



CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DE ESTUDIOS  
AVANZADOS DEL INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

UNIDAD ZACATENCO

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA  
SECCIÓN DE ELECTRÓNICA DEL ESTADO SÓLIDO

**“Transistor de efecto de campo con compuerta de silicio  
nanoestructurado”**

T E S I S

Que presenta

**MARÍA FERNANDA HERNÁNDEZ RODRÍGUEZ**

Para obtener el grado de

**MAESTRA EN CIENCIAS**

EN LA ESPECIALIDAD DE

**INGENIERÍA ELÉCTRICA**

Director de tesis: Dr. Gabriel Romero Paredes Rubio

Título de la tesis:  
"TRANSISTOR DE EFECTO DE CAMPO CON COMPUERTA DE SILICIO NANOESTRUCTURADO"

Autora:  
Lic. María Fernanda Hernández Rodríguez

Asesor:  
Dr. Gabriel Romero Paredes Rubio

---

Sinodales:  
Dra. Magali Estrada del Cueto

---

Dr. Mario Alfredo Reyes Barranca

---



*A Maximiliano, por tu amor y apoyo incondicional,  
por ser mi pilar en cada paso y creer siempre en mí.  
A mi familia, por siempre estar, a pesar de la distancia.*



---

# Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, CONACyT, por el apoyo económico brindado durante mis estudios de posgrado.

Al Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN (Cinvestav), por la oportunidad de completar mis estudios de maestría.

Al Dr. Gabriel Romero, por su infinita paciencia hacia mí, por transmitirme, siempre de manera respetuosa y amable, parte de sus conocimientos y brindarme las herramientas para mi desarrollo profesional.

A la Dra. Magalí y al Dr. Alfredo Reyes, por dedicar parte de su valioso tiempo para la revisión de mi trabajo de tesis.

A mis profesores, investigadores y trabajadores de la sección de electrónica de estado sólido, por compartir conmigo parte de su trabajo.



---

# Resumen

En este trabajo de tesis se reporta la fabricación de películas de Silicio Poroso (Si-P) mediante la técnica de teñido químico asistido por metal en dos pasos (MACE, por sus siglas en inglés), utilizando oro (Au) como metal catalizador, en donde se varió el tiempo de ataque, la concentración y composición de la solución, utilizando diversos compuestos químicos (ácido fluorhídrico, HF; peróxido de hidrógeno, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>; alcohol isopropílico, IPA; fluoruro de amonio, NH<sub>4</sub>F; ácido nítrico HNO<sub>3</sub> y ácido acético, CH<sub>3</sub>COOH). Las películas se formaron sobre muestras de silicio monocristalino con orientación cristalográfica [100], con un sustrato tipo P<sup>+</sup> dopado con boro y una capa epitaxial tipo N dopado con fósforo de  $4 \pm 0.25 \mu\text{m}$  de espesor y resistividad de  $5 \pm 0.75 \Omega\text{-cm}$ . Se obtuvieron los espesores y el índice de refracción de las películas de Silicio Poroso mediante la técnica de clivado y elipsometría, respectivamente, con el fin de hallar la relación entre tales características y las condiciones de formación. De estos resultados se comprueba que el espesor de la capa porosa de silicio, en todos los casos, crece conforme el tiempo de ataque es mayor, mientras que el índice de refracción disminuye. También se calcula el porcentaje de porosidad del silicio poroso mediante la aplicación del modelo de Bruggeman, resultando una porosidad promedio de 65.9 %.

Posteriormente, con base en los resultados obtenidos, se realizó la fabricación de dispositivos tipo FET con Si-P como película activa y zona de aislamiento entre dispositivos, mediante fotolitografía, con contactos de Aluminio depositados por evaporación, para finalmente realizar la caracterización eléctrica de los transistores formados. Se midieron diferentes parámetros para relacionar los resultados con las condiciones de fabricación, hallando una fuerte relación con el espesor de la capa de silicio poroso y con las dimensiones que se utilizaron en el diseño.

*Palabras clave*— Silicio poroso, fotolitografía, teñido químico





---

# Abstract

In this thesis work, Porous Silicon films are fabricated by applying the two-step Metal-Assisted Chemical Stain Etching (MACE), using Au as catalyst metal, where the attack time, concentration and composition of the solution were varied, using different chemical compounds (hydrofluoric acid, HF; hydrogen peroxide, H<sub>2</sub>O; isopropyl alcohol, IPA; ammonium fluoride, NH<sub>4</sub>F; nitric acid, HNO<sub>3</sub> and acetic acid, CH<sub>3</sub>COOH). The films were deposited over monocrystalline silicon samples with crystallographic orientation [100], with a P<sup>+</sup>- type substrate, boron doped and an N-type epitaxial layer doped with phosphorus,  $4 \pm 0.25 \mu\text{m}$  thick and  $5 \pm 0.75 \Omega\text{-cm}$  resistivity. The thicknesses and refractive index of the porous silicon films were obtained by means of cleavage and ellipsometry or techniques, respectively, in order to find the relationship between these characteristics and the formation conditions. From these results it is found that the thickness of the porous silicon layer, in all cases, increases as the attack time increases, while the refractive index decreases. The porosity percentage of the porous silicon is also calculated by applying the Bruggeman model, resulting in an average porosity of 65.9 %.

Subsequently, based on the results obtained, the fabrication of FET type devices with Si-P as active film and isolation zone was carried out, by means of photolithography, with Aluminum contacts deposited by evaporation, to finally perform the electrical characterization of the formed transistors. Different parameters were measured to relate the results with the fabrication conditions, finding a strong relationship with the thickness of the porous silicon layer and the dimensions that were used in the design.

**Keywords**— Porous silicon, photolithography, stain etching



---

# Índice general

<b>Agradecimientos</b>	<b>I</b>
<b>Resumen</b>	<b>III</b>
<b>Abstract</b>	<b>v</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2. Objetivos</b>	<b>2</b>
2.1. Objetivo general . . . . .	2
2.2. Objetivos particulares . . . . .	2
<b>3. Antecedentes</b>	<b>3</b>
3.1. Investigaciones relacionadas en Departamento de Ingeniería Eléctrica (Sección de Electrónica del Estado Sólido) . . . . .	3
<b>4. Marco teórico y estado del arte</b>	<b>5</b>
4.1. Silicio Poroso, Si-P . . . . .	5
4.2. Formación de silicio poroso . . . . .	5
4.2.1. Formación de Si-P mediante teñido químico (stain etching) . . . . .	6
4.2.2. Formación de Si-P mediante teñido químico asistido por metales . . . . .	7
4.3. Caracterización de Si-P . . . . .	9
4.4. Transistor de Efecto de Campo . . . . .	9
4.4.1. Principio de funcionamiento . . . . .	10
4.5. Si-P en FET's y su aplicación en sensores de gases . . . . .	12
<b>5. Trabajo Experimental</b>	<b>14</b>
5.1. Obtención de películas de Si-P y fabricación de dispositivos . . . . .	14



5.1.1.	Preparación de sustratos . . . . .	14
5.1.2.	Teñido químico asistido por metal . . . . .	14
5.1.3.	Fotolitografía para la fabricación de los dispositivos . . . . .	15
5.2.	Caracterización de películas de Si-P . . . . .	19
5.2.1.	Elipsometría . . . . .	19
5.2.2.	Microscopía Óptica . . . . .	19
5.2.3.	Microscopía Electrónica de Barrido . . . . .	19
5.3.	Caracterización de dispositivos . . . . .	20
5.3.1.	Caracterización I-V . . . . .	20
<b>6.</b>	<b>Análisis y discusión de resultados</b>	<b>21</b>
6.1.	Resultados de la caracterización de películas de Si-P . . . . .	21
6.1.1.	Elipsometría . . . . .	21
6.1.2.	Microscopía Óptica . . . . .	25
6.1.3.	Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) . . . . .	27
6.2.	Resultados de la caracterización de los dispositivos FET con Si-P . . . . .	29
6.2.1.	Caracterización I-V . . . . .	29
<b>7.</b>	<b>Conclusiones y trabajo a futuro</b>	<b>55</b>
	<b>Conclusiones</b>	<b>55</b>
	<b>Aportaciones</b>	<b>57</b>
	<b>A. Limpieza RCA para obleas de S</b>	<b>58</b>
	<b>B. Aproximación de medios efectivos</b>	<b>59</b>
	<b>C. Compuestos utilizados para la formación de Si-P</b>	<b>61</b>
	<b>D. Análisis teórico del transistor FET con compuerta de Si-P</b>	<b>63</b>
	<b>Referencias</b>	<b>66</b>

---

# Índice de figuras

4.1. Rutas de obtención de Si-P a partir de silicio sólido (recuperado de [5]). . . . .	6
4.2. Representación esquemática del teñido químico de un paso (recuperado de [5]) . . . . .	7
4.3. Representación esquemática del teñido químico de dos pasos (recuperado de [5]) . . . . .	8
4.4. Sección transversal de un transistor FET simétrico de canal n (recuperado de [87]) . . . . .	10
4.5. Región de carga espacial y características $I - V$ para valores pequeños de $V_{DS}$ y para (a) $V_{GS} = 0$ V, (b) $V_{GS} = -V_1$ y, (c) $V_{GS}$ en oclusión para $V_{GS} = -V_2$ . (recuperado de [87]) . . . . .	11
4.6. Región de carga espacial y características $I - V$ con $V_{GS} = 0$ V y para (a) $V_{DS}$ pequeño, (b) $V_{DS}$ grande y, (c) $V_{DS}$ en oclusión (recuperado de [87]) . . . . .	12
4.7. Representación de la región de carga espacial cuando $V_{DS} > V_{DS}(\text{sat})$ (recuperado de [87]). . . . .	13
5.1. Mascarillas empleadas en el proceso de fotolitografía: a) Si-P de aislamiento, b) Si-P de compuerta y c) metalización. . . . .	16
5.2. Diseño de mascarillas utilizado para la fabricación de los dispositivos. . . . .	16
5.3. Dimensiones del transistor 1A. . . . .	17
6.1. Relación entre las condiciones de formación de Si-P y (a) el espesor e índice de refracción, así como su relación con la (b) porosidad, para el grupo de muestras M25-M30, cuya variación es el tiempo. . . . .	22
6.2. Relación entre las condiciones de formación de Si-P y (a) el espesor e índice de refracción, así como su relación con la (b) porosidad, para el grupo de muestras M31-M36, cuya variación es el contenido de $\text{H}_2\text{O}_2$ y HF. . . . .	22
6.3. Relación entre las condiciones de formación de Si-P y (a) el espesor e índice de refracción, así como su relación con la (b) porosidad, para el grupo de muestras M97-M102, cuya variación es el contenido de IPA y $\text{H}_2\text{O}_2$ . . . . .	23
6.4. Relación entre las condiciones de obtención y el espesor e índice de refracción para el grupo de muestras (a)M157-M159, (b)M160-M162, (c)M175-M177 y (d)M178-M180. . . . .	25
6.5. Razón de crecimiento en relación con el tiempo de usos de la solución para muestras testigo de Si-P delgado. . . . .	26
6.6. Razón de crecimiento en relación con el tiempo de uso de la solución para muestras testigo de Si-P grueso. . . . .	27
6.7. Imágenes SEM de la película de Si-P de aislamiento de la muestra M166 con magnificación de (a) 10K $\times$ y (b) 20K $\times$ . . . . .	27
6.8. Imágenes SEM de la película de Si-P de aislamiento de la muestra M208 con magnificación de (a) 10K $\times$ y (b) 30K $\times$ . . . . .	28
6.9. Imágenes SEM de la película de Si-P de compuerta de la muestra M217 con magnificación de (a) 20K $\times$ y (b) 50K $\times$ . . . . .	28



6.10. Imágenes SEM de la película de Si-P de compuerta de la muestra M219 con magnificación de (a) 10 K × y (b) 50 K ×.	29
6.11. Representación gráfica de los transistores FET 1A fabricados . . . . .	29
6.12. Curvas características I-V del transistor M145. . . . .	30
6.13. Curvas características I-V de los transistores M146-1A y M147-A. . . . .	31
6.14. Curvas I-V de los transistores de las muestras (a) M145, (b) M146 y (c) M147 con $V_{GS}=0$ . . . . .	32
6.15. Curvas I-V del transistor 1A de la muestra M145, M146 y M147 con $V_{GS}=0$ . . . . .	33
6.16. Gráfica de la transconductancia del transistor 1A de las muestras M145, M146 y M147. . . . .	33
6.17. Curvas características I-V de los transistores M154-1A, M155-1A y M156-1A. . . . .	34
6.18. Gráfica del diodo de compuerta de los transistores 154-1A, 155-1A y 156-1A. . . . .	35
6.19. Curvas I-V del transistor 1A de la muestra M154, M155 y M156 con $V_{GS}=0$ . . . . .	35
6.20. Curvas características I-V de los transistores (a)M163-1A, (b)M163-1A restando el valor $I_F$ y (c)M164-1A, (d)M164-1A restando $I_F$ . . . . .	36
6.21. Curvas características I-V del transistor M165-1A. . . . .	36
6.22. Curvas I-V de los transistores de M164 con $V_{GS}=0$ V. . . . .	37
6.23. Gráfica de transconductancia de los transistores 1A, 1B y 1C de la muestra M164. . . . .	37
6.24. Curvas I-V de transistores M169-1A, M170-1A y M171-1A. . . . .	38
6.25. Gráfica del diodo de compuerta de los transistores M170-1A y 171-1A. . . . .	39
6.26. Curvas I-V de transistores 1A, 1B y 1C de las muestras M169, M170 y M171 cuando $V_{GS} = 0$ V. . . . .	39
6.27. Curvas I-V de transistores M169-1A, M170-1A y M171-1A cuando $V_{GS} = 0$ V. . . . .	40
6.28. Curvas I-V del transistor M210-1A (a) obtenida y (b) restando la corriente $I_F$ . . . . .	40
6.29. Gráfica (a) lineal y (b) semilogarítmica del diodo de compuerta del transistor M210-1A. . . . .	41
6.30. Gráfica de transconductancia del transistor M210-1A. . . . .	42
6.31. Curvas I-V del transistor M211-1A (a) obtenida y (b) restando la corriente $I_F$ . . . . .	42
6.32. Curvas I-V del transistor M213-1A (a) obtenida y (b) restando la corriente $I_F$ . . . . .	43
6.33. Curvas I-V del transistor M214-1A (a) obtenida y (b) restando la corriente $I_F$ , y (b) del diodo de compuerta. . . . .	43
6.34. Curvas I-V de transistores M145-7A y M146-7A. . . . .	44
6.35. Gráfica del diodo de compuerta del transistor (a) M145-7A y (b) M146-7A. . . . .	45
6.36. Gráfica del diodo de compuerta de los transistores 1A, 1B y 1C de las muestras (a) M145 y (b) M146. . . . .	45
6.37. Curvas I-V del transistor M154-7A. . . . .	46
6.38. Curvas I-V de transistores M169-7A, M170-7A y M171-7A cuando $V_{GS} = 0$ V. . . . .	46
6.39. Curvas I-V de transistores M163-7A, M164-7A y M165-7A. . . . .	47



6.40. Gráfica I-V del diodo de compuerta de los transistores M163-7A, M164-7A y M165-7A. . . . .	48
6.41. Curvas I-V de transistores M169-7A, M170-7A y M171-7A. . . . .	49
6.42. Curvas I-V de los transistores 7A, 7B y 7C de las muestras (a) M169, (b) M170 y (c) M171 con $V_{GS}=0$ V. . . . .	50
6.43. Curvas I-V de transistores M213-7A y M214-7A. . . . .	51
6.44. Gráfica del diodo de compuerta de los transistores M213-7A y M214-7A. . . . .	52
6.45. Gráfica $I_F$ vs $I_D(sat)$ de los transistores 1A de los dispositivos fabricados. . . . .	54
6.46. Gráfica de la conductancia de canal, G, con respecto a la magnitud del ancho de la región de carga espacial, W, de los transistores 1A de los dispositivos fabricados. . . . .	54
B.1. Representación del concepto de medio efectivo. . . . .	59
D.1. Representación gráfica de la sección transversal del transistor FET fabricado . . . . .	63



---

# Índice de tablas

4.1. Clasificación de poros en Si-P . . . . .	5
4.2. Procesos más reportados para la formación de Si-P . . . . .	6
4.3. Técnicas de caracterización aplicadas a Si-P . . . . .	9
5.1. Condiciones de teñido químico para películas de Si-P. . . . .	15
5.2. Dispositivos formados. . . . .	18
6.1. Resultados obtenidos de elipsometría para tres grupos de películas de Si-P. . . . .	24
6.2. Resultados de elipsometría de muestras testigo. . . . .	26
6.3. Valores obtenidos de la caracterización eléctrica de los dispositivos formados. . . . .	53



---

# Capítulo 1

## Introducción

La tecnología del silicio se encuentra presente en nuestra vida cotidiana, pues diversos dispositivos que usan este material están involucrados en muchas formas de comunicación y transporte. Hacer que el material sea altamente poroso es una forma simple y económica de nanoestructurar y otorgar una gama de propiedades del material marcadamente diferentes de las del semiconductor de partida. Es por ello, que en los últimos años, el silicio poroso (Si-P o bien, P<sub>Si</sub>) se ha considerado como un medio para aumentar aún más la funcionalidad de la tecnología de silicio. Debido a esto, se generó un mayor interés en el silicio poroso en varios campos, incluidos la optoelectrónica, la microelectrónica, la fotónica, la medicina, la detección química y la bioingeniería. Se estableció que este material nanoestructurado y biodegradable tiene una amplia gama de propiedades, haciéndolo ideal para las aplicaciones indicadas. Como resultado, durante los últimos años se ha observado una evolución extremadamente rápida de la optoelectrónica, la fotónica, la microelectrónica, la sensorica, las tecnologías energéticas y los dispositivos y aplicaciones biomédicas basados en Si poroso [[1], [2]]. Se prevé que este crecimiento continúe en un futuro próximo. Sin embargo, a pesar de los avances logrados en el campo del diseño de dispositivos basados en silicio poroso y sus aplicaciones, es necesario señalar que existe un número limitado de publicaciones en el campo de la porosificación del silicio y especialmente de las aplicaciones de este material.

Actualmente, la formación de Si-P se lleva a cabo principalmente mediante la técnica de anodización, la cual presenta alta reproducibilidad y es posible obtener una amplia gama de porosidades y espesores. Sin embargo, la necesidad de realizar una formación selectiva de Si-P o bien, un grabado, dificulta el procesamiento en las obleas de silicio, resultando inconveniente su compatibilidad con la tecnología del silicio. La formación de Si-P mediante teñido químico o *stain etching* no muestra estos problemas, pero los métodos de teñido disponibles presentan problemas de reproducibilidad. Es por ello que como parte del trabajo se realizará la formación de Si-P por tinción con HF y H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> en dependencia de su concentración en la solución, con el propósito de hallar la concentración ideal que permita disminuir las desventajas que actualmente conlleva la aplicación de dicha técnica. Esto es de gran importancia en la actualidad, debido a la velocidad del desarrollo tecnológico y al ritmo de aparición de nuevos campos de aplicaciones tecnológicas basadas en Si-P [2], [3], [4].

El contenido de este trabajo de tesis se encuentra dividido en siete capítulos. El primer capítulo es la presente introducción, seguida de la descripción del objetivo general de la tesis, así como los objetivos particulares. Una breve recopilación de los trabajos realizados en la SEES y que están relacionados con el tema desarrollado, se muestran en el tercer capítulo. En el cuarto capítulo se presenta una recapitulación de los conceptos teóricos y el estado del arte relacionados con este trabajo, haciendo énfasis en tres subsecciones fundamentales para su desarrollo, como lo son la formación y caracterización de Si-P, la teoría detrás de un dispositivo transistor de Efecto de Campo y la aplicación del silicio nanoestructurado en FET's y sensores de gases. Posteriormente, se dedica un capítulo a la descripción del trabajo experimental, para enseguida mostrar los resultados obtenidos en este trabajo. Finalmente, se presentan las conclusiones y el trabajo a futuro de esta investigación.

---

## Capítulo 2

# Objetivos

### 2.1. Objetivo general

Como parte del objetivo principal de este trabajo se propone desarrollar y caracterizar un transistor de efecto de campo (FET) basado en silicio poroso (Si-P) como película de compuerta y película de aislamiento entre dispositivos. La formación de Si-P se llevará a cabo mediante la técnica de teñido químico asistido por metal de dos pasos, para posteriormente investigar las condiciones de formación que favorezcan las características ópticas, eléctricas, morfológicas para su uso en dispositivos sensores de gases.

### 2.2. Objetivos particulares

- Obtener y caracterizar películas de Si-P formado por la técnica de teñido químico catalítico, empleando nano-películas o nanopartículas de oro como catalizador en soluciones a base de ácido fluorhídrico (HF) sobre sustratos de silicio tipo N y orientación [100].
- Investigar la influencia de la solución de formación del Si-P en las características morfológicas y ópticas.
- Fabricar dispositivos JFET con compuerta de Si-P y como región de aislamiento entre otros dispositivos, mediante fotolitografía.
- Caracterizar las propiedades eléctricas de las estructuras tipo FET formadas.

---

## Capítulo 3

# Antecedentes

A continuación, se presentan cronológicamente las investigaciones relacionadas con el uso de Si-P en sensores de gases, las cuales han sido realizadas en la Sección de Electrónica del Estado Sólido (SEES) del Departamento de Ingeniería Eléctrica del CINVESTAV-Unidad Zacatenco, ya que el conocimiento de los trabajos realizados con anterioridad, sirven de base para el desarrollo del presente trabajo de tesis.

### 3.1. Investigaciones relacionadas en Departamento de Ingeniería Eléctrica (Sección de Electrónica del Estado Sólido)

En Noviembre del año 1998, el Dr. Gelacio Castillo Cabrera realizó el trabajo de tesis de maestría titulado “Estudio de los mecanismos de transporte en silicio poroso” bajo la dirección del Dr. Gabriel Romero Paredes y el Dr. Ramón Peña. En dicho trabajo, se desarrolló el estudio de los mecanismos de transporte en Si-P, con enfoque en las características I-V de Si-P y en la unión Si-P/Silicio. El Si-P formado se obtuvo mediante un ataque electroquímico de silicio cristalino con una solución de HF, para posteriormente cambiar tal solución por una de cobre, con la que se realizó el proceso de sensibilización por electrólisis de cobre.

Más adelante, en Enero de 2006, el Dr. Luis Pedrero Ojeda, para la obtención del grado de Maestro en Ciencias realizó el trabajo de tesis nombrado “Desarrollo de estructuras de Silicio Poroso con partículas metálicas para su aplicación a dispositivos sensores” bajo la dirección del Dr. Gabriel Romero Paredes y el Dr. Ramón Peña. En este trabajo se presentó el estudio, fabricación y caracterización de sensores de hidrógeno a base de Si-P con incrustaciones de nanopartículas metálicas de Pd y PdO, demostrando que la combinación de la técnica de anodización para la formación de películas de Si-P y la técnica de depósito autocatálítico, permite realizar sensores para hidrógeno con características favorables. Las estructuras formadas se caracterizaron en condiciones de flujo de hidrógeno a presión atmosférica, simulando condiciones próximas a las de su aplicación práctica.

Más tarde, en Junio del 2008 el Dr. Gerardo Águila Rodríguez bajo la dirección del Dr. Gabriel Romero Paredes y el Dr. Ramón Peña desarrolló la tesis de doctorado titulada “Estudio, fabricación y caracterización de películas de silicio poroso con agregados nanométricos de CuO y Cu<sub>2</sub>O para sensores de gases”. El objetivo central de dicho trabajo consistió en la fabricación de estructuras a base de películas nanométricas de Si-P con nanopartículas de CuO y Cu<sub>2</sub>O para mostrar su efecto en la selectividad de las películas y su aplicación a sensores de gases.

En Diciembre del año 2009 el M. en C. José Ángel Ramírez del Valle realizó el trabajo de tesis para la obtención del grado de maestría, designado “Propiedades del contacto Silicio Poroso-Silicio en función de la interfaz Silicio Poroso-Ambiente en una estructura tipo JFET”, en el cual se llevó a cabo la fabricación de una estructura tipo JFET con compuerta de Si-P, con lo cual se determinó el comportamiento de la interfaz Silicio cristalino - Silicio Poroso (Si-c/Si-P), mediante diversas técnicas de caracterización como SEM, elipsometría, mediciones I-V, entre otras. Además, se realizó el estudio de algunos de los modelos que permiten entender los procesos de formación de Si-P obtenido por diferentes técnicas, así como la caracterización de sus propiedades eléctricas y estructurales. Por último, se realizó un análisis de los principios de funcionamiento de algunas estructuras tipo FET, así como fenómenos eléctricos en la superficie. Este trabajo se realizó bajo la dirección del Dr. Gabriel Romero Paredes.



Posteriormente, el Dr. Marco Antonio Vázquez Agustín bajo la dirección del Dr. Ramón Peña defendió la tesis doctoral titulada “Estudio y desarrollo de diodos emisores de luz con heterouniones de ZnO/Si-P”, en Diciembre del año 2012. En dicho trabajo se llevó a cabo la fabricación y caracterización de estructuras luminiscentes a base de heterouniones ZnO/Si-P. De acuerdo con las técnicas de caracterización aplicadas, las películas de Si-P fueron obtenidas con propiedades fisicoquímicas reproducibles, con propiedades eléctricas, ópticas y estructurales adecuadas para su aplicación en la fabricación de heteroestructuras electroluminiscentes.

Finalmente, el trabajo más reciente relacionado con el tema de investigación que se propone desarrollar, pertenece al Dr. Esteban Díaz Torres que, bajo la dirección del Dr. Gabriel Romero Paredes en Mayo de 2013, defendió la tesis de maestría titulada “Transistor de efecto de campo con compuerta de silicio nanoestructurado como sensor de gases”, en donde se llevó a cabo el desarrollo y caracterización de estructuras tipo FET con compuerta de silicio nanoestructurado de contactos interdigitados como sensor de gas. Tales compuertas de silicio se obtuvieron mediante ataque químico asistido por metal. También se realizó la descripción del comportamiento de la interfaz Si-P/Si-c en relación con la capacidad de adsorción de moléculas del ambiente.

---

## Capítulo 4

# Marco teórico y estado del arte

A continuación, se presentan los fundamentos teóricos que sustentan esta tesis, así como la mención de resultados de investigaciones recientes respecto a cada tema que se aborda en cada sección.

Este capítulo se encuentra organizado en cinco secciones. La primera de ellas es una breve descripción general sobre el Si-P. Posteriormente, se mencionan las técnicas de formación de este material, haciendo énfasis en la técnica que se utiliza en este trabajo, seguido de una sección dedicada a la presentación de las técnicas de caracterización que se utilizan para su estudio. Más adelante se realiza una revisión teórica acerca del transistor tipo FET. Finalmente, se presenta una sección en donde se aborda el uso del Si-P en transistores tipo FET y su aplicación en sensores de gases.

### 4.1. Silicio Poroso, Si-P

El silicio poroso es un material nanoestructurado que se forma a partir de silicio cristalino mediante diversas técnicas de obtención. De manera práctica, se puede considerar que se trata de silicio cristalino con “huecos” en su interior llamados *poros*. La clasificación de este material se realiza según el diámetro de los poros y, de acuerdo con la IUPAC (*International Union of Pure and Applied Chemistry*), la nomenclatura correcta para los diferentes tipos de Si-P son los mostrados en la Tabla 4.1 [5].

Tabla 4.1: Clasificación de poros en Si-P

Tipo de poro	Diámetro de poros (nm)
Macroporo	$>50$
Mesoporo	2-50
Microporo	$\leq 2$

### 4.2. Formación de silicio poroso

De acuerdo con la literatura, actualmente existen más de 40 procesos para la formación de Si-P, haciendo posible la obtención de diferentes tipos de Si-P de acuerdo al tamaño y forma de los poros. En el esquema de la Figura 4.1 se representa la ruta general de obtención de Si-P a partir de sílice sólida [5].

La elección de la técnica a utilizar para la obtención de Si-P depende de una gran variedad de factores como lo son la forma, el tamaño y la densidad de los poros, el volumen y área superficial del sustrato a utilizar, así como también, la posible aplicación del material obtenido, el equipo disponible para su obtención, el tiempo y costos de fabricación, entre otros. Es por ello que no está establecido un método universal para la formación de Si-P.

El vasto número de técnicas para la formación de Si-P se pueden clasificar como técnicas térmicas, técnicas por ataque (húmedo y

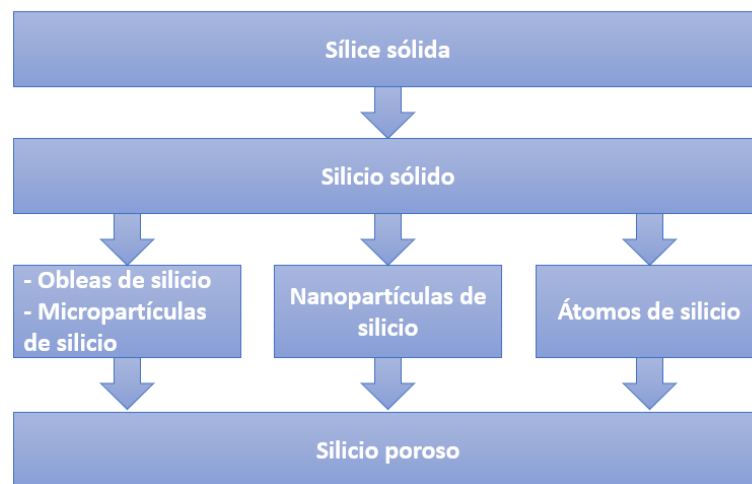


Figura 4.1: Rutas de obtención de Si-P a partir de silicio sólido (recuperado de [5]).

seco), de depósito, mecánicas o de irradiación, sin descartar alguna otra. Con cada tipo de técnica es posible la obtención de poros de distintas clases, como son mesoporos, microporos, etc, y que dan pie a diferentes aplicaciones. En la Tabla 4.2 se muestran algunas de las técnicas más utilizadas para la obtención de Si-P, junto a referencias recientes en donde se reporta la aplicación de cada proceso. Las dos técnicas marcadas en negritas dentro de la tabla son aquellas en las que a continuación se hace énfasis, pues son las que se utilizaron para la formación del Si-P en este trabajo.

Tabla 4.2: Procesos más reportados para la formación de Si-P

Técnica de fabricación	Referencias recientes
Anodización	[6], [7], [8]
<b>Teñido químico</b> ( <i>Stain etching</i> )	[4], [5], [9], [10], [11], [12], [13], [14], [15], [16], [17], [18], [19]
Fotograbado ( <i>Photoetching</i> )	[20], [21]
<b>Teñido químico asistido por metal</b> ( <i>Metal ion-assisted chemical etching, MACE</i> )	[16], [22], [23]
Grabado galvánico ( <i>Galvanic etching</i> )	[26]
Grabado con vapor ( <i>Vapor etching</i> )	[27], [28]

#### 4.2.1. Formación de Si-P mediante teñido químico (stain etching)

La técnica de teñido químico o *stain etching* debe su denominación gracias a Fuller y Ditzemberger (1957) [29], Turner (1960) [30] y Archer (1960) [31], quienes no eran conscientes de la naturaleza porosa de las películas que formaban, pero llamaron al proceso de esta manera debido a las manchas de color que se formaron en los sustratos de obleas de silicio para el revelado de uniones p-n.

El teñido químico se trata de un método químico, en el cual no se requiere el uso de una fuente de iluminación o de polarización para la formación de Si-P. Esta técnica surgió como alternativa al proceso de anodización, el cual es ampliamente utilizado (véase Tabla 5.1). La técnica consiste en la inmersión de un sustrato de silicio en oblea en una solución a base de un fluoruro y un oxidante. El flúor para la formación de Si-P suele ser suministrado por ácido fluorhídrico (HF), aunque también se han descrito soluciones con ácidos fuertes que contienen flúor, como el ácido fluorobórico ( $\text{HBF}_4$ ), ácido fluoroantimónico ( $\text{HSbF}_6$ ) [12], [13], [34] y el bifluoruro de amonio ( $\text{NH}_4\text{F}$ ) [38], [39]. Por otro lado, el oxidante más utilizado es el ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ), que se ha investigado en numerosos estudios para el desarrollo de nanoestructuras de silicio (nanopilares y nanocables) y campos de aplicación interesantes [10]. Sin embargo, el uso de  $\text{HNO}_3$  también conduce a la formación de burbujas, películas no homogéneas y resultados irreproducibles [14], [35], [36], [15]. Actualmente se reportan soluciones para la formación de Si-P utilizando como agente oxidante  $\text{H}_2\text{O}_2$  [80], [81].

La nanoestructuración del silicio por teñido químico es interesante por varias razones. Una de ellas es que se trata de un método económico con capacidad para controlar varios parámetros y que puede llevarse a cabo en un modesto laboratorio químico de manera





sencilla. Además, no es necesaria una preparación previa del sustrato de silicio, más allá de una limpieza estándar. Otro aspecto importante es que, en general, no es determinante para llevar a cabo el proceso el tipo de conductividad del sustrato (N ó P) ni el grado de impurificación.

Actualmente, por medio de experimentos con diferentes oxidantes y con la comprensión de los fenómenos involucrados, se ha desarrollado un conjunto de directrices para un teñido químico eficaz [10], [74], en donde parte de los puntos más relevantes para la formación exitosa de Si-P son los siguientes:

- El oxidante debe ser capaz de inyectar huecos en la banda de valencia del Si a una velocidad apreciable por lo que su potencial electroquímico debe ser más positivo que aproximadamente +0.7 V.
- La solución de flúor debe ser ácida para evitar el grabado catalizado por el OH.
- La formación de óxido debe ser lenta o inexistente.
- Una concentración de flúor suficientemente alta en comparación con la concentración de oxidante evita el electropulido causado por la acumulación de óxido.
- Todos los productos de la reacción deben ser solubles en la solución, ya que subproductos sólidos pueden depositarse en la superficie de la película y evitar su posterior formación.
- La homogeneidad de la película aumenta si la semirreacción del oxidante no desarrolla gas o bien, se puede evitar su adherencia en forma de burbujas con el uso de una sustancia surfactante.
- La reacción neta de grabado desde la inyección de huecos hasta la eliminación de átomos de Si (incluyendo las reacciones de cualquier subproducto) tiene que ser suficientemente anisotrópica (atacando todo tipo de sitios, pero sólo en el fondo del poro, también en dirección perpendicular a la superficie) para apoyar la nucleación y propagación de los poros.

#### 4.2.2. Formación de Si-P mediante teñido químico asistido por metales

El teñido químico asistido por metal ó MAE (por sus siglas en inglés, *Metal assisted etching*) o bien, MACE (por sus siglas en inglés, *Metal ion-assisted chemical etching*) es una variante de la técnica de teñido químico para la formación de Si-P, descrita en la sección anterior. También se basa en el empleo de una solución a base de un fluoruro y de un agente oxidante, pero además se utiliza un metal que potencia catalíticamente el proceso de teñido.

El Si que se encuentra debajo del metal presenta un grabado mucho más rápido que el que no tiene cobertura metálica. Como resultado, el metal se hunde en el sustrato generando poros o nanocables. Esta técnica contiene a su vez dos variantes, en donde el metal, especialmente los metales nobles, puede disolverse en la solución atacante (método MAE de 1 paso) o bien, ser depositado sobre el sustrato de silicio (método MAE de 2 pasos), en forma de nanopartículas o películas finas, antes del proceso de grabado en una solución de HF que contenga un agente oxidante [5], [73], [17], [40].

- **MAE de un paso.** En esta variante, la deposición del metal y el teñido químico se realizan en la misma solución atacante, de tal manera que los iones metálicos se disuelven en HF (Figura 4.2). Este método conlleva a la formación de Si-P con diferentes microestructuras tales como nanohilos o cráteres. En general se trata de un método sencillo, con el cual es posible generar diversas nanoestructuras, sin embargo, el control de dimensión y homogeneidad es complicado.

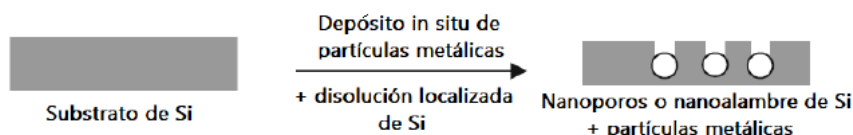


Figura 4.2: Representación esquemática del teñido químico de un paso (recuperado de [5])

- **MAE de dos pasos.** Esta variante consiste en el depósito de una película metálica muy fina de algunos nanómetros de espesor sobre la superficie de Si. En la mayoría de los casos, el depósito del metal se realiza mediante *sputtering* y posteriormente se genera el grabado en la solución de HF en presencia de un agente oxidante. Durante el ataque, la disolución del Si debajo de las partículas metálicas se ve fuertemente potenciada, y se forman poros mientras las partículas se hunden en los poros de Si [16] (Figura 4.3). Los metales depositados son generalmente metales nobles como la Ag [18], [17], [40], [19]; Au [16]; [42] [41], [43], [44], [45] y Pt [16], entre otros.

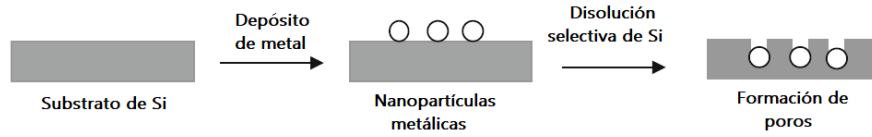


Figura 4.3: Representación esquemática del teñido químico de dos pasos (recuperado de [5])

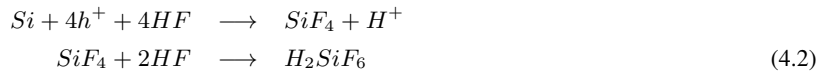
Son diversas las ventajas de utilizar el grabado asistido por metal, ya que el método es fácil de implementar y adecuado para la formación selectiva de Si-P, requerido en la fabricación por grupo de dispositivos. Las capas de Si-P pueden formarse sobre Si tipo N y tipo P en una amplia gama de resistividades y en Si con una alta resistividad. En comparación con las películas grabadas por teñido químico, las que se obtienen mediante el teñido asistido por metal son más uniformes y se pueden obtener con un espesor mucho mayor. Las técnicas MAE pueden utilizarse para fabricar estructuras de alta relación superficie-volumen, en forma selectiva cuando se utiliza el método de litografía para depositar el catalizador metálico con un patrón definido, delimitando así la formación del Si-P y también se consigue controlar la orientación de las nanoestructuras de Si (por ejemplo, poros, nanohilos) con respecto a la superficie del sustrato.

El modelo de formación de Si-P mediante teñido químico asistido por metal sugiere la reducción del agente oxidante, que en este trabajo es el peróxido de hidrógeno  $H_2O_2$ , en presencia de un metal. Esta reacción, denominada como reacción de cátodo, también se considera como la reducción de protones en el hidrógeno reactivo ( $H^+$ ) y la generación de huecos  $h^+$ , resultando la siguiente reacción:

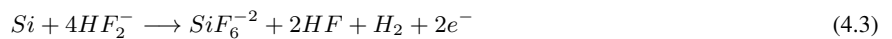


Sin embargo, existen diferentes postulados para la formación de Si-P, en los cuales se considera que la evolución de hidrógeno gaseoso durante el ataque es una reacción de ánodo, es decir, el agente principal de la reacción catódica es el  $H_2O_2$  y no el hidrógeno  $H^+$  [[88]]. Los tres postulados que toman en cuenta esta propuesta para la formación de Si-P son los siguientes:

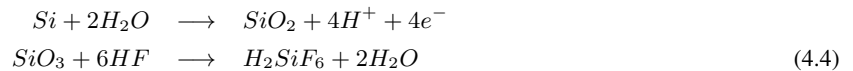
1. Disolución directa de Si en estado tetravalente. Sugiere la oxidación electrónica del Si, formando un complejo tetrafluoruro de Si que es rápidamente disuelto por el HF.



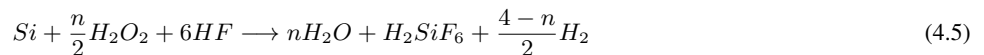
2. Disolución directa de Si en estado divalente: oxidación de Si con un complejo iónico de  $HF_2^{-2}$  que termina reduciéndose a HF, infiriendo que la generación de hidrógeno gaseoso es debida a la reacción de ánodo.



3. Formación y disolución de óxido: se lleva a cabo la formación de óxido sobre la superficie de Si, el cual es disuelto fácilmente por el HF y forma el complejo hexafluoruro de Si en solución acuosa.



Los tres postulados anteriores ocurren simultáneamente, por lo que existen propuestas para realizar una combinación del segundo y tercer postulado, pues se dificulta la estimación de la densidad de estados superficiales que contribuyen a las reacción que conlleva la unión de los tres. Así, para modelar la disolución de Si en presencia del metal catalizador se hace referencia a la siguiente reacción:



con  $n = 3$ .

El proceso de formación de Si-P comienza con la reducción del oxidante en la superficie del metal, pues los metales presentan actividad catalítica grande, debido a la reducción del oxidante se lleva a cabo la generación de huecos que serán difundidos a través del metal e inyectados hacia el Si, cuya unión conforma un contacto metal/semiconductor. Finalmente, el Si es oxidado por los huecos previamente inyectados y disuelto por el HF en la interface metal/Si [[88]], [[89]]. Dado que la concentración de huecos es mayor en la interface, permite que el óxido formado en esta región sea atacado rápidamente por el HF, en comparación con la razón de ataque cuando no se cuenta con el recubrimiento metálico. Por último, los huecos se difunden desde la interface hasta las zonas libres de metal, principalmente en las paredes de los poros y en los extremos de los filamentos formados.



### 4.3. Caracterización de Si-P

El Si-P es un material nanoestructurado cuyas propiedades optoelectrónicas y morfológicas han sido objeto de estudio desde hace varios años. Las propiedades dependen principalmente tanto de la distribución del tamaño de los poros, así como de la naturaleza química de la superficie interna. Hasta la fecha se tiene conocimiento de aproximadamente 100 técnicas de caracterización aplicadas para el estudio de este material [5].

En la Tabla 4.3 se muestran algunas de las técnicas más utilizadas para la caracterización del Si-P, así como las propiedades y parámetros obtenidos de cada proceso de caracterización, además se incluyen referencias sobre el estudio de este material mediante cada técnica. Las técnicas marcadas con negritas son aquellas que se utilizaron en el desarrollo de este trabajo y para las cuales se presenta una breve descripción en la Sección 5.2.

Tabla 4.3: Técnicas de caracterización aplicadas a Si-P

Técnica de caracterización	Propiedades y parámetros obtenidos	Referencias recientes
<b>Elipsometría</b>	Propiedades ópticas, índice de refracción, coeficiente de extinción, espesor, porosidad	[46], [47], [48]
Espectroscopía Raman	Propiedades estructurales, composición	[49], [61], [51], [52]
FTIR	Presencia de especies químicas	[53], [54], [55], [56], [57], [61]
<b>SEM</b>	Forma y textura de la superficie del Si-P	[59], [51], [60], [61], [62], [64]
XRD	Propiedades cristalinas	[61], [60]
FIB	Morfología superficial y volumétrica	[59], [64], [65]
<b>I-V y C-V</b>	Propiedades eléctricas	[66], [67], [75], [76]

### 4.4. Transistor de Efecto de Campo

Los transistores de efecto de campo o FET (por sus siglas en inglés *Fiel Effect Transistor*) denominado de esta manera porque la señal de entrada crea un campo eléctrico que controla la corriente a través de este dispositivo electrónico. Cabe destacar que el FET también ha sido llamado transistor unipolar, para enfatizar que sólo un tipo de portador, los portadores mayoritarios (electrones o huecos), están involucrados en la operación.

Los transistores FET fueron propuestos por primera vez por Shockley en 1952 y comprobado su funcionamiento por primera vez por Dacey y Ross [86]. Es importante destacar que se trata de un dispositivo basado en un principio teórico completamente diferente al de un transistor de unión bipolar o BJT (*Bipolar Junction Transistor*). Mientras que un transistor BJT opera a través de la inyección de portadores minoritarios, en un transistor FET el voltaje aplicado es usado para modular la región transversal que permite el flujo de la corriente. El fenómeno de la modulación de la conductancia de un semiconductor mediante un campo eléctrico aplicado perpendicularmente a la superficie de un semiconductor es llamado *efecto de campo*.

Al hacer una comparativa con los transistores BJT, los FET presentan una impedancia de entrada elevada y además consumen poca potencia, por lo que sigue siendo muy usado en circuitos integrados. Por lo general, un FET es más pequeño que un BJT, lo cual representa un ahorro de espacio en la elaboración de equipos electrónicos. En cuando al ruido, un FET es menos ruidoso que un BJT, por lo que es ampliamente utilizado en las primeras etapas de un circuito. Finalmente, una desventaja para la amplificación de señal del FET, es que la ganancia de señal es menor que en un BJT.

### 4.4.1. Principio de funcionamiento

La estructura básica de un FET está constituida por un semiconductor de tipo n conocido como **canal**, con dos contactos óhmicos en sus extremos, uno de ellos denominado **fuelle** ó S (*Source*) y el otro conocido como **drenador** ó D (*Drain*). En el dispositivo de canal n, los portadores mayoritarios son los electrones, los cuales fluyen entre las terminales de la S y D. El tercer electrodo se denomina **compuerta** ó G (*Gate*) y está constituido por dos regiones de tipo p difundidas a ambos lados del canal e interconectadas entre sí. S es la terminal por la cual los electrones entran al canal mediante un circuito externo y D es la terminal por donde los electrones salen o son drenados del dispositivo. G es conocida como la terminal de control. Como se puede ver en la Figura 4.4, las dos terminales G se encuentran conectadas entre sí con el fin de formar una sola conexión.

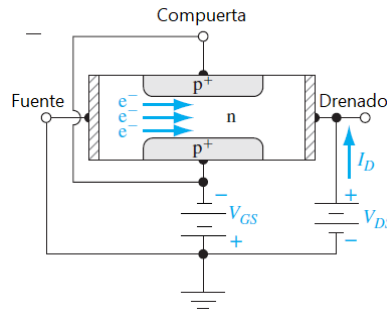


Figura 4.4: Sección transversal de un transistor FET simétrico de canal n (recuperado de [87])

En los circuitos integrados generalmente se utilizan transistores FET fabricados mediante tecnología planar, en la cual el semiconductor de tipo n se encuentra depositado a manera de capa epitaxial sobre un sustrato de Si (material más utilizado, pero puede ser de otro semiconductor) de tipo p. También es posible la fabricación de dispositivos FET de canal p, en donde serán los huecos los portadores mayoritarios que fluyen de la fuente al drenador, sin embargo, este tipo de dispositivos no son muy comunes debido a la baja movilidad de los huecos en comparación con la de los electrones ( $\mu_n = 1350 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$  para electrones y  $\mu_p = 480 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$  para huecos).

En la Figura 4.5a se muestra un FET sin voltaje aplicado en la compuerta ( $V_{GS} = 0 \text{ V}$ ). Cuando la fuente está conectada a tierra y se aplica una baja tensión de drenador  $V_{DS}$  positiva, una corriente de drenador  $I_D$  se produce entre los terminales S y D. Como se puede observar en tal figura, la característica  $I_D-V_{DS}$  es aproximadamente lineal, debido a que el canal n es en esencia una resistencia.

Por otro lado, cuando se aplica un voltaje negativo en la compuerta G,  $V_{GS} = -V_1$ , con respecto a la fuente, S, se altera la conductancia del canal, como se muestra en la Figura 4.5b. La región de carga espacial se amplía, por lo que la región del canal se hace más estrecha, aumentando la resistencia del canal. La pendiente de la curva  $I_D-V_{DS}$ , para  $V_{DS}$  pequeños, disminuye. Si se aplica una tensión  $V_{GS}$  mayor, es posible llegar a la condición mostrada en la Figura 4.5c, donde la región de carga espacial ha llenado completamente la región del canal. Esta condición se conoce como oclusión y la corriente  $I_D$  bajo tal condición, es prácticamente nula, ya que la región de agotamiento aísla las terminales S y D.

En resumen, la corriente en el canal está controlada por el voltaje aplicado en la compuerta, G, y el funcionamiento básico del transistor consiste en el control de la corriente en una parte del dispositivo y por una tensión en otra parte del mismo. Este es un dispositivo normalmente de encendido o en modo de enriquecimiento, lo que significa que debe aplicarse una tensión en la terminal G para apagarlo.

Es importante aclarar que, hasta este punto, se ha considerado en las Figuras 4.4 y 4.5, que el ancho de la región de carga espacial mantiene el mismo valor a lo largo del canal para efectos de visualización. Sin embargo, en la polarización inversa de las uniones p-n, podemos observar cómo éstas están más inversamente polarizadas en la zona del drenador D que en la zona de la fuente S. Recordando que la anchura de la zona de carga espacial en una unión p-n polarizada en inversa es mayor cuanto mayor sea dicha polarización inversa, tendremos que la anchura de la región de deserción es mayor cuanto más cerca del drenador nos ubiquemos, debido a la caída de potencial de la fuente ( $V = 0 \text{ V}$ ) al drenador ( $V = +V_{DS}$ ), o lo que es lo mismo, la anchura efectiva del canal será menor en la parte del drenador D que en la parte de la fuente S.

Ahora, cuando se tiene la condición en que  $V_{GS} = 0 \text{ V}$  se mantiene y  $V_{DS}$  cambia, como se muestra en la Figura 4.6a, se puede observar que a medida que aumenta  $V_{DS}$  de manera positiva, la región de carga espacial se extiende hacia el interior del canal, aumentando su resistencia efectiva, por lo tanto, la pendiente de la característica  $I_D-V_{DS}$  disminuye como se muestra en la Figura 4.6b. La caída de tensión a través del canal depende de la posición y la resistencia efectiva del canal varía a lo largo de la longitud de éste. La región de carga espacial (RCE) se incrementa gradualmente con el incremento de la caída de voltaje de fuente a drenador de 0 V hasta el  $V_{DS}$  aplicado.

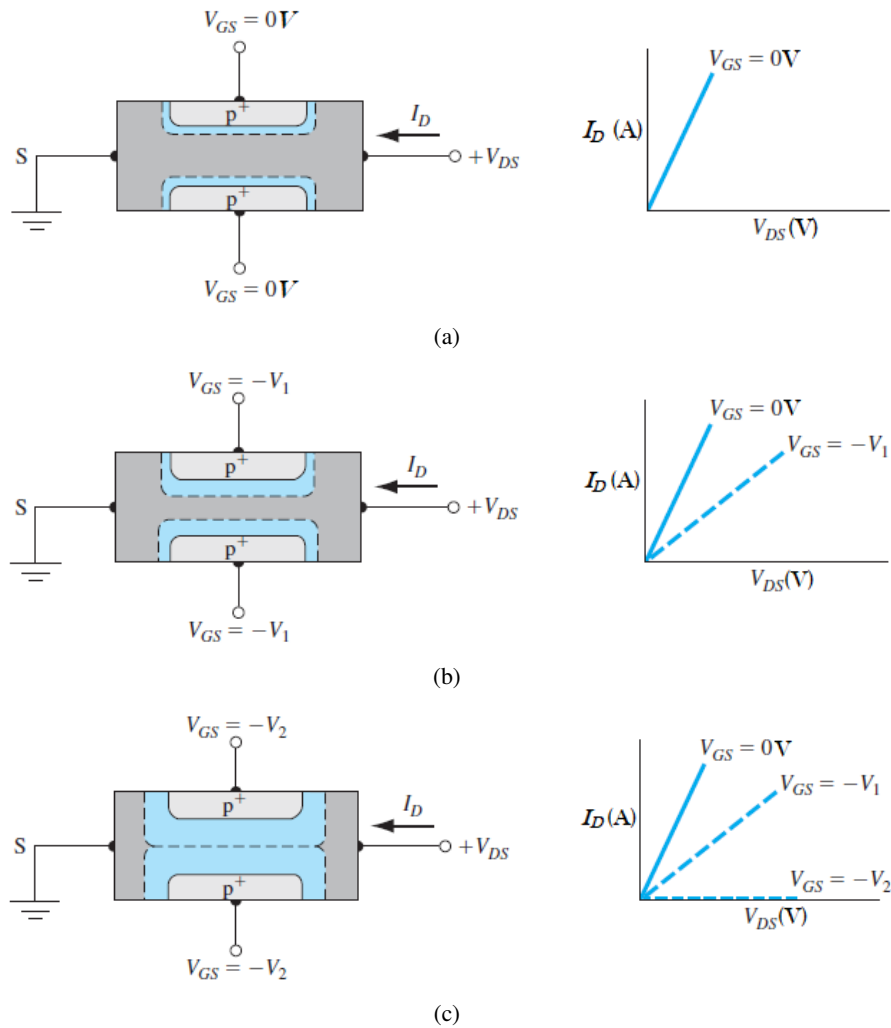


Figura 4.5: Región de carga espacial y características  $I - V$  para valores pequeños de  $V_{DS}$  y para (a)  $V_{GS} = 0V$ , (b)  $V_{GS} = -V_1$  y, (c)  $V_{GS}$  en oclusión para  $V_{GS} = -V_2$ . (recuperado de [87])

Si la tensión  $V_{DS}$  aumenta aún más, puede resultar en la condición mostrada en la Figura 4.6c. El canal se ha ocluido (en inglés, *pinchoff*) en la terminal del drenador y cualquier aumento adicional de la tensión  $V_{DS}$  no provocará un aumento en  $I_D$ . La tensión  $V_{DS}$  en este punto se denomina voltaje de saturación,  $V_{DS}(sat)$ . Para  $V_{DS} > V_{DS}(sat)$ , se dice que el transistor está en la región de saturación e  $I_D$ , para este caso ideal, es independiente de  $V_{DS}$ .

En primera instancia, se podría esperar que  $I_D = 0A$  cuando el canal se cierra, pero esto no ocurre. En la Figura 4.7 se muestra la región de oclusión en el canal, donde  $L$  es la longitud del canal. El canal  $n$  y la terminal del drenador,  $D$ , están ahora separados por una región de carga espacial que tiene una longitud  $\Delta L$ . Los electrones se mueven a través del canal  $n$  desde la fuente,  $S$ , y se inyectan en la región de carga espacial donde, sometidos a la fuerza del campo  $E$ , son barridos hacia la zona del contacto  $D$ . Si se considera que  $\Delta L \ll L$ , entonces el campo eléctrico  $E$  en la región del canal  $n$  no cambia a partir de la condición  $V_{DS}(sat)$ ; la corriente del drenador permanecerá constante al cambiar  $V_{DS}$ . Una vez que los portadores están en la región del drenador, la corriente de drenador será independiente de  $V_{DS}$ ; así, el dispositivo parece una fuente de corriente constante.

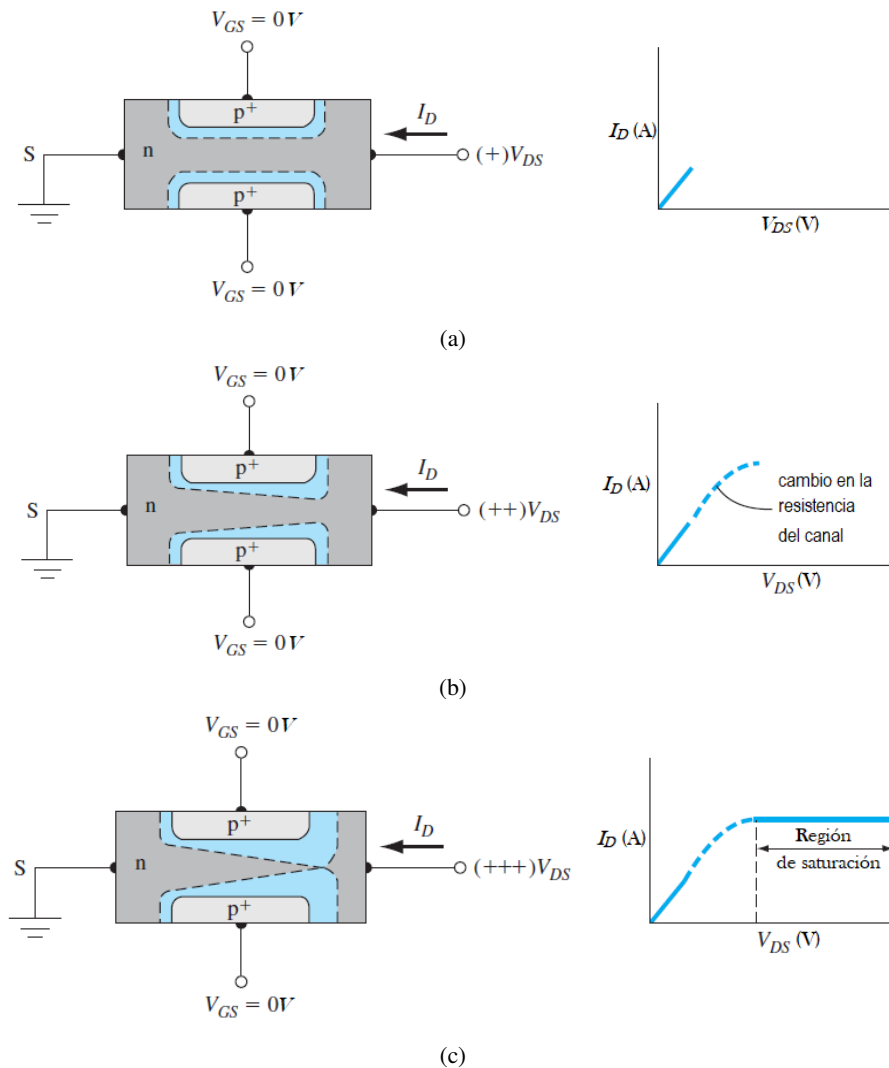


Figura 4.6: Región de carga espacial y características  $I - V$  con  $V_{GS} = 0\text{ V}$  y para (a)  $V_{DS}$  pequeño, (b)  $V_{DS}$  grande y, (c)  $V_{DS}$  en oclusión (recuperado de [87])

## 4.5. Si-P en FET's y su aplicación en sensores de gases

Hoy en día, uno de los usos más prometedores del Si-P es su aplicación en los sensores, ya que algunas de las ventajas de utilizarlo como material en sistemas de sensado es su gran superficie interna (relación superficie-volumen), su reactividad superficial, el amplio rango de tamaño de poros que se pueden obtener, los cuales pueden ser variados por medio del método de obtención, y, sobre todo, su compatibilidad con las tecnologías existentes basadas en Si. El interés en la fabricación de mejores sensores de gases que sean altamente sensibles radica en que actualmente es necesario el monitoreo constante y control de aire contaminado en ambientes tales como laboratorios, hospitales o instalaciones técnicas en general, esto con el fin de prevenir accidentes causados por fuga de gases.

En el presente existen propuestas de nuevos dispositivos de sensado basados en una estructura FET con una capa de Si-P como material sensor, dispositivo conocido como APSFET (*Adsorption Porous Silicon-based FET*) [3],[83]. El mecanismo de detección de dicho dispositivo se basa en un canal de conducción inducido por el gas a detectar en el silicio cristalino bajo la capa de detección, un nuevo enfoque con respecto a los sensores fabricados con Si-P previamente reportados [4]. Los sensores FET propuestos con Si-P demuestran buena sensibilidad para la detección de vapores, líquidos y humedad. La diversidad de los métodos de obtención y, a partir de ahí, la morfología del Si-P, permite crear selectivamente sensores de diferentes sustancias en la misma estructura básica [72], [77]. Los mecanismos de detección implicados están generalmente asociados a un cambio en la concentración de portadores libres en la capa porosa debido a las moléculas adsorbidas, o a cambios en la constante dieléctrica debido a la condensación de gas dentro de los poros; la cantidad detectada es generalmente una conductancia/corriente o una capacitancia [4], [83],[24].

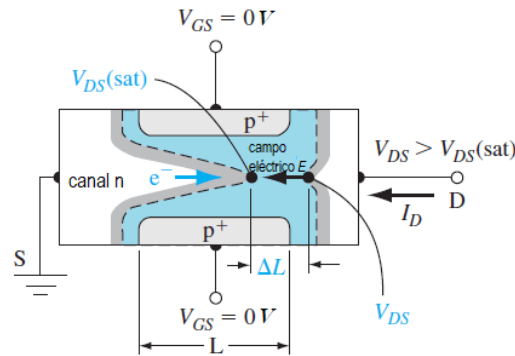


Figura 4.7: Representación de la región de carga espacial cuando  $V_{DS} > V_{DS(sat)}$  (recuperado de [87]).

De manera general, el principio de funcionamiento de un sensor se basa fundamentalmente en el monitoreo de la variación de las propiedades eléctricas u ópticas del Si-P en presencia de especies químicas en un gas, principalmente. Gracias a las propiedades y características de este material es posible utilizarlo como un transductor que convierte el efecto de los analitos en una señal óptica o eléctrica. Una transducción efectiva de un sensor se basa en la precisión y la exactitud, así como en la selección de un tamaño de poro adecuado, ya que determina en gran medida el tamaño de las especies que se pueden capturar [32], [69], [70], [79]. De esta forma un sensor “ideal” tendría gran sensibilidad, alta selectividad, tamaño pequeño y bajo costo. Es por ello que en los últimos años, se han considerado varios materiales de detección nuevos, además de los óxidos metálicos de película gruesa estándar. La compatibilidad de estos materiales con los procesos de fabricación de circuitos integrados (CI) sería sin duda una ventaja notable. De hecho, el uso de la fabricación por lotes de circuitos integrados y la inclusión de la electrónica de extracción/acondicionamiento en el mismo chip daría un impulso significativo en la dirección de dispositivos de bajo coste/bajo tamaño [4]. Actualmente, algunos de los gases principalmente sensados mediante APSFETs, se encuentran los vapores de alcohol y acetona en flujo de  $N_2$ , dióxido de nitrógeno ( $NO_2$ ) y amoníaco ( $NH_3$ ), que a determinados valores, son nocivos para la salud.

Por otro lado, también se han propuesto métodos ópticos, basados en la modulación de la fotoluminiscencia, o en la interferometría y se han demostrado sensibilidades muy altas [4], así, la fotónica del Si-P se ha implementado con éxito como plataforma de detección óptica para una amplia gama de analitos objetivo en diversas aplicaciones. La característica primordial de estos dispositivos es que los cambios en las propiedades dieléctricas dentro del poro pueden conducir a un cambio en el índice de refracción efectivo medio de la película, que a su vez induce un cambio espectral correspondiente en las propiedades ópticas de la capa porosa. La posibilidad de este modo de detección se basa en dos propiedades características adicionales del Si-P, las cuales son: la morfología de los poros y el grabado uniforme, la primera es lo suficientemente pequeña en comparación con las longitudes de onda ópticas para minimizar la dispersión y proporcionar un medio ópticamente uniforme y la segunda es que se presenta un grabado uniforme a medida que el grabado avanza en la oblea, creando así una interfaz ópticamente plana, en comparación con la longitud de onda, para que se produzca la interferencia. Aunque esto no es universalmente el caso para todos los tipos de Si-P, existe una gama significativa de parámetros de grabado, en los que se cumplen estas condiciones. Sin embargo, el uso de la detección óptica implica un sistema de medición mucho más complejo con respecto a los métodos eléctricos, y este hecho limita su utilidad en los sensores prácticos [82].

---

## Capítulo 5

# Trabajo Experimental

En esta sección se presentan los detalles experimentales llevados a cabo en el trabajo de laboratorio de esta tesis. Se comienza por la descripción de los procesos realizados para la obtención de películas de Si-P y la fabricación de los dispositivos electrónicos, posteriormente se explica brevemente la manera en que se realizó la caracterización de las películas formadas y, finalmente, la caracterización de los dispositivos electrónicos.

### 5.1. Obtención de películas de Si-P y fabricación de dispositivos

En este apartado se realiza una explicación de los procesos experimentales llevados a cabo en el laboratorio para la obtención de las películas de Si-P, cuyo estudio fue fundamental para la elección de las condiciones de formación de los dispositivos, cuyos detalles experimentales se presentan al final.

#### 5.1.1. Preparación de sustratos

Se comenzó con el rayado y corte de obleas de Si monocristalino con orientación cristalográfica [100], sustrato P<sup>+</sup> dopado con boro, y resistividad de  $0.005 \pm 0.02 \Omega\text{-cm}$ , con una capa epitaxial tipo N dopado con fósforo de  $4.0 \pm 0.25 \mu\text{m}$  de espesor y resistividad de  $5 \pm 0.75 \Omega\text{-cm}$ . Las muestras obtenidas son de  $1.5 \times 1.5 \text{ cm}^2$  y etiquetadas de manera seriada como se muestra en la primera columna de la Tabla 5.1. Previo a la formación de Si-P, se realizó una limpieza estándar RCA para los sustratos de silicio, la cual se describe a detalle en el Apéndice A.

#### 5.1.2. Teñido químico asistido por metal

El metal utilizado para llevar a cabo el ataque químico asistido por metal es Au, el cual fue depositado mediante pulverización cátodica o *sputtering*, para ello se trabajaron con grupos de 6 muestras, pues ésta es la capacidad permitida por el equipo. El plasma utilizado en el depósito es de Argón, con una presión de  $2 \times 10^{-2}$  mbar (2 Pascales), potencia de 10W, por un tiempo de 10 s y una distancia fuente-sustrato de  $\sim 10$  cm. La película de Au fue depositada del lado N de los sustratos y se determinó, mediante elipsometría, que el espesor de tal película es de aproximadamente 2 nm.

Una vez depositada la capa de Au, se procedió a la preparación de la solución para el teñido químico de cada muestra. En la Tabla 5.1 se observa el porcentaje en volumen de cada componente de la solución con un volumen total de 40 ml, así como el tiempo de ataque. Cabe resaltar que se preparó una solución por cada muestra. Como se puede notar en dicha tabla, los compuestos utilizados para el ataque son mezclas de ácido fluorhídrico (HF), alcohol isopropílico (IPA), peróxido de hidrógeno (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) fluoruro de amonio (NH<sub>4</sub>F), ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>) y ácido acético (CH<sub>3</sub>COOH).

Posterior a determinar la solución y tiempo de teñido químico a utilizar, se procede a sumergir la muestra seleccionada durante el tiempo requerido, para finalizar con el enjuague en agua desionizada en repetidas ocasiones y secar bajo flujo de nitrógeno. Es





importante mencionar que las condiciones de teñido químico para la formación de Si-P, se eligieron con base en lo que actualmente se encuentra citado en la literatura y con el propósito de investigar las mejores condiciones en que se formaría el Si-P de los dispositivos.

Tabla 5.1: Condiciones de teñido químico para películas de Si-P.

Muestra	% HF	% IPA	% H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	% NH <sub>4</sub> F	% HNO <sub>3</sub>	% CH <sub>3</sub> COOH	Tiempo											
M1-M3	40	10	50	-	-	-	3-1 min											
M4-M6	30		60				-	-	-	15-45 s								
M7-M10										15-60 s								
M11-M12	20		70				-	-	-	15-30 s								
M13-M16										15-60 s								
M17-M18										5 y 1 min								
M19-M24	70-20		10				20-70	-	-	-	5 min							
M25-M30	50						40				1-6 min							
M31-M36	70-20						20-70				-	-	-	-	15 s			
M37-M42															-	-	-	-
M43-M48		14-4																
M49-M54	-	-		-	56-16	-	-				-	10-2.5						
M55-M60												4-1.5						
M61-M66												-	-	-	-	-	-	50 s
M67-M72																		
M73-M78	-	-		20	60-10	-	-				-	10-60						
M79-M84			20-70	10														
M85-M90			-	-				-	-	-		-	25 s					
M91-M96														70-20	10-60	20	-	
M97-M102	20	10-60	70-20	-	-	-	-											
M115-M120	-	10	10-60	20	-	-	-	60-10										
M121-M126		10-60	20															
M127-M132		10	20-70	10														
M133-M138		70-20	10-60	10														

### 5.1.3. Fotolitografía para la fabricación de los dispositivos

La fotolitografía (también llamada litografía óptica o litografía UV) es una técnica establecida y frecuentemente utilizada en el área de la microelectrónica, cuyo proceso consiste en el enmascaramiento de patrones geométricos (de tamaño micro a nanométrico) delineados sobre la superficie a grabar utilizando una mascarilla (también llamada máscara óptica) determinada. Para el proceso de grabado selectivo se emplean fotoresinas, las cuales se utilizan generalmente para cubrir el sustrato para una subsecuente exposición a radiación luminosa monocromática de alta energía, específicamente radiación ultravioleta. Dependiendo de la fotoresina aplicada, pueden utilizarse dos modos principales de creación de patrones: el modo positivo (fotoresina soluble bajo iluminación UV) o el negativo (fotoresina insoluble bajo iluminación UV). Por ello, las propiedades del material de la resina son de especial importancia, pues no sólo determinan el modo de estructuración posible, sino que también son importantes para la calidad de las estructuras resultantes, ya que su estabilidad determina la resolución del diseño grabado [84]. Para llevar a cabo con éxito la técnica de fotolitografía, se requiere una atmósfera libre de polvo en suspensión y esto se logra en las denominadas “salas limpias”, es decir, un entorno donde el contenido de partículas en la atmósfera se ha eliminado mediante el uso de filtración forzada.

Para el proceso de grabado de los dispositivos se emplearon tres mascarillas diseñadas y fabricadas en función al número de estructuras que se desean integrar y acorde al tamaño de los sustratos a utilizar, como se muestran en la Figura 5.1. La primera mascarilla (M-1, Figura 5.1a) se diseñó para delimitar el área de formación del Si-P grueso o de aislamiento entre dispositivos, la segunda mascarilla (M-2, Figura 5.1b), para la formación de Si-P delgado de compuerta y, finalmente, la tercera mascarilla (M-3, Figura 5.1c), para definir el área de formación de contactos metálicos. En cada mascarilla, los motivos inferiores y superiores se encuentran separados por una franja en donde se encuentran los motivos de alineamiento con una geometría en cruz con dimensiones de 150 μm de longitud y 150 μm de ancho.

Las mascarillas se diseñaron con el software de diseño KLayout 0.27.6, posteriormente fueron grabadas mediante pulverización catódica de cromo (Cr) sobre un soporte de vidrio de 5×5 cm<sup>2</sup>. Las especificaciones de las tres mascarillas son las siguientes:

- Mascarilla M-1: el primer patrón rectangular de la esquina inferior izquierda tiene dimensiones de  $750 \times 350 \mu\text{m}$ , y este tamaño aumenta  $50 \mu\text{m}$  hasta la tercera fila.
- Mascarilla M-2: tomando nuevamente como referencia el patrón de la esquina inferior izquierda, la geometría que se observa es de  $150 \times 450 \mu\text{m}$ , aumentando el ancho en intervalos de  $50 \mu\text{m}$  hasta la tercera fila con dimensiones de  $250 \times 450 \mu\text{m}$ .
- Mascarilla M-3: utilizando el mismo patrón de referencia, se tiene que la separación entre contactos es de  $250 \mu\text{m}$ , con dimensiones de  $200 \times 250 \mu\text{m}$ . El contacto para las puntas de prueba es de  $200 \times 200 \mu\text{m}$ .

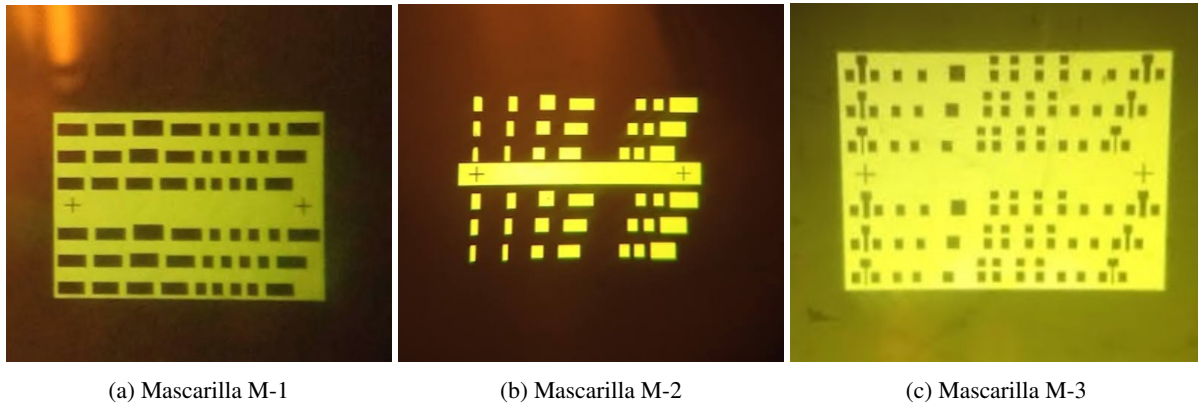


Figura 5.1: Mascarillas empleadas en el proceso de fotolitografía: a) Si-P de aislamiento, b) Si-P de compuerta y c) metalización.

En la siguiente Figura 5.2 se observa el diseño de las mascarillas anteriormente descritas. Como se puede notar, las tres filas se denominan como A, B y C, e indican la diferencia de dimensiones entre los dispositivos de la fila A, a la fila C de manera creciente, con el objetivo de verificar la reproducibilidad de los resultados que se presentan más adelante. En la imagen se encuentran enumeradas las siete columnas, para identificar cada dispositivo. Los dispositivos de cada columna son los siguientes:

- Columna 1: Transistor FET con compuerta de Si-P.
- Columna 2: Transistor FET sin compuerta metálica.
- Columna 3: Capacitor
- Columna 4: Resistencia de Si-P delgado o compuerta
- Columna 5: Resistencia de aislamiento 1
- Columna 6: Resistencia de aislamiento 2, sobre Si-P delgado o de compuerta
- Columna 7: Transistor FET de Si-P delgado o de compuerta en toda el área del transistor

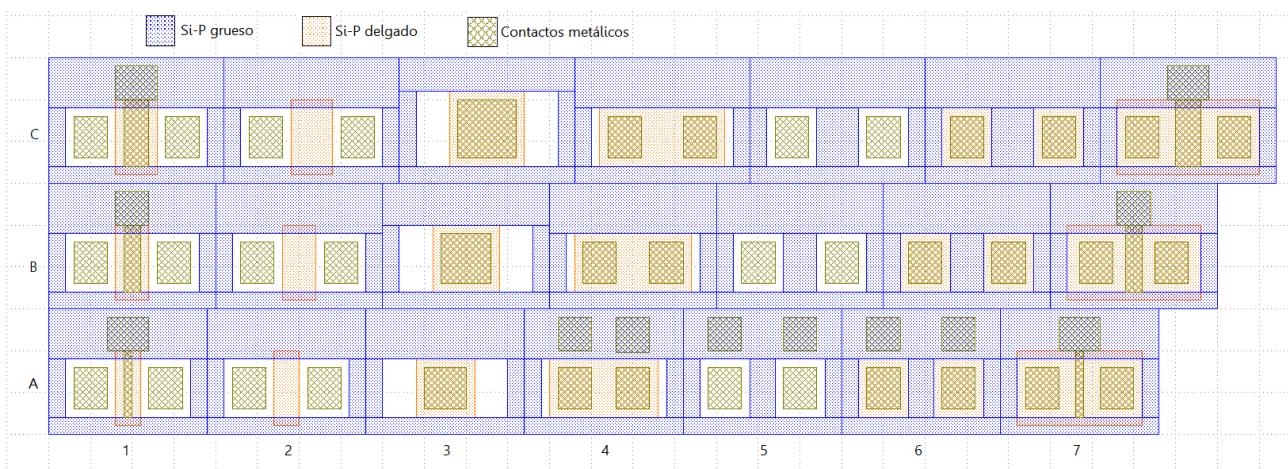


Figura 5.2: Diseño de mascarillas utilizado para la fabricación de los dispositivos.

Con el propósito de una mejor visualización de las dimensiones de los dispositivos, en la siguiente Figura 5.3, se muestran con mayor detalle las medidas del transistor denominado como 1A (columna 1, fila A).

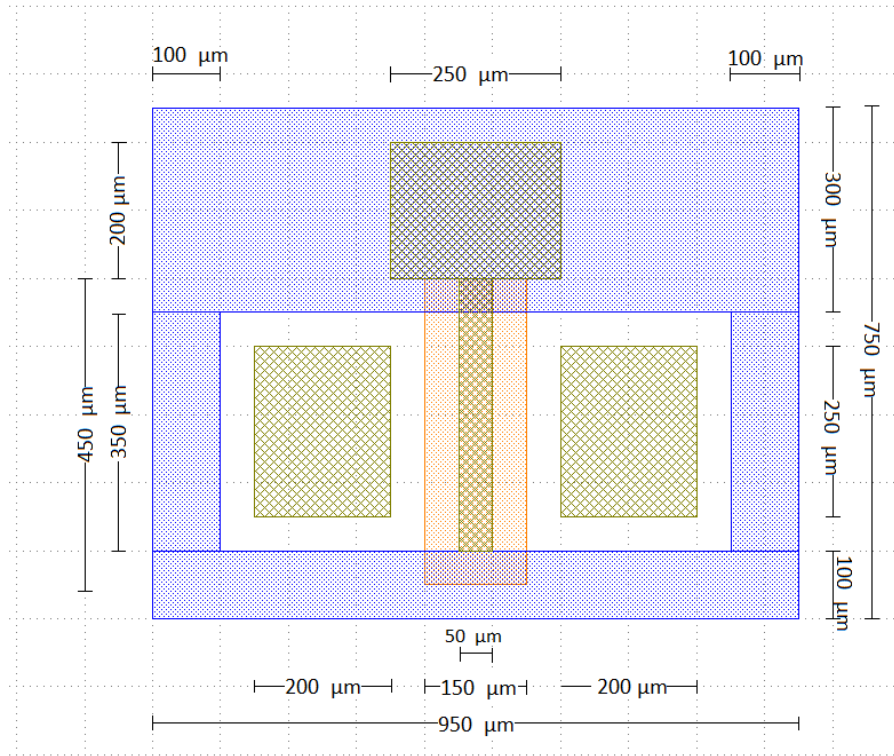


Figura 5.3: Dimensiones del transistor 1A.

En el proceso completo de fabricación de los dispositivos mediante fotolitografía se realizaron los siguientes pasos de manera seriada:

1. Rayado, cortado y etiquetado de substratos de Si de  $1.5 \times 1.5 \text{ cm}^2$ , para posteriormente proceder a la limpieza estándar RCA.
2. Cada muestra se monta sobre un spinner donde se cubre completamente la superficie con fotoresina mediante goteo. Se asegura que la fotoresina se encuentre libre de partículas mediante el uso de filtros durante la aplicación. La temperatura de la fotoresina es la del ambiente.
3. Se hace girar la muestra a una velocidad constante de 4000 RPM durante un tiempo de 20 segundos.
4. Una vez aplicada la película de fotoresina en cada muestra, se procede a realizar un recocido a  $90^\circ \text{ C}$  durante 20 minutos. Este paso se realiza con el objetivo de secar y endurecer la resina para su manipulación en los siguientes pasos.
5. Con un sistema de alineación se monta cada muestra a la par de la mascarilla M-1 y una vez que se encuentran alineadas entre sí, centrando la mascarilla en las muestras, se hace la exposición con luz UV por 10 segundos. En este paso se polimeriza la fotoresina expuesta y se deja sin exponer la parte que está cubierta por la mascarilla.
6. Se revelan los motivos expuestos con inmersión por 20 segundos de cada muestra en una solución reveladora que contiene 3 ml de una solución de hidróxido de potasio KOH, al 10 % en peso, y 33 ml de agua desionizada (solución de revelado 1:11). Se agita suavemente la muestra cuando se sumerge en el revelador, con el fin de remover completamente la resina expuesta en el paso anterior, para posteriormente enjuagar cada muestra con agua desionizada y secar bajo un flujo de nitrógeno.
7. Para comenzar con la formación de la película de Si-P grueso mediante la técnica MAE de dos pasos, se realiza el depósito de la película de Au mediante pulverización catódica bajo las mismas condiciones descritas en la Sección 5.1.2. Cabe mencionar que cada muestra destinada para la fabricación de dispositivos se introduce al equipo junto con una muestra testigo, en la cual únicamente se llevó a cabo el paso 1 (rayado, cortado y limpieza).
8. Una vez aplicada la capa metálica, se procede al teñido químico bajo las condiciones mostradas en la Tabla 5.2, en donde se especifica la solución utilizada <sup>1</sup> (ver Apéndice C) y el tiempo transcurrido para este proceso en la muestra para dispositivos

<sup>1</sup>Las tercias de números en la columna etiquetada como solución para Si-P grueso y delgado, indica el porcentaje de uso de cada compuesto en una solución con volumen total de 40 ml en el siguiente orden: HF, IPA y  $\text{H}_2\text{O}_2$ . Así, por ejemplo, la solución 70-10-20 hace referencia a una mezcla con 70 % de HF, 10 % de IPA y 20 % de  $\text{H}_2\text{O}_2$ .



- y su correspondiente muestra testigo. Una vez formada la película, se procede de manera inmediata a un enjuague en agua desionizada repetidas veces y secado con nitrógeno.
9. Para la remoción de la fotoresina no expuesta en el paso 5, se sumerge cada muestra en acetona en repetidas ocasiones y se vuelve a enjuagar en agua desionizada, enseguida se realiza una limpieza RCA omitiendo el uso de la solución que contiene HF (paso 4 del procedimiento descrito en el Apéndice A).
  10. Hasta este punto, en cada muestra se encuentra formada la película de Si-P grueso. Para la formación de la película de Si-P delgado se repiten los pasos 2 a 9, bajo las condiciones de formación de la Tabla 5.2 y utilizando la mascarilla M-2.
  11. Para formar los contactos metálicos se procede a realizar una evaporación metálica de Aluminio. La fuente de aluminio, que se coloca en el filamento, consiste en dos pequeñas láminas con un peso aproximado de 200 mg cada una. La presión en la cámara es de  $8 \times 10^{-5}$  mbar y el proceso se realiza con una corriente de 60 mA. El proceso de evaporación dura aproximadamente un minuto y la capa de aluminio formada es de alrededor de  $1 \mu\text{m}$ .
  12. Una vez formada la película metálica, se realiza el último proceso de fotolitografía utilizando la mascarilla M-3, repitiendo los pasos 2-6 (con un paso adicional posterior al paso 6, que consiste en un recocido de la resina a  $120^\circ\text{C}$  durante 20 minutos).
  13. El decapado de Al excedente se realiza empleando una solución con 40 ml de ácido fosfórico ( $\text{H}_2\text{PO}_4$ ) y 2 ml de ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ), a una temperatura de  $70^\circ\text{C}$ , durante 50 s. Por último, posterior a un enjuague en agua desionizada y secado bajo gas nitrógeno, se procede a la eliminación de la resina, como se describe en el paso 9, sin el paso de limpieza RCA.

Tabla 5.2: Dispositivos formados.

Dispositivo	Si-P grueso			Si-P delgado		
	M. testigo	Solución	Tiempo (min)	M. testigo	Solución	Tiempo (s)
M145	M148	70-10-20	1	M157	20-10-70	25
M146	M149		3	M158		50
M147	M150		5	M159		75
M154	M151	40-10-50	1	M160	20-40-40	25
M155	M152		3	M161		50
M156	M153		5	M162		75
M163	M166	20-10-70	5	M175	20-60-20	25
M164	M167		3	M176		50
M165	M168		1	M177		75
M169	M172	70-10-20	5	M178	20-60-20	25
M170	M173		3	M179		50
M171	M174		1	M180		75
M210	M205	70-10-20	8	M215	20-10-70	75
M211	M206			M216	20-60-20	50
M212	M207	M217		20-40-40		
M213	M208	M218		20-60-20		
M214	M209	20-10-70		M219	20-40-40	



## 5.2. Caracterización de películas de Si-P

Las técnicas de caracterización aplicadas para el estudio de las películas de Si-P fueron orientadas a la obtención de propiedades ópticas y morfológicas. En esta sección se presentan los detalles experimentales de la técnica de elipsometría, microscopía óptica y SEM, tales caracterizaciones se aplicaron a las muestras en donde se llevó a cabo la formación de películas de Si-P, para determinar la relación entre las condiciones de teñido químico y las características obtenidas, es decir, las películas presentadas en la Tabla 5.1. Estas técnicas también se aplicaron a las muestras testigo de cada dispositivo fabricado (Tabla 5.2), con la finalidad de conocer las características de cada capa en los dispositivos.

### 5.2.1. Elipsometría

La técnica de elipsometría con ángulo variable es una técnica de medición óptica que caracteriza la reflexión de la luz elípticamente polarizada de la superficie e interfaces de las muestras a estudiar. Esta técnica mide el cambio en la luz polarizada al incidir y reflejarse sobre la superficie de la muestra, el nombre de “elipsometría” se debe a que esta luz polarizada incide con una polarización elíptica específica y se refleja con una polarización lineal, dependiendo de los parámetros ópticos de la muestra, espesor e índice de refracción. Durante la aplicación de la técnica se miden dos ángulos de elipsometría:  $\Psi$ , que representa la relación de amplitud y  $\Delta$ , que representa la diferencia de fase entre las componentes perpendicular ( $s$ ) y paralela ( $p$ ) de la onda de luz polarizada, incidente y reflejada. En general, la medición de elipsometría puede ser espectroscópica y se lleva a cabo en la región ultravioleta/visible, pero también es posible la medición en la región infrarroja [85].

Hay dos restricciones particulares en la medición de elipsometría. La primera es que la rugosidad de la superficie de las muestras debe ser pequeña, pues cuando es grande se presenta dispersión de la luz debido a la rugosidad y la intensidad de la luz reflejada disminuye notablemente y la medición se vuelve difícil, pues la técnica determina un estado de polarización a partir de la intensidad de luz. La segunda restricción es que la medición debe realizarse con incidencia oblicua, para ello se elige un ángulo de incidencia que maximice la sensibilidad de la medición, sin embargo, la elección del ángulo de incidencia varía según las constantes ópticas de las muestras. Para la caracterización de semiconductores, el ángulo de incidencia suele ser de 70 a 80°.

La técnica de elipsometría se aplicó en este trabajo de tesis para determinar el espesor óptico de las películas de Si-P y el índice de refracción. Para ello se empleó un sistema de elipsometría de ángulo variable semiautomático Gäertner L2W16S366, con haz de luz monocromática proveniente de un láser de He-Ne con longitud de onda de 632.8 nm y un diodo láser de 824.3 nm. Los ángulos de incidencia se variaron de 80° a 45° en decrementos de 5°. Los resultados se obtuvieron mediante el software SA Ellipsometry y VA Ellipsometry 13, propiedad intelectual del CINVESTAV.

### 5.2.2. Microscopía Óptica

La microscopía óptica permite conocer la microestructura de las muestras mediante la interacción con un haz de luz. La técnica se usó para conocer el espesor de algunas muestras de Si-P, el cual no fue posible medir por elipsometría, específicamente las muestras testigo de Si-P grueso. La magnificación de los objetivos fue de 50× y con ayuda de un micrómetro óptico se determinó el espesor de cada muestra en un corte transversal, obtenidas por clavado o fragmentación a través de planos definidos.

### 5.2.3. Microscopía Electrónica de Barrido

La Microscopía Electrónica de Barrido o SEM (por sus siglas en inglés “Scanning Electron Microscopy”) utiliza electrones para la formación de una imagen de la superficie de una muestra. Se trata de una técnica para el análisis de la morfología superficial. De manera general, un equipo SEM cuenta con un dispositivo (filamento) que genera un haz de electrones que inciden sobre la muestra y mediante diferentes detectores se recolectan los electrones secundarios generados de la interacción con la superficie de la misma para crear una imagen que refleja las características superficiales de la muestra a estudiar. La caracterización de las películas de Si-P se llevó a cabo en el Laboratorio Avanzado de Nanoscopia Electrónica (LANE) del CINVESTAV. Para las mediciones no se requirió una preparación especial de las muestras, pues únicamente fue necesario que el área superficial fuese menor a 1 cm<sup>2</sup>. Es importante mencionar que la técnica SEM no se aplicó a todas las muestras de Si-P formadas, sólo se eligieron cuatro para tener resultados representativos de todo el conjunto de las películas que se obtuvieron.



## 5.3. Caracterización de dispositivos

El estudio de los dispositivos formados se llevó a cabo mediante mediciones Corriente-Voltaje (I-V). Dichas mediciones se realizaron con el objetivo final de conocer las relación entre las características obtenidas de las películas testigo para cada dispositivo, las condiciones de formación y las características I-V.

### 5.3.1. Caracterización I-V

Las mediciones de la característica corriente ( $I_D$ ) en función del voltaje ( $V_{DS}$ ), se aplicaron para todos los dispositivos mostrados en la Tabla 5.2, sin alguna preparación previa, pues tales mediciones se realizaron bajo condiciones ambientales. Se utilizó el equipo corriente-voltaje de la marca KEITHLEY conectado a una máquina de puntas, la cual se encuentra dentro de una caja negra para impedir el paso de la luz ambiental, en el cual los dispositivos son montados sobre una base y las puntas se colocan de acuerdo con las mediciones requeridas. Para las características I-V de los transistores, se aplicó una polarización entre el drenador D y la fuente S con un barrido de 0 a 5 V con pasos de 0.05 V y en la compuerta se aplicó un voltaje de 0 a -2.5 V en intervalos de 0.5 V. Esta caracterización se realizó con el objetivo de verificar la funcionalidad adecuada de los transistores FET y encontrar la relación entre las curvas características y los resultados de aplicar las técnicas de caracterización previamente descritas en cada una de las películas que conforman el transistor. También se realizaron mediciones I-V en el diodo formado por la terminal de compuerta y drenador (o fuente, pues el dispositivo es simétrico), así como mediciones de transconductancia.

---

## Capítulo 6

# Análisis y discusión de resultados

En esta sección se presentan los resultados obtenidos de la caracterización de las películas de Si-P formadas, comenzando por aquellos adquiridos mediante la técnica de elipsometría, microscopía óptica y SEM. Posteriormente se analizan los resultados de la caracterización eléctrica de los dispositivos formados. Para cada caracterización se realiza una descripción detallada y un análisis de los resultados de las muestras de cada grupo.

### 6.1. Resultados de la caracterización de películas de Si-P

En este apartado se muestran los resultados de la caracterización de las películas de Si-P formadas por la técnica de teñido químico asistido por metal que se presentaron en la Tabla 5.1 de la Sección 5.1.2, así como de las muestras testigo de los dispositivos formados que se muestran en la Tabla 5.2.

Cabe mencionar que todas las películas de Si-P formadas se caracterizaron. Sin embargo, en esta sección se presentan los resultados más representativos para cumplir con el objetivo de mostrar la dependencia entre las condiciones de formación y las características que presentan las películas. Para ello se comienza con el análisis de los resultados de la caracterización de elipsometría, posteriormente con microscopía óptica y finalmente con la técnica SEM.

#### 6.1.1. Elipsometría

La técnica de elipsometría de ángulo variable se aplicó para la obtención de los espesores e índice de refracción,  $n$ , de las películas de Si-P. A su vez, se utilizaron los valores del índice  $n$  obtenidos, para el cálculo del *porcentaje de porosidad* (% P) de las películas, el cual se obtuvo mediante la aplicación del modelo de medios efectivos de Bruggeman, como se explica en el Apéndice B.

En las gráficas de las siguientes figuras, se muestran los valores para el espesor, el índice de refracción y la porosidad de tres grupos de muestras en función de la concentración de la solución y tiempo de teñido químico. El primer grupo está conformado por seis muestras etiquetadas como M25 a M30 y en la Figura 6.1a se observa que los valores del espesor (eje izquierdo de color negro) varían de manera creciente de 37.9 a 61.4 nm conforme el tiempo de ataque aumenta de 1 a 6 minutos. Para este primer grupo los porcentajes de HF, IPA y H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> se mantienen constantes en 50 %, 10 % y 40 %, respectivamente. También es posible observar que bajo estas condiciones, el índice de refracción (eje derecho de color azul) aumenta de 1.5 para M25, a 1.7 para la muestra M30. Se deduce que el teñido químico asistido por metal conduce a capas de Si-P más gruesas conforme el tiempo de inmersión de las muestras en la solución de ataque aumenta, a su vez que el índice  $n$  también es mayor. Por otro lado, al calcular el porcentaje de porosidad mediante el modelo de medios efectivos de Bruggeman, se obtuvo un valor de 72 % para la muestra M25 y de 66 % para M30. Esto se puede observar en la gráfica de la Figura 6.1b, donde se representa la variación de la porosidad de las películas M25-M30, en función de las condiciones de formación. Con los resultados de este primer grupo, se puede concluir que conforme se incrementa el tiempo de ataque, hay un incremento en el espesor y una disminución de la porosidad (cantidad de material removido por unidad de volumen y de tiempo).

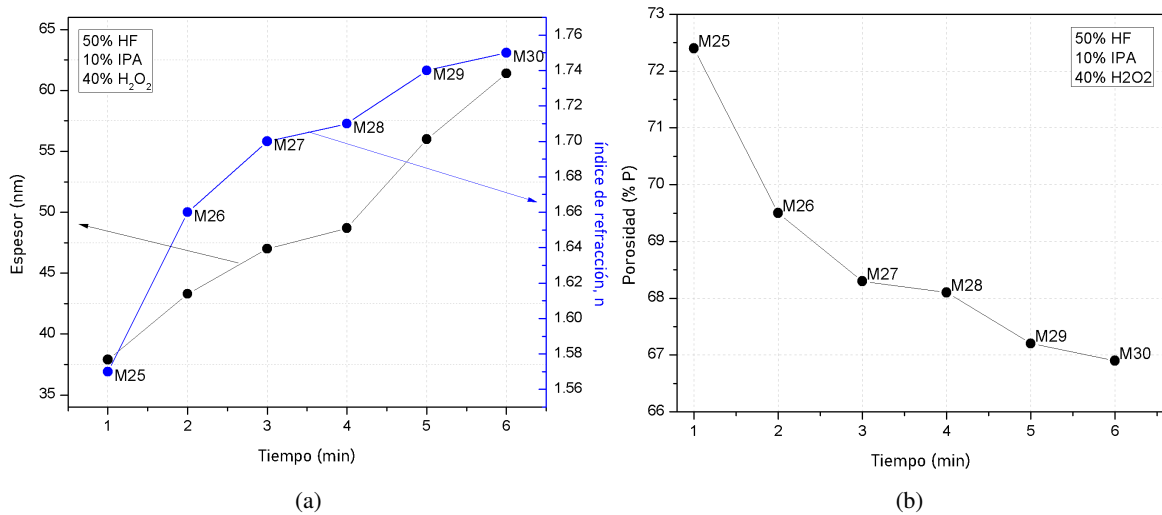


Figura 6.1: Relación entre las condiciones de formación de Si-P y (a) el espesor e índice de refracción, así como su relación con la (b) porosidad, para el grupo de muestras M25-M30, cuya variación es el tiempo.

El segundo grupo que se analiza está conformado por las muestras M31 a M36, que como se puede ver en la gráfica de la Figura 6.2a, el tiempo de ataque se mantuvo constante en 15 segundos para las seis muestras y el porcentaje de IPA, se mantuvo en 10%. La concentración de HF se disminuyó del 70% para M31 hasta 20% para M36, en decrementos de 10%, mientras que la concentración de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> se varió de manera creciente en intervalos de 10% desde el 20% para la muestra M31 hasta el 70% para M36. Se puede observar que para la muestra con el menor contenido de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, es decir, M31 con 20% de este compuesto, es la de menor espesor, pues presenta 47.8 nm de espesor, mientras que la muestra M36 con 70% de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, es la de mayor espesor con 74.8 nm. Con esto se puede inferir que el espesor de las películas se incrementa conforme el porcentaje de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> es mayor, lo cual concuerda con la literatura, pues se ha demostrado que al aumentar el contenido de este compuesto en una solución a base de HF favorece la formación de Si-P en el sustrato [20]. Por otro lado, en la misma gráfica se observa que el índice de refracción presenta un comportamiento creciente conforme aumenta el contenido de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, pues para la muestra M31 el valor de *n* es de 1.5, mientras que para la última muestra, M36 este valor es de 2.04. Para este grupo de películas la porosidad varía desde el 74% para M31, hasta 59% para M36, como se puede observar en la gráfica de la Figura 6.2b. De los resultados también se puede observar que un incremento en la concentración de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> decrece la cantidad de material removido por unidad de volumen y de tiempo ya que, al incrementar el espesor se reduce la porosidad, la cual está asociada en forma inversa con el valor del índice *n*; a mayor índice de refracción menor porosidad, de acuerdo con la teoría de los medios efectivos.

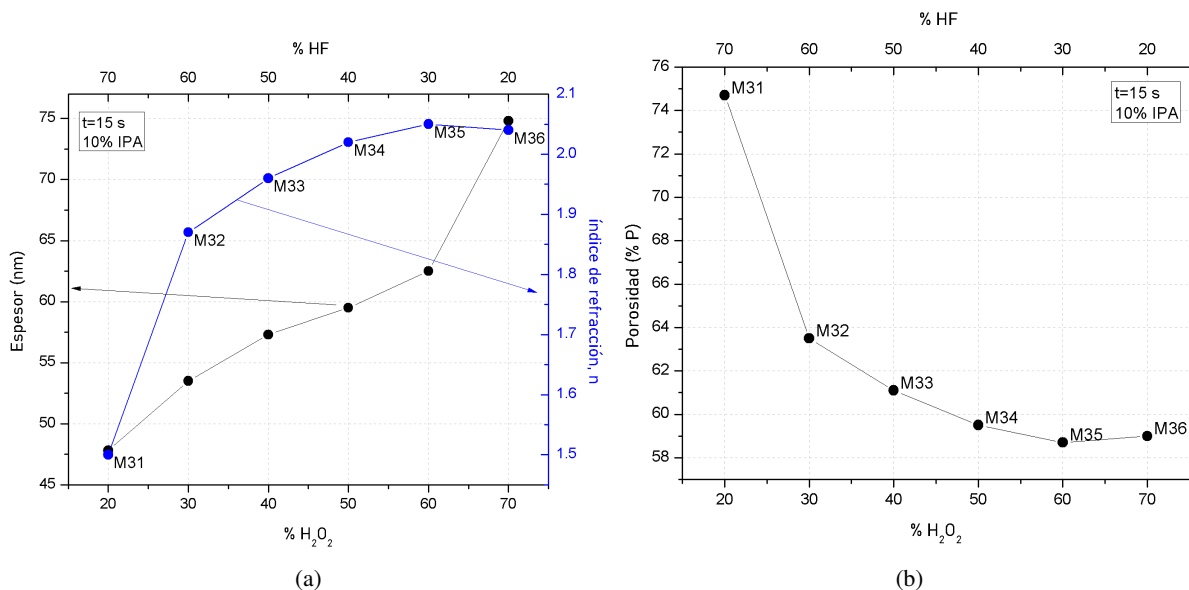


Figura 6.2: Relación entre las condiciones de formación de Si-P y (a) el espesor e índice de refracción, así como su relación con la (b) porosidad, para el grupo de muestras M31-M36, cuya variación es el contenido de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y HF.





Por último, el tercer grupo de películas delgadas que se presenta está conformado por las muestras M97 a M102. Como se puede observar en la gráfica de la Figura 6.3a, la concentración de  $H_2O_2$  disminuye en variaciones de 10 %, desde 70 % para M97, hasta 20 % para M102. En cuanto al contenido de IPA, la concentración se varió de manera creciente desde 10 % para la muestra M97 hasta 70 % para M102. Todas las soluciones contienen 20 % de HF y el tiempo de ataque de 25 segundos es el mismo para todas. Se puede ver que el espesor fue disminuyendo conforme el contenido de  $H_2O_2$  decrece en la solución. Así, la muestra M97 presenta un espesor de 85.93 nm, la cual tiene el mayor contenido de  $H_2O_2$  de este grupo de muestras, mientras que M102 es la muestra con el menor contenido de este compuesto y también la de menor espesor, pues tiene un grosor de 47.26 nm. Por otro lado, se puede notar que el índice  $n$  fue disminuyendo conforme las muestras presentan menor grosor. Así, la muestra con el mayor espesor, M97, tiene un valor  $n$  de 1.97, mientras que este valor para la película M102 que es la más delgada, es de 1.65. La muestra M101 presenta un índice de refracción de 1.64, por lo que en la gráfica se puede ver que la tendencia presenta un comportamiento ligeramente creciente de M101 a M102, sin embargo, la variación es insignificante. Con este grupo de muestras se comprueba una vez más el efecto del  $H_2O_2$  en el teñido químico, pues el aumento de éste conlleva a un mayor crecimiento de Si-P. El porcentaje de porosidad cambia de forma creciente, del 60 % para M97 a 69 % para la muestra M102, tal como se puede ver en la gráfica de la Figura 6.3b. En la siguiente Tabla 6.1 se muestran los resultados ya descritos de los tres grupos de muestras mencionados.

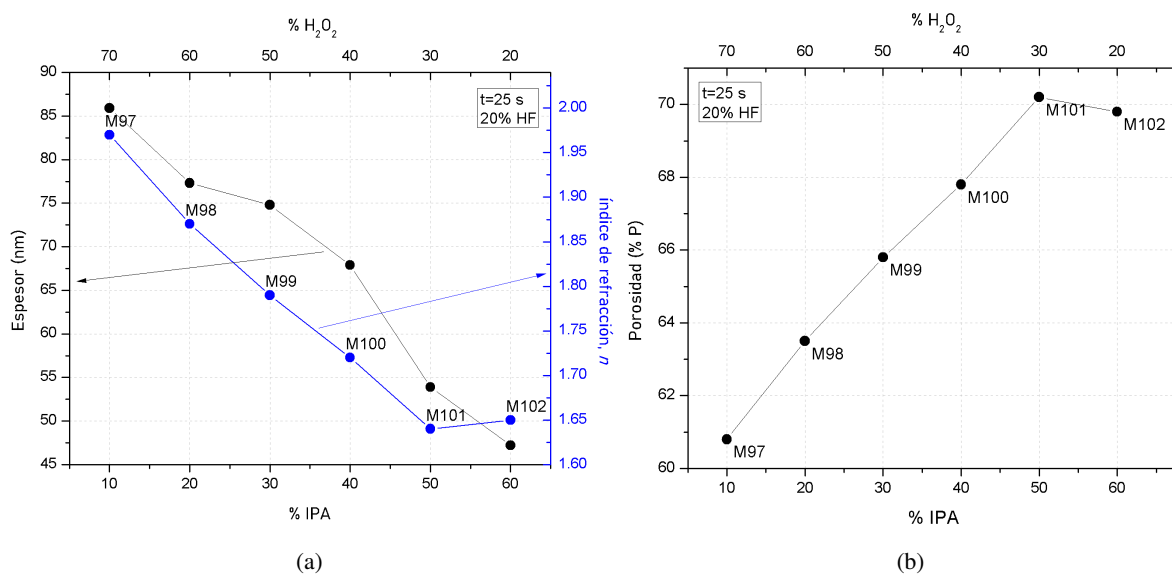


Figura 6.3: Relación entre las condiciones de formación de Si-P y (a) el espesor e índice de refracción, así como su relación con la (b) porosidad, para el grupo de muestras M97-M102, cuya variación es el contenido de IPA y  $H_2O_2$ .

A continuación, se presentan los resultados de aquellas películas que se formaron como muestra testigo de los dispositivos fabricados. Cabe mencionar que únicamente las películas de Si-P delgado se midieron mediante elipsometría, dado que las muestras testigo de Si-P grueso no son posibles de medir por esta técnica, por lo que se midieron con microscopía óptica mediante clivado, cuyos resultados se presentan en la siguiente sección. Las muestras testigo se obtuvieron bajo las condiciones de formación dadas en la Tabla 5.2 antes mostrada. En las gráficas de la Figura 6.4 se presentan los valores obtenidos del espesor e índice de refracción  $n$  de cuatro grupos de muestras, las cuales se formaron como muestras testigo de cuatro grupos de dispositivos fabricados. Se puede observar que para cada grupo de muestras testigo, la concentración de la solución para el teñido químico es la misma, variando únicamente el tiempo de inmersión del sustrato.

El primer grupo de muestras testigo está conformado por M157, M158 y M159. En la gráfica de la Figura 6.4a se puede ver que tales muestras fueron formadas en una solución con 20 % de HF, 10 % de IPA y 70 % de  $H_2O_2$ . El tiempo de inmersión en la solución fue de 25 s para M157, 50 s para M158 y 75 s para M159. Como se puede notar, el espesor y el índice  $n$  aumentaron conforme el tiempo de teñido químico creció. La muestra M157, presenta un espesor de 84.9 nm y un valor  $n$  de 1.73, mientras que M159 tiene 128.5 nm de espesor e índice  $n$  de 1.89. En la Tabla 6.2, se presentan los valores del porcentaje de porosidad de las películas testigo de Si-P delgado, que para este primer grupo varía de manera decreciente desde 67.5 % para M157 hasta 63.0 % para M159.

El siguiente grupo de muestras testigo de película de Si-P delgado es el conformado por las tres muestras M160, M161 y M162. La solución utilizada está compuesta por 20 % de HF, 40 % de IPA y 40 % de  $H_2O_2$ . M160 es la película con el menor tiempo de inmersión en la solución. Con un tiempo de 25 s, se puede ver en 6.4b que también es la de menor espesor con 72.7 nm y la de menor índice  $n$  con un valor de 1.57. Por el contrario, la muestra M162 con tiempo de inmersión de 75 s, es la de mayor espesor, con 153.1 nm y valor  $n = 1.78$ . La muestra M161, presenta valores intermedios entre M160 y M162, lo cual es de esperarse pues el tiempo de inmersión para ésta es de 50 s. El porcentaje de porosidad para las tres muestras varía desde 72.4 % para M160, hasta 66.0 % para M162.



Tabla 6.1: Resultados obtenidos de elipsometría para tres grupos de películas de Si-P.

Grupo	Muestra	Espesor (nm)	Índice $n$	% P
1	M25	37.9	1.57	72.4
	M26	43.3	1.66	69.5
	M27	47	1.70	68.3
	M28	48.7	1.71	68.1
	M29	56	1.74	67.2
	M30	61.4	1.75	66.9
2	M31	47.8	1.50	74.7
	M32	53.5	1.87	63.5
	M33	57.3	1.96	61.1
	M34	59.5	2.02	59.5
	M35	62.5	2.05	58.7
	M36	74.8	2.04	59.0
3	M97	85.9	1.97	60.8
	M98	77.3	1.87	63.5
	M99	74.8	1.79	65.8
	M100	67.9	1.72	67.8
	M101	53.9	1.64	70.2
	M102	47.2	1.65	69.8

Para los dos grupos de muestras restantes, M175-M177 y M178-M180, el comportamiento es semejante al de los dos grupos de muestras testigo descritos previamente, pues de las gráficas en las Figuras 6.4c y 6.4d, es posible observar un comportamiento creciente en los valores medidos para el espesor y para el índice de refracción conforme el tiempo de teñido químico aumenta. Con esto se reafirma que, a mayor tiempo de inmersión del sustrato en la solución, mayor será el espesor de la película de Si-P, lo que a su vez aumenta el valor del índice de refracción  $n$ . Es importante notar que para las muestras M175-M177 y M178-M180, la solución es la misma (20 %-HF, 60 %-IPA, 20 %-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>), por lo que los valores medidos son cercanos y da una idea de la reproducibilidad del proceso, como se muestra en la Tabla 6.2.

Ahora, para todas las películas testigo del Si-P delgado, es importante destacar que el orden de inmersión de las muestras fue de mayor a menor, esto es, en cada tercia se realizó el teñido químico del sustrato con 75 s, luego el de 50 s y, por último, el de 25 s. Entonces, dado que se utilizó la misma solución para cada conjunto, el tiempo de uso de la solución para la primera muestra es de 75 s; para la segunda, 125 s y para la tercera muestra, de 150, pues el tiempo transcurrido se fue acumulando. Dicho esto, en la gráfica de la Figura 6.5 se puede ver que, a mayor tiempo de uso de la solución, la razón de crecimiento de Si-P se incrementa también, este comportamiento se presentó en los cuatro grupos de muestras presentados.

Finalmente, existe un grupo de muestras testigo para las cuales no se presentan los resultados de manera gráfica, pues no fueron formadas en la misma solución, además de que el tiempo de teñido químico no presenta un orden dado, como en los casos anteriores. Éste último grupo está conformado por las muestras testigo para los dispositivos M210 a M214, cuyas condiciones de formación se mostraron en la Tabla 5.2. A pesar de no haber un orden concreto, las muestras testigo para el silicio poroso delgado, M216 y M218 fueron formadas con una solución con el 20 % de HF, 60 % de IPA y 20 % de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> con un tiempo de 50 s, condiciones exactamente iguales a las de las muestras M176 y M179, con lo cual se esperaba que el espesor y el valor de  $n$  sean semejantes, lo cual se comprobó con los resultados que se muestran en la Tabla 6.2, que si bien los valores obtenidos no son exactamente iguales, la variación es mínima. Esto ocurre también con las muestras M217, M219 y M161, donde la solución utilizada tiene concentraciones del 20 % de HF, 40 % de IPA y 40 % H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> con 50 s de inmersión.

A pesar de que los resultados de las películas formadas bajo las mismas condiciones de teñido químico, pero de diferente grupo, presentan variaciones pequeñas en los valores mostrados (espesor, índice de refracción y porosidad), es importante comentar que esto habla de la baja reproducibilidad de los resultados. Estas diferencias entre películas con iguales condiciones de formación se atribuyen principalmente a que no se tuvo un control en el tiempo transcurrido entre realización de la mezcla de los componentes de una solución y la inmersión del sustrato, con lo cual se concluye que es un factor imprescindible a tomar en cuenta, ya que por los resultados obtenidos, existe un proceso de envejecimiento o estabilización de la solución, que cambia la razón de formación del Si-P. Todos los resultados hasta aquí descritos se resumen en la Tabla 6.2.

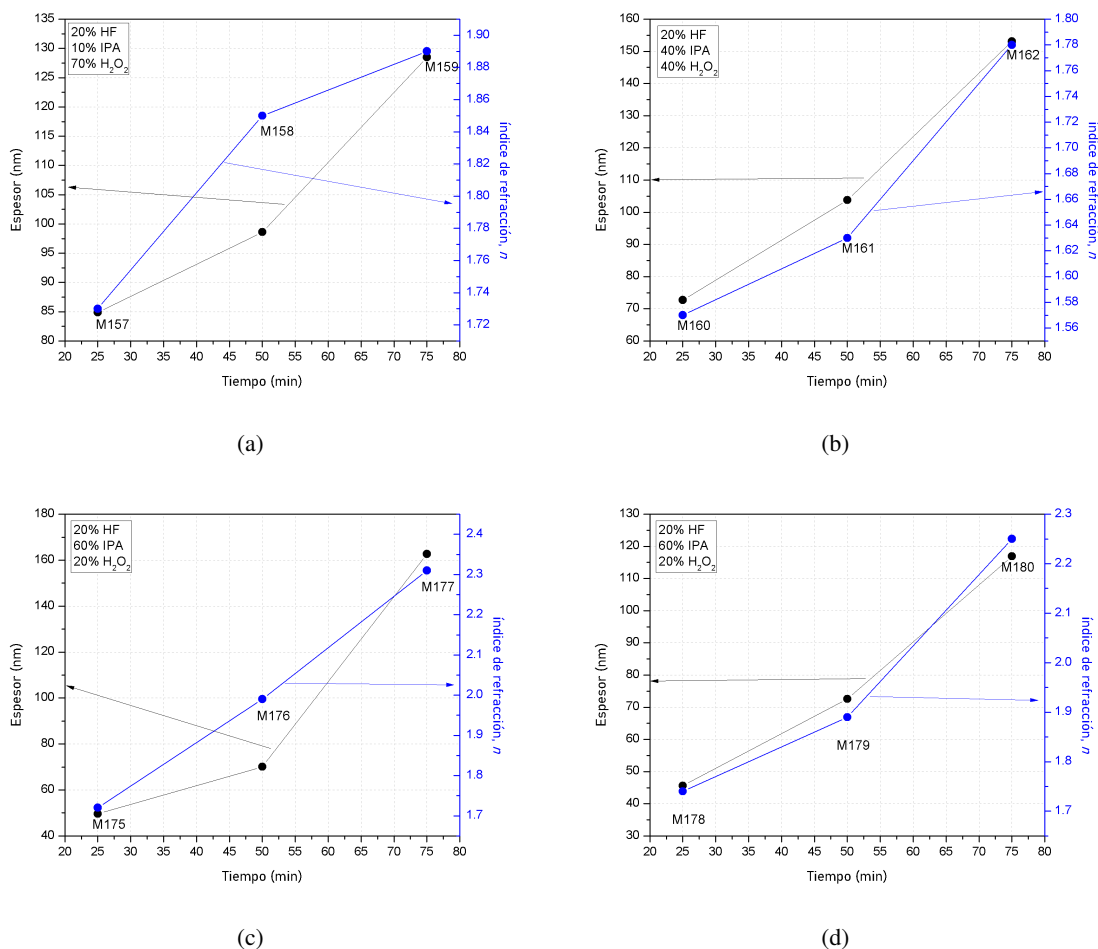


Figura 6.4: Relación entre las condiciones de obtención y el espesor e índice de refracción para el grupo de muestras (a)M157-M159, (b)M160-M162, (c)M175-M177 y (d)M178-M180.

### 6.1.2. Microscopía Óptica

La técnica de microscopía óptica se utilizó para obtener el espesor de las muestras testigo de Si-P grueso mediante clivado. En la siguiente Tabla 6.2, se muestran los espesores de las películas que fueron formadas de acuerdo a las condiciones de teñido químico señaladas en la Tabla 5.2. Las muestras M148-M150 presentan las mismas condiciones de formación que las muestras M172-M174, con una solución de 70 % de HF, 10 % de IPA y 20 % de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y tiempo de ataque de 1, 3 y 5 minutos, respectivamente. Como se puede observar, los valores son cercanos, lo cual indica reproducibilidad en la formación de las películas formadas bajo las mismas condiciones. En cada grupo de muestras con la misma solución y con variación en el tiempo, se puede notar en la tabla, que conforme el tiempo se incrementa, el espesor de cada película aumenta, comportamiento ya observado en la sección anterior.

Por otro lado, las cinco muestras correspondientes a los dispositivos del grupo M210 a M214, fueron formadas con diferentes concentraciones de solución, pero el tiempo es constante para todas. De este grupo, se pueden comparar las muestras M205, M206 y M207 con los grupos M148-M150 y M172-M174, pues la composición de las soluciones es igual, sin embargo las películas M205-M207 tienen un tiempo de 8 minutos de teñido, lo cual conlleva, como se ve en la tabla, que los espesores son mayores para éstas. Lo mismo ocurre con las muestras M208 y M209 al compararlas con el grupo M166-M168, pues las primeras tienen un tiempo de inmersión en la solución de 8 minutos, mientras que el tiempo máximo corresponde a la muestra M166 y es de 5 minutos, también en este caso es de notar que el espesor es mayor conforme se aumenta el tiempo de teñido químico.

De los resultados que se presentan en la tabla anterior y en la Tabla 5.2, es posible observar que, independientemente de la composición de la solución empleada para el teñido químico, el espesor y el índice de refracción  $n$  presenta valores más grandes conforme se incrementó el tiempo de ataque. Las películas de mayor espesor resultan con un porcentaje de porosidad (% P) menor comparadas con las películas de menor grosor. La reproducibilidad de los resultados presentados hasta el momento es limitada.

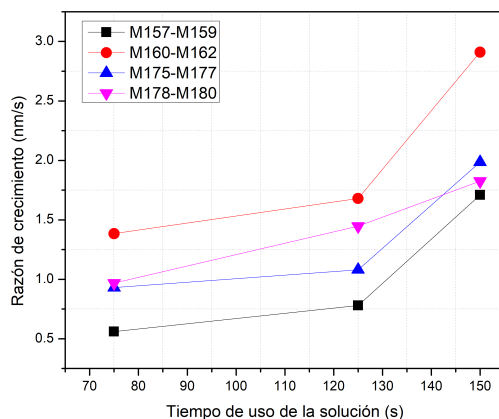


Figura 6.5: Razón de crecimiento en relación con el tiempo de usos de la solución para muestras testigo de Si-P delgado.

Tabla 6.2: Resultados de elipsometría de muestras testigo.

Dispositivo	Si-P grueso		Si-P delgado			
	M. testigo	Espesor ( $\mu\text{m}$ )	M. testigo	Espesor (nm)	índice $n$	% P
M145	M148	3.4	M157	84.9	1.73	67.5
M146	M149	4.3	M158	98.6	1.85	64.1
M147	M150	5.7	M159	128.5	1.89	63.0
M154	M151	3.2	M160	72.7	1.57	72.4
M155	M152	4.6	M161	103.8	1.63	70.4
M156	M153	4.5	M162	153.1	1.78	66.0
M163	M166	3.4	M175	49.6	1.72	67.8
M164	M167	2.5	M176	70.1	1.99	60.3
M165	M168	1.9	M177	162.7	2.31	51.9
M169	M172	5.2	M178	45.6	1.74	67.2
M170	M173	3.8	M179	72.6	1.89	63.0
M171	M174	3.1	M180	116.9	2.25	53.5
M210	M205	6.8	M215	132.7	2.19	55.0
M211	M206	6.5	M216	65.8	1.74	67.2
M212	M207	6.1	M217	112.88	1.81	65.2
M213	M208	5.5	M218	64.71	1.69	68.6
M214	M209	5.2	M219	108.2	1.71	68.1

Finalmente, en la siguiente Figura 6.6, se observa la gráfica de la razón de crecimiento de Si-P grueso de aislamiento con respecto al tiempo de uso de la solución utilizada en los cuatro grupos de muestras. En ellas se observa un incremento en la razón de crecimiento conforme se incrementa el uso de la solución, por lo que se puede concluir que estas soluciones son activadas con el tiempo de uso, llegando a ser cada vez más reactivas y por lo tanto dan lugar a resultados no reproducibles, si no es tomado en cuenta este factor.

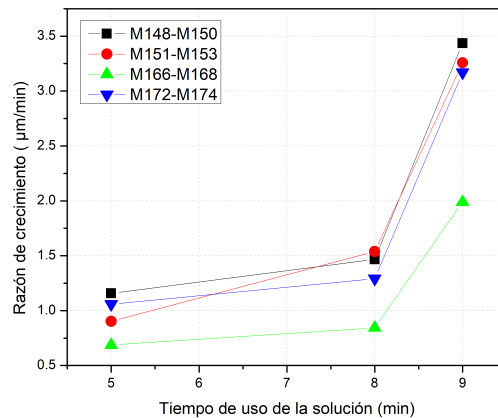


Figura 6.6: Razón de crecimiento en relación con el tiempo de uso de la solución para muestras testigo de Si-P grueso.

### 6.1.3. Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)

La morfología superficial de algunas películas de Si-P se observó mediante caracterización SEM. Se caracterizaron cuatro películas en total: M166, M208, M217 y M219. Tanto la muestra M166 como M208, son muestras testigo de los dispositivos M163 y M213, respectivamente, para la formación de Si-P grueso de aislamiento. Por otro lado, M217 y M219, son muestra testigo de los dispositivos M212 y M214, respectivamente, para Si-P delgado de compuerta. Es importante destacar, que las cuatro películas que se eligieron para la aplicación de esta técnica de caracterización, fueron seleccionadas aleatoriamente tomando en cuenta la uniformidad de la película de Si-P y la homogeneidad de la superficie, sin evidentes fracturas o fisuras.

En la Figura 6.7 se observa la morfología superficial de la muestra M166, donde la película de Si-P grueso se formó con una solución de 20 % de HF, 10 % IPA y 70 % de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> en un tiempo de 5 minutos de teñido químico. En la Figura 6.7a la magnificación es de 10K × y de 20K × en la Figura 6.5b. Es posible observar que, en general, la formación de poros es uniforme, pero de acuerdo a la Figura 6.7b, el diámetro de poros es variable (alrededor de 100 nm para los poros de mayor tamaño).

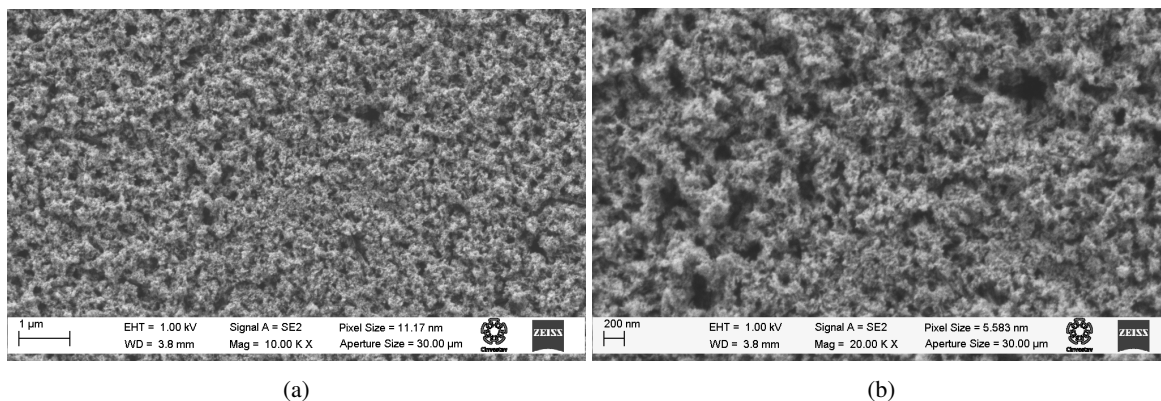


Figura 6.7: Imágenes SEM de la película de Si-P de aislamiento de la muestra M166 con magnificación de (a) 10K × y (b) 20K ×.

La segunda película de Si-P grueso es de la muestra M208, la cual se formó mediante teñido químico utilizando la misma composición de la solución anterior (20 % de HF, 10 % de IPA y 70 % de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>), pero con un tiempo de teñido químico de 8 minutos. Como podemos ver en las imágenes SEM de la Figura 6.8, la superficie de la película es homogénea en cuanto a la formación de los poros, presentando una variación en el diámetro de estos. Tal variación oscila alrededor de 200 nm para los poros más grandes, como se puede ver en la Figura 6.8b. En comparación con el diámetro de los poros de M166 (Fig. 6.7b), en M208 se formaron poros de mayor dimensión, lo cual se puede asociar con el tiempo de teñido químico.

La muestra M217 es una película de Si-P delgado, la cual se formó por teñido químico empleando una solución de 20 % de HF,

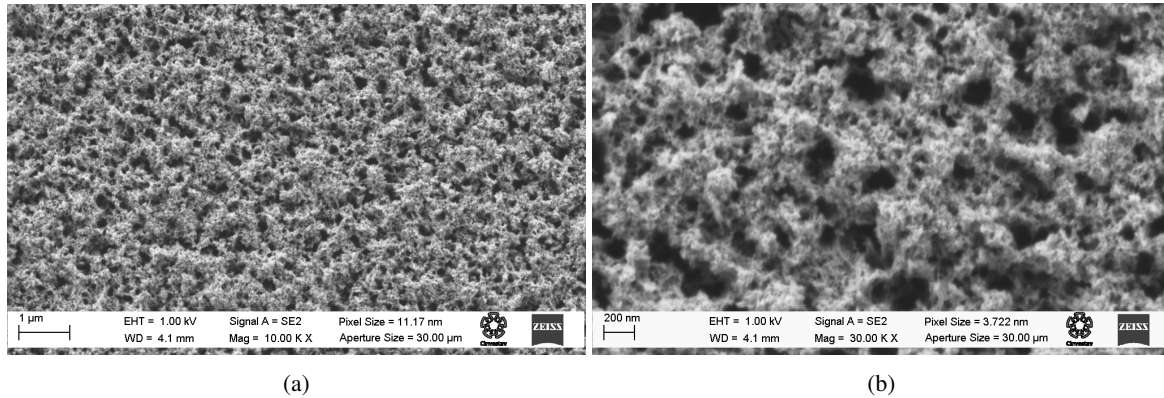


Figura 6.8: Imágenes SEM de la película de Si-P de aislamiento de la muestra M208 con magnificación de (a) 10K × y (b) 30K ×.

40 % de IPA y 40 % de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> con un tiempo de 75 segundos. Como se puede ver en la imagen SEM de la Figura 6.9a, esta película presenta uniformidad de poros en la superficie, con diámetros inferiores a 50 nm, como se observa de la Figura 6.9b

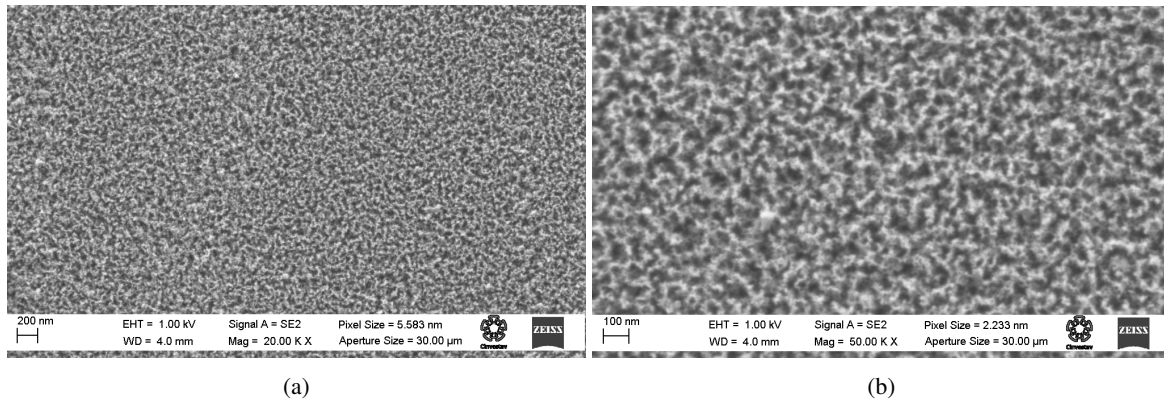


Figura 6.9: Imágenes SEM de la película de Si-P de compuerta de la muestra M217 con magnificación de (a) 20K × y (b) 50K ×

Finalmente, la muestra M219 corresponde a la formación de una película de Si-P delgado formada por teñido químico asistido por metal, en donde se utilizó una solución con la misma composición de 20 % de HF, 40 % de IPA y 40 % de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, pero con un tiempo de 50 s. Al igual que para las muestras anteriores, la superficie presenta una formación de poros uniforme (Figura 6.10a), con tamaño del diámetro de poros variable, de alrededor de 50 nm (Figura 6.10b). La diferencia en el aspecto de la superficie con la película de M217, puede deberse al tiempo transcurrido entre la mezcla de los componentes de la solución en el teñido químico y la inmersión de las muestras.

La morfología superficial de las muestras caracterizadas por SEM es uniforme en cuanto a la formación de poros, ya que en las cuatro películas es posible observar que se formaron tales estructuras sobre toda la superficie de manera homogénea, con lo cual se puede inferir que las soluciones que han sido utilizadas en la formación de Si-P mediante teñido químico asistido por metal es factible para la formación de poros con dimensiones dependientes del tiempo de uso de la solución.

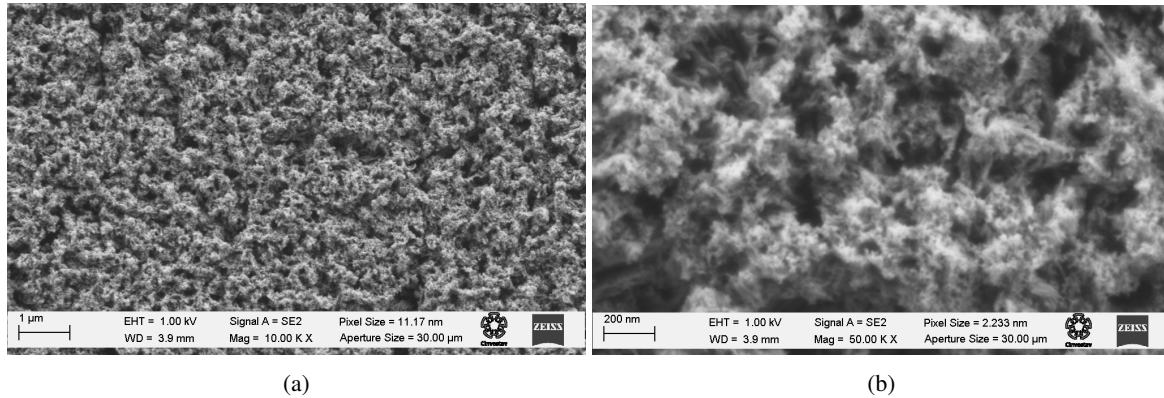


Figura 6.10: Imágenes SEM de la película de Si-P de compuerta de la muestra M219 con magnificación de (a) 10 K × y (b) 50 K ×.

## 6.2. Resultados de la caracterización de los dispositivos FET con Si-P

En esta sección se presentan los resultados representativos de la caracterización eléctrica de los transistores FET fabricados. Las gráficas se analizan y discuten por grupos, de acuerdo a las características de formación presentados en la Tabla 5.2. Esta caracterización se realizó para obtener las curvas características de los transistores y determinar su funcionamiento en condiciones ambientales en función de las condiciones de formación y así determinar cuáles son las mejores condiciones para la fabricación de estos dispositivos.

### 6.2.1. Caracterización I-V

A continuación se presentan los resultados de la caracterización eléctrica de los dispositivos etiquetados como 1A, cuya representación se encuentra en la siguiente Figura 6.11. Como se puede observar en la imagen, en la zona de la terminal de compuerta es en donde se encuentra la película de Si-P delgada, y el contacto en donde aplica el voltaje  $V_{GS}$ . Al comparar esta representación esquemática de los transistores 1A con la presentada en la Figura 4.4, se observa que en el modelo diseñado para este trabajo de tesis, cuenta únicamente con una terminal de compuerta. Más aún, la compuerta no está constituida por una región de tipo  $p$  difundida en el canal, pues es este caso, esa capa está conformada por Si-P. A pesar de las evidentes diferencias, se espera que el funcionamiento sea semejante al presentado en la descripción de los transistores FET de la Sección 4.4.1. Para los transistores fabricados en esta investigación, la región de carga espacial se extiende hacia el interior del canal de un solo lado, pues sólo se cuenta con una compuerta.

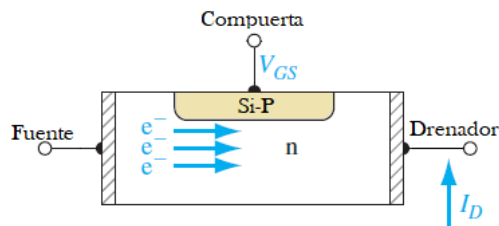


Figura 6.11: Representación gráfica de los transistores FET 1A fabricados

### Transistores 1A

En las gráficas de la Figura 6.12 y 6.13 se muestran las curvas I-V características del primer grupo de dispositivos fabricados etiquetados como M145, M146 y M147, recordando que cada una de estas tres muestras alberga a su vez, tres transistores denominados 1A, 1B y 1C con Si-P en la compuerta y tres transistores llamados 7A, 7B y 7C con Si-P en todo el canal. La diferencia entre los dispositivos A, B y C son variaciones congruentes en las dimensiones, tal como se explicó en el apartado 5.1.3, por lo que en cada caso

se muestra el dispositivo equivalente que mejor representa el comportamiento de todos, cuyos resultados se enlistan en la Tabla 6.3. Este primer grupo de muestras fueron elaboradas en una solución con 70 % de HF, 10 % de IPA y 20 % de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> para Si-P grueso y una solución de 20 % HF, 10 % IPA y 70 % de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> para Si-P delgado.

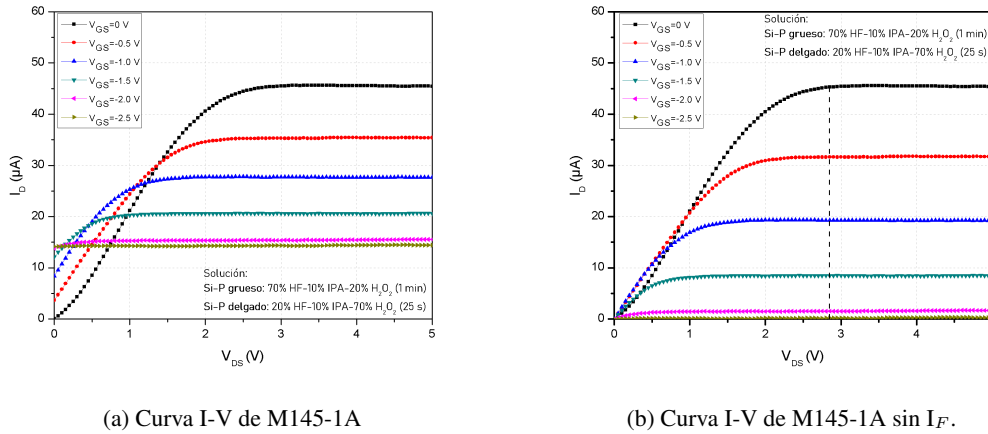


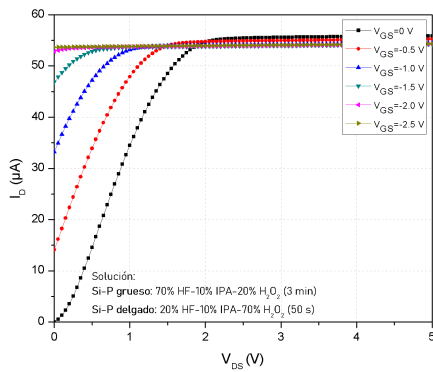
Figura 6.12: Curvas características I-V del transistor M145.

La gráfica 6.12a representa las curvas I-V del transistor M145-1A, donde se observa un incremento de la corriente de fuga del drenador cuando  $V_{DS} = 0$ , conforme se polariza la compuerta a un voltaje diferente de cero, mientras que 6.12b es la gráfica del mismo transistor en donde se ha restado esta corriente de fuga, la cual corresponde a la corriente de fuga originada por la polarización de la compuerta G. La corriente de fuga  $I_F$  o  $I_L$  (por sus siglas en inglés, *Leakage current*) es la corriente eléctrica no deseada que circula por la terminal. Al comparar ambas gráficas, es posible notar que se aprecia mejor el comportamiento transistor de esta muestra al restar el valor  $I_F$ , esta corriente de alguna manera enmascara, en mayor (muestra M146) o menor (muestra M147) medida, el comportamiento del transistor. Esta operación se justifica si los transistores serán utilizados como sensores de gases sin la metalización de compuerta, y que la presencia de los gases a analizar podrá modificar la carga en la compuerta que modifica la región de carga espacial en el canal debida a la unión silicio poroso/silicio de la compuerta. Razón por la que en todos los dispositivos, donde se presenta esta corriente de fuga de polarización de compuerta, se lleva a cabo esta operación. Las curvas I-V de las muestras M146 y M147 que se muestran en la Figura 6.13a y 6.13c, respectivamente, también se realizaron restando  $I_F$ , como se observa en la Figura 6.13b para el transistor M146-1A y en la Figura 6.13d, para el dispositivo M147-1A. Como se explicó en los detalles experimentales, el voltaje de la compuerta  $V_{GS}$  se varió de 0 a -2.5 V con decrementos de 0.5 V, mientras que la tensión  $V_{DS}$  en el drenador se varió de 0 a 5 V. El voltaje de saturación para este grupo de dispositivos disminuye progresivamente, ya que M145 tiene un valor  $V_{DR}(sat) = 2.8$  V; M146,  $V_{DR}(sat) = 2.1$  V y, M147  $V_{DR}(sat) = 1.7$  V. Para las tres muestras, el voltaje de apagado  $V_P$  está ligeramente por debajo de -2.5 V. La corriente de drenador en saturación para cada dispositivo también es diferente y dependiente de las condiciones de formación del SiP de compuerta (delgado), siendo del orden de 45  $\mu A$  para el dispositivo M145-1A, 55  $\mu A$  para M146-1A y del orden de 13  $\mu A$  para M147-1A.

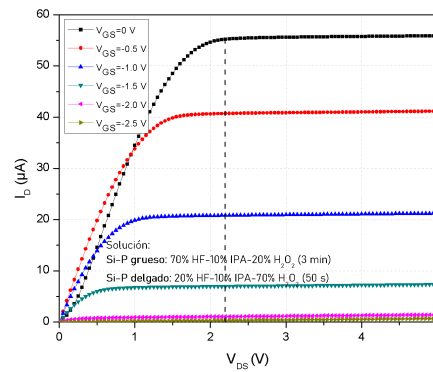
Para el mismo grupo de muestras M145-M147, se presentan en la gráfica 6.14 las curvas I-V para el caso en que  $V_{GS} = 0$  V. Para cada transistor se realiza una comparativa de estas curvas de los dispositivos A, B y C, con el fin de encontrar una tendencia en la pendiente de la curva I-V antes de la saturación y en la corriente de saturación,  $I_D(sat)$ , ya que la primera es asociada a la resistencia del canal, la cual se espera que se incremente al aumentar las dimensiones de éste. Es importante recordar que el transistor 1A, en todos los casos, tiene un ancho de canal de 750  $\mu m$  con una compuerta de 150  $\mu m$  de ancho. Estas dimensiones aumentan 50  $\mu m$  de transistor en transistor. De esta forma, el transistor 1B tiene un ancho de canal de 800  $\mu m$  con una compuerta de 200  $\mu m$  de ancho, mientras que el transistor 1C tiene 850  $\mu m$  de ancho de canal y 250  $\mu m$  de ancho de compuerta. Dicho esto, se observa que para el transistor M145, la gráfica de la Figura 6.14a, hay una tendencia creciente en la pendiente de la curva I-V de los dispositivos 1A a 1C, justo antes de la saturación, es decir, la resistencia del canal tiende a incrementarse, observándose como un decremento de la corriente antes de la saturación, sin embargo, no hay una tendencia clara en cuanto a la corriente  $I_D(sat)$ . Este comportamiento se puede explicar debido a que la longitud del canal en el dispositivo 1C es mayor, que en el dispositivo 1A, presentándose una mayor resistencia de canal al aumentar su longitud, pues los portadores de carga recorren una mayor distancia en el dispositivo 1C que en el 1A. Para los dispositivos M146 y M147 esta tendencia no es muy clara.

En la gráfica de la Figura 6.15 se observan las curvas I-V de los transistores 1A de las muestras M145, M146 y M147 sin voltaje aplicado a la compuerta G ( $V_{GS} = 0$  V). Se observa un cambio en la corriente de saturación, el cual está asociado a la profundidad del Si-P de compuerta, y por consiguiente a la barrera de potencial de la unión Si-P/Silicio, la cual influye también en la corriente de fuga de la unión. El Si-P de compuerta en los tres transistores se formó con la misma composición en solución de teñido químico (20 % HF, 10 % IPA, 70 % H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>), pero los tiempos son diferentes, el transistor M145 tiene un tiempo de ataque de 25 s; M146, de 50

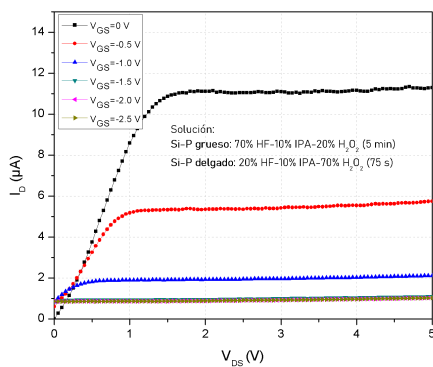




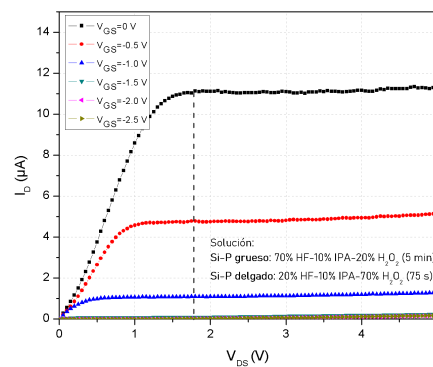
(a) Curva I-V de M146-1A



(b) Curva I-V de M146-1A sin  $I_F$ .



(c) Curva I-V de M147-1A



(d) Curva I-V de M147-1A sin  $I_F$ .

Figura 6.13: Curvas características I-V de los transistores M146-1A y M147-A.

s y finalmente, M147, de 75 s, por lo que la profundidad de la película de Si-P de la compuerta es mayor a mayor tiempo de ataque químico, medidas que se obtuvieron en las muestras testigo: M157 tiene una profundidad de Si-P de 84.9 nm, M158, de 98.6nm y M159, de 128.5 nm (ver tabla 6.2).

Por otro lado, para el transistor de la muestra M146, Figura 6.14b, no se aprecia una tendencia al cambiar las dimensiones de los dispositivos. Sin embargo, para la muestra M147 presenta una tendencia creciente en cuanto al valor de la corriente de saturación conforme las dimensiones del dispositivo son mayores. El transistor de la muestra M147 es el que presentó menor corriente de fuga, de  $0.73 \mu\text{A}$  a  $V_{GS} = -2.5 \text{ V}$ , mientras que M145 y M146 tienen valores de 14.65 y  $52.8 \mu\text{A}$ , respectivamente.

En la gráfica de la Figura 6.16 se muestran las curvas de transconductancia  $I_d$  vs  $V_{GS}$ , de los transistores 1A de las tres muestras de este grupo, es decir, M145, M146 y M147, obtenidas de las gráficas en las que se ha restado la corriente de fuga de la compuerta. La transconductancia es la razón de cambio de la corriente del drenador con respecto al voltaje aplicado en la compuerta, por lo que se puede inferir que, para este grupo de muestras, el dispositivo de M145 es el que presenta un mayor control de la compuerta sobre el flujo de la corriente en el canal.

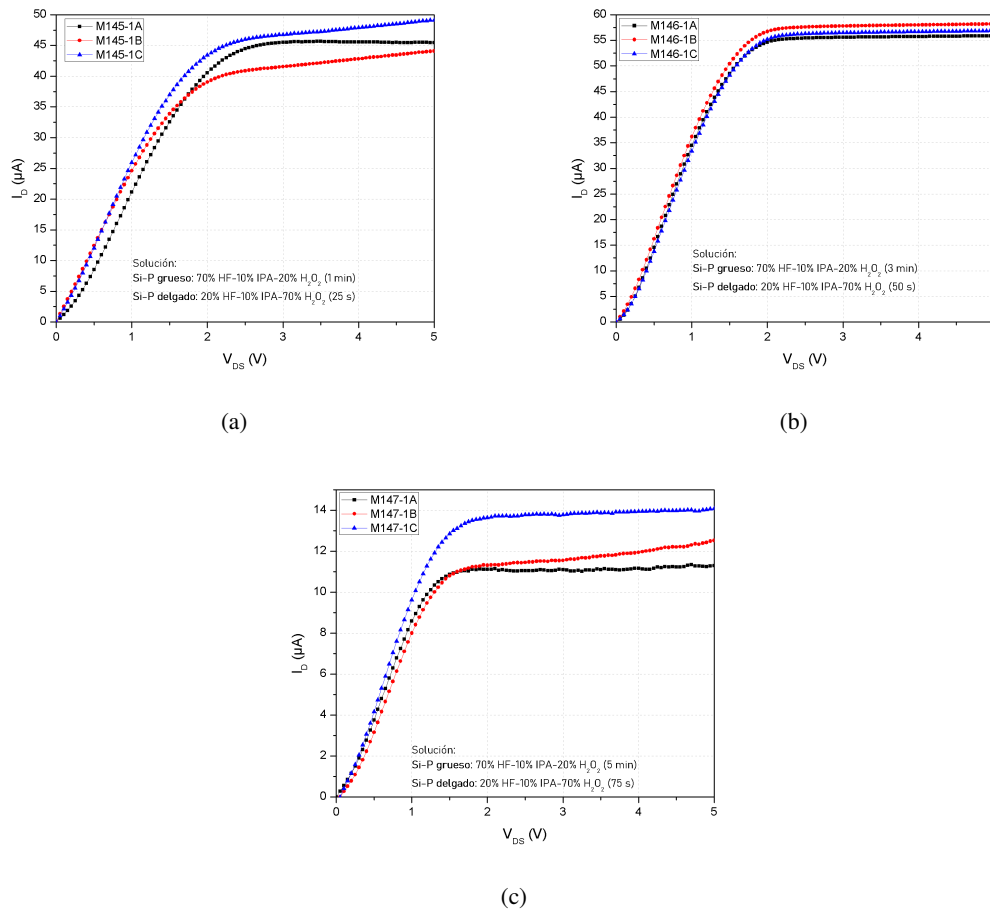


Figura 6.14: Curvas I-V de los transistores de las muestras (a) M145, (b) M146 y (c) M147 con  $V_{GS}=0$ .

El siguiente grupo de dispositivos está conformado por tres muestras, M154, M155 y M156, para las cuales se utilizó una solución con 40 % de HF, 10 % de IPA y 50 % de  $H_2O_2$  para la formación de Si-P grueso, mientras que para el Si-P delgado se empleó la solución conformada por 20 % de HF, 40 % de IPA y 40 % de  $H_2O_2$ , con diferentes tiempos, tal como se puede observar en la Tabla 5.2. De este grupo de muestras, no fue posible obtener curvas características propias de un transistor, pues como se puede observar en la Figura 6.17, la característica I-V de cada transistor FET, se encuentra enmascarada por la alta corriente de fuga del diodo de compuerta (Figura 6.18).

A pesar de estos resultados, es posible observar en las gráficas que, el valor de la corriente de fuga,  $I_F$ , va disminuyendo conforme aumenta el tiempo de teñido químico para la formación del Si-P de compuerta y de aislamiento. El transistor M154-1A tiene un tiempo de formación de Si-P de compuerta de 25 s y de 1 min para Si-P de aislamiento, mientras que el transistor M155-1A tiene un tiempo de 50 s y 3 min, respectivamente y, por último, M156-1A se formó con un tiempo de 75 s para el Si-P delgado y 5 min para el Si-P de aislamiento. El transistor con los menores tiempos de formación de Si-P, M154-1A, presenta el valor de corriente de fuga más grande, pues como se puede observar en la gráfica de la Figura 6.17a, este valor de  $I_F$  es de  $101.3 \mu A$  a  $V_{GS} = 2.5V$ , mientras que para el transistor M155-1A  $I_F$  es de  $82.40 \mu A$  (Figura 6.17c). Finalmente, el transistor con los mayores tiempos de formación de Si-P, es decir, M156-1A, es el dispositivo que presenta el menor valor de la corriente de fuga, pues de acuerdo con la gráfica de la Figura 6.17e,  $I_F$  es de  $40.5 \mu A$ . Esta relación en cuanto a la corriente de fuga y los tiempos de teñido químico, son semejantes a los resultados obtenidos en el grupo de las muestras M145-M147, en donde el transistor que se formó con el tiempo de ataque químico más largo, es el que presenta el valor más pequeño en cuanto a la corriente  $I_F$ .

Por otro lado, en la Figura 6.19 se grafica la curva I-V de cada transistor de este grupo cuando se tiene la condición en que  $V_{GS} = 0V$ . Aunque no hay un valor definido en cuanto a la corriente de saturación, se puede notar que el valor de la corriente máxima en el drenador bajo esta condición va disminuyendo conforme se pasa de la muestra con el menor tiempo de teñido químico, M154-1A, a la de mayor tiempo, M156-1A. La muestra M154-1A presenta un valor máximo de la corriente  $I_D$  de  $137.3 \mu A$ ; M155-1A, de  $95.3 \mu A$  y, M156-1A, de  $55.9 \mu A$ , correspondientes a espesores de la película de Si-P de compuerta (delgado) de: 72.7 nm, 103.8 nm y 153.1 nm (ver Tabla 6.2). Este análisis se realiza con el fin de hallar una relación entre las condiciones de formación de las películas

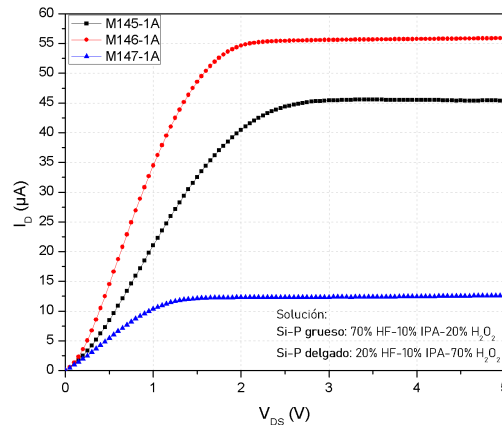


Figura 6.15: Curvas I-V del transistor 1A de la muestra M145, M146 y M147 con  $V_{GS}=0$ .

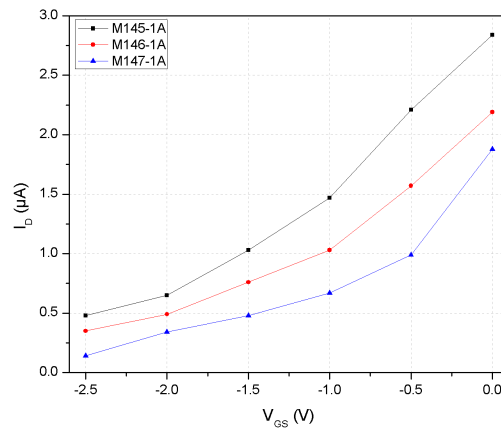


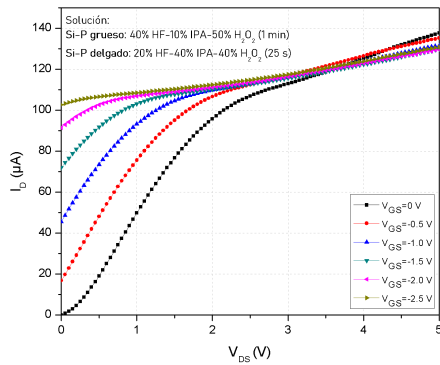
Figura 6.16: Grafica de la transconductancia del transistor 1A de las muestras M145, M146 y M147.

que conforman los transistores FET y los resultados de la caracterización eléctrica.

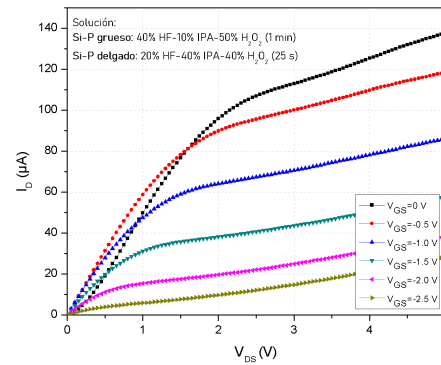
Como se observa en las gráficas de la Figura 6.17, para los tres dispositivos, se realizó una gráfica I-V con los resultados obtenidos de la caracterización eléctrica, así como la gráfica de la característica I-V restando el valor de la corriente de fuga,  $I_F$ . Al restar tal valor, se puede notar que, del perfil de las gráficas, los tres transistores no presentan control de la corriente en la compuerta, pues no hay un valor claro de la corriente de saturación. Dado que este comportamiento se presentó para los dispositivos 1A, 1B y 1C de las tres muestras de este grupo, es posible concluir que la combinación de las soluciones de teñido químico utilizadas para la formación tanto de Si-P grueso como delgado, así como el tiempo de teñido, no son efectivas para su uso en zonas de aislamiento y de compuerta de un transistor FET.

El siguiente conjunto de dispositivos está conformado por las muestras M163, M164 y M165. El Si-P grueso de las tres muestras se formó con una solución de 20, 10 y 70 % de HF, IPA y  $H_2O_2$ , respectivamente, con tiempo de ataque entre 1 y 5 minutos. Para la formación de Si-P delgado se empleó una solución con 20 % de HF, 60 % de IPA y 20 % de  $H_2O_2$ , con 25 s de ataque para M163, 50 s para M164 y 75 s para M165. En las gráficas de la Figura 6.20 y la Figura 6.21 se presentan las curvas I-V características de los transistores de este grupo. En primera instancia, se puede notar que en la gráfica resultante de la caracterización eléctrica de la muestra M163-1A (Figura 6.20a) y M165-1A (6.21a) no presentan curvas características de un transistor FET. En cambio, para la muestra M164-1A (Figura 6.20c) se obtuvo una gráfica I-V con un comportamiento propio de un transistor.

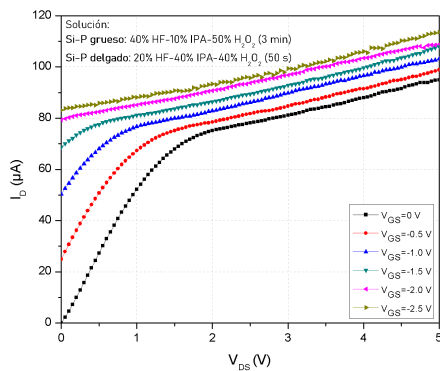
Para hacer aún más notorios estos resultados, en cada uno de los tres dispositivos se graficaron las curvas I-V restando el valor de la corriente de fuga,  $I_F$ . La muestra 163-1A, no tiene un valor de la corriente de saturación bien definido (Figura 6.20b), por lo



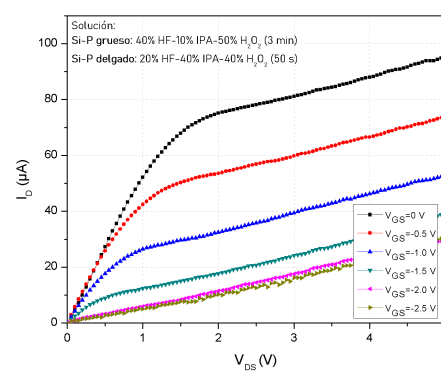
(a) Curva I-V de M154-1A



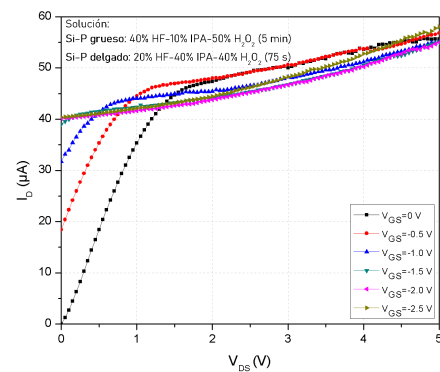
(b) Curva I-V de M154-1A sin  $I_F$



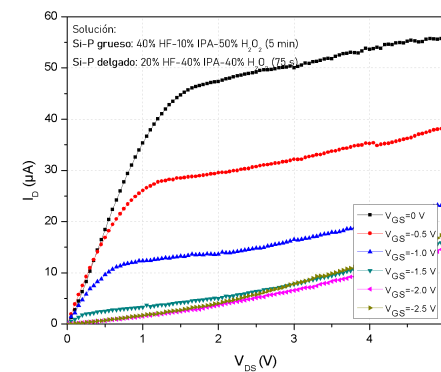
(c) Curva I-V de M155-1A



(d) Curva I-V de M155-1A sin  $I_F$



(e) Curva I-V de M156-1A



(f) Curva I-V de M156-1A sin  $I_F$

Figura 6.17: Curvas características I-V de los transistores M154-1A, M155-1A y M156-1A.

que se puede inferir que se presenta modulación de canal (cambio de la longitud efectiva del canal por efecto de la región de carga espacial en la terminal de drenador), además, antes del voltaje  $V_{DS} = 2$  V, la resistencia del dispositivo para  $V_{GS} = 0$  V es mayor que cuando se aplica voltaje en la compuerta, para  $|V_{GS}| < 1.0$  V, por lo que se sobrepone con las curvas correspondientes. Además, de la gráfica de la Figura 6.20a, se puede ver una corriente de fuga que enmascara el comportamiento propio de un FET, con un valor de  $45.8 \mu\text{A}$  a  $V_{GS} = 2.5$  V. Con esto, se puede concluir que los tiempos utilizados para la formación tanto de Si-P grueso como delgado, no son óptimos para obtener un transistor FET con curvas I-V bien definidas. Por otro lado, el transistor M164-1A es el dispositivo que presenta el mejor comportamiento de este grupo. Como se puede notar en la gráfica de la Figura 6.20c, tiene un valor de la corriente de fuga de  $6.3 \mu\text{A}$ , valor muy pequeño comparado con la corriente  $I_F$  de las otras dos muestras. Además, aún sin restar el valor de  $I_F$ , es posible observar una voltaje  $V_{DS}(sat)$  bien definido, con un valor de 2.3 V, marcado con una línea punteada en la Figura 6.20d.

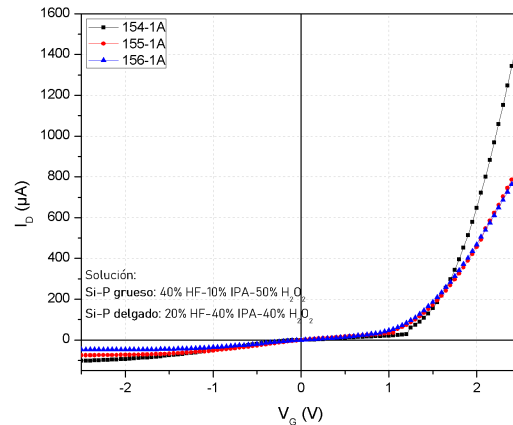


Figura 6.18: Gráfica del diodo de compuerta de los transistores 154-1A, 155-1A y 156-1A.

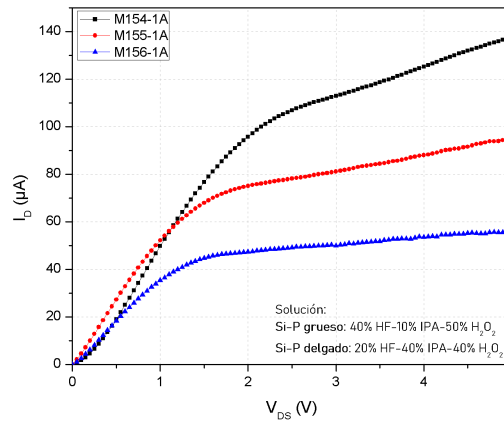
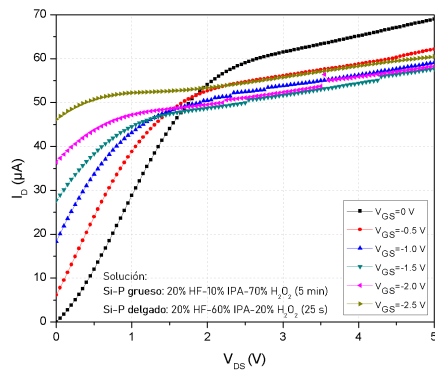


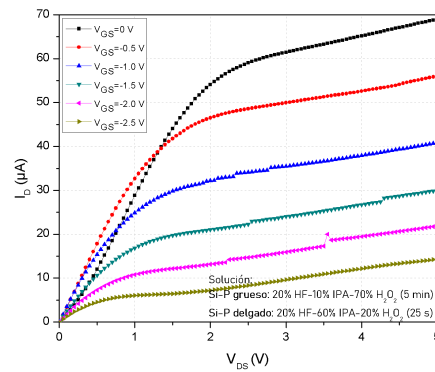
Figura 6.19: Curvas I-V del transistor 1A de la muestra M154, M155 y M156 con  $V_{GS}=0$ .

Finalmente, la gráfica I-V del transistor M165-1A se encuentra enmascarada por el alto valor de la corriente de fuga, como se puede observar en la Figura 6.21a. Este valor es de  $154.3 \mu A$ , teniendo la corriente  $I_F$  más grande de este grupo de muestras. Al restar la corriente de fuga se puede notar que existe un valor bien definido en cuanto a la corriente de saturación, con un valor  $V_{DS}(sat)$  de 3.08 V (línea punteada de la Figura 6.21b). Aunque al restar la corriente  $I_F$  se puede presentar un comportamiento propio de un transistor, al observar más detenidamente las curvas antes de la saturación, es posible notar que la resistencia de canal no presenta una dependencia directa con el voltaje de la compuerta para  $|V_{GS}| < 1.5$  V, de forma semejante como ocurre con los resultados de M163-1A.

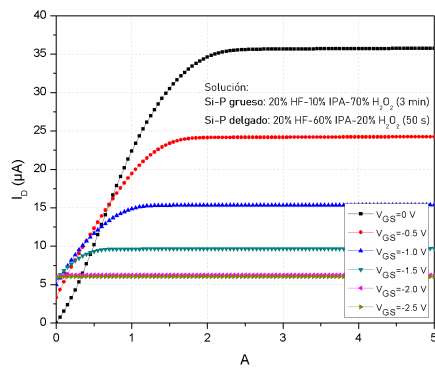
Dados estos resultados, en la gráfica de la Figura 6.22 se presentan las curvas I-V de los transistores 1A, 1B y 1C de la muestra M164 para  $V_{GS} = 0$  V, con el fin de analizar el cambio con respecto a la longitud del canal, la cual corresponde a longitudes de 250, 300 y 350 micras, respectivamente. Como se puede observar, el valor de  $I_D(sat)$  aumenta conforme se incrementa la longitud del canal, contrario a lo esperado, recordando que es el transistor 1C el de mayores dimensiones. Este comportamiento también fue obtenido para el grupo de muestras M145-M147, como se describió anteriormente.



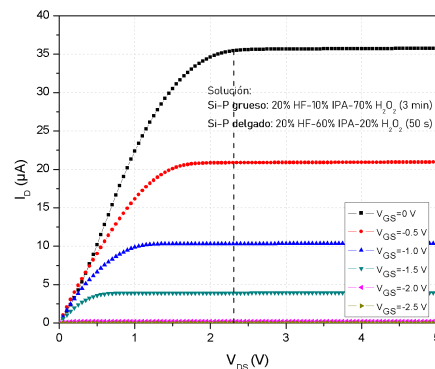
(a) Curva I-V de M163-1A



(b) Curva I-V de M163-1A sin  $I_F$

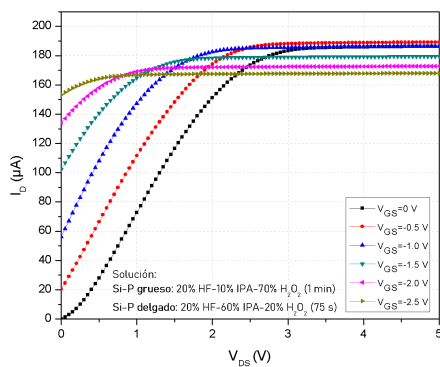


(c) Curva I-V de M164-1A

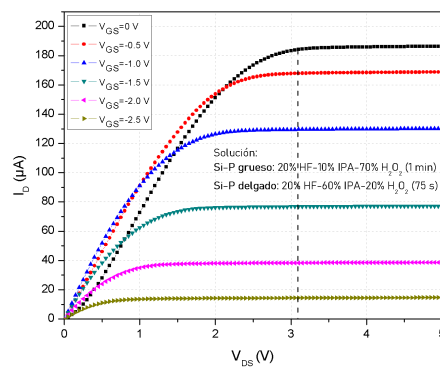


(d) Curva I-V de M164-1A sin  $I_F$

Figura 6.20: Curvas características I-V de los transistores (a)M163-1A, (b)M163-1A restando el valor  $I_F$  y (c)M164-1A, (d)M164-1A restando  $I_F$ .



(a)



(b) Curva I-V de M165-1A sin  $I_F$

Figura 6.21: Curvas características I-V del transistor M165-1A.

Finalmente, en la Figura 6.23, se presenta una gráfica de la transconductancia de los tres transistores (1A, 1B y 1C) de la muestra M164, a partir de las gráficas sin corriente de fuga (Figura 6.20d). Al observar dicha gráfica, es posible observar que la razón de cambio de la corriente de drenador con el voltaje de compuerta, transconductancia, es semejante para los tres dispositivos e independiente de la longitud de canal.

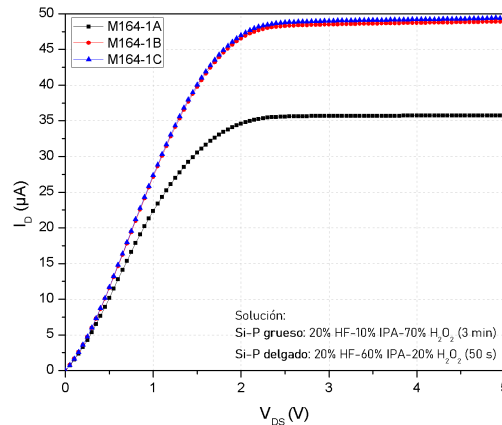


Figura 6.22: Curvas I-V de los transistores de M164 con  $V_{GS}=0$  V.

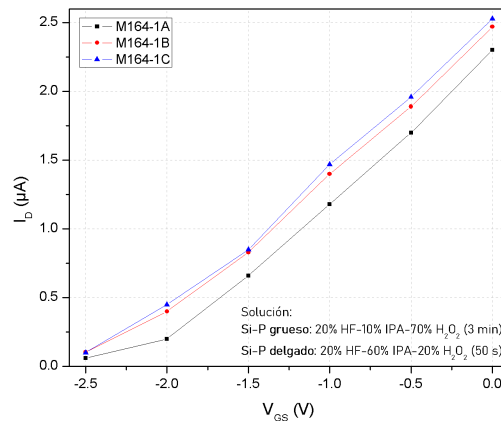


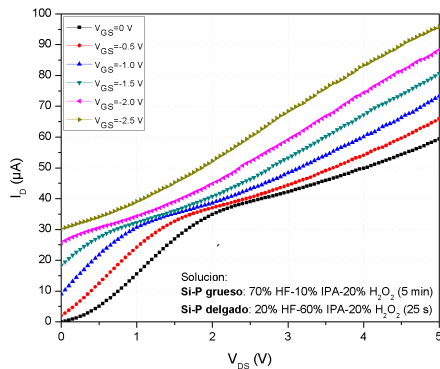
Figura 6.23: Gráfica de transconductancia de los transistores 1A, 1B y 1C de la muestra M164.

Es importante mencionar que para los transistores de las muestras M163 y M165, no se realiza una descripción más detallada de los resultados, más allá de la presentación de las curvas I-V, pues no se obtuvieron resultados que amerite una mayor descripción. Así, de este grupo de dispositivos, se concluye que el transistor M164 es el que presenta mejores resultados, recordando que la formación de Si-P grueso se realizó con una solución conformada por 20 % de HF, 10 % de IPA y 70 % de  $H_2O_2$ , con tiempo de ataque de 3 min, mientras que la formación del Si-P de compuerta tuvo un tiempo de teñido químico de 50 s, en una solución con el 20 % de HF, 60 % de IPA y 20 % de  $H_2O_2$ .

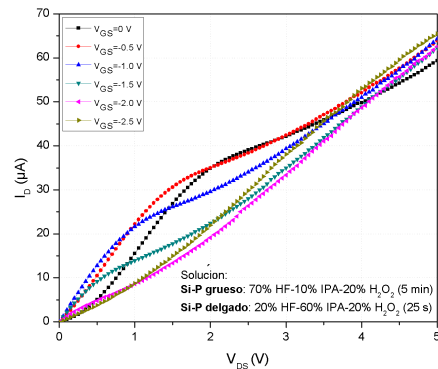
Las muestras M169, M170 y M171 conforman el siguiente grupo de muestras, en donde el Si-P grueso fue formado a partir de una solución con 70 % de HF, 10 % de IPA y 20 % de  $H_2O_2$ , y tiempos de teñido de 5 min para M169, 3 min para M170 y 1 min para M171. Por otro lado, la formación de Si-P para la compuerta se formó utilizando una solución con 20 % de HF, 60 % de IPA y 20 % de  $H_2O_2$ , con tiempos de ataque entre 25 y 75 s. En la gráfica de la Figura 6.24 se presentan las curvas características de los transistores 1A de las tres muestras: M169, M170 y M171. De la gráfica 6.24a se puede observar que el transistor M169-1A no presenta curvas I-V características de un transistor, y al restar la corriente  $I_F$  (Figura 6.24b), se observa que no es el efecto de la corriente de fuga lo que enmascara un comportamiento de transistor, por lo cual se deduce que, la compuerta no controla la corriente de drenador, debido a que la barrera de potencial del diodo de compuerta no puede realizar esta función, por lo que el tiempo de teñido químico, 25 s, para la formación de Si-P de compuerta no es suficiente para formar una barrera de potencial que se module con el voltaje de compuerta, cambio en el ancho de la región de carga espacial que module el ancho del canal.

En la Figura 6.24c y 6.24e se grafican las curvas I-V de los transistores M170-1A y M171-1A, respectivamente. De tales gráficas, es posible observar que en ambos casos la corriente de fuga  $I_F$  es alta, enmascarando el efecto de control de la corriente del drenador

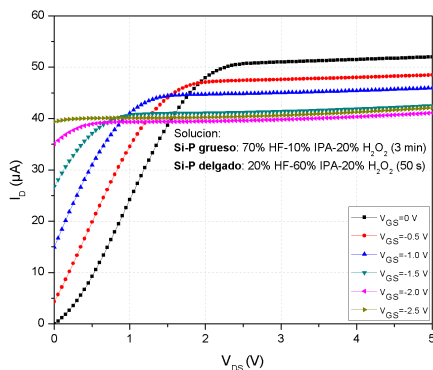
por el voltaje de compuerta, con valores de  $39.8 \mu\text{A}$  para M170-1A y  $71.5 \mu\text{A}$  para M171-1A. En la Figura 6.25 se presentan las curvas I-V para el diodo de compuerta de M170-1A y M171-1A, donde se pueden observar las corrientes de fuga para  $V_{GS} < 0 \text{ V}$ . Con la finalidad de observar el control de la corriente de drenador con el voltaje de compuerta, en ambos casos se grafican las curvas I-V restando  $I_F$ , con el fin de observar el efecto de control de la compuerta, ya que al realizar esto se puede notar el comportamiento propio de un transistor. En la Figura 6.24d y 6.24f, se presentan las gráficas I-V de los transistores M170-1A y M171-1A, respectivamente sin el efecto de la corriente de fuga. Se puede notar que M170-1A es el transistor, en el cual se tiene un mejor control de la corriente de drenador, al comparar con la gráfica del dispositivo M171-1A. A pesar de que en ambos casos se presentan curvas I-V características de un transistor, la corriente de fuga presenta valores grandes, por lo que es posible deducir que es baja la eficacia en cuanto a las condiciones de formación de Si-P para las muestras de este grupo.



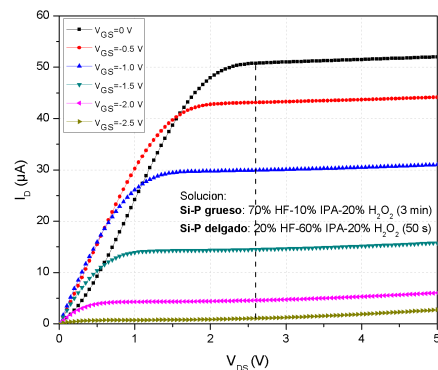
(a) Curva I-V de M169-1A



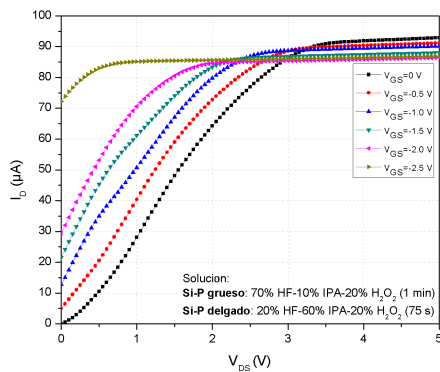
(b) Curva I-V de M169-1A sin  $I_F$



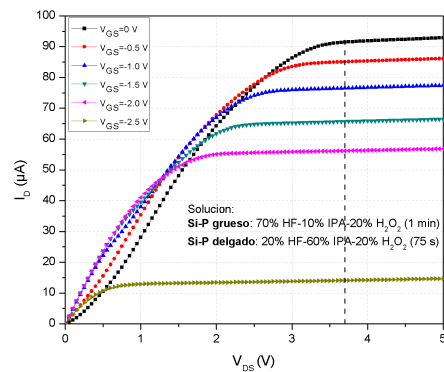
(c) Curva I-V de M170-1A



(d) Curva I-V de M170-1A sin  $I_F$



(e) Curva I-V de M171-1A



(f) Curva I-V de M171-1A sin  $I_F$

Figura 6.24: Curvas I-V de transistores M169-1A, M170-1A y M171-1A.



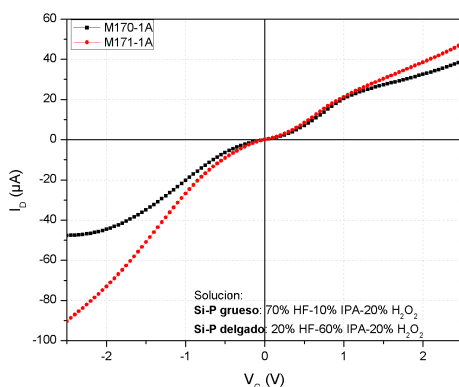


Figura 6.25: Gráfica del diodo de compuerta de los transistores M170-1A y 171-1A.

A pesar de que las condiciones de formación para las tres muestras no son óptimas para la fabricación de transistores FET como se describió anteriormente, en los transistores M169-1A y M171-1A existe una tendencia en cuanto a la curva de la corriente del drenador,  $I_D$ , en función del voltaje  $V_{DS}$ , tal como se visualiza en las gráficas de la Figura 6.26a y 6.26c, para voltajes de compuerta igual a cero. En los dos casos, cuando se tiene que  $V_{GS} = 0$  V, el valor de la corriente de saturación,  $I_D(sat)$ , aumenta conforme la distancia de separación entre los contactos aumenta, correspondiente a un aumento en la longitud del canal, por lo que el transistor 1C presenta un valor  $I_D(sat)$  mayor que 1A, comportamiento observado en los resultados de la caracterización eléctrica de transistores de los grupos antes descritos, cuando es de esperarse que disminuya al incrementar la longitud de canal y por consiguiente su resistencia, tal como se observa para el transistor M170-1 en la gráfica de la Figura 6.26b. Por otro lado, en la gráfica de la Figura 6.27 se observan las curvas I-V de los transistores 1-A de las tres muestras de este grupo, para la condición en que  $V_{GS} = 0$  V. No hay una tendencia clara en cuanto a estas curvas, pero esto se debe a que la muestra M169-1A no presenta una corriente de saturación definida, pues como se describió, no tiene un comportamiento de transistor. A pesar de ello, se puede ver que hay un decremento en los valores de la resistencia (antes de la saturación), pues la muestra con el mayor tiempo de teñido químico para el Si-P de aislamiento es la M169, es la que presenta mayor resistencia, mientras que M171 con el menor tiempo de teñido para el Si-P grueso es la que tiene una menor resistencia. El comportamiento correspondiente se presenta para los valores de la corriente de saturación, pues se puede ver que la corriente de saturación para M170-1A es de  $51.1 \mu A$ , y para M171-1A, este valor es de  $92.1 \mu A$ .

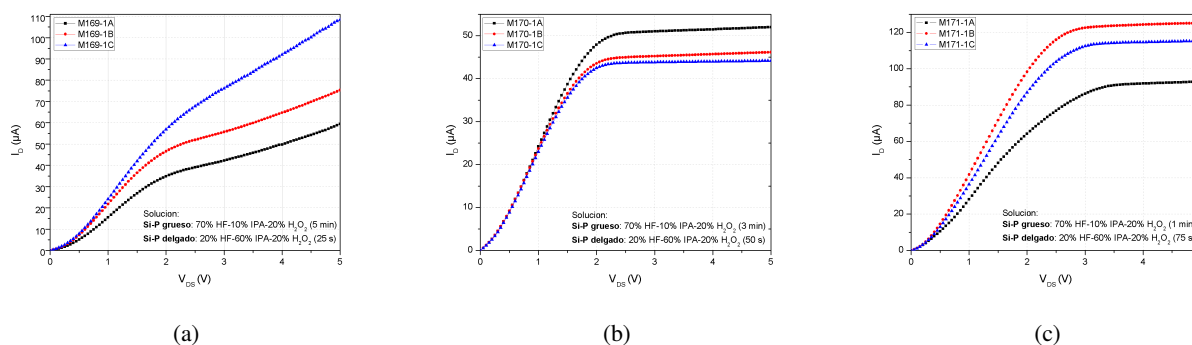


Figura 6.26: Curvas I-V de transistores 1A, 1B y 1C de las muestras M169, M170 y M171 cuando  $V_{GS} = 0$  V.

El último conjunto de dispositivos cuyos resultados de la caracterización eléctrica se describen, está constituido por cinco muestras: M210, M211, M212, M213 y M214. Como se puede observar en la Tabla 5.2, no hay una relación directa entre las condiciones de formación de los dispositivos de este grupo, pues como se comentó en los resultados obtenidos de elipsometría (Sección 6.1.1), se fabricaron para determinar la existencia de algún cambio en las características con base en la solución utilizada y el tiempo de teñido químico, por lo cual se presentan los resultados de la caracterización eléctrica de manera independiente para estas muestras.

Las muestras M210, M211 y M212 albergan dispositivos cuya película de Si-P grueso de aislamiento se formó con una solución de teñido químico con 70 % de HF, 10 % de IPA y 20 % de  $H_2O_2$  por un tiempo de de 8 minutos. Los dispositivos de M210 se fabricaron con una película de Si-P delgado de compuerta con una solución de 20 % de HF, 10 % de IPA y 70 % de  $H_2O_2$  por 75 segundos. En la Figura 6.28 se muestran las curvas I-V del transistor M210-1A. Las características I-V de los transistores M210-1B y M210-1C

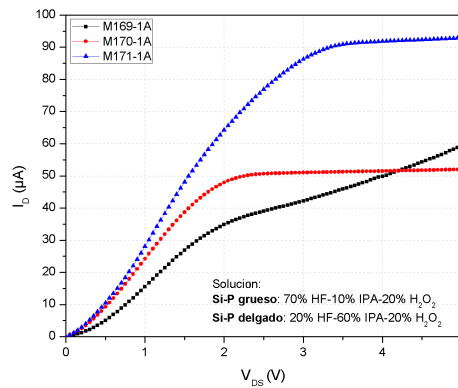


Figura 6.27: Curvas I-V de transistores M169-1A, M170-1A y M171-1A cuando  $V_{GS} = 0$  V.

presentan curvas irregulares, posiblemente debido a fallas en los contactos, por lo que no se muestran. Las gráficas I-V del diodo de compuerta se presentan en la Figura 6.29, en donde se gráfica de forma lineal en la Figura 6.29a, mientras que en la gráfica de la Figura 6.29b se presenta en una escala logarítmica, se puede observar que tiene una corriente de fuga, con un valor de  $7.4 \mu\text{A}$  a  $-2.5$  V de voltaje de compuerta, la cual enmascara fuertemente el comportamiento de transistor, el cual presenta una corriente de saturación del orden de  $8.5 \mu\text{A}$ , tal como se puede observar en la Figura 6.28a y, para propósitos de visualización, en la Figura 6.28b se muestra la gráfica I-V del mismo transistor, restando el valor de la corriente de fuga,  $I_F$ . El voltaje de saturación para este dispositivo es de  $1.8$  V, indicado con la línea punteada en la Figura 6.28b. Finalmente, para M210-1A se presenta la gráfica de la transconductancia en la Figura 6.30. El voltaje de apagado  $V_P$  tiene un valor de alrededor de  $-1.5$  V. Para  $V_{GS} = 0$  V, la corriente de saturación es pequeña, del orden de  $8.0 \mu\text{A}$ , y del orden de la corriente de fuga del diodo de compuerta, por lo que se espera que el ancho del canal esté fuertemente reducido por el ancho de la región de carga espacial, formada en la región de canal por las características del silicio poroso de compuerta y las características del silicio tipo N, de la capa epitaxial, unión SiP/Silicio. La profundidad del Si-P de compuerta es pequeña, del orden  $133$  nm, por lo que no debería de afectar al canal ya que éste es el espesor de la capa epitaxial, cuyo orden es de  $4 \mu\text{m}$ .

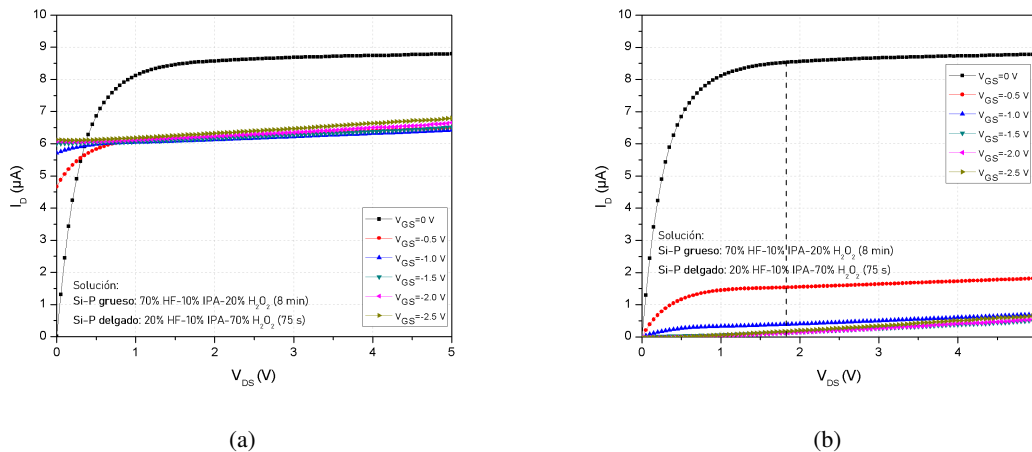


Figura 6.28: Curvas I-V del transistor M210-1A (a) obtenida y (b) restando la corriente  $I_F$ .

En la Figura 6.31 se observan las gráficas I-V del transistor 1A de la muestra M211, en la cual el Si-P delgado de compuerta se formó con una solución de 20 % de HF, 60 % de IPA y 20 % de  $\text{H}_2\text{O}_2$  con un tiempo de teñido químico de 50 segundos. De la Figura 6.31a se puede observar que la corriente de fuga presenta un valor de aproximadamente  $57.8 \mu\text{A}$  a un voltaje  $V_{GS} = -2.0$  V, la cual enmascara el comportamiento propio del transistor FET, como se puede observar en la gráfica de la Figura 6.31b, en donde tal efecto es posible de visualizar, al restar la corriente de fuga de las características I-V. El voltaje de saturación para M211-1A es de  $2.07$  V y el voltaje de apagado presenta un valor menor a  $2.0$  V como se puede notar en las gráficas; la profundidad del Si-P de compuerta, de  $65.8$  nm, es mucho menor que en la muestra anterior, M210, cuyas características originan una región de carga menor, dando lugar a un ancho de canal tal, que permite una corriente de saturación del transistor a  $V_{GS} = 0$  V, mucho mayor que en la muestra anterior, del orden de

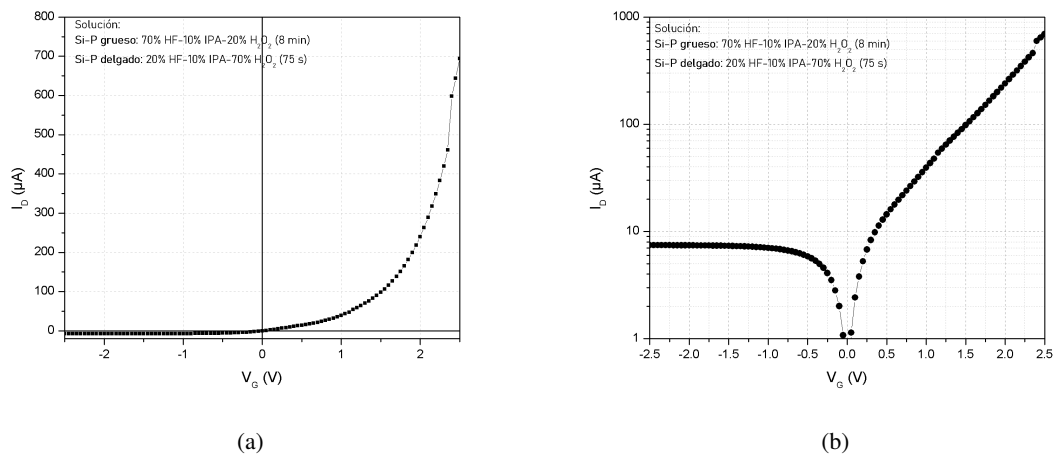


Figura 6.29: Gráfica (a) lineal y (b) semilogarítmica del diodo de compuerta del transistor M210-1A.

120  $\mu\text{A}$ . Es necesario destacar que en esta muestra los transistores M211-1B y M211-1C no presentan curvas I-V características de un transistor, aún eliminando la corriente de fuga, debido principalmente a problemas en los contactos, por lo cual no se presentan.

La muestra M212 no presenta curvas características I-V propias de un dispositivo transistor, por lo que se omiten los resultados para dicha muestra. La formación de Si-P delgado para M212 se realizó a partir de una solución de teñido compuesta por 20 % de HF, 40 % de IPA y 40 % de  $\text{H}_2\text{O}_2$  con un tiempo de teñido de 50 segundos. Estas condiciones de formación del Si-P de compuerta, posiblemente, no permiten tener una barrera de potencial adecuada en el diodo de compuerta, por lo que no es posible el control de la corriente de drenador del transistor. Por otro lado, los dispositivos de la muestra M213 y M214 se fabricaron con una solución para el Si-P de aislamiento conformada por 20 % de HF, 10 % de IPA y 70 % de  $\text{H}_2\text{O}_2$  con un tiempo de 8 minutos. Para M213, el Si-P delgado de compuerta del transistor se logró a través de una solución con el 20 % de HF, 60 % de IPA y 20 % de  $\text{H}_2\text{O}_2$  con un tiempo de teñido químico de 50 segundos. Como se puede ver en la Figura 6.32a, curvas características I-V del transistor M213-1A, el dispositivo presenta una corriente de fuga de 4.7  $\mu\text{A}$  a un voltaje de -2.0 V, valor relativamente pequeño en comparación con el resultado del transistor M211-1A y del orden del M210-1A. En la gráfica, donde se muestran las características I-V restando la corriente  $I_F$  (Figura 6.32b), se observa que la corriente de fuga no enmascara el comportamiento propio del transistor, sin embargo, es notable que las curvas no llegan a un valor de corriente de saturación, por lo que se infiere que se presenta el efecto de modulación de la longitud de canal por efecto del voltaje de drenador, el cual, en este caso, se esperaría que fuera despreciable dadas las dimensiones del canal. Del valor de la corriente de saturación para  $V_{GS} = 0$  V, el cual es ligeramente menor al que presenta el transistor M211-1A, del orden de 60  $\mu\text{A}$ , el ancho del canal es adecuado para el efecto transistor, y por consiguiente la profundidad del Si-P de compuerta así como las características del Si-P, para formar una barrera de potencial adecuada con el silicio cristalino, que permite controlar la corriente de drenador con el voltaje de compuerta, aunque es relativamente alto el voltaje de apagado del transistor, por abajo de -2.0V, así también la microestructura del Si-P es óptimo para tener bajas corrientes de fuga del diodo de compuerta.

Finalmente, los dispositivos de la muestra M214 se fabricaron con una solución con el 20 % de HF, 40 % de IPA y 40 % de  $\text{H}_2\text{O}_2$  con un tiempo de teñido químico de 50 segundos para el Si-P delgado, al igual que para la muestra M212, sin embargo, para el transistor M214-1A sí fue posible obtener resultados de la caracterización eléctrica, cuyo comportamiento se asemeja al de un transistor (Figura 6.33a), tal como se obtuvo para el transistor M213-1A. En la gráfica de la Figura 6.33b se observa que la corriente de fuga para este transistor es de aproximadamente 6.2  $\mu\text{A}$  (gráfica del diodo de compuerta en la Figura 6.33c). En este caso la corriente de fuga no enmascara el comportamiento propio de un transistor. Como se puede ver en la gráfica de la Figura 6.32b, su comportamiento es similar al del transistor M213-1A. En este caso el voltaje de saturación,  $V_{DS}(sat)$  tiene un valor de 2.0 V aproximadamente, mientras que el voltaje de apagado es menor de -2.0 V, similar al caso anterior, que bajo estas condiciones de formación del Si-P de compuerta, dan paso a la formación de un espesor y características morfológicas y eléctricas adecuadas para dar lugar a barreras de potencial y corrientes de fuga del diodo de compuerta aceptables.

Una vez presentados todos los resultados de la caracterización eléctrica de los dispositivos 1A, es posible notar que el grupo que presenta mejores resultados es el primer grupo conformado por los tres transistores M145-1A, M146-1A y M147-1A, pues los tres presentan curvas propias de un transistor, sin embargo la fuga enmascara tal comportamiento. La solución utilizada para la formación del Si-P de aislamiento contiene 70 % de HF, 10 % de IPA y 20 % de  $\text{H}_2\text{O}_2$ , mientras que para el Si-P de compuerta contiene 20 % de HF, 10 % de IPA y 70 % de  $\text{H}_2\text{O}_2$ . Por otro lado, el dispositivo que además de presentar curvas I-V características de un transistor, presenta la menor corriente de fuga, es M164-1A. Tal valor es  $I_F = 6.3 \mu\text{A}$ . La solución que se utilizó para el Si-P grueso contiene 20 % de HF, 10 % de IPA y 70 % de  $\text{H}_2\text{O}_2$  y para el Si-P delgado con un tiempo de teñido químico de 3 minutos, tal solución tiene

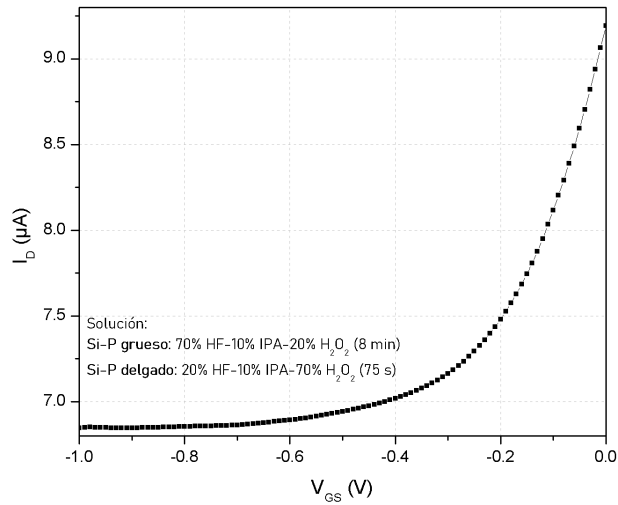


Figura 6.30: Gráfica de transconductancia del transistor M210-1A.

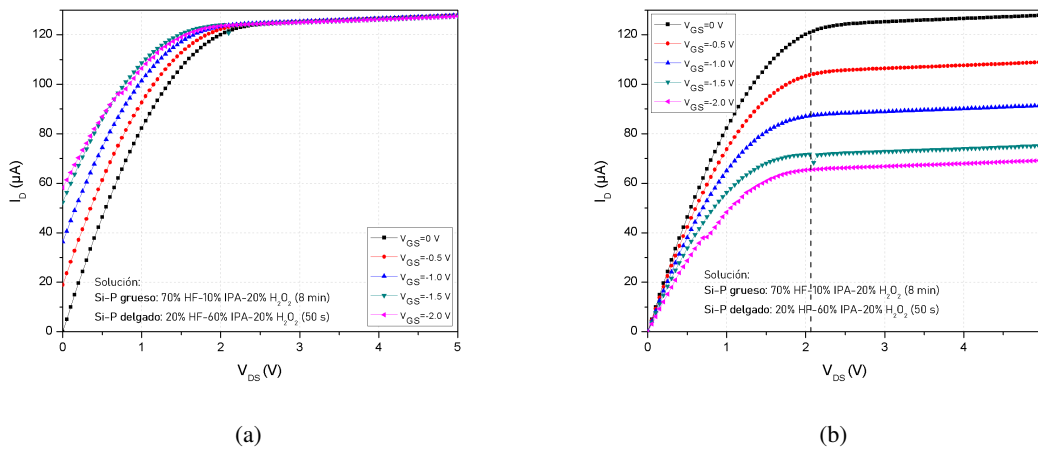


Figura 6.31: Curvas I-V del transistor M211-1A (a) obtenida y (b) restando la corriente  $I_F$ .

20 % de HF, 60 % de IPA y 20 % de  $H_2O_2$  con un tiempo de ataque de 50 s.

### Transistores 7A

Como bien se mencionó anteriormente en la descripción de los detalles experimentales para la fabricación de los dispositivos mediante fotolitografía (Sección 5.1.3), las condiciones de formación se variaron para determinar la composición y el tiempo de teñido químico (Tabla 5.2) con los cuales se pudiesen obtener mejores resultados en cuanto a la obtención de dispositivos transistores tipo FET. Tal como se explicó, cada muestra contiene dos tipos de transistores, el primero es un transistor FET con compuerta de Si-P, cuyos resultados se presentaron anteriormente. El segundo transistor es una variación del primero, pues en éste se formó una película de Si-P delgado que abarca toda el área del transistor, sobre el cual se ubican los contactos de fuente y drenador y, por consiguiente, el canal está formado por el Si-P, el cual se encuentra etiquetado como transistor 7 en cada muestra, como se esquematiza en la Figura 5.2, columna siete.

Del primer grupo de tres dispositivos, M145-7A, M146-7A y M147-7A, se obtuvieron las curvas características que se presentan en la Figura 6.34, a excepción de la muestra M147, ya que dicha muestra no presenta el efecto de la modulación de la corriente

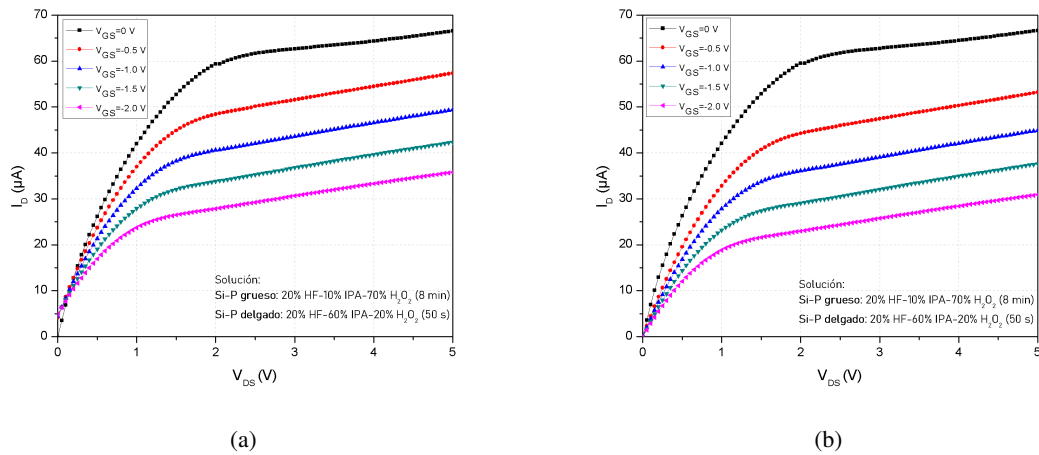


Figura 6.32: Curvas I-V del transistor M213-1A (a) obtenida y (b) restando la corriente  $I_F$ .

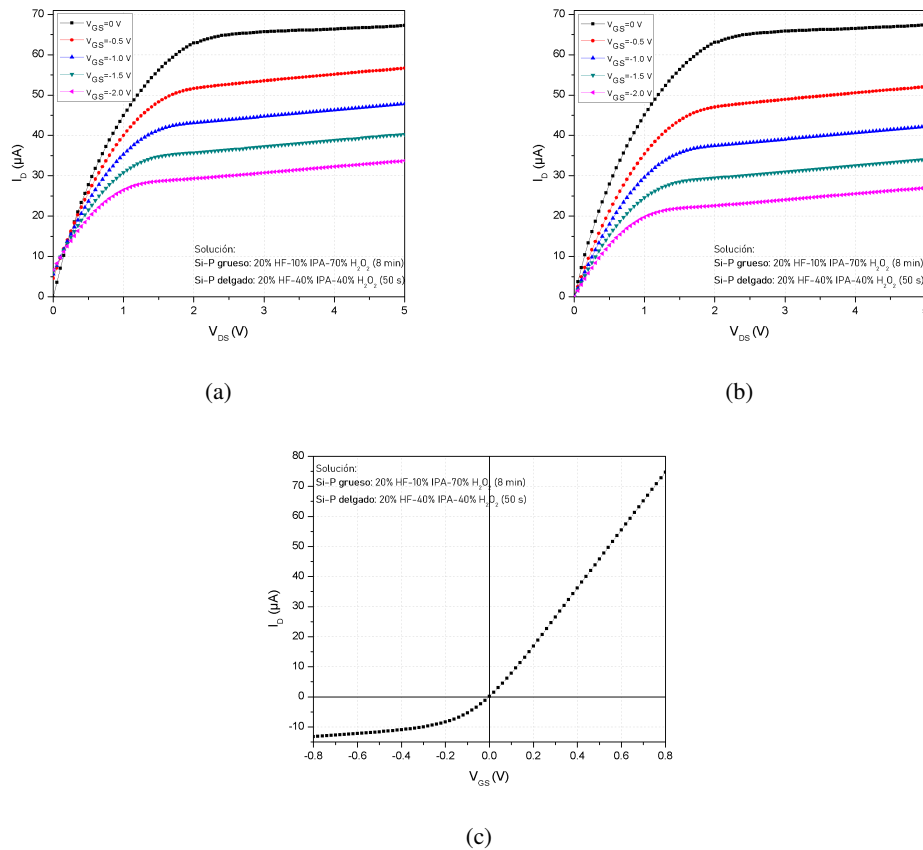
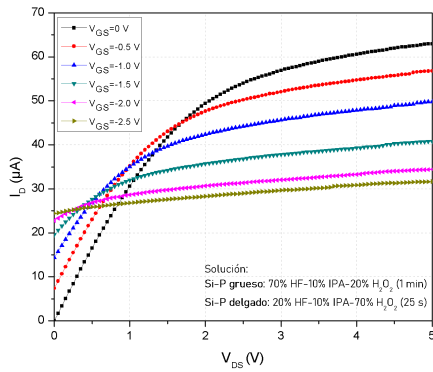


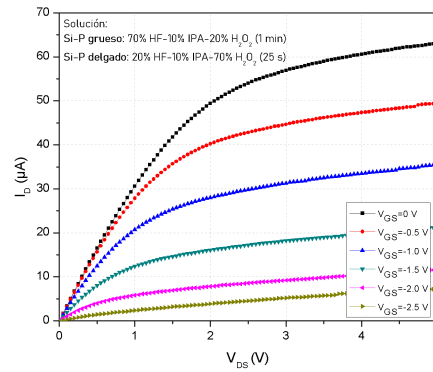
Figura 6.33: Curvas I-V del transistor M214-1A (a) obtenida y (b) restando la corriente  $I_F$ , y (b) del diodo de compuerta.

de drenador por el voltaje aplicado en la compuerta, por lo que se omite la gráfica correspondiente. Para ambas muestras se utilizó la misma solución para la formación de Si-P grueso y delgado (70 % HF-10 % IPA-20 % H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y 20 % HF-10 % IPA-70 % H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, respectivamente), variando el tiempo de teñido químico en los dos casos. Para la muestra M145 se estableció el tiempo de teñido químico en 1 minuto para Si-P grueso y 25 segundos para la película delgada, mientras que para M146 se utilizó un tiempo de 3 minutos para la película gruesa y 50 segundos para la película delgada de Si-P. Como se puede ver en la Figura 6.34a, la corriente de fuga para el transistor M145-7A es de 24.3  $\mu\text{A}$ , mientras que se puede ver de la Figura 6.34c, que la corriente de fuga obtenida para el dispositivo M146-7A es de 4.2  $\mu\text{A}$ . En las gráficas de la Figura 6.35 se muestran las características I-V del diodo de compuerta

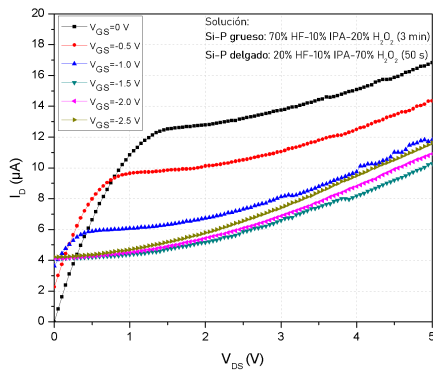
de los transistores M145-7A y M146-7A. Es claro que, para M146-7A, la corriente de fuga es pequeña comparada con M145-7A, además, la corriente saturación de drenador también es pequeña, del orden de  $12.7\mu\text{A}$  para  $V_{GS} = 0\text{ V}$  (aproximadamente  $56.8\mu\text{A}$  para M145-7A con  $V_{GS} = 0\text{ V}$ ), pero en ningún caso se alcanza propiamente una saturación de corriente ideal. Aunque se puede considerar a partir del cambio de la pendiente en las curvas I-V que, este incremento de corriente con el voltaje se puede asociar a una modulación de la longitud de canal, lo que provoca un decremento de la resistencia de éste. Además, ninguno de los dos transistores llega al voltaje de apagado con las condiciones de caracterización establecidas. Por lo anterior, se deduce que para este conjunto de muestras, las condiciones de fabricación no son adecuadas para su funcionamiento como transistor con Si-P en el canal. Para propósitos de visualización, en las gráficas 6.34b y 6.34d, respectivamente, se muestran las curvas I-V de los transistores 7A de M145 y M146 respectivamente, a las cuales se les restó el valor de la corriente obtenida para  $V_{DS} = 0\text{ V}$ , correspondiente a la corriente de fuga del diodo de compuerta.



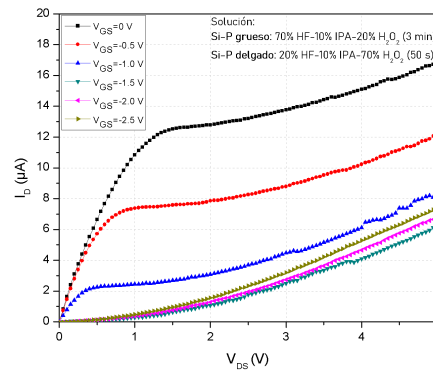
(a) Curva I-V de M145-7A



(b) Curva I-V de M145-7A sin  $I_F$



(c) Curva I-V de M146-7A



(d) Curva I-V de M146-7A sin  $I_F$

Figura 6.34: Curvas I-V de transistores M145-7A y M146-7A.

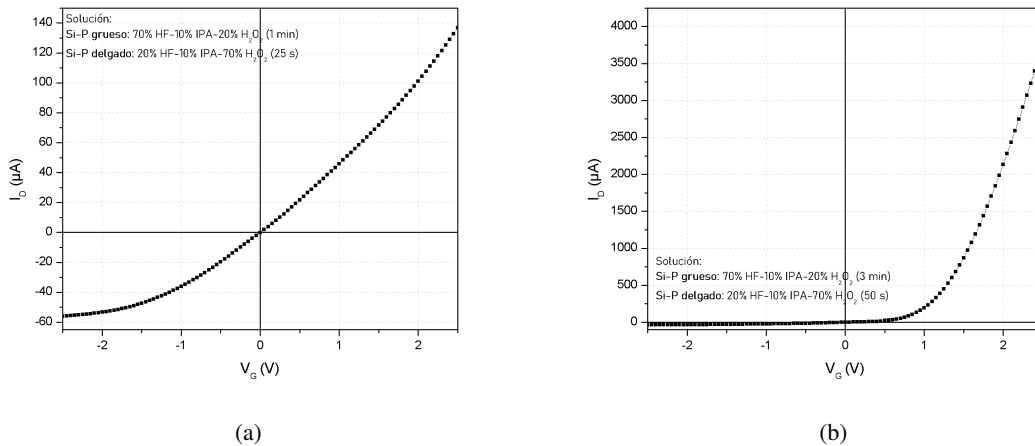


Figura 6.35: Gráfica del diodo de compuerta del transistor (a) M145-7A y (b) M146-7A.

Para las muestras M145 y M146 se presentan a continuación, en la Figura 6.36, las curvas I-V correspondientes a los transistores 7A, 7B y 7C cuando se tiene la condición en que  $V_{GS} = 0$  V. En ambos casos se observa que existe una tendencia creciente de la corriente de saturación  $I_D(sat)$  conforme las dimensiones de los dispositivos aumentan, recordando que el transistor 7A tiene una separación entre contactos de  $250 \mu\text{m}$ ; 7B, de  $300 \mu\text{m}$  y, 7C, de  $350 \mu\text{m}$ , contrario a lo esperado ya que, a mayor longitud la resistencia se debería de incrementar y por consiguiente la corriente debería disminuir.

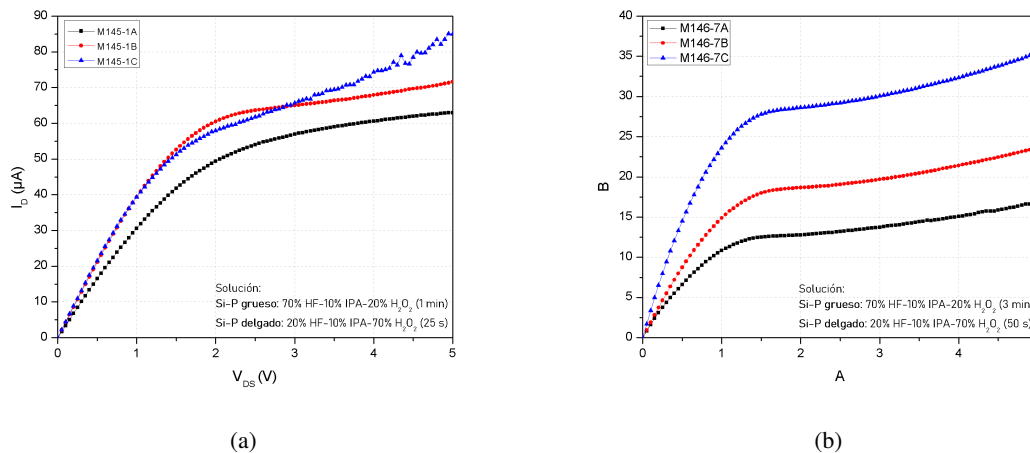


Figura 6.36: Gráfica del diodo de compuerta de los transistores 1A, 1B y 1C de las muestras (a) M145 y (b) M146.

El siguiente grupo de muestras está conformado por M154, M155 y M156, sin embargo, los transistores 7A de las muestras M155 y M156 no mostraron resultados correspondientes a las características de un transistor, por lo que no se presentan, los cuales corresponden a tiempos de formación del Si-P de compuerta de 50s y 75s. El canal es de silicio poroso, por lo que a mayor espesor se esperaría una mayor circulación de corriente, y no tiene porqué presentarse una obstrucción del canal, por lo que es necesario analizar si la circulación de corriente se presenta en la capa epitaxial y lo que se observa es un aislamiento causado por el silicio poroso que a su vez afecta los contactos de drenador y fuente, por lo que un espesor grueso no presentaría efecto transistor, contrario a si se tiene un espesor delgado. Las gráficas de la única muestra de este grupo se pueden observar en la Figura 6.37. Es importante recordar que M154-7A se fabricó con una solución de 40 % de HF, 10 % de IPA y 50 % de  $\text{H}_2\text{O}_2$  por 1 minuto para el Si-P de aislamiento y de 20 % de HF, 40 % de IPA y 40 % de  $\text{H}_2\text{O}_2$  por 25 segundos para el Si-P de compuerta, en este transistor se presenta una corriente de fuga del diodo de compuerta del orden de  $I_D(sat)$  para  $V_{GS} = 0$ , por lo que, de acuerdo con estos resultados el aislamiento no fue suficiente. Dicha corriente  $I_F$  tiene un valor de  $77.5 \mu\text{A}$ , mientras que  $I_D(sat)$  presenta un valor de  $101.0 \mu\text{A}$ . Al comparar ambos valores, es de esperar que el efecto transistor esté enmascarado por la alta corriente de fuga, aunque es de notar que no se alcanza una corriente de saturación ideal, pues no se llega a un valor constante de  $I_D$ . En la Figura 6.37 se presentan las características I-V después de restar la correspondiente corriente de fuga.

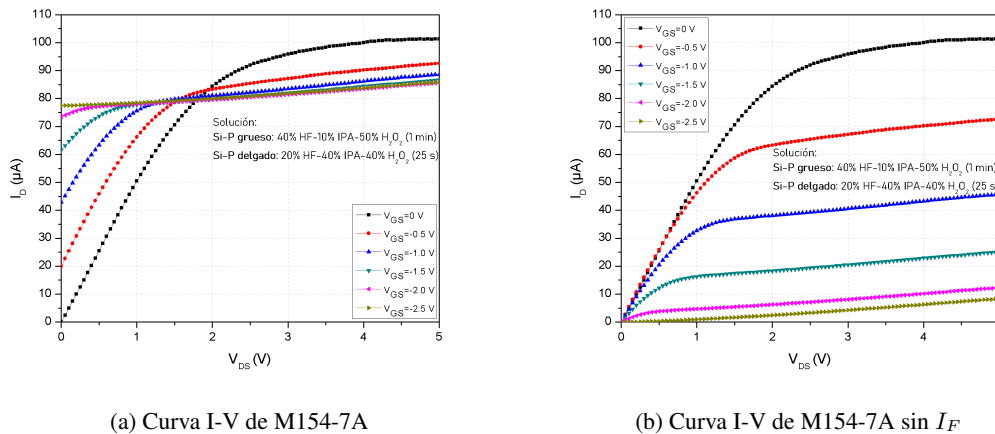


Figura 6.37: Curvas I-V del transistor M154-7A.

A pesar de no obtener resultados satisfactorios para los transistores de este grupo de muestras, en la Figura 6.38 se grafican las curvas I-V cuando se tiene la condición en que  $V_{GS} = 0$  V de los transistores 7A, 7B y 7C de la muestra M154. Esto se realizó con el fin de hallar una tendencia en dicha curva y que, en efecto, se halló que conforme las dimensiones del canal son mayores, la resistencia disminuye y la corriente de saturación, por consiguiente, aumenta, efecto encontrado en los grupos de muestras descritos anteriormente.

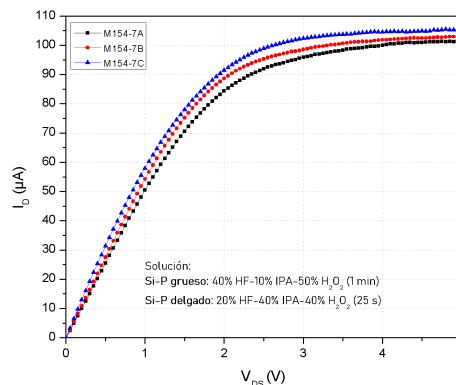
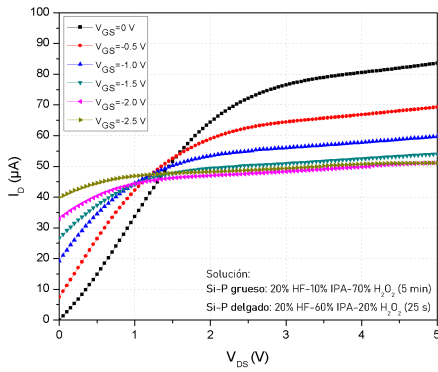


Figura 6.38: Curvas I-V de transistores M169-7A, M170-7A y M171-7A cuando  $V_{GS} = 0$  V.

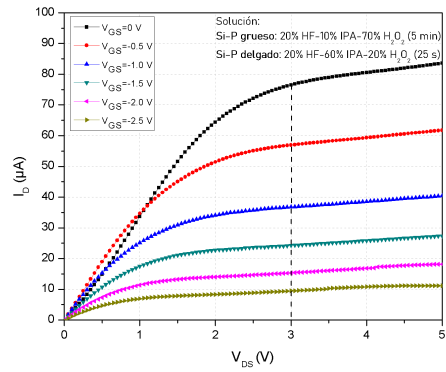
Las curvas I-V del grupo conformado por las muestras M163, M164 y M165, se presentan en las gráficas de la Figura 6.39a, 6.39c y 6.39e, respectivamente. Con la finalidad de visualización, en las Figuras 6.39b, 6.39d y 6.39f se presentan las características I-V, respectivamente, a las que se les restó la correspondiente corriente de fuga. En los tres casos, se observa que el valor de esta corriente enmascara el comportamiento propio de un transistor. Tanto el transistor M163-7A y M165-7A, presentan un valor de corriente de fuga grande, comparado con la del transistor M164-7A (mismo caso que se presentó para los transistores M163-1A, M164-1A y M165-1A). La corriente de fuga para M163-1A y M165-7A es de  $46.8$  y  $144 \mu\text{A}$ , respectivamente, mientras que para M164-7A este valor es de  $7.63 \mu\text{A}$ , valor pequeño al comparar los tres resultados, siendo la corriente  $I_D(sat)$  con  $V_{GS} = 0$  V también la de menor valor. Esto se puede comprobar con la gráfica de la Figura 6.40, en donde se representan los resultados al realizar la caracterización eléctrica del diodo de compuerta. En tal gráfica, se observa que es considerable la diferencia entre las características I-V de las tres muestras, así como su correspondiente corriente de fuga  $I_F$ , las cuales están asociadas a la barrera de potencial de la unión Si-P/Silicio.

Por otro lado, el valor del voltaje de saturación,  $V_{GS}(sat)$ , es de aproximadamente  $3.0$  V para M163-7A y M165-7A, mientras que para M164-7A, de  $2.1$  V (voltaje representado con una línea punteada para en la gráfica I-V de los transistores). La aproximación del voltaje de saturación del transistor M163-7A se debe a que no se obtiene un valor específico en cuanto a la corriente de saturación, pues el valor de  $I_D$  no logra llegar a un valor constante, caso contrario a las otras dos muestras. Para los tres transistores el voltaje de compuerta de apagado presenta un valor mayor o igual a  $-2.5$  V. En este conjunto no se presentan la comparativa de los transistores 7A, 7B y 7C, pues en las tres muestras únicamente el dispositivo 7A presenta curvas I-V propias de un transistor, esto puede deberse a errores en el trabajo experimental. Debido a las características de las curvas, se puede concluir que el dispositivo M163-7A es el

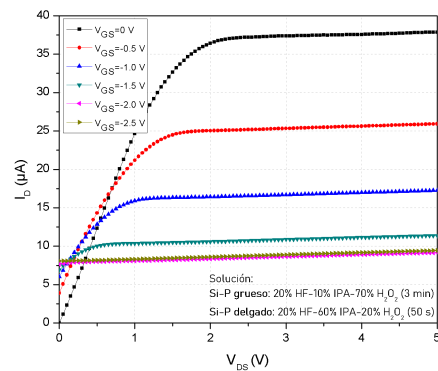




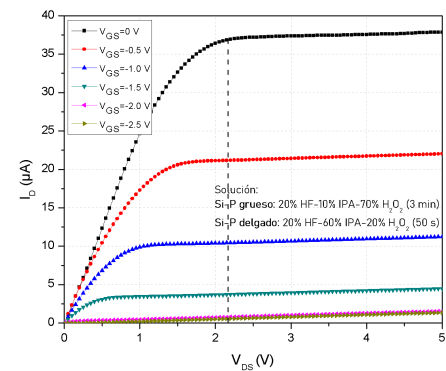
(a) Curva I-V de M163-7A



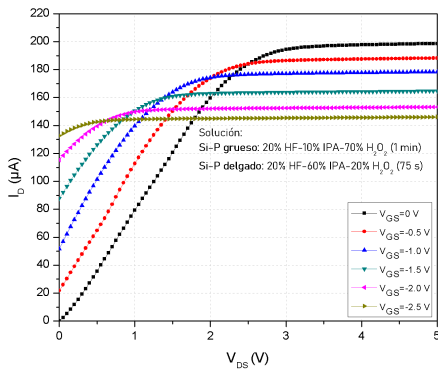
(b) Curva I-V de M163-7A sin  $I_F$



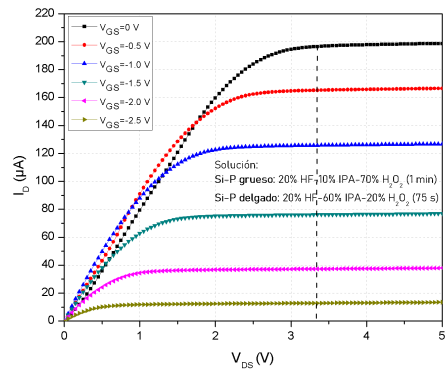
(c) Curva I-V de M164-7A



(d) Curva I-V de M164-7A sin  $I_F$



(e) Curva I-V de M165-7A



(f) Curva I-V de M165-7A sin  $I_F$

Figura 6.39: Curvas I-V de transistores M163-7A, M164-7A y M165-7A.

que presenta un menor control, pues se puede notar que no es claro el valor del voltaje de saturación, ya que en las condiciones de medición se continúa incrementando la corriente y no se llega a un valor de la corriente  $I_D$  constante, probablemente debido a un efecto de modulación de canal.

Recordando las condiciones de formación para los dispositivos de estas muestras, la composición de la solución para la formación de Si-P aislante es de 20% de HF, 10% de IPA y 70% de  $H_2O_2$ , con tiempos de 5, 3 y 1 minutos para M163-7A, M164-7A y M165-7A, respectivamente, mientras que la solución que se usó en el teñido químico para formar Si-P delgado es de 20% de HF, 60% de IPA y 20% de  $H_2O_2$ , con tiempo de 25, 50 y 75 segundos. De este grupo se puede concluir que el tiempo utilizado tanto para Si-P grueso y delgado, resulta en mejores mediciones eléctricas cuando se realiza el teñido químico por 3 minutos y 50 segundos, respectivamente.

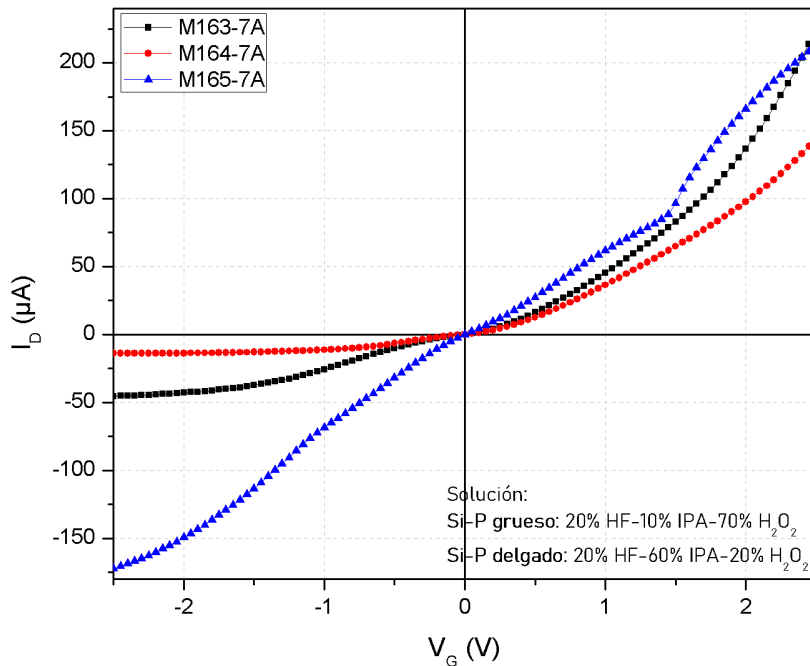
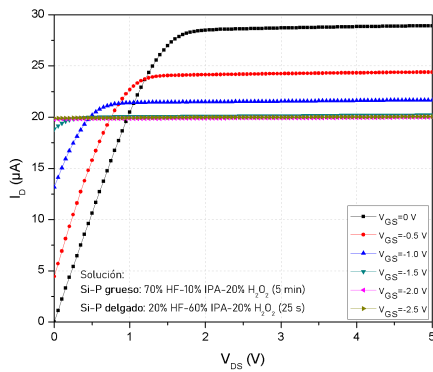


Figura 6.40: Gráfica I-V del diodo de compuerta de los transistores M163-7A, M164-7A y M165-7A.

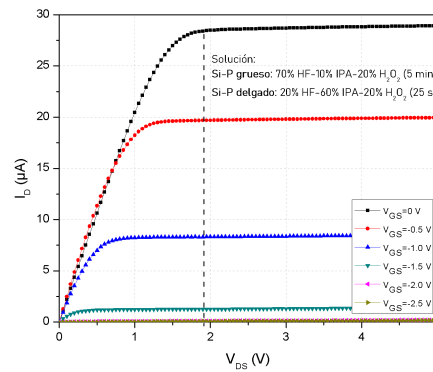
El siguiente grupo de muestras, está conformado por M169, M170 y M171. Para estas muestras se utilizó una mezcla de 70 % de HF, 10 % de IPA y 20 % de  $H_2O_2$  para formar el Si-P grueso y de 20 % de HF, 60 % de IPA y 20 % de  $H_2O_2$  para el Si-P delgado. En la Figura 6.41a se muestra la curva I-V del transistor M169-7A, en donde se puede observar que la corriente de fuga presentada es de  $19.3 \mu A$  para  $V_G = -2.5V$ , que al restar la correspondiente corriente de fuga para cada voltaje de compuerta ( $V_G$ ) se obtiene la gráfica 6.41b, en donde se observan claramente las curvas características de un transistor. Lo mismo se realiza con el transistor M170-7A, cuya corriente de fuga es de  $36.7 \mu A$  a  $V_G = -2.5V$ , como se muestra en la gráfica de la Figura 6.41c que, al restar los correspondientes valores de la corriente de fuga para cada voltaje  $V_G$ , resulta un comportamiento de la medición mostrado en la Figura 6.41d. Finalmente, la muestra M171-7A presentó curvas I-V que se muestran en la gráfica de la Figura 6.41e, cuyo resultado de restar el efecto de la corriente  $I_F$  se muestra en la gráfica de la Figura 6.41f. Se puede observar que el valor de tal corriente es de aproximadamente  $112 \mu A$  para  $V_{GS} = -2.5 V$ . Con estos resultados, se concluye que en los tres casos la corriente de fuga presenta un efecto de enmascaramiento en las curvas características I-V, pues como se describió, al restarle el valor correspondiente de  $I_F$  en cada caso, se observa un comportamiento propio de un transistor. Además, se infiere que el aumento en el tiempo para la formación del Si-P de compuerta o bien al disminuir el tiempo de formación del Si-P de aislamiento, resulta en valores más grandes en el valor de la corriente de fuga, pues la muestra con menor tiempo tanto en la formación de Si-P grueso es la muestra M171 y la de menor tiempo en la formación de Si-P delgado es la muestra M169.

El valor del voltaje de saturación es de 1.8 V para M169-7A; 2.2 V para M170-7A y 2.8 V, para el transistor M171-A. En las gráficas de las Figuras 6.41b y 6.41f, corresponden a los transistores 7A de M169 y M171, sin corriente de fuga, respectivamente. En éstas gráficas está presente una línea vertical punteada para indicar los voltajes de saturación, y enfatizar que en estas dos muestras  $V_{DS}(sat)$  está bien definido. Como se puede notar, también este valor aumentó de M169-7A a M171-7A, tal como en el caso de la corriente de fuga. El valor del voltaje de apagado para los transistores 7A de las tres muestras es menor a -2.5 V. Por último, en la Figura 6.42 se observan las gráficas de las curvas I-V cuando  $V_{GS} = 0 V$ , comparando el transistor 7A, 7B y 7C en cada caso. Se puede notar que en cada gráfica aumenta el valor de la corriente de saturación, a medida que la distancia entre los contactos del dispositivo es más grande. Este comportamiento de las curvas I-V se observó en casos anteriores de los resultados obtenidos en los grupos de muestras descritos anteriormente.

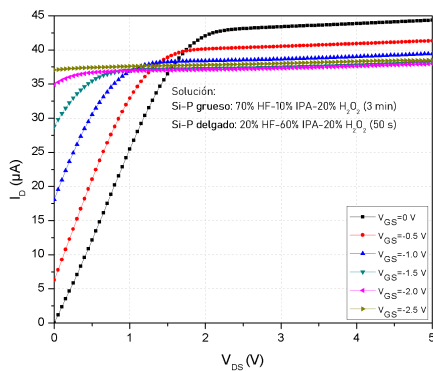
Para finalizar, el último conjunto de muestras está conformado por M210, M211, M212, M213 y M214. Únicamente los transistores M213-7A y M214-7A presentaron curvas propias de un transistor, por lo que se omite la descripción de los resultados obtenidos para el resto de las muestras de este conjunto (M210-7A, M211-7A y M212-7A). En las gráficas de la siguiente Figura 6.43a se observa que el valor de la corriente de fuga del transistor M213-7A es de  $3.9 \mu A$  a  $V_{GS} = -2.0 V$ , tal como se observa en la curva característica en



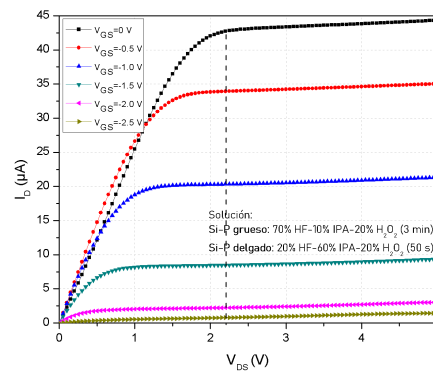
(a) Curva I-V de M169-7A



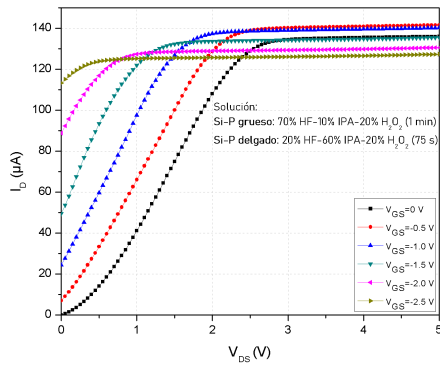
(b) Curva I-V de M169-7A sin  $I_F$



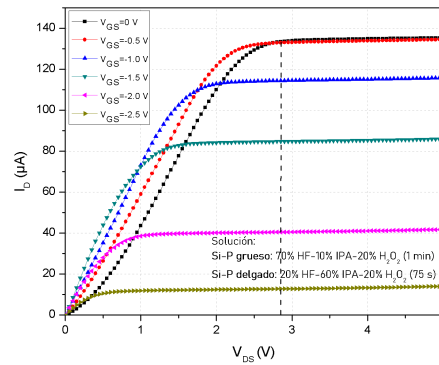
(c) Curva I-V de M170-7A



(d) Curva I-V de M170-7A sin  $I_F$



(e) Curva I-V de M171-7A



(f) Curva I-V de M171-7A sin  $I_F$

Figura 6.41: Curvas I-V de transistores M169-7A, M170-7A y M171-7A.

inversa del diodo de compuerta presentada en la Figura 6.44. Por otro lado, el valor del voltaje de saturación es de aproximadamente 1.0 V, el voltaje al cual tiende a saturación es el voltaje que da lugar a que la corriente de drenador se aparte de la dependencia lineal con el voltaje  $V_{DS}$ . Sin embargo, como se observa en la gráfica de la Figura 6.43a, el valor de la corriente en el drenador,  $I_D$ , no alcanza dentro del rango de valores empleados, un valor constante, con un comportamiento semejante a la existencia de una modulación en la longitud del canal, dando lugar a una disminución de la resistencia por efecto de un acortamiento de la longitud del canal, sin embargo, dada la longitud de la compuerta, del orden de  $50 \mu\text{m}$ , es poco probable que tal efecto se presente.

Por otro lado, el transistor M214-7A presenta las curvas características mostradas en la Figura 6.43c, donde es posible notar que el valor de la corriente de fuga es de aproximadamente  $6.47 \mu\text{A}$  para  $V_G = -2\text{V}$  (tal como se puede observar, para mayor claridad, en

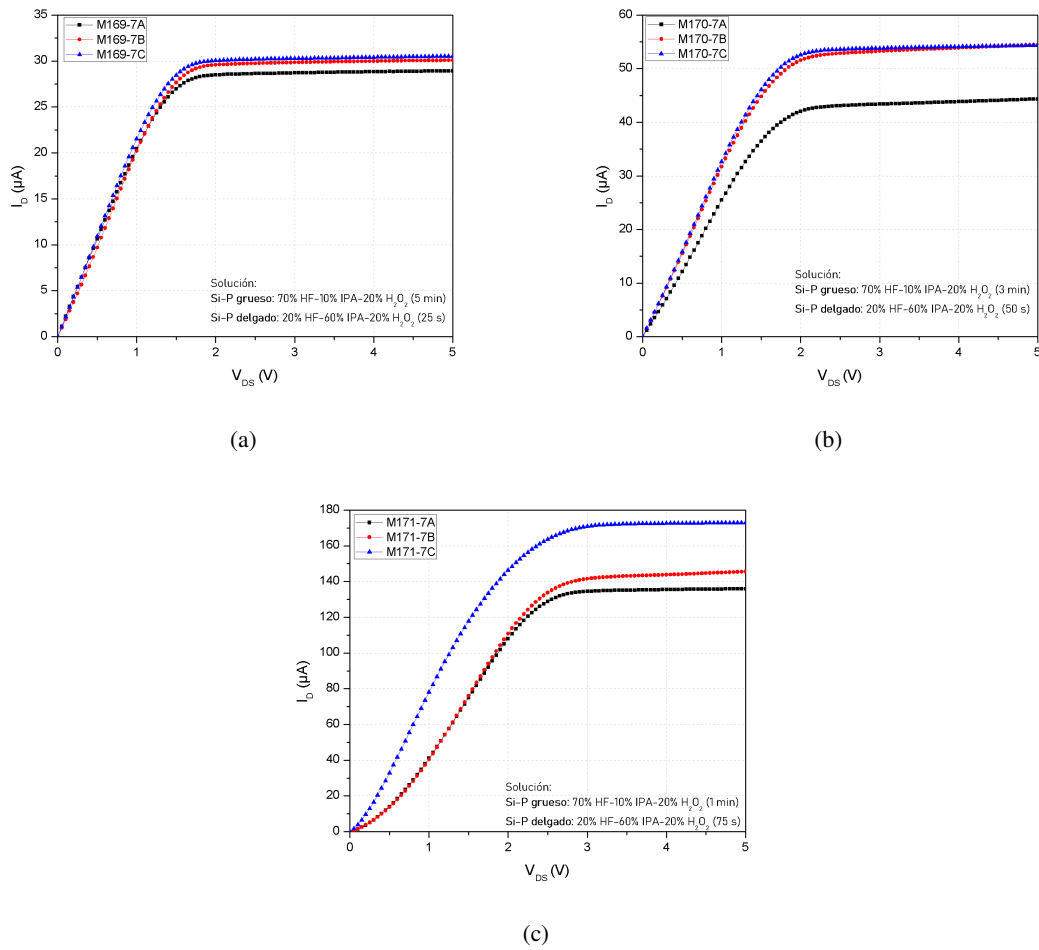
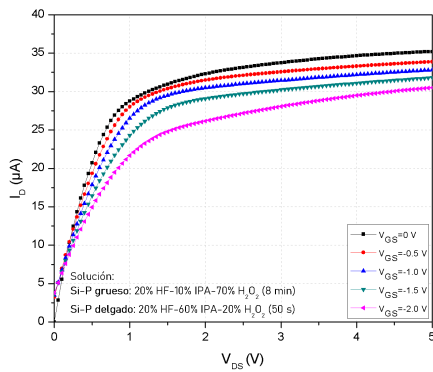
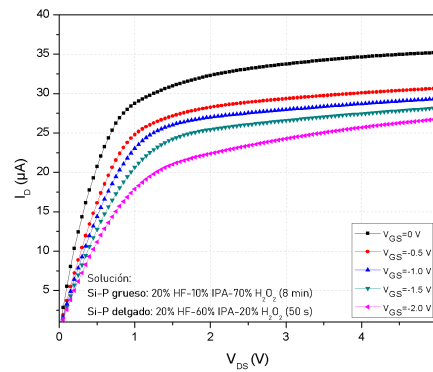


Figura 6.42: Curvas I-V de los transistores 7A, 7B y 7C de las muestras (a) M169, (b) M170 y (c) M171 con  $V_{GS}=0$  V.

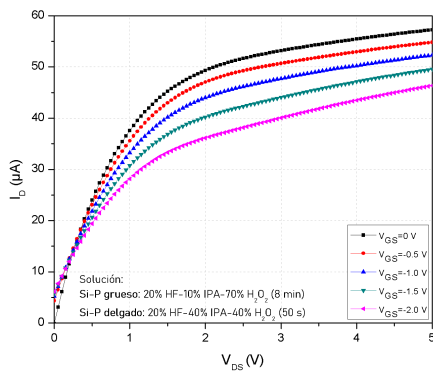
gráfica de la Figura 6.43d y para mayor claridad, de la Figura 6.44), mientras que el voltaje de saturación tiene un valor aproximado de 2.2 V. No corresponde a un valor constante o saturación, sin embargo, aumenta casi linealmente, por lo que es un caso semejante al anterior. De estas dos muestras se puede deducir que las condiciones de formación de Si-P grueso y delgado dan lugar una corriente de fuga baja, sin embargo, se observa poco control de la corriente de drenador por el voltaje de compuerta.



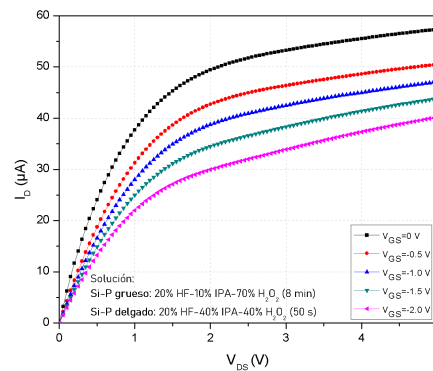
(a) Curva I-V de M213-7A



(b) Curva I-V de M213-7A sin  $I_F$



(c) Curva I-V de M214-7A



(d) Curva I-V de M214-7A sin  $I_F$

Figura 6.43: Curvas I-V de transistores M213-7A y M214-7A.

De los resultados de la caracterización I-V de los dispositivos 7A, es posible concluir que el mejor grupo de transistores, es el conformado por las muestras M169-7A, M170-7A y M171-7A, pues el perfil de las curvas de salida de los tres dispositivos son semejantes a una curva característica de un transistor FET. La capa de Si-P grueso de estas muestras están formadas con una solución de 70 % de HF, 10 % de IPA y 20 % de  $H_2O_2$ . Por otro lado, la película de Si-P de compuerta se formó en una solución con el 20 % de HF, 60 % de IPA y 20 % de  $H_2O_2$ . Sin embargo, es el dispositivo M164-7A, pues además de presentar curvas I-V con un comportamiento característico de un transistor, es aquel con la menor corriente de fuga de todos los dispositivos 7A fabricados, teniendo un valor  $I_F = 7.63 \mu A$  a  $V_{GS} = -2.5 V$ . Para la formación de la película gruesa de Si-P de éste transistor se utilizó una solución con 20 % de HF, 10 % de IPA y 70 % de  $H_2O_2$  con un tiempo de ataque de 3 minutos, mientras que para la formación de la capa delgada de Si-P la solución está conformada por el 20 % de HF, 60 % de IPA y 20 % de  $H_2O_2$  en un tiempo de 50 s.

En la Tabla 6.3 se pueden observar todos los resultados anteriormente descritos del transistor FET-1, es decir, el transistor con compuerta de Si-P y a continuación, los de los transistores FET-7, formados con Si-P en todo el canal. En dicha tabla se menciona sólo un transistor por muestra, en este caso los transistores 1A y 7A, recordando que las variaciones en las dimensiones son congruentes entre los transistores etiquetados como A, B y C. Otro punto que destacar de la tabla es que para algunos dispositivos se encuentran espacios vacíos, pues no se presentó un comportamiento de transistor, por lo que sería erróneo comparar los valores con aquellos dispositivos que sí presentan tal efecto.

Como se puede observar en la tabla, se presentan los resultados de la solución utilizada para la formación del Si-P de aislamiento y de compuerta, así como el tiempo de teñido químico. También se muestra el espesor medido por elipsometría o clivado, según sea el caso. En las últimas columnas se presentan los resultados medidos de la corriente de fuga,  $I_F$ , cuando ( $V_{GS} = -2.5 V$ ), así como la corriente de saturación.

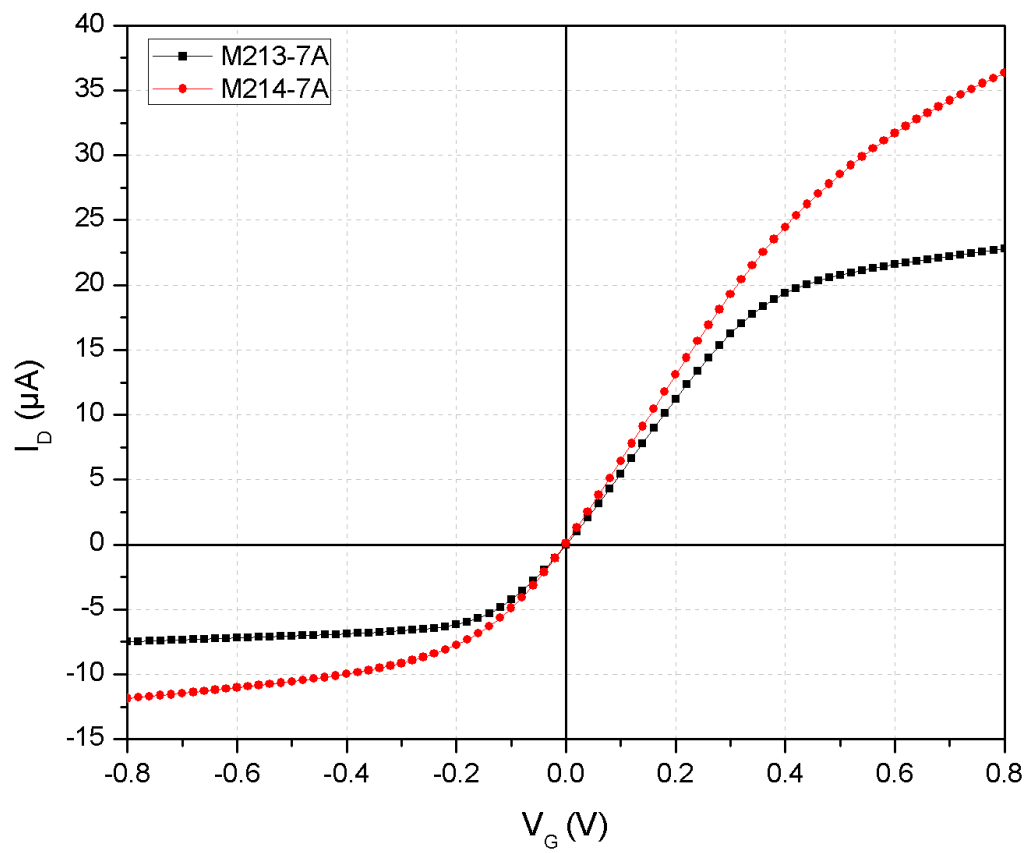


Figura 6.44: Gráfica del diodo de compuerta de los transistores M213-7A y M214-7A.

Tabla 6.3: Valores obtenidos de la caracterización eléctrica de los dispositivos formados.

Muestra	Si-P aislamiento		Si-P compuerta		Transistor 1A		Transistor 7A			
	Solución	t (min)	Espesor ( $\mu\text{m}$ )	Solución	t (s)	Espesor (nm)	$I_F$ ( $\mu\text{A}$ ) ( $V_G = -2.5\text{ V}$ )	$I_D$ (sat) ( $\mu\text{A}$ )	$I_F$ ( $\mu\text{A}$ ) ( $V_G = -2.5\text{ V}$ )	$I_D$ (sat) ( $\mu\text{A}$ )
M145	70-10-20	1	3.4	20-10-70	25	84.9	14.65	45.0	38.2	55
M146		3	4.3		50	98.6	52.8	55.0	14.8	12.0
M147		5	5.7		75	128.5	0.73	13.0	-	-
M154	40-10-50	1	3.2	20-40-40	25	72.7	101.3	137.3	77.5	101
M155		3	4.6		50	103.8	82.4	95.3	-	-
M156		5	4.5		75	153.7	40.5	55.9	-	-
M163	20-10-70	1	3.4	20-60-20	25	49.6	45.8	59.96	46.8	70.0
M164		3	2.5		50	70.1	6.3	35.6	7.63	35
M165		5	1.9		75	162.7	154.3	107.7	144.0	190.0
M169	70-10-20	5	5.2	20-60-42	25	45.6	-	-	19.8	1.8
M170		3	3.8		50	72.6	39.8	51.1	36.9	48.0
M171		1	3.1		75	116.9	71.5	92.1	112.8	135.0
M210	70-10-20	8	6.8	20-10-70	75	132.7	6.1	8.5	-	-
M211			6.5		20-60-20	65.8	57.8	120	-	-
M212			6.1		20-40-40	112.88	-	-	-	-
M213	20-10-70	5.5	5.5	20-60-20	50	64.71	4.4	60.0	7.4	33.0
M214		5.2	5.2	20-40-40	108.2	6.2	65.3	11.9	59.0	

Es importante recordar, que como se hizo a lo largo del trabajo, la solución utilizada en el ataque químico se encuentra en un formato de tres números separados por un guión, en donde cada cantidad representa el porcentaje del compuesto HF (ácido fluorhídrico), IPA (alcohol isopropílico) y  $\text{H}_2\text{O}_2$  (peróxido de hidrógeno), exactamente en ese orden.



En la gráfica de dispersión de la Figura 6.45 se encuentran representados los valores obtenidos de la corriente  $I_F$  e  $I_D(sat)$  de los transistores 1A de todos los dispositivos que fueron fabricados. En esta gráfica es posible visualizar el comportamiento de la relación entre dichas corrientes, pues a medida que incrementa la corriente de fuga de los dispositivos, también aumenta el valor de la corriente de saturación, y viceversa. Al realizar un ajuste polinomial, se encuentra que la curva de tendencia es de un polinomio de segundo grado, con los parámetros que se presentan en el recuadro inferior derecho de la gráfica. Para los dispositivos 7A no se presenta una gráfica análoga, pues de la Tabla 6.3, se puede notar que para estos transistores no hay suficientes datos que permitan realizar un ajuste.

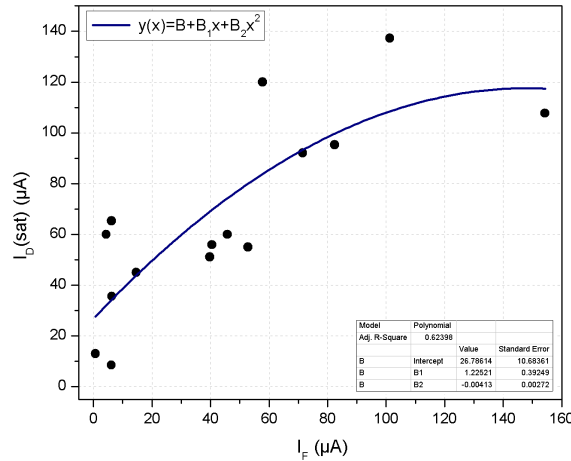


Figura 6.45: Gráfica  $I_F$  vs  $I_D(sat)$  de los transistores 1A de los dispositivos fabricados.

Finalmente, en la siguiente Figura 6.46, se presenta una gráfica teórica-experimental de la conductancia de canal,  $G$ , con respecto a la magnitud del ancho de la región de carga espacial,  $W$ , por efecto de la unión silicio poroso/silicio, para el transistor 1A de cada muestra, donde la conductancia se evaluó a partir de la gráfica I-V de los transistores en la región lineal, para  $V_{GS} = 0$ , y se relacionó con el cálculo del ancho del canal, considerando los valores promedio de las características de la capa epitaxial proporcionadas por el fabricante. El procedimiento empleado para el cálculo de la gráfica se describe en el Apéndice D. En tal gráfica es posible observar que la conductancia disminuye conforme el ancho de canal ( $a - W$ ) se vuelve más estrecho, siendo  $a$  el espesor promedio de la capa epitaxial. Cada uno de los transistores fabricados cumple con esta condición, por lo cual se encuentran representados dentro de la gráfica.

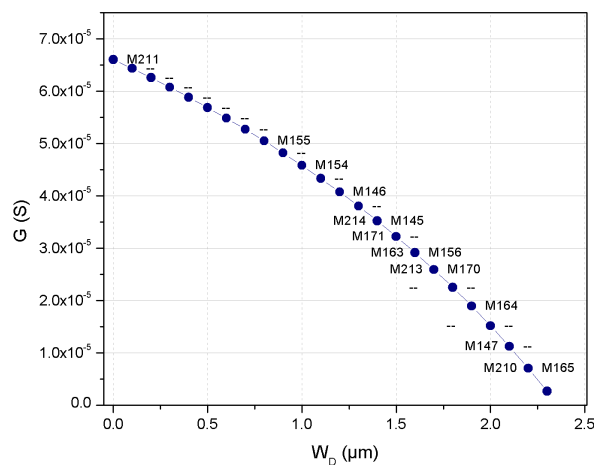


Figura 6.46: Gráfica de la conductancia de canal,  $G$ , con respecto a la magnitud del ancho de la región de carga espacial,  $W$ , de los transistores 1A de los dispositivos fabricados.



---

## Capítulo 7

# Conclusiones y trabajo a futuro

En este trabajo se destaca la fabricación de estructuras FET con compuerta de silicio poroso. Las capas de silicio nanoestructurado se formaron mediante la aplicación de la técnica de teñido químico asistido por metal de dos pasos, realizando una caracterización por separado de las películas y del dispositivo, cuyos resultados se relacionaron.

La revisión de los trabajos realizados en la SEES, se tomaron como referencia para la presente investigación, difiriendo principalmente en el método de formación de las películas de Silicio Poroso. La técnica de teñido químico para la formación de películas de Si-P es un método de fabricación efectivo para la obtención de estas películas, sin embargo, se deben tomar en cuenta múltiples factores para asegurar la reproducibilidad. Como bien se mencionó dentro del marco teórico, el teñido químico asistido por metal es una de las técnicas mayormente utilizadas para la formación de Si-P, y en este trabajo se utilizó debido a que resulta ser sencillo y económico de llevar a cabo, algo sumamente importante, ya que se formaron alrededor de 200 películas de Si-P.

La fabricación de un Transistor de Efecto de Campo con compuerta de Si-P surge de la iniciativa de que la presente investigación sea utilizada como referencia para su aplicación en sensores de gases. El estudio del funcionamiento de este dispositivo es fundamental para el entendimiento de la complejidad requerida para su formación y el control de las variables que pueden afectar los resultados.

En cuanto al trabajo experimental, se pudo observar que, de inicio a fin de todo el trabajo de fabricación de los dispositivos, es sumamente importante replicar cada uno de los procesos con la mayor exactitud posible, pues estos podrían afectar los resultados de la caracterización. Desde el proceso de limpieza RCA, es recomendable la precisión en cuanto al tiempo de cada uno de los pasos, pues una adecuada limpieza asegura la remoción de las partículas de tamaño considerable, de los compuestos orgánicos, residuos de metales y óxidos formados en la superficie. Cabe mencionar que algunas de las muestras de películas de Si-P presentadas en este trabajo, son resultado de múltiples repeticiones de todo el proceso requerido, ya que naturalmente, algunos errores experimentales no permitían la obtención de estas capas. Con base en esto, se determinó que el tiempo de ataque químico de los substratos posterior a la deposición de Au, para la formación del Si-P delgado (para la compuerta), se eligió en un intervalo de 25 a 75 s, ya que se forma la capa porosa de manera uniforme sobre la superficie.

La técnica de fotolitografía para la fabricación de los dispositivos formados resultó ser efectiva para este trabajo, ya que permitió la obtención de cada muestra con el patrón diseñado en las mascarillas, de manera repetitiva y con precisión, en la medida de lo posible. Sin embargo, se pudo notar que las condiciones de temperatura llegaron a afectar en ciertas ocasiones la resina utilizada. Además, con esta técnica es posible el diseño de múltiples dispositivos por cada muestra, pues como se explicó en los detalles experimentales, se realizaron siete dispositivos por substrato que, además, se pudieron variar en tamaño, resultando al final, 42 dispositivos por cada muestra fabricada.

Es muy importante mencionar que, por cada dispositivo fabricado, se realizó la formación de una película testigo de Si-P. Esto se logró mediante la inmersión de las dos muestras al mismo tiempo, cuando se realizó el teñido químico, que además, tenían una previa deposición de la capa metálica bajo exactamente las mismas condiciones, pues al momento de realizar el depósito en sputtering, la muestra que sería utilizada para la formación de los dispositivos y sus respectivas muestras testigo (dos por cada muestra para dispositivos, silicio poroso grueso de aislamiento y silicio poroso delgado de compuerta), eran introducidas al equipo de manera simultánea. Con esto se pretendía, en medida de lo posible, eliminar diferencias entre la capa de Si-P testigo y la que se forma para los dispositivos.

La caracterización se dividió en dos etapas, primero se caracterizaron las películas de Si-P para determinar qué condiciones de formación favorecerían un espesor adecuado para su uso en ciertas zonas de los dispositivos, como lo son el tiempo y la proporción de



los compuestos utilizados. Con ello se determinó que el tiempo de ataque para la formación de capas gruesas de Si-P, se iba a variar de 1, 3 y 5 minutos, en donde las proporciones de HF y H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> serían variables de un grupo a otro, mientras que el IPA se mantendría constante para todos los dispositivos (10 %). Por otro lado, el tiempo de teñido para las capas delgadas de Si-P, se varió de 25 a 75 s, pero en este caso, la proporción de HF se mantuvo en 20 % del total de la solución. La segunda etapa, consiste en la caracterización de los dispositivos y de las respectivas muestras testigo.

Con base en los resultados, se comprueba que, a pesar de las diferencias en la concentración de cada compuesto de la solución utilizada para el teñido químico, el tiempo de teñido para todos los grupos de muestras formados, es un factor muy importante que afecta en las características de las películas, pues a medida que el tiempo aumenta, el espesor es más grande. Por otro lado, la idea de mantener un porcentaje de 20 % de HF para la formación de la capa delgada de Si-P, surge de los resultados de elipsometría, pues de esta forma se puede variar el contenido de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, ya que a medida que éste aumenta, el espesor también es mayor.

La técnica de elipsometría resultó efectiva para la caracterización de las películas delgadas, para conocer el espesor e índice de refracción. Para las películas gruesas, se aplicó el método de clivado para conocer el espesor de éstas, mediante microscopía óptica. El tiempo de uso de la solución es un factor sumamente importante al momento de buscar la reproducibilidad de los resultados, pues se logró observar que, desde el instante en que la solución contiene los tres compuestos utilizados, ésta es más reactiva conforme transcurre el tiempo, pues se activa con el tiempo.

De acuerdo con los resultados de la caracterización SEM, es posible observar que las soluciones utilizadas en este trabajo para la fabricación de las películas de Si-P, son adecuadas para la formación de capas porosas con una distribución uniforme de los poros y, con una fuerte dependencia del diámetro de estos con el tiempo de teñido químico

Al realizar la caracterización eléctrica de los dispositivos, es posible notar que no todas las soluciones utilizadas para la formación de Si-P son adecuadas para la formación de capas porosas a utilizar en un transistor FET, pues algunos de estos dispositivos no muestran un comportamiento propio de un transistor de este tipo. Es posible observar que conforme el tiempo de teñido químico aumenta, la corriente de fuga disminuye, por lo que se infiere que, capas porosas más gruesas, presentan un mejor desempeño para estos dispositivos. El efecto es similar al que se observa en la corriente de saturación, pues a medida que el tiempo de teñido químico aumenta, está corriente,  $I_D(sat)$ , también disminuye.

El uso de Si-P como película de compuerta en un transistor FET, da lugar a un buen control en la corriente de drenador, para la mayoría de los dispositivos, sin embargo, al tener una capa de Si-P en toda el área del canal, incluida la región por abajo de los contactos de drenador y fuente, los cuales se pueden denominar como FET's de silicio poroso, los resultados de la caracterización I-V, en general, no condujeron a un control efectivo de la corriente de drenador, ya que la mayoría de los transistores con este diseño no presentaron curvas I-V propias de un transistor.

De acuerdo con los resultados, la muestra M164 es aquella que presenta los mejores resultados para los transistores 1A y 7A. La solución utilizada para la formación de Si-P grueso contiene 20 % de HF, 10 % de IPA y 70 % de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> con un tiempo de teñido químico de 3 minutos y resultando en una capa de Si-P de 2.5  $\mu\text{m}$ . Para el Si-P delgado, se empleó una solución con 20 % de HF, 60 % de IPA y 20 % de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> por un tiempo de 50 segundos, resultando en una película con espesor de 70 nm.

Con este trabajo se lograron cumplir con los objetivos presentados en el inicio, sin embargo, como trabajo a futuro se pretende que esta investigación sirva como base para indagar más acerca de los siguientes puntos:

- Caracterización del resto de los dispositivos diseñados mediante fotolitografía, que fueron fabricados en la misma muestra.
- Caracterización de los capacitores fabricados para obtener información sobre la unión silicio poroso-silicio.
- Investigar las características del contacto aluminio-silicio poroso.
- Obtener más información sobre la capacidad del silicio poroso como aislante entre dispositivos.
- Indagar más sobre los efectos de las dimensiones de los dispositivos funcionales.
- Realizar más pruebas para asegurar las reproducibilidad de aquellos dispositivos que presentan un comportamiento propio de un transistor FET.
- Investigar sobre la posible aplicación de los dispositivos formados para su uso en sensores de gases.
- Establecer el tipo de gas a censar mediante los dispositivos formados, así como la cantidad de producto que es posible medir y verificar que se encuentre dentro de un rango permitido de acuerdo a estándares médicos.

# Aportaciones

- **XXX International Material Research Congress & International Conference on Advanced Materials**, en Agosto del 2022, bajo el nombre “*Formation, fabrication and characterization of porous silicon in FET-type structures*”.



- **VI Seminario Regional de Materiales Avanzados** organizado por la Universidad Autonoma del Estado de Hidalgo, en Octubre del 2022, con el nombre “*Transistor de Efecto de Campo con Compuerta de Silicio Nanoestructurado*”.



---

## Apéndice A

# Limpieza RCA para obleas de S

La limpieza RCA es una serie estándar de pasos de limpieza de obleas de silicio para su posterior uso en la fabricación de semiconductores. El procedimiento básico fue desarrollado por Werner Kern en 1965 mientras trabajaba para RCA (*Radio Corporation of America*), el cual originalmente consiste en tres pasos fundamentales: la eliminación de los contaminantes orgánicos (limpieza orgánica + limpieza de partículas), la eliminación de la fina capa de óxido (banda de óxido, opcional) y la eliminación de la contaminación iónica (limpieza iónica).

El procedimiento utilizado para la limpieza de las obleas de Si utilizadas en este trabajo de tesis fue el siguiente:

1. Las muestras por limpiar se colocan en un soporte de teflón para posteriormente sumergirlas en dimetil-benceno  $C_8H_{10}$  (Xileno) precalentado a  $75^\circ$ . Una vez transcurridos 10 minutos, antes de un enjuague en agua, es necesario realizar un enjuague en acetona a temperatura ambiente en un baño por ultrasonido, con el fin de eliminar residuos de Xileno ya que este no se disuelve en agua. El propósito de este paso es la remoción de partículas de gran tamaño de la superficie de las muestras, así como residuos de grasa y material orgánico.
2. Las muestras se sumergen en una solución “piraña” conformada por  $H_2SO_4$  y  $H_2O_2$  en una proporción 3:1, a una temperatura de  $85^\circ$  por 10 minutos en un baño por ultrasonido, para posteriormente enjuagarlas con agua desionizada. Durante este paso del procedimiento, el objetivo es remover compuestos orgánicos y algunos contaminantes inorgánicos de la superficie.
3. En una solución “X1”, compuesta por  $H_2O$ ,  $NH_4OH$  y  $H_2O_2$  en una proporción 5:1:1 y precalentada a  $85^\circ$ , las muestras se sumergen por 10 minutos en baño ultrasónico, para posteriormente enjuagarlas con agua desionizada. Este paso permite remover silicatos, residuos de metales ligeros y agentes orgánicos.
4. Las muestras se sumergen en una solución 10:1 de  $H_2O$  y  $HF$  y se enjuagan en agua desionizada, repitiéndose tal proceso tres veces. La finalidad de este paso en el procedimiento es la remoción de óxido nativo en la superficie de las muestras de silicio.
5. En una solución “X2”, compuesta por  $H_2O$ ,  $HCl$  y  $H_2O_2$  en una proporción 5:1:1, las muestras son sumergidas por 10 minutos a  $85^\circ$  en un baño de ultrasonido. Finalmente, las muestras se enjuagan con agua desionizada por 5 minutos y se secan con un flujo de gas nitrógeno. En este paso final se remueven los contaminantes que no han sido eliminados en los pasos previos, así como iones metálicos.

---

## Apéndice B

# Aproximación de medios efectivos

La obtención de las constantes ópticas del silicio poroso se ha realizado con la modelación de su microestructura, considerándolo como un medio compuesto granulado bifásico, en donde se tienen inclusiones idénticas de silicio, colocadas al azar dentro de una matriz de aire homogénea. Cuando la luz interactúa con nanoestructuras de un semiconductor con un tamaño característico  $L$  y función dieléctrica  $\epsilon_2$  distribuido en un medio con función dieléctrica  $\epsilon_1$  (Figura B.1a), en el cual se cumple que la longitud de onda  $\lambda \gg L$ , este sistema de dos fases se puede tratar como un medio homogéneo (fase efectiva), asociado con una función dieléctrica efectiva,  $\epsilon_{ef}$  (Figura B.1b), la cual está relacionada con las constantes dieléctricas de las diferentes fases que constituyen este material (aire y silicio).

Esta asunción, es la que se considera en las teorías o aproximaciones de medio efectivo. A continuación, se presentan los modelos propuestos por Maxwell-Garnett y Bruggeman para el cálculo de la porosidad a partir del índice de refracción efectivo.

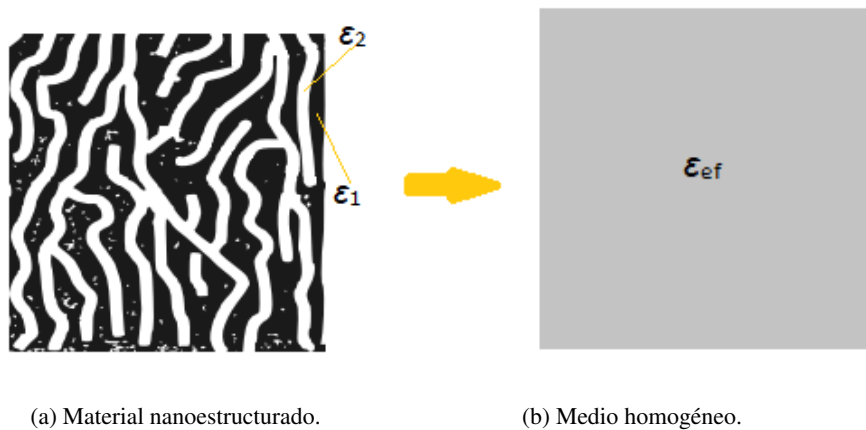


Figura B.1: Representación del concepto de medio efectivo.

### Modelo de Maxwell Garnett

La regla de mezcla Maxwell-Garnett es una de las más antiguas, y representa de buena manera sistemas diluidos con altas porosidades y partículas esféricas distanciadas entre sí:

$$\frac{\epsilon_{ef} - \epsilon_M}{\epsilon_{ef} + 2\epsilon_M} = P \frac{\epsilon - \epsilon_M}{\epsilon + 2\epsilon_M} \quad (\text{B.1})$$

De acuerdo con la Figura B.1, se tiene que  $\epsilon_{ef}$  es la constante dieléctrica efectiva del sistema obtenida experimentalmente,  $\epsilon$  corresponde a la constante dieléctrica del del Si, mientras que  $\epsilon_M$  es la constante dieléctrica del medio, en este caso, aire.



## Modelo de Bruggeman

Una de las ecuaciones más utilizadas es la que propuso Bruggeman, conocida también como aproximación de medio efectivo (EMA, del inglés *effective medium approximation*):

$$P \frac{n_{aire}^2 - n_{ef}^2}{n_{aire}^2 + 2n_{ef}^2} + (1 - P) \frac{n_{Si}^2 - n_{ef}^2}{n_{Si}^2 + 2n_{ef}^2} = 0 \quad (\text{B.2})$$

en ambos modelos,  $P$  es el porcentaje de porosidad del material, en este caso, el silicio;  $n_{ef}$  es el valor del índice de refracción efectivo correspondiente al obtenido experimentalmente (para este trabajo se utilizó la caracterización por espectroscopía);  $n_1$  es el índice de refracción del medio 1, en este caso es el aire, por lo que se tiene  $n_1 = n_{aire}$ ; y, finalmente,  $n_2$  es el índice de refracción del medio 2, en este caso el silicio, por lo que  $n_2 = n_{Si}$ .

La función dieléctrica relativa en medios dispersivos se define como  $\varepsilon = \varepsilon_r + i\varepsilon_i$  su relación con el índice de refracción complejo  $\eta = n + ik$  es a través de  $\eta = \sqrt{\varepsilon}$ , donde la permeabilidad relativa es  $\mu = 1$  ya que los materiales no son magnéticos. Considerando solo la parte real y para la región en donde no hay absorción del medio  $k \ll n$  se obtiene que  $n = \sqrt{\varepsilon}$ . Las funciones dieléctricas e índice de refracción se toman de la literatura. Para el aire se utiliza un valor constante de 1, tanto para la función dieléctrica como para el índice de refracción.

---

## Apéndice C

# Compuestos utilizados para la formación de Si-P

A continuación, se presenta una breve descripción de los compuestos que fueron utilizados para la formación de las películas de Si-P que conforman los dispositivos fabricados.

### **Ácido Fluorhídrico (HF) 48 %**

Este compuesto también es denominado Acido Hidrofluórico y se tiene usos de laboratorio, análisis, investigación y química fina. Se presenta en estado líquido y es incoloro, tiene un olor característico picante. En cuanto a las propiedades físicas, tiene un punto de fusión/congelación de  $-35^{\circ}\text{C}$ , mientras que su punto inicial de ebullición e intervalo de ebullición es de  $106^{\circ}\text{C}$ . Su densidad relativa es de 1.16 y es miscible con agua, además de ser un compuesto no combustible.

Este material, bajo condiciones ambientales normales, es estable, no reactivo, sin embargo, se recomienda mantenerlo en condiciones previsibles de temperatura y presión durante su almacenamiento y manipulación. La temperatura recomendada de almacenamiento oscila entre  $15$  y  $25^{\circ}\text{C}$  y se sugiere conservar alejado del calor.

Es recomendable no combinarlo con metales alcalinos, metales, percloratos, ácido nítrico, ácido sulfúrico, entre otros, debido a la posibilidad de reacciones peligrosas. Por otro lado, está altamente contraindicado combinarlo con Hidróxido alcalino (álcali cáustico), Óxido de fósforo, Lejía fuerte, Óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ), Permanganatos, entre otros, debido a la iniciación de reacciones fuertes.

### **Alcohol Isopropílico (IPA) 99.99 %**

El uso recomendado de este producto químico es como solvente y materia prima. La denominación química sistémica es isopropanol, nombrado genéricamente como 2-Propanol ó 2-hidróxipropano. La fórmula química de este compuesto es  $\text{C}_3\text{H}_7\text{OH}$ . Presenta un estado físico líquido incoloro con el olor característico del alcohol. Tiene un punto de fusión/congelación de  $-97.8^{\circ}\text{C}$ , con un punto de inflamación de  $12^{\circ}\text{C}$ . Su presión de vapor es de 128 mbar (a  $20^{\circ}\text{C}$ ), además es miscible en agua.

El Alcohol Isopropílico es estable en condiciones de almacenamiento a temperatura ambiente normal y recomendado la no exposición de los envases a temperaturas altas. Se sugiere evitar la mezcla incontrolada con oxidantes fuertes debido a la incompatibilidad. Debido a que existen peligros específicos asociados a la formación de mezclas inflamables, se recomienda su manipulación en habitaciones con ventilación, pus la combustión libera monóxido y dióxido de carbono.

### **Peróxido de Hidrógeno ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) 99.99 %**

El peróxido de hidrógeno se denomina comúnmente dióxido de hidrógeno, tiene una fórmula química  $\text{H}_2\text{O}_2$ . Este producto químico es usado principalmente en blanqueadores de textiles, alimentos, papel, en la producción de químicos, plásticos, farmacéuticos, electroplateado, tratamiento de agua, refinado y limpieza de metales, combustible de cohetes, caucho para espuma, antiséptico, agente neutralizante en la destilación del vino, desinfectante de semillas, entre otros.

En cuanto a las propiedades físicas y químicas, presenta una apariencia líquida incolora y con olor ligero. Tiene un punto de ebullición de  $141^{\circ}\text{C}$  y un punto de fusión de  $-11^{\circ}\text{C}$ , es soluble en agua y en alcohol. Es estable bajo condiciones normales de



presión y temperatura. Se debe evitar combinar con materiales combustibles, agentes reductores, iones metálicos y materiales oxidables.

Es un compuesto no inflamable, sin embargo, con el calor propicia la combustión espontánea de materiales combustibles, pues libera oxígeno el cual intensifica y favorece la combustión. Se recomienda mantener alejado de toda fuente de calor o colocar junto a materiales combustibles, ni impurezas. Se sugiere almacenar en lugares ventilados, frescos y secos, y mantenerlos bien cerrados, protegido de luz y a temperaturas inferiores a 35 °C. Los contenedores recomendados para este producto son las botellas de vidrio ámbar.



---

## Apéndice D

# Análisis teórico del transistor FET con compuerta de Si-P

A continuación, se describe el procedimiento teórico para la obtención de la gráfica de la Figura 6.46 del ancho de la región de carga espacial,  $W$ , en función de la conductancia,  $G$ , presentada en la Sección 6.2.

La siguiente Figura D.1 es una representación de los transistores FET formados. En la parte inferior se encuentra el sustrato de Si  $P^+$ , mientras que en la parte superior está la capa epitaxial tipo N de  $3.5 \mu\text{m}$  de espesor, valor representado como la profundidad del canal,  $a_e$ . Sobre esta última, se encuentran los contactos de aluminio, los cuales fueron diseñados con una separación de  $250 \mu\text{m}$ , es decir, el largo del canal del transistor,  $L$ . El ancho del canal,  $W_T$ , tiene un valor de  $350 \mu\text{m}$ .

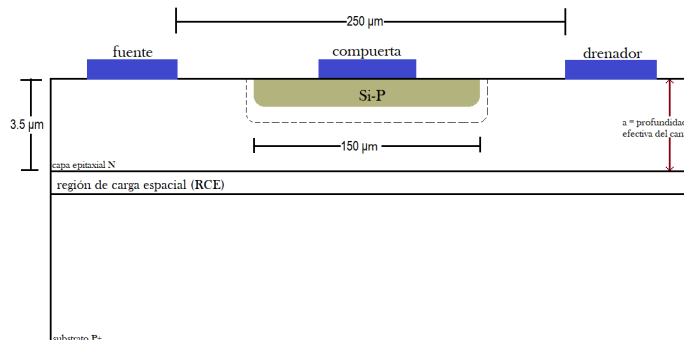


Figura D.1: Representación gráfica de la sección transversal del transistor FET fabricado

Por otro lado, el largo de la compuerta es  $L_G = 150 \mu\text{m}$ , mientras que el ancho  $W = 350 \mu\text{m}$ . De la Figura, también se puede ver que el largo del canal, sin tomar en cuenta la región de la compuerta es  $L_N = 100 \mu\text{m}$ .

La movilidad de los electrones en Si, tiene un valor  $\mu = 1450 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ , de acuerdo a la literatura. De acuerdo con el fabricante, la resistividad de la capa epitaxial es  $\rho = 5 \Omega\text{-cm}$ . Como es sabido, la carga de los electrones es  $q = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ , mientras que la masa efectiva de los electrones en el silicio es  $m_n^* = 0.98m_0$ . El valor de la concentración de portadores,  $n$ , en la capa epitaxial no está especificado por el fabricante, pero se puede determinar de la ecuación de la resistividad, ( $\rho$ ):

$$\rho = \frac{1}{q\mu n} \Rightarrow n = \frac{1}{q\mu\rho} \quad (\text{D.1})$$

tal valor resulta como  $n = 8.62 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ . Por otro lado, la densidad de estados efectivos en la banda de conducción,  $N_C$ , se



obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$N_C = 4.83 \times 10^{15} \left( \frac{m_n^*}{m_0} \right)^{\frac{3}{2}} T^{\frac{3}{2}} \quad (D.2)$$

obteniendo un resultado de  $N_C = 2.43 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ .

Tomando en cuenta la siguiente ecuación:

$$n = N_D = N_C \exp\left(-\frac{E_C - E_F}{T}\right) \quad (D.3)$$

se obtienen las expresiones para la diferencia entre la banda de conducción,  $E_C$ , y el nivel de Fermi,  $E_F$ , así como el valor del potencial interconstruido,  $\Phi_{bi}$ , entre la región del sustrato y la capa epitaxial:

$$E_C - E_F = kT \ln\left(\frac{N_C}{n}\right) \quad (D.4)$$

$$\Phi_{bi} = \frac{1}{q} (E_g - (E_C - E_F)) \quad (D.5)$$

resultando en los valores  $E_C - E_F = 0.266 \text{ V}$  y  $\Phi_{bi} = 0.854 \text{ V}$ .

La región de carga espacial (RCE) de una unión P-N se puede determinar mediante la siguiente ecuación:

$$W = \sqrt{\frac{2\epsilon_S (\Phi_{bi} + V_D - V_G)}{qN_D}} \quad (D.6)$$

conociendo los valores de  $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-14} \text{ F/cm}$ ,  $k_s = 11.9$  y  $\epsilon_S = 1.05 \times 10^{-12} \text{ F/cm}$ . Entonces, para la región de carga espacial que se forma entre el sustrato y la capa epitaxial cuando  $V_D = 0 \text{ V}$  y  $V_G = 0 \text{ V}$ , se obtiene de la siguiente expresión:

$$W_D = \sqrt{\frac{2\epsilon_S (\Phi_{bi})}{qN_D}} \quad (D.7)$$

resultando en  $W_D = 1.1417 \mu\text{m}$ . Con los valores obtenidos hasta este punto, es posible determinar que la profundidad efectiva del canal,  $a$ , es de  $2.3583 \mu\text{m}$ , pues este valor se encuentra mediante la siguiente diferencia:

$$a = a_e - W_D \quad (D.8)$$

Por otro lado, la conductancia del canal,  $G_i$ , sin compuerta resulta de  $6.6 \times 10^{-5} \text{ S}$ , al aplicar la siguiente expresión:

$$G_i = \frac{aW_T}{\rho L} \quad (D.9)$$

así, la resistencia del canal está dada por la siguiente ecuación:

$$R_i = \frac{1}{G_i} \quad (D.10)$$

cuyo resultado es  $R_i = 15143.88 \text{ Ohm}$ .

La región de carga espacial en el silicio cristalino por el efecto de la unión Si-P/Si, se representa con  $W$ , mientras que la profundidad del Si-P está representado con  $Y_{PS}$ . Por lo tanto, la conductancia del canal,  $G_G$ , bajo la compuerta de Si-P se determina mediante la siguiente expresión:

$$G_G = \frac{(a - Y_{PS} - W) W_T}{\rho (L_G + 2W)} \quad (D.11)$$

considerando que  $Y_{PS} \ll W$ .

La magnitud del largo del canal de fuente y drenador, tienen una magnitud de  $50 \mu\text{m}$ , por lo tanto:

$$L_{source} = L_{drain} = 50 \mu\text{m} \Rightarrow L_N = L_{source} + L_{drain} = 100 \mu\text{m}. \quad (D.12)$$



La conductancia del canal  $G_N$  fuera de la compuerta de Si-P, resulta de la siguiente forma:

$$G_N = \frac{aW_T}{\rho(L_N - 2W)} \cong \frac{aW_T}{\rho(L_N)} \quad (\text{D.13})$$

$$= 0.000165083 \text{ S}. \quad (\text{D.14})$$

La longitud total del canal está dada por la siguiente adición:

$$L = L_G + L_N \quad (\text{D.15})$$

$$= 150 + 100 = 250 \mu\text{m}. \quad (\text{D.16})$$

La resistencia del canal,  $R_N$ , fuera de la compuerta de Si-P es:

$$R_N = \frac{1}{G_N} \quad (\text{D.17})$$

$$= 6057.55 \text{ Ohm} \quad (\text{D.18})$$

mientras que la resistencia del canal,  $R_G$ , bajo la compuerta de Si-P es:

$$R_G = \frac{1}{G_G} = \frac{\rho L_G}{(a - W) W_T}. \quad (\text{D.19})$$

Por lo cual, la resistencia total sera la suma de  $R_N$  y  $R_G$ :

$$R = R_N + R_G = \frac{\rho L_N}{a W_T} + \frac{\rho L_G}{(a - W) W_T} \quad (\text{D.20})$$

Finalmente, se encuentra que la región de carga espacial,  $W$ , en el silicio cristalino por efecto de la unión Si-P/Si, en función de la resistencia del canal, se puede determinar mediante la siguiente expresión (la cual se encuentra graficada en la Figura 6.45):

$$W = a \left( 1 - \frac{L_G \rho}{W_T a R - L_N \rho} \right). \quad (\text{D.21})$$

---

# Bibliografía

- [1] Lei, Q., Guo, J., Noureddine, A., Wang, A., Wuttke, S., Brinker, C. J., & Zhu, W. (2020). “Sol-gel-based advanced porous silica materials for biomedical applications”. *Advanced Functional Materials*, 30(41), 1909539.
- [2] Föll, H., Christophersen, M., Carstensen, J., & Hasse, G. (2002). “Formation and application of porous silicon”. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 39(4), 93-141.
- [3] Barillaro, G., Nannini, A., & Pieri, F. (2003). “APSFET: a new, porous silicon-based gas sensing device”. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 93(1-3), 263-270.
- [4] Barillaro, G., Diligenti, A., Nannini, A., Strambini, L. M., Comini, E., & Sberveglieri, G. (2006). “Low-concentration NO<sub>2</sub> detection with an adsorption porous silicon FET”. *IEEE Sensors Journal*, 6(1), 19-23.
- [5] Canham, L. (Ed.). (2014). “*Handbook of porous silicon*”. Berlin, Germany: Springer International Publishing.
- [6] Suryana, R., D. K. Sandi, & O. Nakatsuka. “The morphological study of porous silicon formed by electrochemical anodization method”. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 333. No. 1. IOP Publishing, 2018.
- [7] He, L., Wang, Y., He, X., Li, J., He, Q., & Wei, D. (2020). “The combined effects of anodization parameters on morphological of the porous silicon and the ballistic electron emission of PS-based emitter”. *Vacuum*, 171, 108998.
- [8] Handayani, M., & Suryana, R. (2019). “Optical Absorbance of Porous Silicon on n-type Si (111) Surfaces Fabricated by Electrochemical Anodization Method”. *Materials Today: Proceedings*, 13, 87-91.
- [9] Ayat, M., Belhousse, S., Boarino, L. et al. “Formation of nanostructured silicon surfaces by stain etching”. *Nanoscale Res Lett* 9, 482 (2014).
- [10] Kolasinski, K. W., Granitzer, P., & Rumpf, K. (2014). “New approaches to the production of porous silicon by stain etching”. *Nanostructured Semiconductors: from basic research to applications*, 45-84.
- [11] Kolasinski, K. W., & Yadlovskiy, J. (2011). “Stain etching of silicon with V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>”. *physica status solidi c*, 8(6), 1749-1753.
- [12] Parbukov, A. N., Beklemyshev, V. I., Gontar, V. M., Makhonin, I. I., Gavrilov, S. A., & Bayliss, S. C. (2001). “The production of a novel stain-etched porous silicon, metallization of the porous surface and application in hydrocarbon sensors”. *Materials Science and Engineering: C*, 15(1-2), 121-123.
- [13] Ünal, B., Parbukov, A. N., & Bayliss, S. C. (2001). “Photovoltaic properties of a novel stain etched porous silicon and its application in photosensitive devices”. *Optical Materials*, 17(1-2), 79-82.
- [14] Abramof, P. G., Beloto, A. F., Ueta, A. Y., & Ferreira, N. G. (2006). “X-ray investigation of nanostructured stain-etched porous silicon”. *Journal of applied physics*, 99(2), 024304.
- [15] Lippold, M., Böhme, U., Gondek, C., Kronstein, M., Patzig-Klein, S., Weser, M., & Kroke, E. (2012). “Etching silicon with HF-HNO<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>O mixtures—unprecedented formation of trifluorosilane, hexafluorodisiloxane, and Si-F Surface Groups”. *European Journal of Inorganic Chemistry*, 2012(34), 5714-5721.
- [16] Li, X., & Bohn, P. W. (2000). “Metal-assisted chemical etching in HF/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> produces porous silicon”. *Applied Physics Letters*, 77(16), 2572-2574.
- [17] Tsujino, K., & Matsumura, M. (2005). “Helical nanoholes bored in silicon by wet chemical etching using platinum nanoparticles as catalyst”. *Electrochemical and Solid State Letters*, 8(12), C193.
- [18] Hadjersi, T., Gabouze, N., Kooij, E. S., Zinine, A., Ababou, A., Chergui, W., ... & Djeghri, A. (2004). “Metal-assisted chemical etching in HF/Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>8</sub> or HF/KMnO<sub>4</sub> produces porous silicon”. *Thin solid films*, 459(1-2), 271-275.
- [19] Chartier, C., Bastide, S., & Lévy-Clément, C. (2008). “Metal-assisted chemical etching of silicon in HF-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>”. *Electrochimica Acta*, 53(17), 5509-5516.
- [20] Tomioka, S., Miyazaki, T., & Adachi, S. (2007). “Porous silicon formation by photoetching in HF/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> solution using incoherent light source”. *Japanese Journal of Applied Physics*, 46(8R), 5021.



- [21] Gelloz, B., Fuwa, H., Kondoh, E., & Jin, L. (2018). "Photoetching of Porous Silicon Nanostructures in Hydrofluoric Acid Using Monochromatic Light". *ECS Journal of Solid State Science and Technology*, 7(12), P730.
- [22] Singh, N., Sahoo, M. K., & Kale, P. G. (2018). "Effect of MACE parameters on length of porous silicon nanowires (PSiNWs)". *Journal of Crystal Growth*, 496, 10-14.
- [23] Volovlikova, O. V., Gavrilov, S. A., Silakov, G. O., Zheleznyakova, A. V., & Dudin, A. A. (2019). "Preparation of Hydrophobic Porous Silicon by Metal-Assisted Etching with Pd-Catalyst". *Russian Journal of Electrochemistry*, 55(12), 1186-1195.
- [24] Kayahan, E. (2018). "Porous silicon based CO<sub>2</sub> sensors with high sensitivity". *Optik*, 164, 271-276.
- [25] Arshavsky-Graham, S., Massad-Ivanir, N., Segal, E., & Weiss, S. (2018). "Porous silicon-based photonic biosensors: Current status and emerging applications". *Analytical chemistry*, 91(1), 441-467.
- [26] Pyatilova, O. V., Gavrilov, S. A., Shilyaeva, Y. I., Pavlov, A. A., Shaman, Y. P., & Dudin, A. A. (2017). "Influence of the doping type and level on the morphology of porous Si formed by galvanic etching". *Semiconductors*, 51(2), 173-177.
- [27] Díaz-Torres, E., Romero-Paredes, G., Peña-Sierra, R., & Ávila-García, A. (2015). "Formation and characterization of porous silicon films obtained by catalyzed vapor-chemical etching". *Materials Science in Semiconductor Processing*, 40, 533-538.
- [28] Amri, C., Ouertani, R., Hamdi, A., & Ezzaouia, H. (2016). "Effect of acid vapor etching on morphological and opto-electric properties of flat silicon and silicon nanowire arrays: a comparative study". *Superlattices and Microstructures*, 91, 278-289.
- [29] Fuller, C. S., & Ditzenberger, J. A. (1956). "Diffusion of donor and acceptor elements in silicon". *Journal of Applied Physics*, 27(5), 544-553.
- [30] Turner, D. R. (1960). "On the mechanism of chemically etching germanium and silicon". *Journal of the electrochemical Society*, 107(10), 810.
- [31] Archer, R. J. (1960). "Stain films on silicon". *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 14, 104-110.
- [32] Harraz, F. A. (2014). "Porous silicon chemical sensors and biosensors: A review". *Sensors and Actuators B: Chemical*, 202, 897-912.
- [33] Burham N., Hamzah A. A., & Majlis B. Y. "Self-Adjusting Electrochemical Technique for Producing Nanoporous Silicon". *New Research on Silicon-Structure, Properties, Technology (Materials Science) ed. VI (2017) Talanin (Croatia: INTECH)*, cap. 6.
- [34] Sapelkin, A. V., Bayliss, S. C., Unal, B., & Charalambou, A. (2006). "Interaction of B50 rat hippocampal cells with stain-etched porous silicon". *Biomaterials*, 27(6), 842-846.
- [35] Terheiden, B., Hensen, J., Wolf, A., Horbelt, R., Plagwitz, H., & Brendel, R. (2011). "Layer transfer from chemically etched 150 mm porous Si substrates". *Materials*, 4(5), 941-951.
- [36] Balaguer, M., & Matveeva, E. (2010). "Quenching of porous silicon photoluminescence by molecular oxygen and dependence of this phenomenon on storing media and method of preparation of pSi photosensitizer". *Journal of Nanoparticle Research*, 12(8), 2907-2917.
- [37] Gerischer, H., & Lübke, M. (1988). "On the etching of silicon by oxidants in ammonium fluoride solutions: A mechanistic study". *Journal of the Electrochemical Society*, 135(11), 2782.
- [38] Jakubowicz, J. (2005). "Morphology of silicon (111) during electrochemical etching in NH<sub>4</sub>F electrolytes". *Advances in Materials Science*, 5(2), 7.
- [39] Andrushin, S. Y., Balagurov, L. A., Bayliss, S. C., Liberova, G. V., Petrova, E. A., Unal, B., & Yarkin, D. G. (2004). "Formation of Porous Silicon Layers on Insulating Substrate for Microbridge-Type Sensor Applications". *MRS Online Proceedings Library (OPL)*, 828.
- [40] Tsujino, K., & Matsumura, M. (2007). "Morphology of nanoholes formed in silicon by wet etching in solutions containing HF and H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> at different concentrations using silver nanoparticles as catalysts". *Electrochimica Acta*, 53(1), 28-34.
- [41] Peng, K., Lu, A., Zhang, R., & Lee, S. T. (2008). "Motility of metal nanoparticles in silicon and induced anisotropic silicon etching". *Advanced Functional Materials*, 18(19), 3026-3035.
- [42] Qiu, T., Wu, X. L., Siu, G. G., & Chu, P. K. (2005). "Self-assembled growth and green emission of gold nanowhiskers". *Applied Physics Letters*, 87(22), 223115.
- [43] Lee, C. L., Tsujino, K., Kanda, Y., Ikeda, S., & Matsumura, M. (2008). "Pore formation in silicon by wet etching using micrometre-sized metal particles as catalysts". *Journal of materials chemistry*, 18(9), 1015-1020.
- [44] Megouda, N., Hadjersi, T., Piret, G., Boukherroub, R., & Elkechai, O. (2009). "Au-assisted electroless etching of silicon in aqueous HF/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> solution". *Applied Surface Science*, 255(12), 6210-6216.
- [45] Zhao, Y., Li, D., Sang, W., Yang, D., & Jiang, M. (2007). "The optical properties of porous silicon produced by metal-assisted anodic etching". *Journal of materials science*, 42(20), 8496-8500.
- [46] Bayramov, A. I., Mamedov, N. T., Dzharafarov, T. D., Aliyeva, Y. N., Ahmadova, K. N., Alizade, E. H., ... & Ragimov, S. K. (2019). "Photoluminescence and optical transitions in C60 fullerene thin films deposited on glass, silicon and porous silicon". *Thin Solid Films*, 690, 137566.



- [47] Odarych, V. A., Poperenko, L. V., & Yurgelevych, I. V. (2020). "Structure of natural film on porous silicon surface founded by ellipsometry". *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 698(1), 46-55.
- [48] Zavalisty, O. I., Makarenko, O. V., Odarych, V. A., & Yampolskyi, A. L. (2020). "The Structure of Oxide Film on the Porous Silicon Surface". *Ukrainian Journal of Physics*, 65(1), 75-75.
- [49] Massoud, A. M., Chapuis, P. O., Canut, B., & Bluet, J. M. (2020). "Thermal conductivity of irradiated porous silicon down to the oxide limit investigated by Raman thermometry and scanning thermal microscopy". *Journal of Applied Physics*, 128(17), 175109.
- [50] Alwan, A. M., Yousif, A. A., & Wali, L. A. (2018). "A study on the morphology of the silver nanoparticles deposited on the n-type porous silicon prepared under different illumination types". *Plasmonics*, 13(4), 1191-1199.
- [51] Kalimuthu V., & Rath, S. (2017). "One-step synthesis of Au-coated porous silicon as a surface enhanced Raman scattering substrate for biomolecule detection". *Materials Letters*, 204, 115-119.
- [52] Zhong, F., Wu, Z., Guo, J., & Jia, D. (2018). "Porous silicon photonic crystals coated with Ag nanoparticles as efficient substrates for detecting trace explosives using SERS". *Nanomaterials*, 8(11), 872.
- [53] Plummer, A., Kuznetsov, V. A., Gascooke, J. R., Shapter, J., & Voelcker, N. H. (2017). "Combined thermal and FTIR analysis of porous silicon based nano-energetic films". *RSC advances*, 7(12), 7338-7345.
- [54] Azaiez, K., Zaghouni, R. B., Khamlich, S., Meddeb, H., & Dimassi, W. (2018). "Enhancement of porous silicon photoluminescence property by lithium chloride treatment". *Applied Surface Science*, 441, 272-276.
- [55] Nayef, U. M., Khudhair, I. M., & Kayahan, E. (2017). "Organic vapor sensor using photoluminescence of laser ablated gold nanoparticles on porous silicon". *Optik*, 144, 546-552.
- [56] Merazga, S., Cheriet, A., M'hammedi, K., Mefoued, A., & Gabouze, N. (2019). "Investigation of porous silicon thin films for electrochemical hydrogen storage". *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(20), 9994-10002.
- [57] Cui, Y., Liu, Y., Wu, J., Zhang, F., Baker, A. P., Lavorgna, M., ... & Liu, X. (2018). "Porous silicon-aluminium oxide particles functionalized with acid moieties: an innovative filler for enhanced Nafion-based membranes of direct methanol fuel cell". *Journal of Power Sources*, 403, 118-126.
- [58] Nayef, U. M., Hussein, H. T., & Hussien, A. M. A. (2018). "Study of photoluminescence quenching in porous silicon layers that using for chemical solvents vapor sensor". *Optik*, 172, 1134-1139.
- [59] , M., Lee, D. G., Park, H. I., Park, C., Choi, J. H., & Kim, H. (2018). "Microstructure controlled porous silicon particles as a high capacity lithium storage material via dual step pore engineering". *Advanced Functional Materials*, 28(23), 1800855.
- [60] , A. B., Alwan, A. M., & Zayer, M. Q. (2019). "Optimizing of gold nanoparticles on porous silicon morphologies for a sensitive carbon monoxide gas sensor device". *Plasmonics*, 14(2), 501-509.
- [61] Alwan, A. M., Hashim, D. A., & Jawad, M. F. (2019). "Efficient bimetallic nanoparticles embedded-porous silicon CO gas sensor". *Solid-State Electronics*, 153, 37-45.
- [62] Seredin P. V., Goloshchapov, D. L., Lenshin, A. S., & Kasatkin, I. A. (2021). "Effect of combination of etching modes on the design, structural and optical properties of the compliant substrates based on porous silicon". *Optical Materials*, 119, 111358.
- [63] Pavlenko, M., Myndrul, V., Gottardi, G., Coy, E., Jancelewicz, M., & Iatsunskyi, I. (2020). "Porous silicon-zinc oxide nanocomposites prepared by atomic layer deposition for biophotonic applications". *Materials*, 13(8), 1987.
- [64] Zhang, Y., Kong, C., Davidsen, R. S., Scardera, G., Duan, L., Khoo, K. T., ... & Abbott, M. (2020). "3D characterisation using plasma FIB-SEM: A large-area tomography technique for complex surfaces like black silicon". *Ultramicroscopy*, 218, 113084.
- [65] Afandi, Y., Parish, G., & Keating, A. (2019). "Compensating porosity gradient to produce flat, micromachined porous silicon structures". *Microporous and Mesoporous Materials*, 284, 427-433.
- [66] Sharma, P., Dell, J., Parish, G., & Keating, A. (2021). "Engineering 1/f noise in porous silicon thin films for thermal sensing applications". *Microporous and Mesoporous Materials*, 324, 111302.
- [67] Bahar, M., Eskandari, H., & Shaban, N. (2017). "Electrical properties of porous silicon for N<sub>2</sub> gas sensor". *J. Theor. Comput. Sci*, 4(1), 1-6.
- [68] Myndrul, V., Viter, R., Savchuk, M., Shpyrka, N., Erts, D., Jevdokimovs, D., ... & Iatsunskyi, I. (2018). "Porous silicon based photoluminescence immunosensor for rapid and highly-sensitive detection of Ochratoxin A". *Biosensors and Bioelectronics*, 102, 661-667.
- [69] Mulloni, V., & Pavesi, L. (2000). "Porous silicon microcavities as optical chemical sensors". *Applied Physics Letters*, 76(18), 2523-2525.
- [70] Schechter, I., Ben-Chorin, M., & Kux, A. (1995). "Gas sensing properties of porous silicon". *Analytical Chemistry*, 67(20), 3727-3732.
- [71] Korotcenkov, G. (Ed.). (2016). "Porous silicon: from formation to application: formation and properties", Volume One. CRC Press.



- [72] Dusheiko, M., Ilchenko, V., Obukhova, T., & Stepanova, M. (2017, April). “*Sensors on FET with porous silicon*”. In 2017 IEEE 37th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO) (pp. 162-164). IEEE.
- [73] Badawy, W. A., El-Sherif, R. M., & Khalil, S. A. (2010). “*Porous Si layers—Preparation, characterization and morphology*”. *Electrochimica acta*, 55(28), 8563-8569.
- [74] Nahidi, M., & Kolasinski, K. W. (2005). “*Effects of stain etchant composition on the photoluminescence and morphology of porous silicon*”. *Journal of the Electrochemical Society*, 153(1), C19.
- [75] Kim, S. J., & Lee, S. H. (2004). “*CV and photoluminescence properties of alcohol vapor sensors based on porous silicon*”. *Journal of the Korean Physical Society*, 44(1), 167.
- [76] Park, K. Y., Kang, K. S., Kim, S. J., Lee, S. H., Park, B. G., & Sung, M. Y. (2003). “*Electrical properties of alcohol vapor sensors based on porous silicon*”. *Journal of the Korean Institute of Electrical and Electronic Material Engineers*, 16(12S), 1232-1236.
- [77] Kutova, O., Borodinova, T., Dusheiko, M., Loboda, B., Obukhova, T., & Tkach, S. V. (2018, April). “*Influence of Pt nanoparticles in porous silicon on performance of MISFET sensor*”. In 2018 IEEE 38th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO) (pp. 173-176). IEEE.
- [78] Ahmed, A. M., & Mehaney, A. (2019). “*Ultra-high sensitive 1D porous silicon photonic crystal sensor based on the coupling of Tamm/Fano resonances in the mid-infrared region*”. *Scientific reports*, 9(1), 1-9.
- [79] Korotcenkov, G. (Ed.). (2016). “*Porous silicon: from formation to application: formation and properties*”, Volume One. CRC Press.
- [80] Gonchar, K. A., Moiseev, D. V., Bozhev, I. V., & Osminkina, L. A. (2021). “*Influence of H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> concentration on the structural and photoluminescent properties of porous silicon nanowires fabricated by metal-assisted chemical etching*”. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 125, 105644.
- [81] Xu, J., Liu, S., Yang, Y., Li, J., Tian, C., Guo, L., ... & Zhong, Z. (2019). “*Preparation of porous silicon by electrochemical etching methods and its morphological and optical properties*”. *International Journal of Electrochemical Science*, 5188-5199.
- [82] Piya, R., Gupta, B., Gooding, J. J., & Reece, P. J. (2018). “*Optimising porous silicon Bragg reflectors for narrow spectral resonances*”. *Journal of Applied Physics*, 124(16), 163103.
- [83] Nannini Barillaro, G., Nannini, A., Pieri, F., & Strambini, L. M. (2004). “*Temperature behavior of the APSFET—a porous silicon-based FET gas sensor*”. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 100(1-2), 185-189.
- [84] Herzer, N., Hoepfener, S., & Schubert, U. S. (2010). “*Fabrication of patterned silane based self-assembled monolayers by photolithography and surface reactions on silicon-oxide substrates*”. *Chemical Communications*, 46(31), 5634-5652.
- [85] Fujiwara, H. (2007). “*Spectroscopic ellipsometry: principles and applications*”. John Wiley & Sons.
- [86] Dacey, G. C., & Ross, I. M. (1955). “*The field effect transistor*”. *Bell System Technical Journal*, 34(6), 1149-1189.
- [87] Neamen, D. A. (2003). *Semiconductor physics and devices: basic principles*. McGraw-hill.
- [88] Huang, Z., Geyer, N., Werner, P., De Boor, J., & Gösele, U. (2011). “*Metal-assisted chemical etching of silicon: a review*”. *Advanced materials*, 23(2), 285-308.
- [89] Huang, Z., Shimizu, T., Senz, S., Zhang, Z., Geyer, N., & Gosele, U. (2010). “*Rate effect on the direction of metal-assisted chemical and electrochemical etching of silicon*”. *The Journal of Physical Chemistry C*, 114(24), 10683-10690.