572E-4
+DSUB = 0.2873       PCLM = 6.403032E-10 ETAB = 4.268713E-3
+PDIBLC2 = 3.271335E-3 PDIBLCB = -1E-3     PDIBLC1 = 7.477411E-4
+PSCBE1 = 3.515038E9 PSCBE2 = 5.273648E-10 DROUT = 1E-3
+DELTA = 0.01        RSH = 77.3          PVAG = 14.985
+PRT = 0             UTE = -1.5          MOBMOD = 1
+KT1L = 0            KT2 = 0.022         KT1 = -0.11
+UB1 = -7.61E-18     UC1 = -5.6E-11      UA1 = 4.31E-9
+WL = 0              WLN = 1             AT = 3.3E4
+WWN = 1             WWL = 0             WW = 0
+LLN = 1             LW = 0              LL = 0
+LWL = 0             CAPMOD = 2          LWN = 1
+CGDO = 2.65E-10     CGSO = 2.65E-10    XPART = 0.5
+CJ = 3.017493E-4    PB = 0.8            CGBO = 1E-9
+CJSW = 1.634365E-10 PBSW = 0.99         MJ = 0.4487672
+CJSWG = 3.9E-11     PBSWG = 0.99       MJSW = 0.1219817
+CF = 0              )                   MJSWG = 0.1219817
*

```

```

# File: mAMI150.xst
# For: Cross-section process definition file # Vendor: MOSIS:AMI
# Technology: 1.5U N-Well (Lambda = 0.8um, Technology = SCNA)
# Technology Setup File: mAMI150.tdb # Copyright (c) 2000
# Tanner Research, Inc. All rights reserved
# *****
# L-Edit
#Step  Layer Name      Depth      Label      [Angle[offset]]  Comment
#-----
gd  -                10         p-         -           -           # 1. Substrate
id  "Well X"          3          n-         -           -           # 2. n-Well
id  ActPSelNotPoly   0.9        p+         75    0         # 3. p-Implant
id  ActNSelNotPoly   0.9        n+         75    0         # 4. n-Implant
id  "P Base"         2          -          -           -           # 5. NPN Base Implant
gd  -                0.6        -          -           -           # 6. Field Oxide
e   Active          0.6        -          45          -           # 7.
gd  -                0.04       -          -           -           # 8. Gate Oxide
gd  Poly            0.4        -          -           -           # 9. Polysilicon
e   NotPoly         0.44       -          45          -           # 10.
gd  -                0.07       -          45          -           # 11. 2nd Gate Oxide
gd  Poly2           0.4        -          -           -           # 12. 2nd Polysilicon
e   NotPoly2        0.47       -          60          -           # 13.
gd  -                0.9        -          -           -           # 14.
e   "P/P2/Act Contact" 0.9        -          60          -           # 15.
gd  Metal1          0.6        -          -           -           # 16. Metal 1
e   "Not Metal1"     0.6        -          45          -           # 17.
gd  -                1          -          -           -           # 18.
e   Via             1          -          60          -           # 19.
gd  Metal2          1.15       -          -           -           # 20. Metal 2
e   "Not Metal2"     1.15       -          45          -           # 21.
gd  -                2          -          -           -           # 22. Overglass
e   Overglass       2          -          -           -           # 23.

```


Anexo C



Anexo C

Modelos de Pspice para transistores FGMOS de una y dos compuertas de control.

* OrCAD Model Editor - Version 9.0

```
.subckt TMCf1_VH_NMOS DN SN BN G1 SENS
```

```
*-----
```

```
*           CINVESTAV
*   DEPARTAMENTO DE INGENIERIA ELECTRICA
*           SEES
*   MODELO COMPLETO PARA TRANSISTOR DE COMPUERTA FLOTANTE CON
*   UNA SOLA COMPUERTA DE CONTROL.
*           SOLO TRANSISTOR NMOS
*   MODELO DESARROLLADO POR VICTOR HUGO PONCE PONCE.
```

```
*-----
```

```
* DECLARACION DE PARAMETROS, PASADOS AL MODELO MEDIANTE EL SIMBOLO
* EN EL EDITOR ESQUEMATICO. C1 ES LA CAPACITANCIA ENTRE P1 Y P2
* OBTENIDA DEL LAYOUT.
```

```
+           PARAMS: C1=0
+           AREA_POLY1=0
+           LN=0    WN=0
+           ASN=0   PSN=0
+           ADN=0   PDN=0
```

```
*-----
```

```
* PARAMETROS EXTRAIDOS DEL PROCESO DE FABRICACION CMOS
* SE DEBEN MANTENER ACTUALIZADOS.
* POR EJEMPLO, EN PSPICE "CGBO" EQUIVALE A "CGBON" PARA UN NMOS.
```

```
*-----
```

```
* DESCRIPCION PARA EL TRANSISTOR NMOS.
```

```
.PARAM           CGBON=1.0E-10 CGSON=2.56E-10 CGDON=2.56E-10
+           WDN=0.643U LDN=8.001E-15 PHIN=1
+           TOXN=316E-10
+           VSENSOR=0
*           TOXN: en metros
```

```
*-----
```

```
*-----
```

```
* EXPRESIONES DEL MODELO
```

```
*-----
```

```
*-----
```

```
.PARAM RGDE=1E12
.PARAM EPSI=34.530E-12
*           farads/metro
.PARAM DIST_POLY1_A_SUB=0.958E-6
*           metros
```

```
*-----
```

```
* CAPACITANCIAS DE CONTROL DE ENTRADA
C1 G1 CF {C1}
```

```
*-----
```

```
* RESISTENCIA ASOCIADAS A LA COMPUERTA DE CONTROL
RG1 G1 0 {RGDE}
```

```

*-----
* SUMA DE LAS CAPACITANCIAS DE CONTROL (Cin) ESTO SE USA CUANDO
* SE TIENE MAS DE UNA COMPUERTA DE CONTROL. EN ESTE CASO SOLO
* APARECE UNA SOLA. SI SE TIENEN MAS COMPUERTAS, HABRA QUE
* PONER LAS CORRESPONDIENTES.
VCT1 CT1 0 {C1}
RVCT1 CT1 0 {RGDE}
*-----
* VOLTAJE PARA SIMULAR LA CARGA EN LA COMPUERTA FLOTANTE
* DEBIDO A LA INTERACCION DEL GAS CON LA PELICULA SENSORA
EVGAS GAS 0 VALUE={V(SENS)}
RGAS GAS 0 {RGDE}
*-----
* CAPACITANCIA PARASITA ENTRE CF Y CANAL, "COXN", NMOS
VCT2 CT2 0 {(EPSI/TOXN)*(LN-2*LDN)*(WN-2*WDN)}
RVCT2 CT2 0 {RGDE}
*-----
* CAPACITANCIA PARASITA ENTRE CF Y SUSTRATO (NMOS)
VCT3 CT3 0 {CGBON*(LN-2*LDN)}
RVCT3 CT3 0 {RGDE}
*-----
* CAPACITANCIA PARASITA ENTRE CF Y FUENTE Y DRENADOR, NMOS
VCT4 CT4 0 {(CGSON+CGDON)*(WN-2*WDN)}
RVCT4 CT4 0 {RGDE}
*-----
* CAPACITANCIA PARASITA ENTRE POLY1 Y SUSTRATO
VCT5 CT5 0 {(EPSI/DIST_POLY1_A_SUB)*AREA_POLY1}
RVCT5 CT5 0 {RGDE}
*-----
* CAPACITANCIA TOTAL (TERMINO DEL DENOMINADOR PARA EL POTENCIAL
* DE CF) EL CALCULO DE LAS CAPACITANCIAS SE HACE A TRAVES DE
* FUENTES DE VOLTAJE, SIENDO UN METODO EQUIVALENTE
ECTOT CTOT 0 VALUE={V(CT1)+V(CT2)+V(CT3)+V(CT4)+V(CT5)}
RECTC CTOT 0 {RGDE}
*-----
* TERMINOS PARA EL POTENCIAL DE COMPUERTA FLOTANTE
*-----
* POTENCIAL DEBIDO A LA CAPACITANCIA DE CONTROL
*
ECIN CIN 0 VALUE={C1/V(CTOT)*V(G1)}
RECIN CIN 0 {RGDE}
*-----
* POTENCIAL DE CF EN FUNCION DE LOS POTENCIALES EN FUENTE,
* DRENADOR Y SUSTRATO DEL NMOS

EDSN DSN 0 VALUE={CGSON*(WN-2*WDN)/V(CTOT)*V(SN)
+          +CGDON*(WN-2*WDN)/V(CTOT)*V(DN)
+          +CGBON*(LN-2*LDN)/V(CTOT)*V(BN)}
REDSN DSN 0 {RGDE}
*-----
* POTENCIAL DE CF EN FUNCION DE LOS POTENCIALES EN EL CANAL

```

* Y SUSTRATO, NMOS

EOXBN OXBN 0 VALUE={{(EPSI/TOXN)*(LN-2*LDN)*(WN-2*WDN)*(V(SN)
+ 2*PHIN))/V(CTOT)}

REOXBN OXBN 0 {RGDE}

*-----

* POTENCIAL DE CF EN FUNCION DEL POTENCIAL EN POLY1 SOBRE

* OXIDO GRUESO (BACK-PLATE) PARA UN PROCESO POZO N

EPOL1 POL1 0 VALUE={{(EPSI/DIST_POLY1_A_SUB)*AREA_POLY1*V(BN)/V(CTOT)}}

RPOL1 POL1 0 {RGDE}

*-----

* POTENCIAL TOTAL EN LA COMPUERTA FLOTANTE

ECF CF 0 VALUE={V(DSN)+V(OXBN)+V(CIN)+V(POL1)+V(GAS)}

RECF CF 0 {RGDE}

*-----

* MOSFET ASOCIADO AL MODELO

M1 DN CF SN BN MN1 L={LN} W={WN} AD={ADN} AS={ASN} PD={PDN} PS={PSN} OFF

*-----

.ends TMCF1_VH_NMOS

*\$

* PSpice Model Editor - Version 16.3.0

*\$

* OrCAD Model Editor - Version 9.0

.subckt TMCf2_VH_NMOS DN SN BN G1 G2 SENS

*-----

* CINVESTAV

* DEPARTAMENTO DE INGENIERIA ELECTRICA

* SEES

* MODELO COMPLETO PARA TRANSISTOR DE COMPUERTA FLOTANTE CON

* DOS COMPUERTAS DE CONTROL.

* SOLO TRANSISTOR NMOS

* MODELO DESARROLLADO POR VICTOR HUGO PONCE PONCE.

*-----

* DECLARACION DE PARAMETROS, PASADOS AL MODELO MEDIANTE EL SIMBOLO

* EN EL EDITOR ESQUEMATICO.

+ PARAMS: C1=0 C2=0

+ AREA_POLY1=0

+ LN=0 WN=0

+ ASN=0 PSN=0

+ ADN=0 PDN=0

*-----

* PARAMETROS EXTRAIDOS DEL PROCESO DE FABRICACION CMOS

* SE DEBEN MANTENER ACTUALIZADOS.

* POR EJEMPLO, EN PSPICE "CGBO" EQUIVALE A "CGBON" PARA UN NMOS.

*-----

* DESCRIPCION PARA EL TRANSISTOR NMOS.

.PARAM CGBON=1.0E-10 CGSON=1.72E-10 CGDON=1.72E-10

+ WDN=0.01U LDN=0.01U PHIN=0.7

+ TOXN=319E-10

*+ VSENSOR=0

* TOXN: en metros

*-----

*-----

* EXPRESIONES DEL MODELO

*-----

*-----

.PARAM RGDE=1E12

.PARAM EPSI=34.530E-12

* farads/metro

.PARAM DIST_POLY1_A_SUB=0.958E-6

* metros

*-----

* CAPACITANCIAS DE CONTROL DE ENTRADA

C1 G1 CF {C1}

C2 G2 CF {C2}

*-----

* RESISTENCIA ASOCIADAS A LA COMPUERTA DE CONTROL

RG1 G1 0 {RGDE}

RG2 G2 0 {RGDE}

*-----
 * SUMA DE LAS CAPACITANCIAS DE CONTROL (Cin) ESTO SE USA CUANDO
 * SE TIENE MAS DE UNA COMPUERTA DE CONTROL. EN ESTE CASO SE
 * TIENEN DOS COMPUERTAS. SI SE TIENEN MAS COMPUERTAS, HABRA QUE
 * PONER LAS CORRESPONDIENTES.
 VCT1 CT1 0 {C1+C2}
 RVCT1 CT1 0 {RGDE}
 *-----
 * VOLTAJE PARA SIMULAR LA CARGA EN LA COMPUERTA FLOTANTE
 * DEBIDO A LA INTERACCION DEL GAS CON LA PELICULA SENSORA
 EVGAS GAS 0 VALUE={V(SENS)}
 RGAS GAS 0 {RGDE}
 *-----
 * CAPACITANCIA PARASITA ENTRE CF Y CANAL, "COXN", NMOS
 VCT2 CT2 0 {(EPSI/TOXN)*(LN-2*LDN)*(WN-2*WDN)}
 RVCT2 CT2 0 {RGDE}
 *-----
 * CAPACITANCIA PARASITA ENTRE CF Y SUSTRATO (NMOS)
 VCT3 CT3 0 {CGBON*(LN-2*LDN)}
 RVCT3 CT3 0 {RGDE}
 *-----
 * CAPACITANCIA PARASITA ENTRE CF Y FUENTE Y DRENADOR, NMOS
 VCT4 CT4 0 {(CGSON+CGDON)*(WN-2*WDN)}
 RVCT4 CT4 0 {RGDE}
 *-----
 * CAPACITANCIA PARASITA ENTRE POLY1 Y SUSTRATO
 VCT5 CT5 0 {(EPSI/DIST_POLY1_A_SUB)*AREA_POLY1}
 RVCT5 CT5 0 {RGDE}
 *-----
 * CAPACITANCIA TOTAL (TERMINO DEL DENOMINADOR PARA EL POTENCIAL
 * DE CF) EL CALCULO DE LAS CAPACITANCIAS SE HACE A TRAVES DE
 * FUENTES DE VOLTAJE, SIENDO UN METODO EQUIVALENTE
 ECTOT CTOT 0 VALUE={V(CT1)+V(CT2)+V(CT3)+V(CT4)+V(CT5)}
 RECTC CTOT 0 {RGDE}
 *-----
 * TERMINOS PARA EL POTENCIAL DE COMPUERTA FLOTANTE
 *-----
 * POTENCIAL DEBIDO A LAS CAPACITANCIAS DE CONTROL
 *
 ECIN CIN 0 VALUE={C1/V(CTOT)*V(G1)+C2/V(CTOT)*V(G2)}
 RECIN CIN 0 {RGDE}
 *-----
 * POTENCIAL DE CF EN FUNCION DE LOS POTENCIALES EN FUENTE,
 * DRENADOR Y SUSTRATO DEL NMOS
 EDSN DSN 0 VALUE={CGSON*(WN-2*WDN)/V(CTOT)*V(SN)
 + CGDON*(WN-2*WDN)/V(CTOT)*V(DN)
 + CGBON*(LN-2*LDN)/V(CTOT)*V(BN)}
 REDSN DSN 0 {RGDE}
 *-----
 * POTENCIAL DE CF EN FUNCION DE LOS POTENCIALES EN EL CANAL
 * Y SUSTRATO, NMOS

```
EOXBN OXBN 0 VALUE={{(EPSI/TOXN)*(LN-2*LDN)*(WN-2*WDN)*(V(SN)
+
+2*PHIN))/V(CTOT)}}
REOXBN OXBN 0 {RGDE}
*-----
* POTENCIAL DE CF EN FUNCION DEL POTENCIAL EN POLY1 SOBRE
* OXIDO GRUESO (BACK-PLATE) PARA UN PROCESO POZO N
EPOL1 POL1 0 VALUE={{(EPSI/DIST_POLY1_A_SUB)*AREA_POLY1*V(BN)/V(CTOT)}}
RPOL1 POL1 0 {RGDE}
*-----
* POTENCIAL TOTAL EN LA COMPUERTA FLOTANTE
ECF CF 0 VALUE={V(DSN)+V(OXBN)+V(CIN)+V(POL1)+V(GAS)}
RECF CF 0 {RGDE}
*-----
* MOSFET ASOCIADO AL MODELO
M1 DN CF SN BN MN1 L={LN} W={WN} AD={ADN} AS={ASN} PD={PDN} PS={PSN} OFF
*-----
.ends TMCF2_VH_NMOS
*$
```