



PONTIFICIA **UNIVERSIDAD CATÓLICA** DEL PERÚ

Esta obra ha sido publicada bajo la licencia Creative Commons
Reconocimiento-No comercial-Compartir bajo la misma licencia 2.5 Perú.

Para ver una copia de dicha licencia, visite
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.5/pe/>



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**ANÁLISIS Y COMPROBACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LOS
TRANSISTORES DE EFECTO DE CAMPO SENSIBLES A IONES
RESPECTO A LOS MOSFETS**

Tesis para optar el Título de Ingeniero Electrónico

**Presentado por:
Víctor Zacarías Prado Saldaña**

Lima - Perú

2008

RESUMEN

Los sensores de estado sólido en base a silicio han sido ampliamente utilizados en la detección de numerosas especies químicas. Entre estos sensores, el ISFET (Ion Sensitive Field Effect Transistor) es uno de los más estudiados. En el presente trabajo se analiza y se comprueba el comportamiento de los ISFETs respecto a los MOSFETs.

Se define y se describe físicamente al ISFET. Mediante el modelo de la doble capa de Gouy-Chapman-Stern y la teoría de los centros activos o enlaces locales (Site-binding theory), se explica el funcionamiento del ISFET. También, se presentan las variables que afectan el comportamiento del ISFET y se realiza una comparación de las expresiones matemáticas del MOSFET e ISFET.

Se muestra un conjunto de circuitos electrónicos asociados al ISFET, los cuales fueron desarrollados para la utilización del ISFET como sensor de pH. A continuación se presentan las curvas características del ISFET obtenidas en simulaciones, así como en ensayos realizados en laboratorio. Estas curvas son comparadas con el propósito de verificar la precisión del modelo utilizado en las simulaciones del ISFET, las cuales fueron desarrolladas en el programa OrCAD Pspice. Por último se implementa un circuito electrónico (ISFET-metro), mostrando la relación que existe entre su voltaje de salida y la variación del pH de la solución analizada.

Palabras claves: MOSFET, ISFET, interfase dieléctrico-electrolito, voltaje umbral, pH, SPICE, simulación.

ÍNDICE

Introducción.....	1
1. El ISFET: Concepto, principios y expresiones matemáticas.	
1.1. Concepto y descripción física del ISFET.....	4
1.2. Principios de funcionamiento del ISFET.....	6
1.2.1. Modelo de la doble capa de Gouy-Chapman-Stern.....	6
1.2.2. Teoría de los centros activos (Site-binding theory).....	8
1.2.3. Teoría de los centros activos extendida.....	12
1.2.4. Variables que afectan el comportamiento del ISFET.....	14
1.2.4.1. Temperatura.....	14
1.2.4.2. Electrodo de referencia.....	16
1.2.4.3. Deriva temporal.....	19
1.2.4.4. Resistencias parásitas de fuente y drenador.....	20
1.2.4.5. Iluminación.....	21
1.2.4.6. Efecto de cuerpo.....	22
1.2.4.7. Ruido 1/f.....	23
1.3. Expresiones matemáticas del ISFET.....	24

2. Circuitos electrónicos asociados al ISFET.

2.1. Instrumentación asociada al ISFET.....	31
2.1.1. Convertidor de corriente a voltaje.....	31
2.1.2. Amplificador con realimentación negativa al electrodo de referencia.....	32
2.1.3. Circuito con realimentación a la fuente	33
2.1.4. Amplificador diferencial ISFET/MOSFET.....	34
2.1.5. Seguidor de fuente y drenador.....	35
2.1.6. Circuito de corrientes constantes.....	37
2.1.7. Circuito con realimentación para sistemas discretos.....	38
2.1.8. Circuito “Readout” sin realimentación.....	40
2.1.9. Circuitos multiplexores.....	40

3. Obtención de resultados de los parámetros del ISFET.

3.1. Simulación del ISFET.....	44
3.1.1. Modelos utilizados para la simulación del ISFET.....	44
3.1.2. Macromodelo.....	44
3.1.3. Resultados obtenidos en las simulaciones.....	48
3.2. Parte experimental.....	52
3.2.1. Curvas características del ISFET.....	54
3.2.1.1. Resultados obtenidos al comparar las curvas obtenidas en las simulaciones y en los ensayos.....	55
3.2.1.2. Resultados obtenidos al tratar al ISFET como un MOSFET.....	57

3.2.1.3. Resultados obtenidos al observar la influencia del pH en la característica de salida del ISFET.....58

3.2.2. ISFET-metro.....62

3.2.2.1. Resultados obtenidos en los ensayos con el ISFET-metro.....64

Conclusiones.....68

Referencias bibliográficas.....69



INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el desarrollo de sensores se ha vuelto muy importante debido a su capacidad de realizar determinaciones analíticas de forma rápida, selectiva y con elevada sensibilidad. Los sensores se utilizan ampliamente para la detección de numerosos analitos en el ámbito del análisis clínico, industria alimenticia, etc.

Una rama que ha experimentado gran desarrollo es la relativa a los sensores basados en materiales semiconductores, destacándose los sensores de estado sólido en base a silicio [1]. Dentro de estos sensores, uno de los más estudiados es el ISFET (Ion Sensitive Field Effect Transistor), a causa de su facilidad de fabricación y operación, así como su bajo coste. Además, su miniaturización tiene todo un conjunto de ventajas sobre otros procedimientos de fabricación, tales como el mayor control de las estructuras y capacidad para producción masiva.

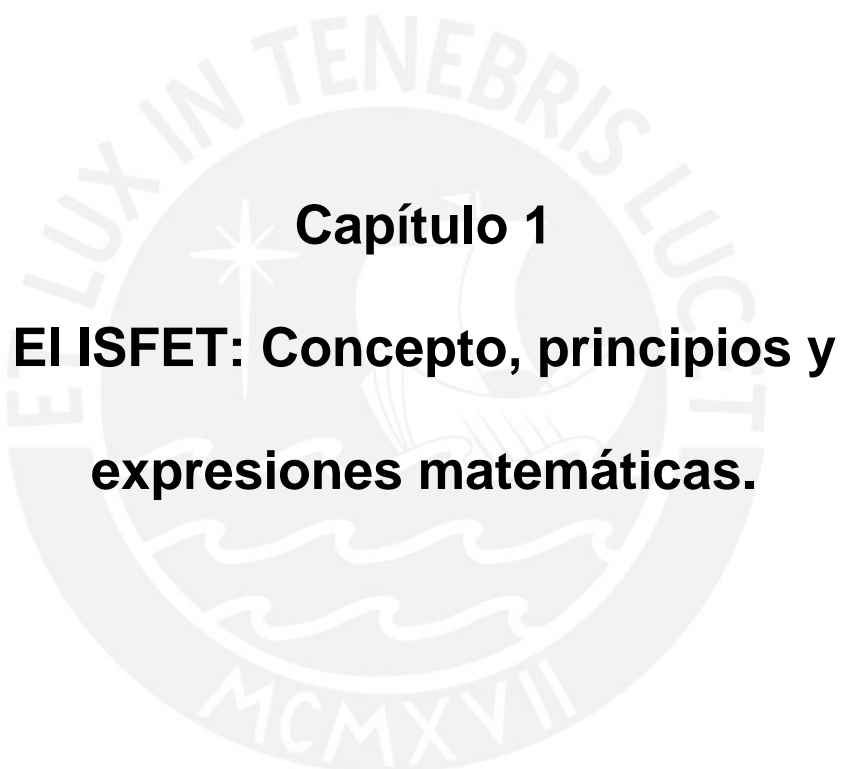
El concepto de ISFET como un dispositivo químicamente sensible basado en la estructura metal-óxido-semiconductor (MOSFET) fue introducido inicialmente por Bergveld en los setentas [2]. Bergveld y su equipo reemplazaron el contacto metálico de la puerta del MOSFET por una solución electrolítica y protegieron la totalidad del dispositivo excepto la región de la puerta con una resina epoxy aislante e impermeable, resultando un dispositivo sensible a la concentración de iones en la solución. Luego se introdujo el uso de un electrodo de referencia, el cual establece un contacto eléctrico con la solución.

En los primeros trabajos acerca del ISFET se creía que su funcionamiento se basaba en una aproximación empírica que combinaba el comportamiento de los electrodos de vidrio y las características de un MOSFET [8]. Sin embargo, este

modelo fue rechazado ya que presentaba incoherencias al tratar de explicar resultados experimentales. Actualmente, se plantea que el funcionamiento del ISFET es debido a los fenómenos físicos y químicos que tienen lugar en la interfase dieléctrico-electrolito. Estos fenómenos son explicados por el modelo de la doble capa de Gouy-Chapman-Stern y la teoría de los centros activos o enlaces locales (Site-binding theory) [9].

La sensibilidad al pH que se observa cuando es expuesto a un electrolito hace del ISFET una herramienta muy útil en varios campos de aplicación: ingeniería biomédica, agricultura, medio ambiente, etc. Aunque la principal aplicación del ISFET es la medición del pH de una solución, sencillas modificaciones en la estructura de este dispositivo como la adición de una membrana orgánica, han dado lugar a los transistores de carácter químico tipo CHEMFET, los cuales presentan sensibilidad a un determinado analito (de carácter iónico) en dependencia de la composición de la membrana [1].

El objetivo del presente trabajo es analizar y comprobar el comportamiento de los ISFETs respecto a los MOSFETs. Para lograr lo anterior se utilizarán técnicas modernas de simulación y ensayos en laboratorio; de esta forma se podrá observar las similitudes y diferencias de comportamiento, y dependencias entre las variaciones tales como corriente de drenador respecto a variaciones del voltaje umbral. Además, esta comprobación se realizará considerando los valores de los parámetros de fabricación que ha generado el fabricante de los ISFETs y asumiendo valores intrínsecos de este dispositivo y siempre observando lo que sucede con los MOSFETs en situaciones similares.



Capítulo 1
El ISFET: Concepto, principios y
expresiones matemáticas.

1.1. Concepto y descripción física del ISFET.

El ISFET se describe como un sensor químico de estado sólido sensible al pH, el cual combina los principios de los sensores químicos potenciométricos y amperométricos, debido a que la circulación de corriente eléctrica en un sustrato semiconductor es controlada por la diferencia de potencial que se origina en una interfaz [1].

En su estructura física el ISFET es similar al MOSFET, la única diferencia en la estructura del ISFET es el reemplazo de la puerta de metal del MOSFET por una combinación en serie de un electrodo de referencia, un electrolito y un aislante químico sensible o membrana [2-7].

El ISFET está constituido por un sustrato de silicio dopado con impurezas de boro (tipo P) o de fósforo (tipo N), en el cual dos regiones de dopaje diferente a la del sustrato son formadas mediante procesos tecnológicos de implantación y difusión. A estas zonas se les denominan fuente y drenador. La zona localizada entre la fuente y el drenador es denominada canal, encima de la cual se ubica una capa delgada de óxido de silicio de gran calidad sobre el que se coloca una membrana inorgánica sensible al pH, tales como nitruro de silicio (Si_3N_4), óxido de tantalio (Ta_2O_5), alúmina (Al_2O_3) y trióxido de tungsteno amorfo (a-WO_3).

Para obtener un ISFET con una estructura parecida a la del MOSFET se utiliza tecnología de fabricación de circuitos integrados MOS. El proceso de encapsulado se lleva a cabo con resinas del tipo epoxy aislante e impermeable [1, 8], dejando solo en contacto con el electrolito la puerta del dispositivo; y garantizando la posibilidad de establecer contacto eléctrico con el drenador, la fuente y el sustrato.

En las figuras 1.1 y 1.2 se muestran los esquemas del MOSFET e ISFET respectivamente, donde D es el drenador, S es la fuente, G es la puerta y B es el sustrato.

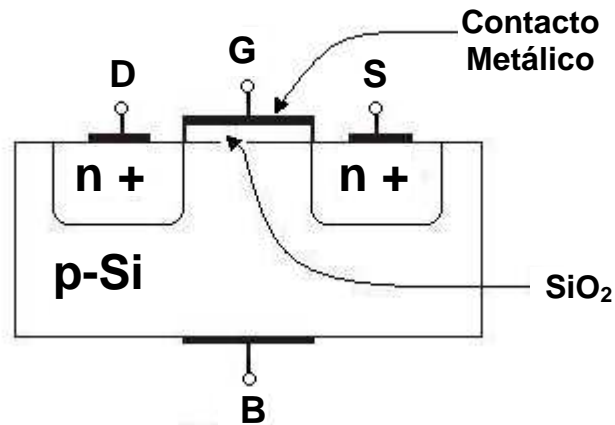


Fig. 1.1. Esquema del MOSFET.

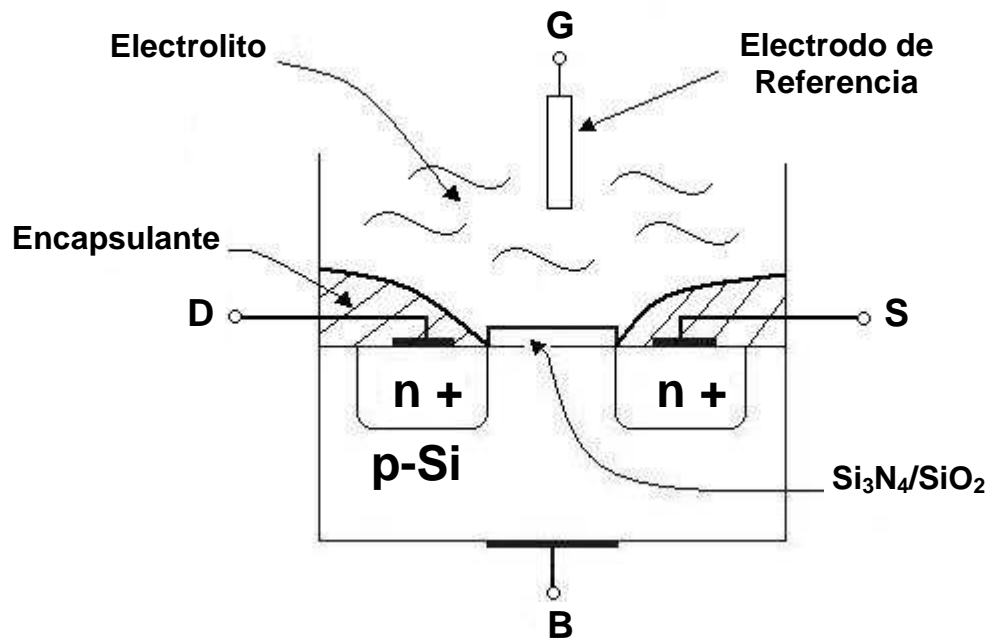


Fig. 1.2. Esquema del ISFET.

1.2. Principios de funcionamiento del ISFET.

Los fenómenos físicos y químicos que explican el funcionamiento del ISFET tienen lugar en la interfase dieléctrico-electrolito. Estos fenómenos y su relación con la respuesta del dispositivo al variar el pH, son todavía objeto de estudio. El modelo de la doble capa de Gouy-Chapman-Stern y la teoría de los centros activos o enlaces locales (Site-binding theory), permiten explicar todos los procesos que se presentan en la interfase dieléctrico-electrolito [1, 2, 3, 8, 9, 10]. Además, se toma en cuenta la teoría del MOS para dar una explicación completa de los principios de funcionamiento del ISFET.

1.2.1. Modelo de la doble capa de Gouy-Chapman-Stern.

Originalmente, la explicación del funcionamiento del ISFET se basó en una aproximación empírica que combinaba el comportamiento de los electrodos de vidrio y las características de un MOSFET. Sin embargo, lo observado experimentalmente no pudo ser completamente explicado, en especial la sensibilidad medida [9]. Este modelo fue desechado ya que la lentitud del proceso de difusión de especies químicas a través del dieléctrico, no podía explicar la rapidez observada en la respuesta del sensor comprobándose de forma experimental, que el espesor del dieléctrico no alteraba la velocidad de respuesta del ISFET [1].

La fabricación del ISFET con dieléctricos tales como Si_3N_4 , Al_2O_3 y Ta_2O_5 introdujo el modelo de las superficies bloqueadas [8]. Según este modelo, los mecanismos de distribución de carga están gobernados por procesos electrostáticos. En la interfase óxido-electrolito no tiene lugar ningún transporte

de cargas, sino que se genera una densidad de cargas superficial llamada doble capa eléctrica de Gouy-Chapman-Stern. En un primer plano se sitúan los iones específicamente absorbidos por la superficie del óxido formando el denominado plano interno de Helmholtz (IHP) y en una segunda capa se encuentran los iones solvatados formando lo que se denomina plano externo de Helmholtz (OHP) como se puede apreciar en la figura 1.3. Más allá de esta zona se encuentran las cargas de signo opuesto a la superficie del óxido atraídas electrostáticamente (conocida como zona de carga difundida o de Gouy-Chapman).

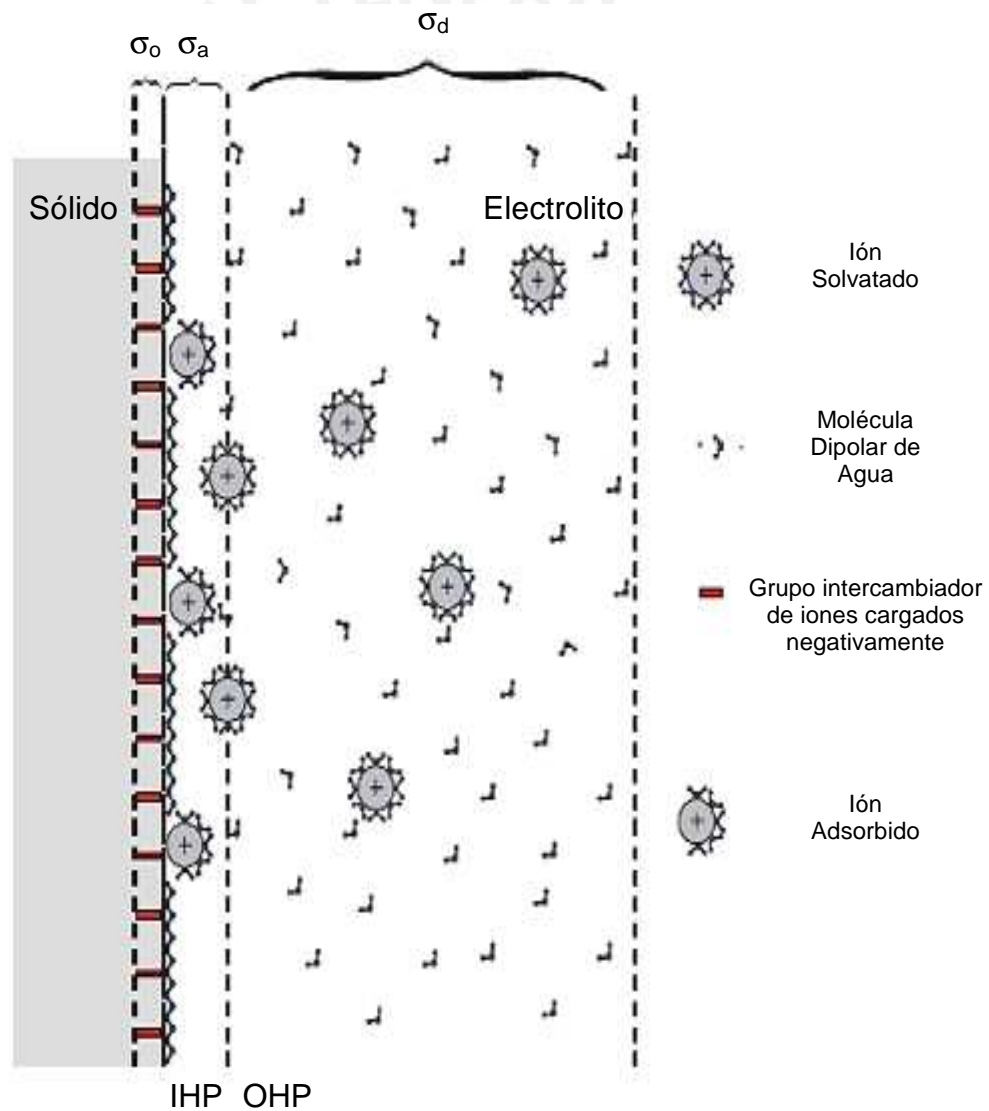


Fig. 1.3. Modelo de Gouy-Chapman-Stern para la interfase sólido - electrolito[8].

1.2.2. Teoría de los centros activos (Site-binding theory).

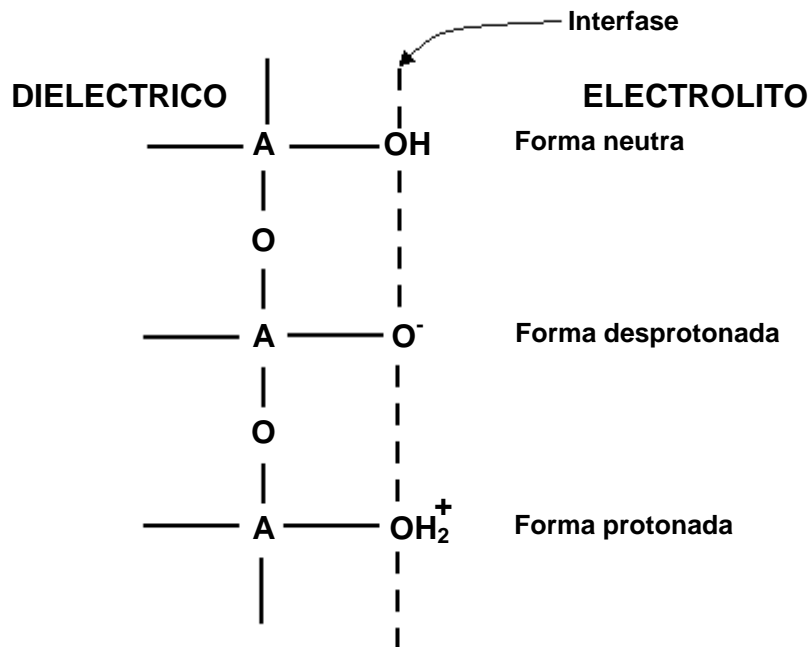
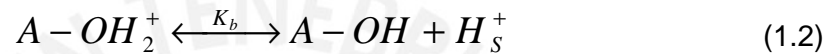
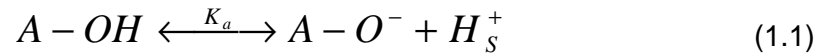


Fig. 1.4. Representación de los grupos hidroxilos en la interfase dieléctrico-electrolito.

Una aproximación más reciente en el estudio de las interfases óxido-electrolito consistió en la aplicación de modelos utilizados por químicos [10]. Estos modelos se fundamentan en la presencia de grupos intercambiadores de carga en la superficie del dieléctrico que forma la interfaz con la solución. Estos grupos pueden presentar un carácter ácido, básico o anfótero y sirven de centros discretos que participan en reacciones químicas con los iones H^+ del electrolito. Estos centros discretos, también se conocen como centros activos ya que su presencia en la superficie del dieléctrico varía la concentración de iones H^+ en la zona del electrolito cercana a la interfase [1].

A continuación se presenta una descripción de la teoría de los centros activos [1, 8, 9, 10].

Los grupos hidroxilos (OH) del SiO₂ son centros activos que, debido a su carácter anfótero, pueden ser cargados positivamente con un ión hidrógeno, negativamente al perder un protón o quedarse neutros. Así, tenemos que en la interfase dieléctrico-electrolito se presentan las siguientes reacciones químicas [1, 8, 9, 10]:



Donde $A - OH$, $A - OH_2^+$ y $A - O^-$ son respectivamente las tres formas en las que podemos encontrar a los grupos hidroxilos en la interfase dieléctrico-electrolito: neutra, protonada y desprotonada; Lo anterior se aprecia en la figura 1.4. K_a y K_b son las constantes de equilibrio, las cuales vienen dadas por:

$$K_a = \frac{[A - O^-][H_s^+]}{[A - OH]} \quad (1.3)$$

$$K_b = \frac{[A - OH][H_s^+]}{[A - OH_2^+]} \quad (1.4)$$

La relación entre la concentración de protones en el volumen del electrolito H_B^+ , la concentración existente en la interfase H_s^+ y la caída de tensión $-\psi_0$ entre ambas zonas esta dada por la ley de Boltzmann [1, 8, 9]:

$$[H^+]_s = [H^+]_B \exp\left[\frac{-q\psi_0}{kT}\right] \quad (1.5)$$

Donde k es la constante de Boltzmann ($8.62 \cdot 10^{-5}$ eV/K) y T es la temperatura.

La densidad superficial de grupos hidroxilos por unidad de área, N_s , puede ser expresada de la siguiente manera [1, 8, 9]:

$$N_s = [A - OH] + [A - OH_2^+] + [A - O^-] \quad (1.6)$$

Donde la carga neta superficial viene dada por:

$$\sigma_0 = q([A - OH_2^+] - [A - O^-]) \quad (1.7)$$

De estas expresiones se obtiene, después de algunas simplificaciones, la ecuación que establece la relación entre el potencial de la interfase óxido-electrolito y el pH de la solución [1, 8, 9]:

$$2.303(pH_{pzc} - pH) = \frac{q\psi_0}{kT} + \sinh^{-1}\left(\frac{q\psi_0}{kT} \frac{1}{\beta}\right) \quad (1.8)$$

Donde pH_{pzc} es el pH en el punto en el que la carga neta debida a los centros activos de la superficie es nula:

$$pH_{pzc} = \log\left(\frac{K_a}{K_b}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (1.9)$$

Y β es una constante que depende de la capacidad de reacción de los centros activos del óxido:

$$\beta = \frac{2q^2 N_s (K_a K_b)^{\frac{1}{2}}}{kTC_{DL}} \quad (1.10)$$

Siendo la densidad de los centros activos (N_s), una característica de cada material y C_{DL} la capacidad asociada a la doble capa eléctrica de la interfase.

Aparte de pH_{pzc} , β es el único parámetro que determina la relación entre ψ_0 y el pH. De esta forma, tenemos dos regiones para la curva ψ_0 vs pH.

para valores de β pequeños:

$$\beta \ll \frac{q\psi_0}{kT} \quad (1.11)$$

Se obtiene la siguiente expresión [1, 8, 9]:

$$2.303(pH_{pzc} - pH) = \frac{q\psi_0}{kT} + \ln\left(\frac{q\psi_0}{kT} \frac{1}{\beta}\right) \quad (1.12)$$

Siendo en este caso la respuesta del ISFET no lineal con el pH.

Para valores de β elevados:

$$\beta \gg \frac{q\psi_0}{kT} \quad (1.13)$$

Se tiene la siguiente expresión [1, 8, 9]:

$$\psi_0 = 2.303 \frac{kT}{q} \frac{\beta}{\beta + 1} (pH_{pzc} - pH) \quad (1.14)$$

De estas ecuaciones se aprecia la importante influencia que ejerce la reactividad de la superficie (K_a y K_b) y la densidad de centros activos (N_s) en la sensibilidad del ISFET. Para valores bajos de β la respuesta será no-lineal y poco sensible al pH, especialmente alrededor del pH_{pzc} ; mientras que para valores elevados de β la respuesta será lineal con el pH.

1.2.3. Teoría de los centros activos extendida.

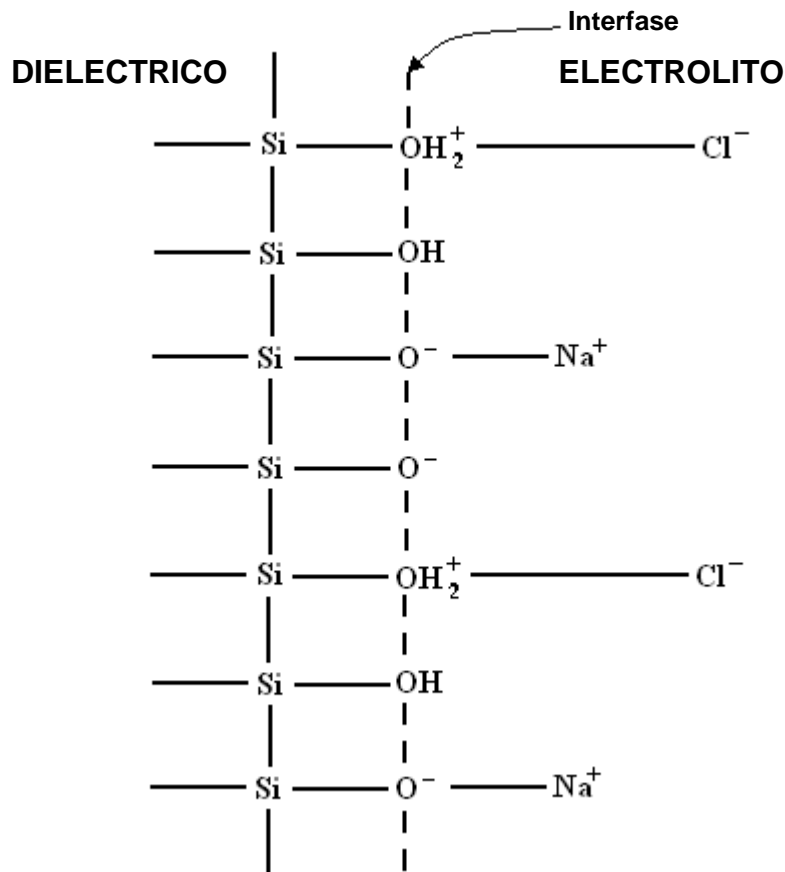
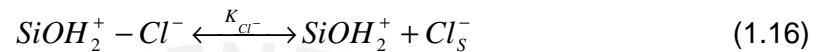
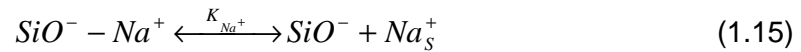


Fig. 1.5. Representación de los grupos hidroxilos en la interfase dieléctrico-electrolito incluyendo la absorción de los iones Na^+ y Cl^- .

La teoría de los centros activos fue extendida con el propósito de incluir situaciones con otros iones en la solución además del hidrógeno. Tomando al NaCl como un ejemplo típico de electrolito soporte, se tienen las siguientes expresiones de equilibrio [8, 9]:



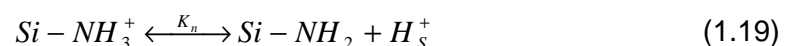
Donde las constantes de equilibrio vienen dadas por:

$$K_{Na^+} = \frac{[SiO^-][Na^+]_s}{[SiO^- - Na^+]} \quad (1.17)$$

$$K_{Cl^-} = \frac{[SiOH_2^+][Cl^-]_s}{[SiOH_2^+ - Cl^-]} \quad (1.18)$$

En la gráfica 1.5 se presenta la estructura de la interfase dieléctrico-electrolito según la teoría de los centros activos extendida.

En el caso del nitrato de silicio, se tienen grupos hidroxilos y grupos aminos, como intercambiadores de carga. En este caso también se manifiestan las reacciones químicas ya observadas donde interviene el grupo hidroxilo. Además, debido a la presencia del grupo amino en la interfase, ocurre una tercera reacción química. Esta reacción se puede expresar de la siguiente manera [1, 8]:



$$K_n = \frac{[Si-NH_2][H_s^+]}{[Si-NH_3^+]} \quad (1.20)$$

Donde K_n es la constante de equilibrio de la reacción química.

La densidad superficial del grupo amino (N_t) se expresa de la siguiente manera [1, 8]:

$$N_t = [Si-NH_2] + [Si-NH_3^+] \quad (1.21)$$

1.2.4. Variables que afectan el comportamiento del ISFET.

Para entender bien el funcionamiento del ISFET es importante conocer las variables que afectan su comportamiento.

1.2.4.1. Temperatura.

La dependencia térmica de los ISFETs puede ser explicada en términos de la teoría estándar del MOSFET y la teoría de los centros activos (site – binding theory), junto con la característica pH – temperatura del electrolito. Los factores más afectados por la temperatura en MOSFETs e ISFETs son el voltaje umbral y la movilidad de los portadores en el canal de los transistores [7, 9].

La movilidad es la función inversa de la temperatura absoluta (T) [7]:

$$\mu(T) = \mu(300K) \left(\frac{300}{T} \right)^n \quad (1.22)$$

Donde el factor n depende de la concentración de impurezas y su valor está entre 1.0 y 1.5.

La dependencia térmica en el voltaje umbral se observa principalmente en el potencial Fermi ϕ_F [1, 7]:

$$\phi_F = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_{SUB}}{n_i} \quad (1.23)$$

Donde N_{SUB} es el dopaje en el sustrato, k es la constante de Boltzmann, q es la magnitud de la carga eléctrica ($1.6 \cdot 10^{-19}$ C) y n_i es la concentración de portadores de un semiconductor intrínseco.

De acuerdo a la teoría de centros activos y a la característica pH – temperatura del electrolito, la influencia térmica se ve reflejada en la expresión de sensibilidad al pH del ISFET [1, 2, 7]:

$$\frac{\partial \psi_o}{\partial pH} = -2.3 \frac{kT}{q} \alpha \quad (1.24)$$

Donde α es un parámetro de sensibilidad, el cual también es dependiente de la temperatura.

A continuación se presentan algunas alternativas desarrolladas para eliminar la dependencia térmica de los ISFETs [1]:

Utilizar una instrumentación que polarice al sensor con una corriente de drenador térmicamente estable. Este valor debe estar bien determinado, lo que sólo es posible por vía experimental, caracterizando individualmente cada ISFET.

Inyectar una señal de alta frecuencia en el sustrato del dispositivo semiconductor. Mediante el procesamiento de señales se puede separar la respuesta química de la respuesta térmica.

Emplear alguna técnica de compensación. Por ejemplo, el uso de un par ISFET – REFET en conjunto con un circuito de medida diferencial atenúa eficazmente el efecto de la temperatura en el funcionamiento del ISFET. Otra posibilidad es la implementación de una compensación numérica, añadiendo un sensor de temperatura junto al ISFET. Al medir el pH se mide también la temperatura y en dependencia de la magnitud de esta última variable se realiza una corrección a la señal de pH. La corrección solo puede realizarse si somos capaces, por vía empírica, de modelar el comportamiento del ISFET con la temperatura. Este modelo matemático se puede almacenar en una memoria EPROM asociada a la instrumentación del ISFET o puede servir de guía para el diseño de un circuito electrónico de compensación térmica.

1.2.4.2. Electrodo de Referencia.

En los inicios del ISFET se creía que bajo ciertas condiciones, éste podría medir con éxito la actividad iónica sin la necesidad de introducir un electrodo de referencia en la solución [1, 7, 9]. Sin embargo esta primera idea fue discutida por químicos, físicos y electrónicos.

Los químicos que usan electrodos sensibles a iones, tales como los electrodos de vidrio o los electrodos de alambre cubierto, miden el potencial interfacial a través de la interfase membrana – líquido. Y es claro que dicha diferencia de potencial sólo puede ser medida vía dos contactos eléctricos; por eso, es necesario que un electrodo de referencia establezca contacto eléctrico con la solución. Para los químicos, los cuales miran al ISFET como un electrodo selectivo a iones, queda bien establecida la premisa de utilizar un electrodo de referencia para realizar las medidas con un ISFET [1, 9].

Los físicos de estado sólido y electrónicos plantearon que para utilizar el ISFET no era necesario un electrodo de referencia, debido a que la sensibilidad del dispositivo era provocada por las cargas interfaciales y no por el potencial generado en la interfaz dieléctrico – electrolito. Esto fue propuesto para ISFETs con puertas de óxido de silicio donde, después de la hidratación del óxido, esta capa actuaba como un conductor iónico selectivo estableciendo un equilibrio termodinámico con el sustrato de silicio. Posteriormente fue descubierto que el dióxido de silicio no es el mejor material para servir de intermediario entre el silicio y una solución acuosa, porque no es el buen conductor iónico necesario para el funcionamiento de los electrodos selectivos a iones, ni el buen aislante requerido para la utilización de un dispositivo FET. Este hecho obligó a depositar una capa aislante adicional en la puerta del sensor, como por ejemplo el nitruro de silicio, la alúmina o el óxido de tántalo. La adición de esta capa aislante uniformizó los conceptos en los investigadores acerca del principio de operación del ISFET, quedando bien establecida la idea de la variación del potencial superficial entre el dieléctrico y el electrolito como causa de la sensibilidad del dispositivo. Para medir este potencial superficial entre el dieléctrico y el electrolito se necesita un electrodo de referencia que cierre el circuito por la solución [1, 9].

El electrodo que usualmente se utiliza para trabajar con los ISFETs es el electrodo de referencia Ag/AgCl. El estándar electrodo Ag/AgCl consta de tres fases: un alambre de plata que provee un contacto para el voltaje aplicado, una capa sólida de cloruro de plata y una solución líquida con una gran concentración de KCl constante, la cual incrementa la resistencia del electrodo. KCl mantiene la concentración de Cl constante, debido a que el electrodo es sensible al Cl. Por lo anterior, la interacción se lleva a cabo en la interfaz KCl – solución y no directamente en la interfaz electrodo – solución. Sin embargo, este tipo de electrodo es difícil de miniaturizar. En el caso de soluciones biológicas, como CSF, se puede usar un seudo-electrodo de referencia. Este se basa en el mismo proceso de fabricación de un electrodo de referencia común pero excluyendo la fase líquida; usando el hecho que los fluidos biológicos tienen relativamente una gran concentración constante de iones de cloruro [7].

Una técnica alternativa es el uso de dos ISFETs (con distintas sensibilidades químicas) operando en modo diferencial con un cuasi-electrodo de referencia, ésta configuración se muestra en la figura 1.6. Esta técnica permite una fácil integración “on-chip” de ambos sensores y del electrodo de referencia. Si bien el potencial de la interfaz electrodo – solución varía con la composición de la solución, el circuito de medición diferencial rechaza la variación del potencial de la interfaz como una señal de modo-común. Esta estructura tiene la ventaja adicional de reducir las interferencias externas que afectan a ambos ISFETs (como por ejemplo luz y temperatura) [7].

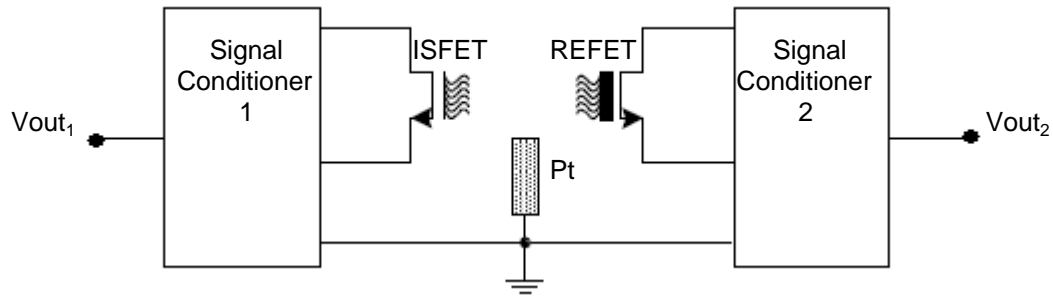


Fig. 1.6. Configuración diferencial ISFET/REFET con cuasi-electrodo de referencia [7].

1.2.4.3. Deriva Temporal.

La deriva temporal del ISFET se puede asociar a una variación “espontánea” y sin seguir una ley bien definida de la respuesta del sensor (voltaje umbral del ISFET) en el tiempo. El adjetivo espontánea se utiliza para denotar que a pesar de mantener constantes las variables del experimento (pH, temperatura, iluminación y conductividad) la señal eléctrica de salida presenta una determinada variación. Es decir, la deriva es una variación no controlada de la señal en el tiempo y su causa aún no es conocida en detalle [1].

La deriva que ocurre en la puerta del ISFET es probablemente debido a la formación de una delgada capa de gel sobre la superficie de la puerta. Esta capa provoca interferencias en las reacciones químicas que ocurren en la interfaz, donde participan los grupos intercambiadores de carga. Hay un periodo inicial de deriva, el cual puede durar varias horas (típicamente 8 horas para el SiO_2 y 2 horas para el Si_3N_4), seguido por un periodo de estabilización donde la deriva se reduce y se vuelve lineal. Los efectos producidos por la deriva pueden ser eliminados efectivamente con el uso de ciertas técnicas tales como análisis de

inyección de flujo (flow-injection analysis) o análisis alterno de analitos (analyte-chopping analysis) [9].

1.2.4.4. Resistencias parásitas de fuente y drenador.

Los ISFETs con frecuencia incorporan resistencias internas de fuente y drenador relativamente grandes. Esto es resultado de problemas en el encapsulado, debido a que los contactos eléctricos están lejos del área de la puerta del sensor. Como consecuencia de lo anterior se forman difusiones de fuente y drenador con un largo de varios milímetros [9]. Una posibilidad para disminuir el valor de estas resistencias es realizar difusiones profundas y altamente dopadas [1]. La figura 1.7 muestra la representación del ISFET considerando las resistencias de fuente (R_S) y drenador (R_D).

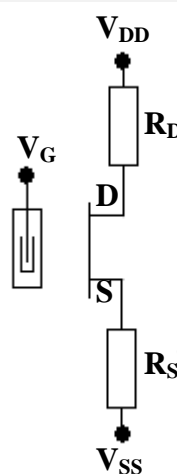


Fig. 1.7. Representación del ISFET considerando las resistencias de fuente y drenador.

Después de aplicar la ley de Kirchhoff de voltaje y la ley de Ohm se tienen las siguientes expresiones [1]:

$$V_{DDSS} = V_{DS} + I_{DS} * (R_S + R_D) \quad (1.25)$$

$$V_{GSS} = V_{GS} + I_{DS} * R_S \quad (1.26)$$

Donde V_{DS} es el voltaje drenador-fuente, V_{GS} es el voltaje puerta-fuente e I_{DS} es la corriente de drenador. Conociendo estas expresiones se pueden identificar que variaciones sufrirá la I_{DS} .

1.2.4.5. Iluminación.

Los ISFETs al igual que la mayoría de semiconductores presentan un grado de sensibilidad óptica [9]. Lo anterior es debido a que la solución electrolítica permite el paso de fotones al sustrato del semiconductor. En la mayoría de aplicaciones prácticas la iluminación no presenta un problema serio, sin embargo no debe ser menospreciado.

En la práctica cuando una falla en el encapsulado ocurre y se forma una vía de escape para la corriente entre la solución y el sensor, la corriente resultante usualmente es muy sensible a la luz. Como consecuencia, el ISFET exhibe una gran sensibilidad óptica [9].

Realizar medidas en condiciones de oscuridad o de iluminación constante puede ser una manera de evitar la influencia de la luz sobre el sensor aunque esta solución no siempre es factible. También se puede modificar la puerta del ISFET añadiendo un filtro óptico que no altere la sensibilidad química y que impida la llegada de los fotones al semiconductor. No existen filtros que atenúen todo el espectro de longitudes de onda de las radiaciones luminosas, pero se puede

tratar de conocer las longitudes de onda que más afectan el funcionamiento del ISFET y optimizar el diseño del filtro[1].

1.2.4.6. Efecto de cuerpo.

El voltaje umbral del FET en tecnología CMOS es expresado como [1, 7]:

$$V_{TH} = V_{FB} - \frac{Q_B}{C_{OX}} + 2\phi_F \quad (1.27)$$

Donde V_{FB} es el voltaje de banda plana, C_{OX} es la capacidad del óxido, Q_B es la densidad de carga por unidad de área en la zona del semiconductor cercana a la interfaz y ϕ_F es el potencial de Fermi. En el caso del ISFET se asume que V_{FB} es sensible al cambio del pH, también se asume que Q_B , ϕ_F y C_{OX} son constantes y no influenciados por el cambio de pH.

Sin embargo, el voltaje umbral (V_{TH}) no es constante con respecto a la diferencia de voltaje sustrato-fuente (V_{BS}). Cuando V_{BS} no es 0, la expresión para el voltaje umbral es modificado para incorporar V_{BS} como sigue [1, 7]:

$$V_{TH} = V_{FB} + 2\phi_F + \frac{\sqrt{2K_S \epsilon_O q N_A (2\phi_F + |V_{BS}|)}}{C_{OX}} \quad (1.28)$$

Donde K_S es la constante dieléctrica del semiconductor, ϵ_O es la permitividad del vacío y N_A es la concentración de impurezas aceptoras en el semiconductor. Esta expresión es crítica, debido a la influencia de V_{BS} en el valor de V_{TH} en

implementaciones on-chip de ISFETs de canal n. Si el valor de V_{BS} consigue llegar a un valor diferente de cero causa un cambio en V_{TH} , el cual no es producido debido al cambio del nivel de pH.

El error que ocurre debido al efecto de cuerpo es significativo, depende de la tecnología de fabricación y el punto de operación. El voltaje umbral puede variar mas de la mitad de su valor original [7].

1.2.4.7. Ruido 1/f.

Como el ISFET es básicamente un MOS, las fuentes de ruido para el ISFET son similares al del MOSFET. En el caso de mediciones clínicas de fluidos biológicos, las fluctuaciones de los valores del pH son relativamente lentas y un único sensor ISFET opera a frecuencias que no exceden varios Hertz. Por lo anterior, el principal ruido que limita el funcionamiento del ISFET es el ruido 1/f [7].

El fenómeno del ruido 1/f es producido debido a las fluctuaciones aleatorias del número de portadores en el canal. Las fluctuaciones se producen porque los portadores son capturados y liberados por trampas ubicadas cerca de la interfaz silicio-dióxido de silicio.

La medida de la corriente de drenador del ISFET muestra una buena concordancia con el ruido 1/f cuando este se puede expresar en la región de saturación de la siguiente manera [7]:

$$S_{id}(f) = \frac{K_F I_{DS}}{C_{OX} L^2 f} \quad (1.29)$$

Donde S_{id} es densidad espectral del ruido en la corriente de drenador y K_F es una cantidad dependiente del proceso de fabricación.

De acuerdo a la expresión anterior el ruido $1/f$ puede ser minimizado controlando la frecuencia de operación del sensor. El desarrollo de interfaces que realicen el sobremuestreo de la señal a frecuencias más altas que las fluctuaciones básicas de pH, permitirán la reducción del ruido $1/f$.

1.3. Expresiones matemáticas del ISFET.

Las expresiones para la corriente de drenador del MOSFET en la región no saturada y la región de saturación son respectivamente las siguientes [1, 2]:

$$I_{DS} = C_{ox}\mu \frac{W}{L} \left[(V_{GS} - V_{TH})V_{DS} - \frac{1}{2}V_{DS}^2 \right] \quad (1.30)$$

$$I_{DS} = C_{ox}\mu \frac{W}{2L} (V_{GS} - V_{TH})^2 \quad (1.31)$$

Donde:

V_{TH} es el voltaje umbral.

C_{ox} es la capacidad en el óxido por unidad de área.

W es el ancho del canal.

L es el largo del canal.

μ es la movilidad de los electrones en el canal.

En el caso del ISFET las expresiones tanto para la corriente de drenador en la región no saturada como para la región de saturación son respectivamente las siguientes [1,2]:

$$I_{DS} = C_{ef} \mu \frac{W}{L} \left[(V_{GS} - V_{TH}) V_{DS} - \frac{1}{2} V_{DS}^2 \right] \quad (1.32)$$

$$I_{DS} = C_{ef} \mu \frac{W}{2L} (V_{GS} - V_{TH})^2 \quad (1.33)$$

Siendo C_{ef} la capacitancia efectiva por unidad de área, cuya expresión viene dada por:

$$C_{ef} = \frac{C_{ox} C_M}{C_{ox} + C_M} \quad (1.34)$$

$$C_{ox} = \frac{K_{ox} \epsilon_o}{t_{ox}} \quad C_M = \frac{K_M \epsilon_o}{t_M} \quad (1.35)$$

Donde:

C_M es la capacitancia de la capa inorgánica.

K_{ox} es la constante dieléctrica del óxido.

K_M es la constante dieléctrica de la capa de membrana inorgánica.

t_{ox} es espesor de la capa de óxido.

t_M es el espesor de la capa de membrana inorgánica.

ϵ_o es la permitividad del vacío.

Otra expresión importante del MOSFET es la del voltaje umbral [1,2]:

$$V_{TH} = \frac{\phi_M - \phi_{Si}}{q} - \frac{Q_{ox} + Q_{ss} + Q_B}{C_{ox}} + 2\phi_f \quad (1.36)$$

Siendo:

Φ_M el trabajo de extracción del metal.

Φ_{Si} el trabajo de extracción del semiconductor (Silicio).

Q_{ox} la carga acumulada en el óxido.

Q_{ss} la carga acumulada en la interfaz óxido-semiconductor.

Q_B la densidad de carga por unidad de área en la zona del semiconductor cercana a la interfaz.

ϕ_f el potencial de valor constante, cuyo valor depende de la concentración de impurezas en el semiconductor y da una idea de la separación del nivel de Fermi del semiconductor con el nivel de Fermi intrínseco.

$$\phi_f = \frac{KT}{q} U_f \quad (1.37)$$

Donde:

T es la temperatura del semiconductor, en grados Kelvin.

K es constante de Boltzman ($8.62 \cdot 10^{-5}$ eV/K).

U_f es el parámetro de dopamiento del semiconductor.

En el caso del ISFET, la sustitución del metal por un electrolito produce la alteración del primer término del miembro derecho; además, la necesidad de utilizar un electrodo de referencia para realizar el contacto eléctrico con el electrolito nos obliga a no olvidar la contribución de potencial de este electrodo.

También debemos tomar en consideración los efectos del potencial generado en la interfase electrolito – dieléctrico. Debido a lo anterior, la expresión del voltaje umbral es la siguiente [1,2]:

$$V_{TH} = E_{ref} - \psi + \chi^{sol} - \frac{\phi_{Si}}{q} - \frac{Q_{ox} + Q_{ss} + Q_B}{C_{ox}} + 2\phi_f \quad (1.38)$$

Los términos no conocidos tienen el siguiente significado:

E_{ref} es la caída de potencial en el electrodo de referencia.

ψ es el potencial superficial en la interfaz dieléctrico – electrolito, el cual es dependiente de la concentración de iones H^+ (pH) de la solución.

χ^{sol} es el potencial dipolar de la superficie en la interfaz dieléctrico – electrolito.

Un ISFET puede ser tratado como un MOSFET y conectarse a un trazador de curvas con el electrodo de referencia conectado al V_{GS} , las curvas I_{DS} vs V_{DS} pueden ser obtenidas como función de V_{GS} como es usualmente hecho con los MOSFETs (figura 1.8). Sin embargo, con el electrodo de referencia conectado a la fuente ($V_{GS} = 0$) curvas similares pueden conseguirse cambiando el pH ($\psi = f\{pH\}$) de la solución [2] (figura 1.9).

Se aprecia en la figura 1.8 que las curvas coinciden con las curvas típicas que se obtienen para un MOSFET, lo cual era de esperar debido a todo lo expuesto en el presente capítulo.

Por otro lado, las curvas que se observan en la figura 1.9 pueden ser explicadas con la ayuda de las ecuaciones 1.32 y 1.33. Al revisar estas ecuaciones se observa que la expresión $(V_{GS} - V_{TH})$ es la responsable de la variación de las

curvas y como V_{GS} se mantiene constante, se concluye que la variación del V_{TH} con el pH de la solución constituye la causa de las modificaciones de la I_{DS} .

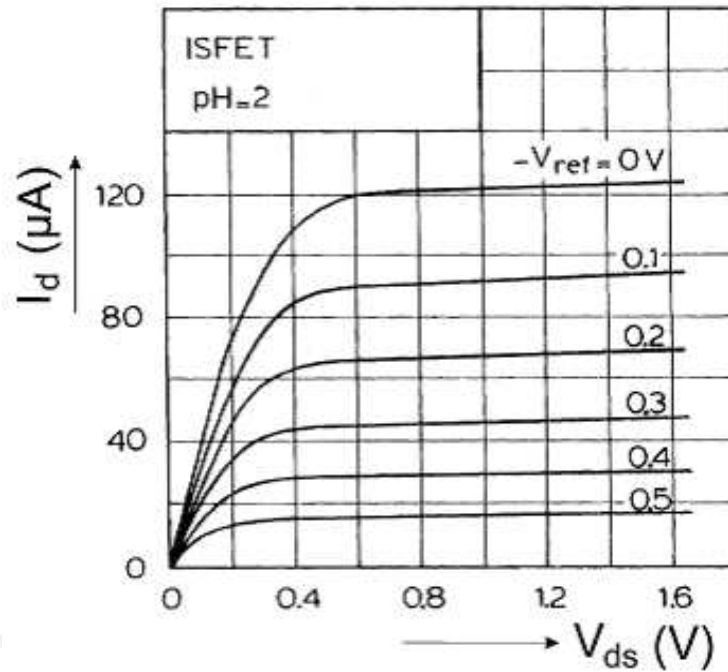


Fig. 1.8. I_{DS} vs V_{DS} de un ISFET con V_{GS} como parámetro [2].

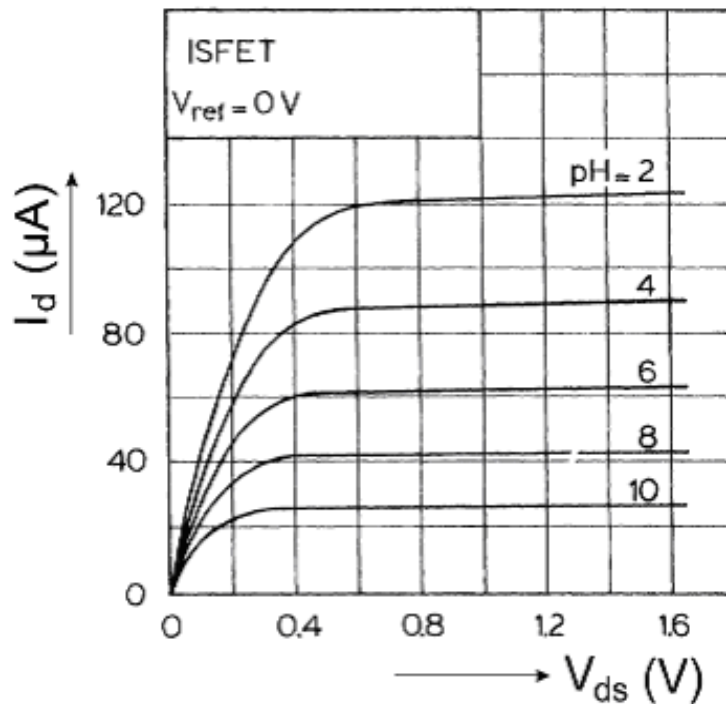


Fig. 1.9. I_{DS} vs V_{DS} de un ISFET con pH como parámetro [2].

Teniendo en cuenta todo lo presentado en este capítulo, es posible representar al MOSFET y al ISFET utilizando el mismo circuito electrónico para ambos. Este circuito puede ser apreciado en la figura 1.10.

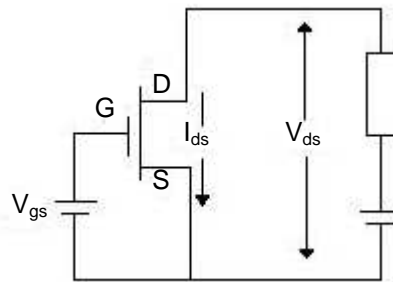


Fig. 1.10. Modelo de circuito Electrónico del MOSFET e ISFET.



Capítulo 2
Circuitos electrónicos asociados al
ISFET.

2.1. Instrumentación asociada al ISFET.

Para obtener una señal de medición, el ISFET tiene que ser asociado a un circuito analógico que sirva como interfaz. Los dispositivos con los que se relaciona al ISFET normalmente son: amplificadores operacionales, fuentes de corriente y MOSFETs; los cuales son combinados en diversos circuitos con realimentación, manteniendo la corriente de drenador del ISFET constante y/o el voltaje drenador-fuente del ISFET constante.

2.1.1. Convertidor de corriente a voltaje.

El circuito que se muestra en la figura 2.1 es útil para medir la corriente de drenador (I_{DS}) [11].

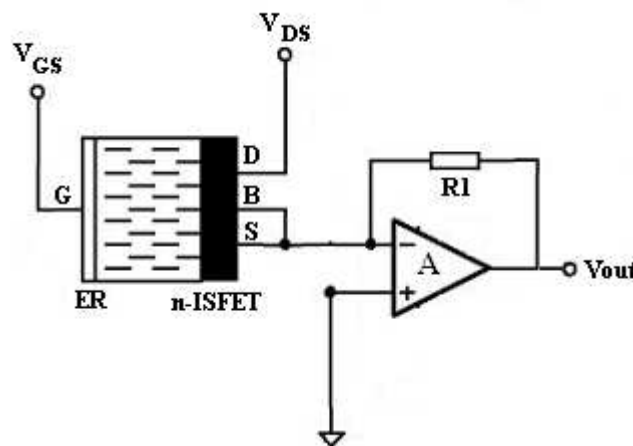


Fig. 2.1. Convertidor corriente – voltaje.

G es la puerta, D es el drenador, S es la fuente, B es el sustrato, ER es el electrodo de referencia, V_{GS} es el voltaje puerta-fuente y V_{DS} es el voltaje

drenador-fuente. La corriente que se desplaza a través de la resistencia R_1 genera un voltaje de salida (V_{out}). La ecuación para V_{out} es la siguiente:

$$V_{out} = -I_{DS} * R_1 \tag{2.1}$$

2.1.2. Amplificador con realimentación negativa al electrodo de referencia.

En la figura 2.2 se muestra un circuito con realimentación negativa al electrodo de referencia [7, 9]. Debido a que las mediciones son potenciométricas, se mantienen constantes la I_{DS} y la V_{DS} .

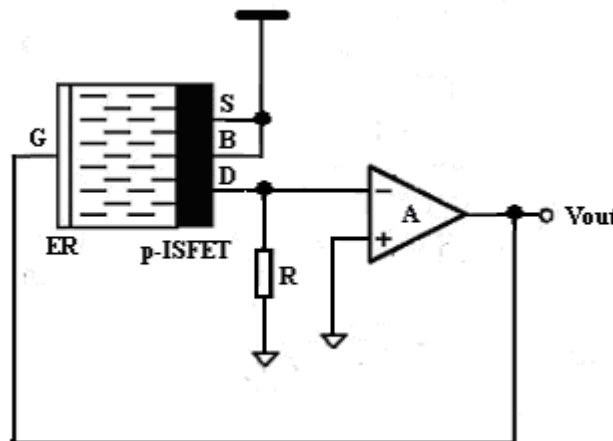


Fig. 2.2. Amplificador con realimentación negativa al electrodo de referencia.

La precisión del sistema mejora con el crecimiento de la ganancia A del amplificador, debido a que la amplificación es:

$$\frac{\partial V_{out}}{\partial \psi_o} = \frac{A}{1 + A} \tag{2.2}$$

El sistema es muy útil para experimentos con el ISFET hechos en laboratorio; sin embargo, tiene dificultades cuando se usan simultáneamente mas de un ISFET debido a que sólo se utiliza un electrodo de referencia [7,9].

En la figura 2.3 se observa un circuito que utiliza una resistencia en configuración pull-up para un n-ISFET, de esta forma se mantiene constante el voltaje sustrato-fuente ($|V_{BS}| = 0$ [7]).

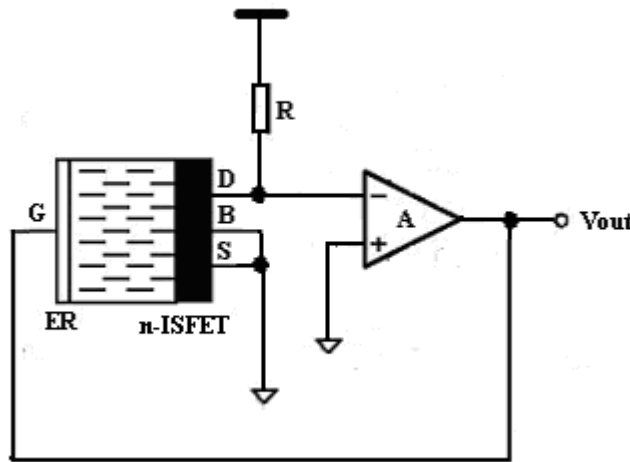


Fig. 2.3. Amplificador con realimentación negativa con resistencia en configuración pull-up.

2.1.3. Circuito con realimentación a la fuente.

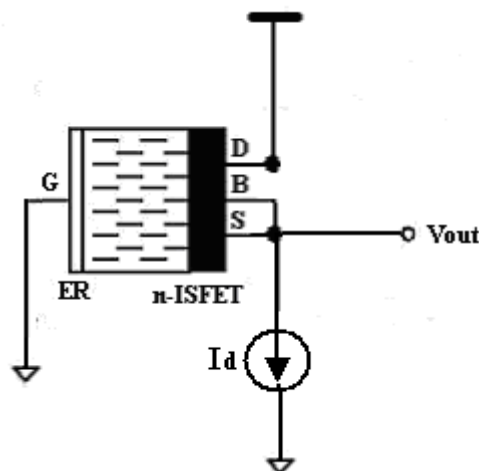


Fig. 2.4. Circuito con realimentación a la fuente.

La figura 2.4 muestra un circuito con realimentación a la fuente [7, 9]. En este circuito una fuente de corriente (I_d) mantiene constante la I_{DS} resultando un voltaje de fuente (V_S), para esto el voltaje de la puerta (V_G) y el voltaje de drenador (V_D) deben mantenerse constantes.

La precisión del sistema depende principalmente del valor de la resistencia de la corriente diferencial de fuente (R_{CS}), lo cual puede ser apreciado en la siguiente expresión [7, 9]:

$$dV_S = dV_{out} = \frac{d\psi_o}{1 + \frac{1}{R_{CS}g_m}} + \frac{dV_{DS}}{\frac{1}{g_d} \left(\frac{1}{R_{CS}} + g_m \right)} \quad (2.3)$$

Donde g_m es la transconductancia y g_d es la conductancia del drenador.

El circuito no es adecuado para implementaciones discretas, ya que la gran impedancia de las conexiones eléctricas causa una caída de señal y ruido. Un problema adicional es el “efecto de cuerpo” en el ISFET [7].

2.1.4. Amplificador diferencial ISFET/MOSFET.

En la figura 2.5 se puede apreciar un circuito amplificador conformado por un ISFET, un MOSFET, un amplificador operacional y una fuente de corriente (I_d) con realimentación de la señal de salida (voltaje) a la entrada del MOSFET. Este concepto es conocido como realimentación indirecta (indirect feedback) [7, 9].

La amplificación del circuito esta dado por la expresión:

$$\frac{\partial V_{out}}{\partial \psi_o} = \frac{A}{A+1} \quad (2.4)$$

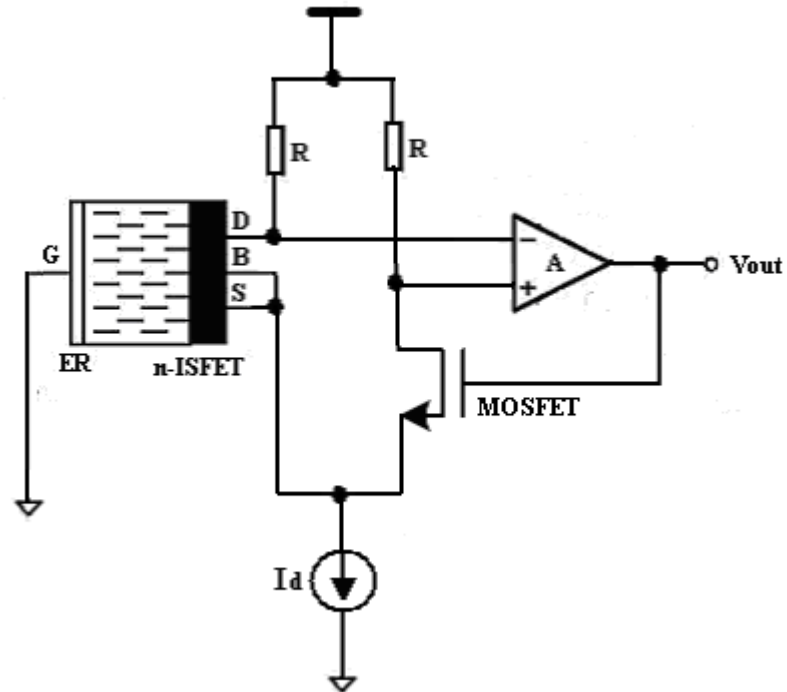


Fig. 2.5. Amplificador diferencial ISFET/MOSFET.

Los cambios inducidos por la temperatura en la corriente de drenador tanto para el ISFET como para el MOSFET son eliminados por la etapa de entrada diferencial, debido a que es una señal en modo común. Finalmente obtenemos un voltaje de salida térmicamente estable [9].

2.1.5. Seguidor de fuente y drenador.

En la figura 2.6 se aprecia un sistema seguidor de fuente y drenador. Este sistema está conformado por un amplificador de instrumentación (A_1 , A_2 y A_3), una fuente de alimentación con una fuente de corriente, un voltaje de referencia ajustable (V_{ref}) y un amplificador operacional (A_4) [7, 9].

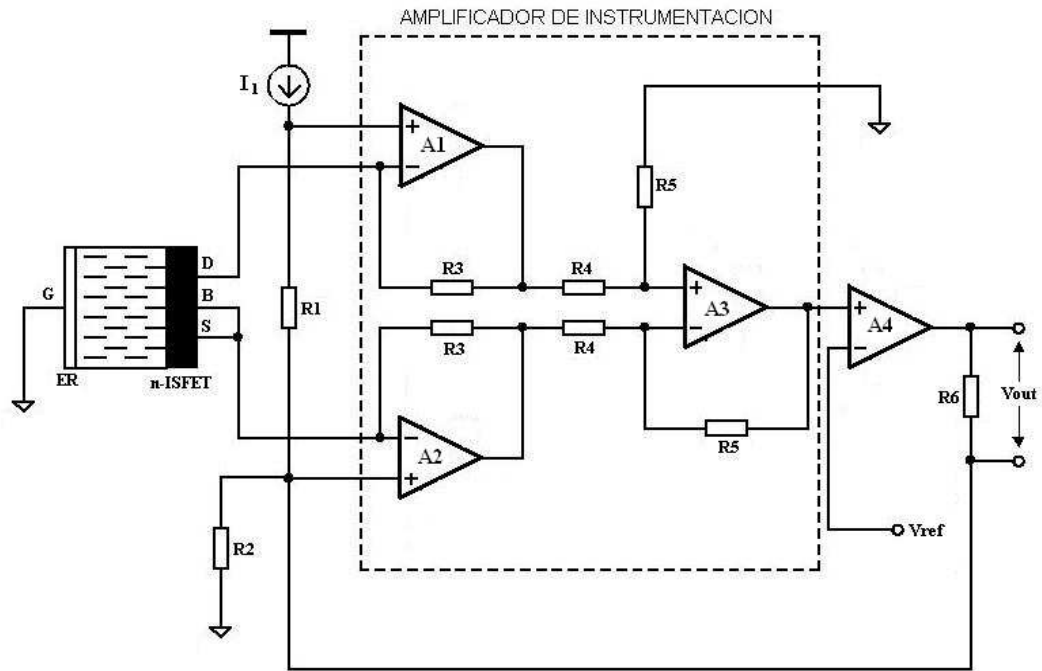


Fig. 2.6. Sistema seguidor de fuente y drenador.

Como la resistencia de entrada de los amplificadores operacionales es elevada, toda la corriente I_1 circula por la resistencia R_1 . Así mismo, la diferencia de potencial entre las entradas de los amplificadores operacionales A_1 y A_2 es nula. De lo anterior se concluye que la expresión para el V_{DS} es la siguiente:

$$V_{DS} = I_1 R_1 \quad (2.5)$$

La corriente I_{DS} se mantiene constante y el cambio del voltaje umbral (V_{TH}) es amplificado hacia la salida a través de la resistencia R_6 por la relación:

$$\Delta V_{out} = \Delta V_{TH} \left(\frac{R_6}{R_2} \right) \quad (2.6)$$

Las conexiones para fuente y drenador del ISFET son simétricas y de muy baja resistencia debido a la realimentación interna de los amplificadores A_1 y A_2 , lo

cual hace que este sistema sea atractivo para implementaciones discretas donde son usados cables largos [7, 9].

2.1.6. Circuito de corrientes constantes.

En la figura 2.7 se muestra un circuito que trabaja con dos fuentes de corriente (I_1 e I_2) y dos amplificadores operacionales [7, 12]. Este circuito se basa en el mismo principio que el sistema seguidor de fuente y drenador, y es una interesante alternativa para la integración de circuitos discretos o circuitos monolíticos con p-ISFETs.

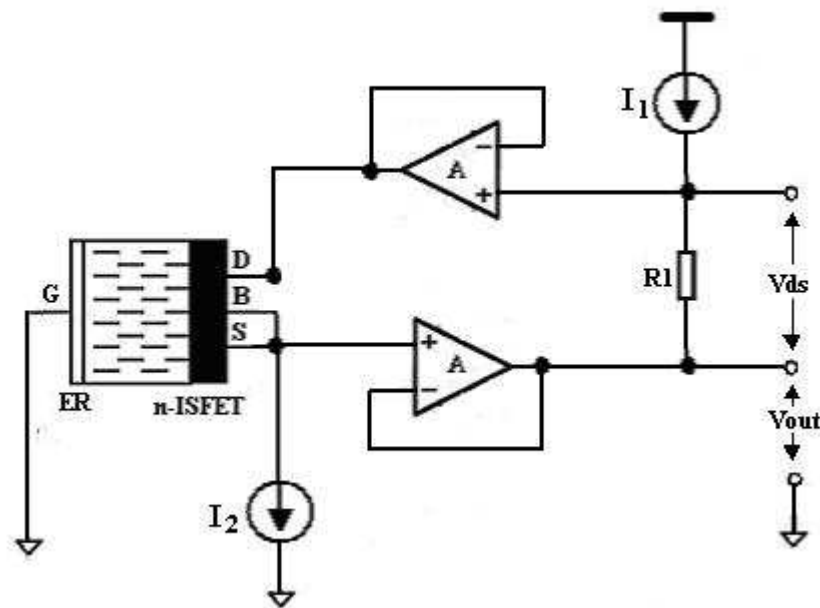


Fig. 2.7. Circuito de corrientes constantes.

La corriente I_1 produce un voltaje en la resistencia R_1 ; el seguidor de voltaje refleja este voltaje hacia los terminales fuente y drenador del ISFET, entonces $V_{DS} = I_1 \cdot R_1$. La corriente de drenador se mantiene constante debido a I_2 , el ISFET

trabaja en la región lineal y el voltaje de salida (V_{out}) es calculado por la siguiente expresión:

$$V_{out} = -V_{TH} (ISFET) - \frac{I_2}{\beta I_1 R_1} - \frac{I_1 R_1}{2} \quad (2.7)$$

2.1.7. Circuito con realimentación para sistemas discretos.

En la figura 2.8 se observa un circuito con realimentación, el cual se utiliza para pruebas con sistemas discretos [7].

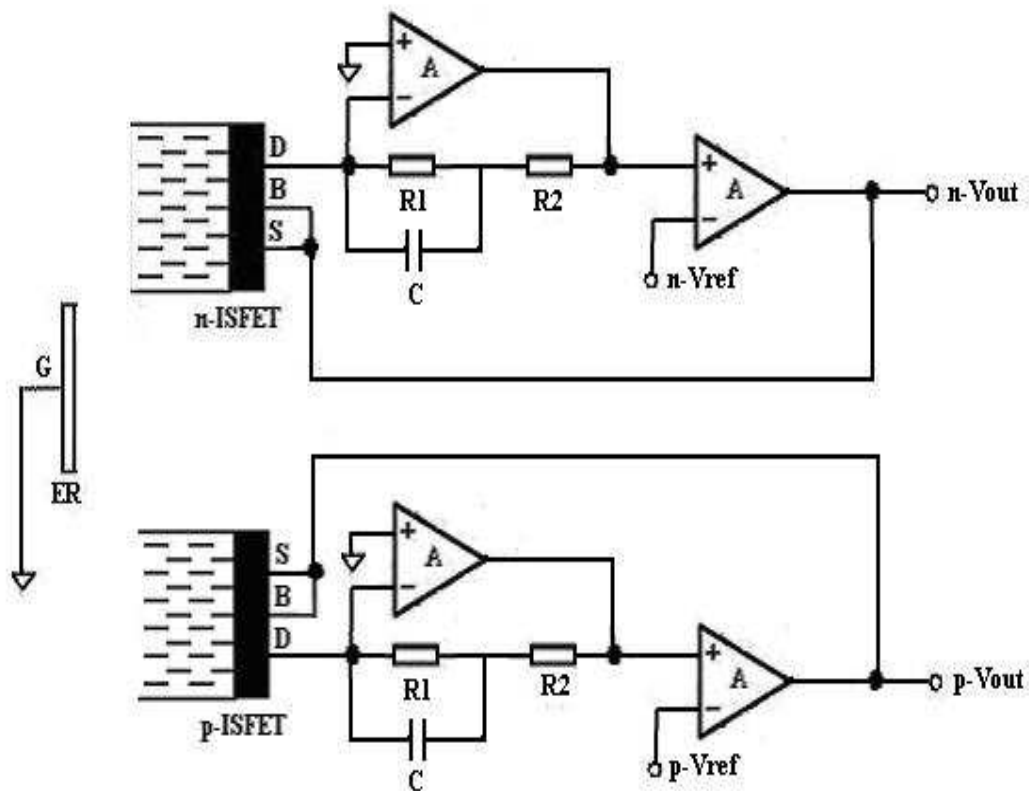


Fig. 2.8. Circuito con realimentación para sistemas discretos.

Las siguientes expresiones describen el funcionamiento del circuito:

$$I_{DS} = \frac{V_{ref}}{R_1 + R_2} \quad (2.8)$$

$$V_{out} = V_{DS} = V_{GS} (pH) \quad (2.9)$$

Este sistema permite medir simultáneamente n-ISFETs y p-ISFETs, manteniendo constante la corriente de drenador. Cada cambio en V_{TH} debido a una modificación del pH resulta en un cambio de I_{DS} , lo cual causa un incremento de V_{out} .

El “efecto de cuerpo” tiene que ser considerado cuando se utiliza esta configuración en microistemas monolíticos CMOS. En ISFETs de canal n, la señal de realimentación que regresa a la fuente causa que $|V_{BS}| > 0$. Lo anterior produce un incremento en V_{TH} , el cual no se debe a una modificación del pH. El problema puede ser resuelto usando un circuito con realimentación indirecta, donde la señal de salida llega a la fuente de un PMOS, con lo cual se consigue mantener $|V_{BS}| = 0$ [7]. En la figura 2.9 se muestra dicho circuito.

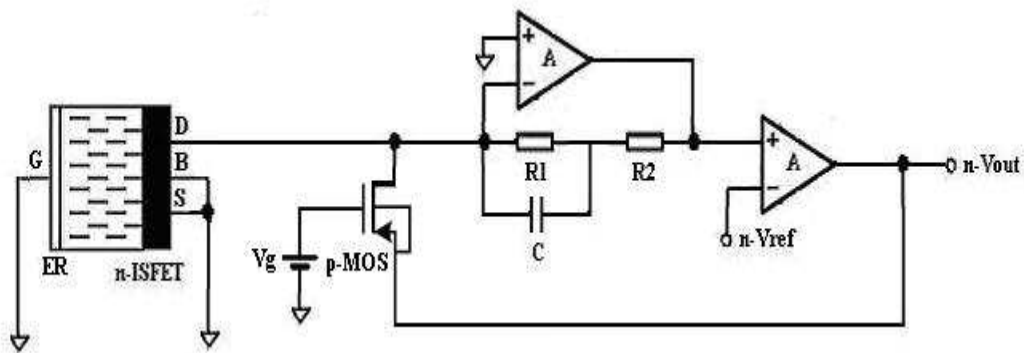


Fig. 2.9. Circuito con realimentación indirecta para implementaciones CMOS.

2.1.8. Circuito “Readout” sin realimentación.

En la figura 2.10 se muestra un circuito que no presenta efecto de cuerpo y mantiene constante el V_{DS} [7].

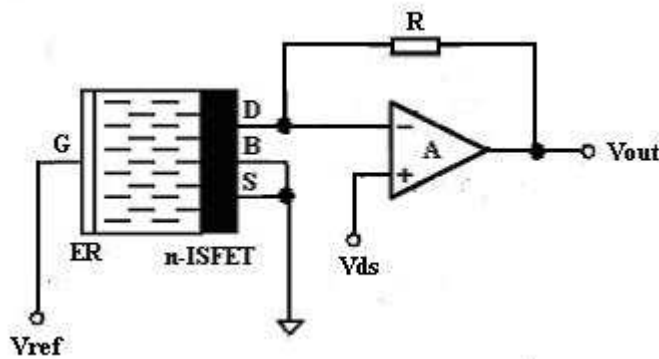


Fig. 2.10. Circuito “Readout” sin realimentación.

El sensor opera en modo saturación y las expresiones para la corriente y voltaje de salida son las siguientes:

$$V_{out} = V_{DS} - I_{DS}R \tag{2.10}$$

$$I_{DS} = \frac{1}{2} \mu C_{ef} \frac{W}{L} [V_{GS} - V_{TH}(pH)]^2 \tag{2.11}$$

2.1.9. Circuitos multiplexores.

La figura 2.11. presenta un circuito multiplexor en donde cada ISFET tiene su propio amplificador y cuyas salidas son multiplexadas [9]. Este circuito es útil cuando se utilizan ISFETs sensibles a un tipo particular de ión, como son H^+ , Na^+ , K^+ o Ca^{2+} .

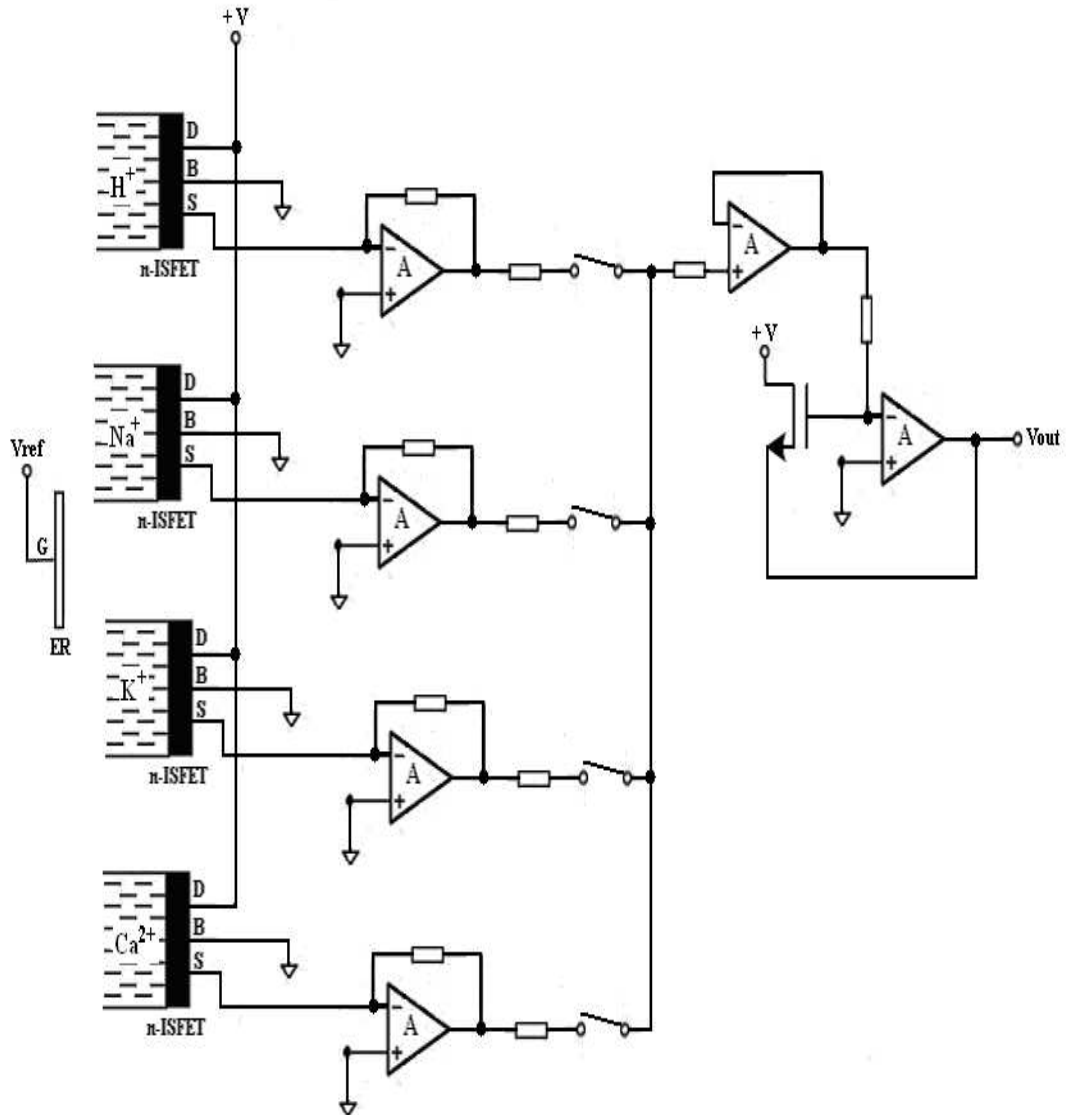


Fig. 2.11 Circuito multiplexor formado por varios amplificadores.

En la figura 2.12. se observa un circuito multiplexor en donde los diferentes ISFETs son conectados secuencialmente a un solo amplificador, produciéndose de esta manera la multiplexión [9]. Este circuito es útil en caso se requiera examinar un gran número de ISFETs, los cuales pueden ser conectados secuencialmente a un sistema que registre sus parámetros.

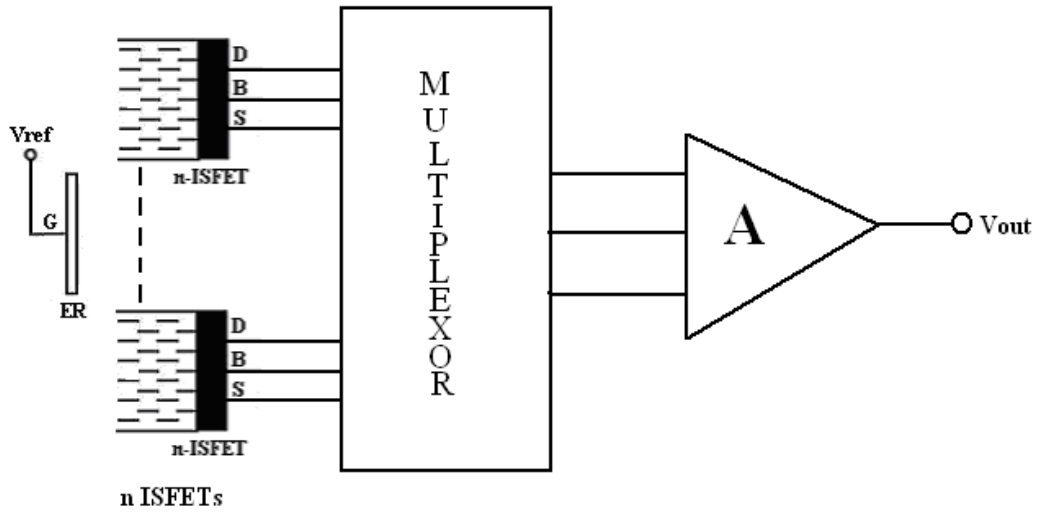
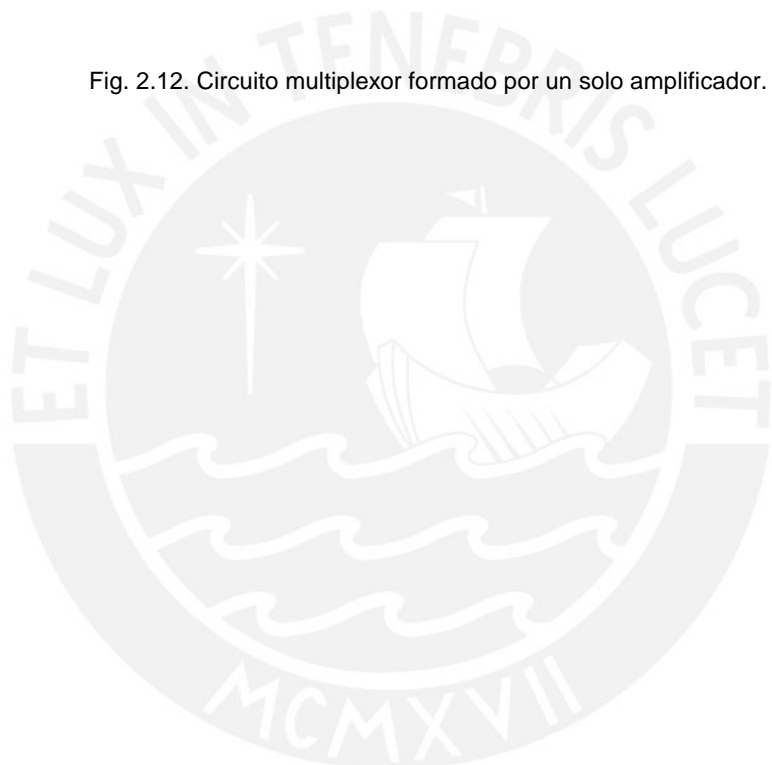
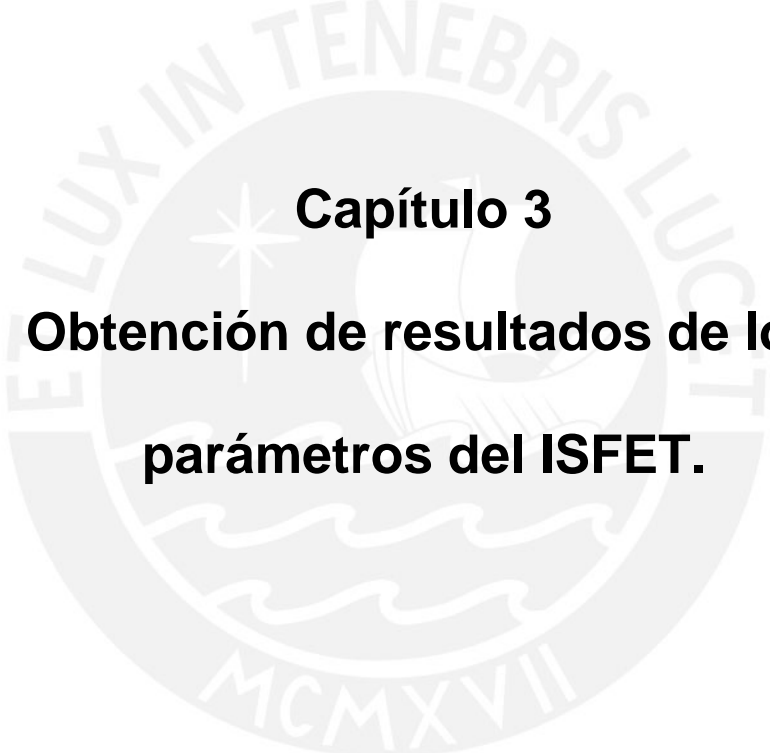


Fig. 2.12. Circuito multiplexor formado por un solo amplificador.





Capítulo 3
Obtención de resultados de los
parámetros del ISFET.

3.1. Simulación del ISFET.

Spice (simulation program with integrated circuits emphasis) ha sido utilizado ampliamente en el modelado y simulación del ISFET, así como para sistemas basados en el ISFET [13-19]. En el presente trabajo se utilizó el programa OrCAD PSpice para todas las simulaciones realizadas.

3.1.1. Modelos utilizados para la simulación del ISFET.

En la literatura, Martinoia y su equipo proponen dos modelos para el ISFET: el modelo “built-in” y el macromodelo [13, 15, 16, 17]. El modelo “built-in” es un modelo físico-químico sofisticado que caracteriza completamente el comportamiento del ISFET; sin embargo, para el desarrollo de este modelo se necesita la disponibilidad del programa fuente y un profundo conocimiento de la estructura del código[13]. El macromodelo es un modelo menos preciso que el modelo “built-in”; sin embargo, es más general así como más amigable con el usuario y puede ser implementado en las versiones más comerciales de SPICE, como son el HSpice y PSpice [13, 17]. En el presente trabajo se utilizó el macromodelo para la simulación del ISFET. A continuación se desarrolla una explicación del macromodelo [17].

3.1.2. Macromodelo.

Para el desarrollo de este modelo hay que considerar que el ISFET esta conformado por dos etapas separadas: la etapa electrónica (MOSFET) y la etapa electroquímica (interfase electrolito-dieléctrico).

Esta primera idea contradice la condición de neutralidad de carga de la estructura del ISFET, el cual está dado por [16, 17]:

$$\sigma_o + \sigma_d + \sigma_s = 0 \quad (3.1)$$

Donde σ_o , σ_d y σ_s son la densidad de carga en la interfase electrolito-dieléctrico, en la capa de difusión y en el semiconductor respectivamente. Por otro lado, si se considera σ_s constante con respecto al pH y si se asume que es mucho más pequeño que σ_o y σ_d [13, 17, 20], la condición de neutralidad de carga se reduce a:

$$\sigma_o + \sigma_d = 0 \quad (3.2)$$

Debido a lo anterior, se puede considerar que la etapa electrónica está separada de la etapa electroquímica.

Las siguientes expresiones son extraídas de la teoría de centros activos y de la teoría de la doble capa [8, 10, 13, 14, 15, 17].

$$\sigma_d = \sqrt{8\epsilon_w kTc_{bulk}} \sinh\left(\frac{\varphi_{gd}}{2V_T}\right) = \alpha \sinh\left(\frac{\varphi_{gd}}{2V_T}\right) \quad (3.3)$$

$$\sigma_o = qN_{sil} \left(\frac{H_b^2 \exp\left(-2\frac{\varphi_{eo}}{V_T}\right) - K_A K_B}{H_b^2 \exp\left(-2\frac{\varphi_{eo}}{V_T}\right) + K_A H_b^2 \exp\left(-\frac{\varphi_{eo}}{V_T}\right) + K_A K_B} \right) + qN_{Nit} \left(\frac{H_b^2 \exp\left(-\frac{\varphi_{eo}}{V_T}\right)}{H_b^2 \exp\left(-\frac{\varphi_{eo}}{V_T}\right) + K_N} \right)$$

$$\sigma_o = qN_{sil} f_a(\varphi_{eo}, pH) + qN_{Nit} f_b(\varphi_{eo}, pH) \quad (3.4)$$

Donde ϵ_w es la permitividad del electrolito, c_{bulk} es la concentración de iones en el electrolito, N_{sil} es la densidad de superficie del silanol, N_{nit} es la densidad de superficie del amine, K_A , K_B , K_N son constantes de disociación, H_b es la concentración de protones en el electrolito, ϕ_{eo} es el potencial de la interfase electrolito-dieléctrico, ϕ_{gd} es el potencial a través de la capa de difusión (capa Gouy-Chapman), $V_T = kT/q$ es el voltaje térmico.

En la figura 3.1 se presenta el circuito electrónico equivalente del ISFET según el macromodelo.

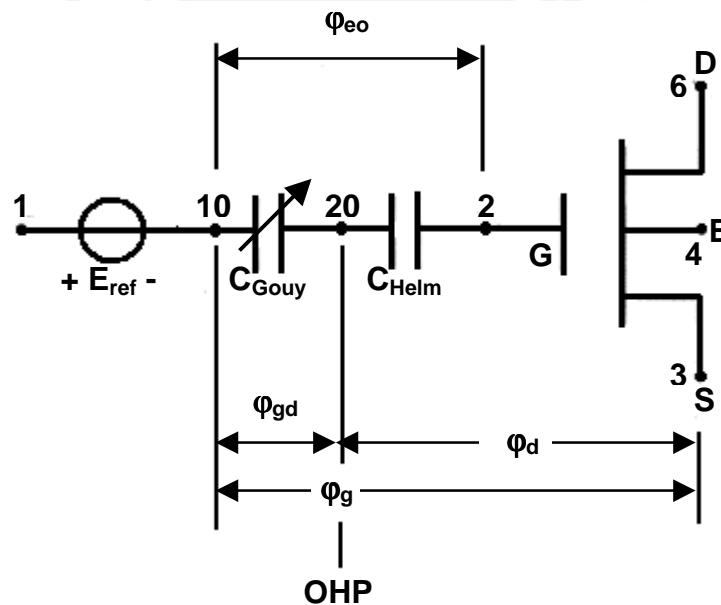


Fig. 3.1. Circuito electrónico equivalente del ISFET [13, 17].

Los condensadores en serie C_{gouy} (capa de difusión Gouy-Chapman) y C_{Helm} (capa Helmholtz) son sustituidos por un condensador equivalente C_{eq} . La expresión para C_{eq} es la siguiente [13, 17]:

$$C_{eq} = \frac{C_{Gouy} C_{Helm}}{C_{Gouy} + C_{Helm}} \quad (3.5)$$

La ecuación que relaciona σ_d con φ_{eo} es la que sigue [13, 17]:

$$\sigma_d = -\sigma_o = -C_{eq} \varphi_{eo} \quad (3.6)$$

El condensador Helmholtz esta dado por la siguiente expresión [13, 14, 17]:

$$C_{Helm} = \frac{\epsilon_{IHP} \epsilon_{OHP}}{\epsilon_{OHP} d_{IHP} + \epsilon_{IHP} d_{OHP}} WL \quad (3.7)$$

Donde W es el ancho del canal del ISFET, L es el largo del canal del ISFET, ϵ_{IHP} es la permitividad interna de la superficie Helmholtz, ϵ_{OHP} es la permitividad externa de la superficie Helmholtz, d_{IHP} es la distancia entre dieléctrico e iones no hidratados y d_{OHP} es la distancia entre dieléctrico e iones hidratados.

La expresión del condensador Gouy-Chapman es la siguiente [13, 17]:

$$C_{Gouy} = \frac{\partial \sigma_d}{\partial \varphi_{gd}} = \frac{\partial}{\partial \varphi_{gd}} \left[\sqrt{8\epsilon_w kTc_{bulk}} \sinh \left(\frac{\varphi_{gd}}{2V_T} \right) \right]$$

$$C_{Gouy} \cong \frac{\sqrt{8\epsilon_w kTc_{bulk}}}{2V_T} \quad (3.8)$$

Finalmente obtenemos la siguiente expresión para el φ_{eo} [13, 17]:

$$\varphi_{eo} = \frac{q}{C_{eq}} [N_{sil} f_a(\varphi_{eo}, pH) + N_{Nit} f_b(\varphi_{eo}, pH)] \quad (3.9)$$

En la expresión anterior se observa que ϕ_{eo} depende del pH y del mismo ϕ_{eo} . La etapa electrónica es modelada utilizando uno de los modelos disponibles del MOSFET .

En la figura 3.2 se aprecia la representación del ISFET según el macromodelo, también se muestran sus conexiones externas.

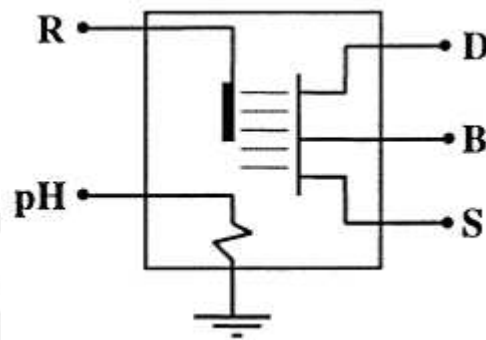


Fig. 3.2. Representación del ISFET [17].

Donde R es el electrodo de referencia, D es el drenador, S es la fuente, B es el sustrato y pH es la conexión para la fuente de pH emulada. La fuente de pH es una señal química de entrada modelada por una fuente independiente de voltaje conectada a una resistencia. El macromodelo utiliza este voltaje como la fuente electroquímica que controla el potencial ϕ_{eo} .

3.1.3. Resultados obtenidos en las simulaciones.

El circuito utilizado en las simulaciones es el que se observa en la figura 2.1. Se consideró al nitruro de silicio (Si_3N_4) como membrana inorgánica sensible al pH y los parámetros escogidos para las simulaciones pueden ser apreciados en la tabla 3.1. Los textos usados como archivos de entrada en las simulaciones se muestran en los anexos I, II, III y IV.

Símbolo	Nombre	Valor	Origen
L	Longitud de puerta del ISFET	10u [m]	Fabricante
W	Ancho de puerta del ISFET	500u [m]	Fabricante
dihp	Distancia entre dieléctrico e iones no hidratados	0.1n [m]	Fabricante
dohp	Distancia entre dieléctrico e iones hidratados	0.3n [m]	Fabricante
Ka	Constante de disociación positiva	15.8 [mol/l]	Típico
Kb	Constante de disociación negativa	$63.1 \cdot 10^{-9}$ [mol/l]	Típico
Kn	Constante de disociación del amine	$1 \cdot 10^{-10}$ [mol/l]	Típico
Nsil	Densidad de superficie del silanol	$3 \cdot 10^{18}$ [1/m ²]	Típico
Nnit	Densidad de superficie del amine	$2 \cdot 10^{18}$ [1/m ²]	Típico
Cbulk	Concentración de iones en el electrolito	0.1 [l/moles]	Típico
epsihp	Permitividad de la superficie interna de Helmholtz	32	Típico
epsohp	Permitividad de la superficie externa de Helmholtz	32	Típico
epsw	Permitividad del electrolito	78.5	Típico
Eabs	Potencial del electrodo de hidrógeno	4.7 [V]	Típico
Erel	Potencial del electrodo de referencia (Ag/AgCl)	0.2 [V]	Típico
Phim	Trabajo de extracción del metal / carga electrónica	4.7 [V]	Típico
Chieo	Potencial dipolar de la superficie en la interfaz dieléctrico-electrolito	$3 \cdot 10^{-3}$ [V]	Típico

Tabla 3.1. Parámetros utilizados en las simulaciones.

Como resultado de las simulaciones se obtuvieron las curvas típicas del ISFET que explican sus características eléctricas y electroquímicas, las cuales son importantes en su proceso de caracterización.

Al introducir un valor constante para el pH se pudo tratar al ISFET como un MOSFET, logrando obtenerse las curvas I_{DS} vs V_{DS} en función del V_{GS} (figura 3.3) y las curvas I_{DS} vs V_{GS} en función del V_{DS} (figura 3.4), donde I_{DS} es la corriente de drenador, V_{DS} es el voltaje drenador-fuente y V_{GS} es el voltaje puerta-fuente. Curvas similares se consiguieron al introducir valores constantes para V_{GS} y V_{DS} . En la figura 3.5 se muestran las curvas I_{DS} vs V_{DS} en función del pH y en la figura 3.6 se muestran las curvas I_{DS} vs V_{GS} en función del pH.

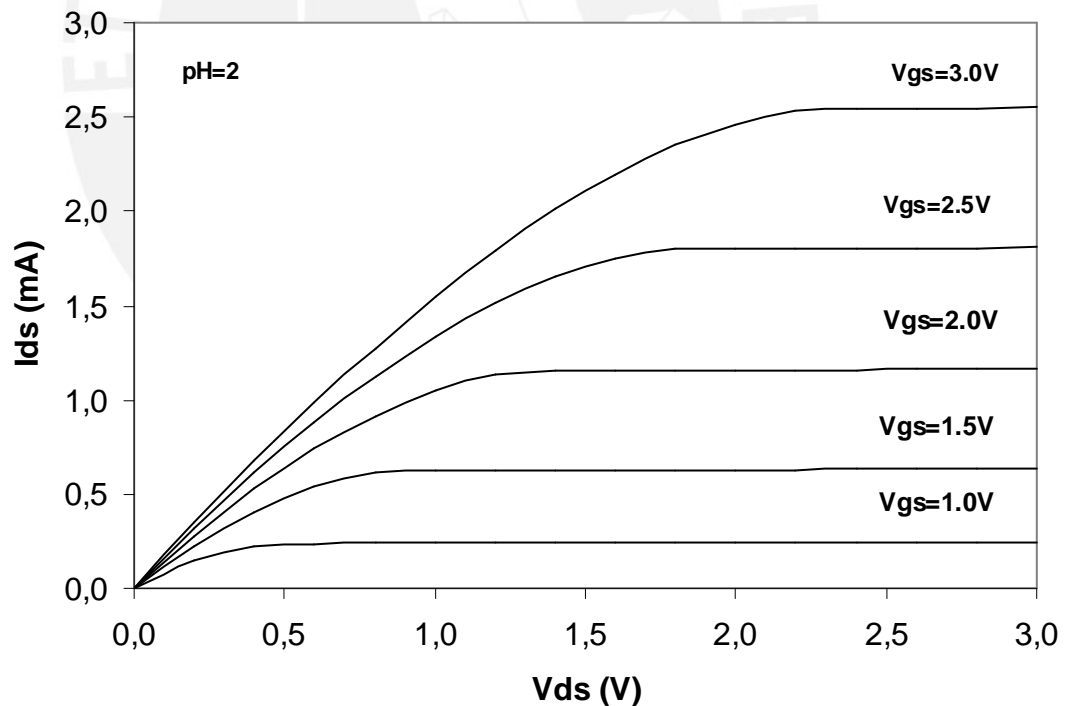


Fig. 3.3. I_{DS} vs V_{DS} en función del V_{GS} .

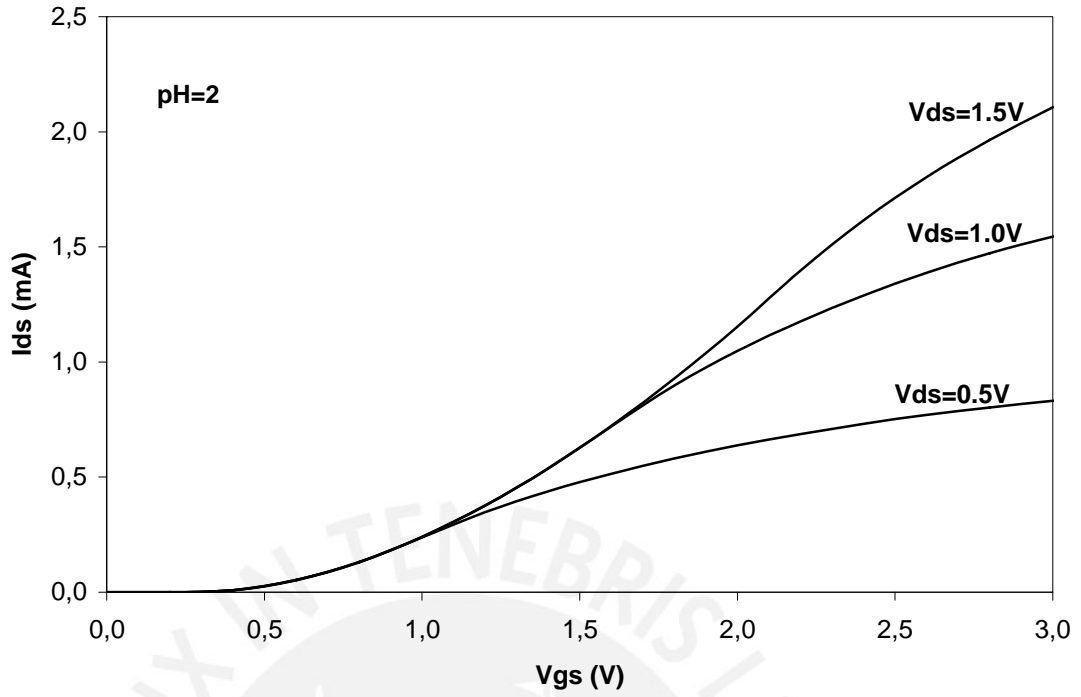


Fig. 3.4. I_{ds} vs V_{gs} en función del V_{ds} .

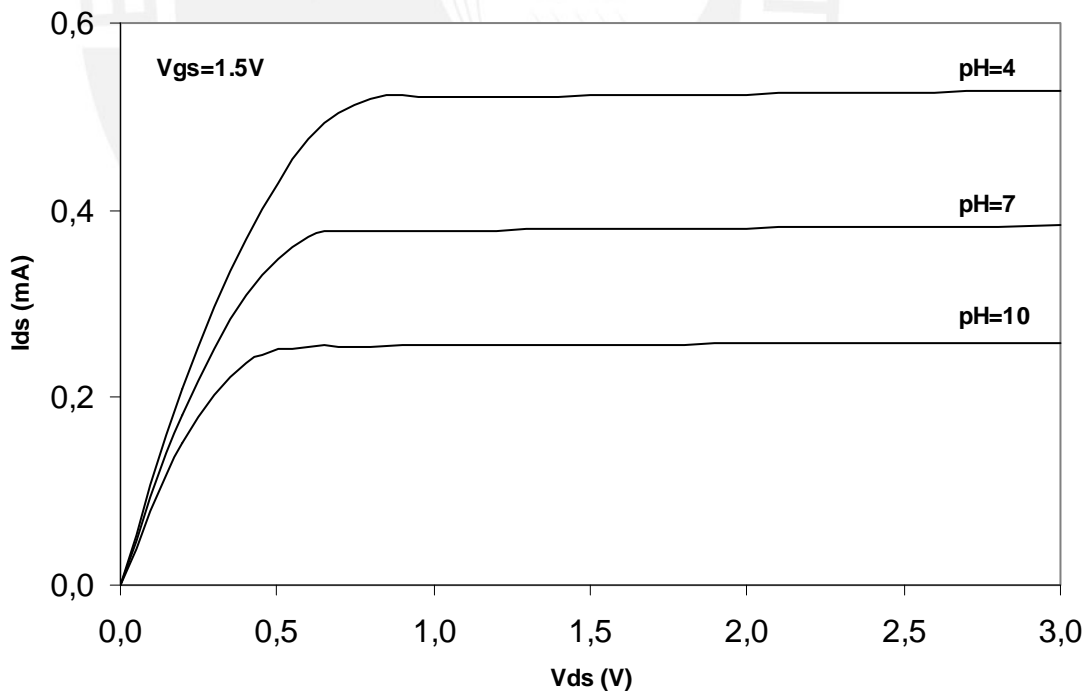


Fig. 3.5. I_{ds} vs V_{ds} en función del pH.

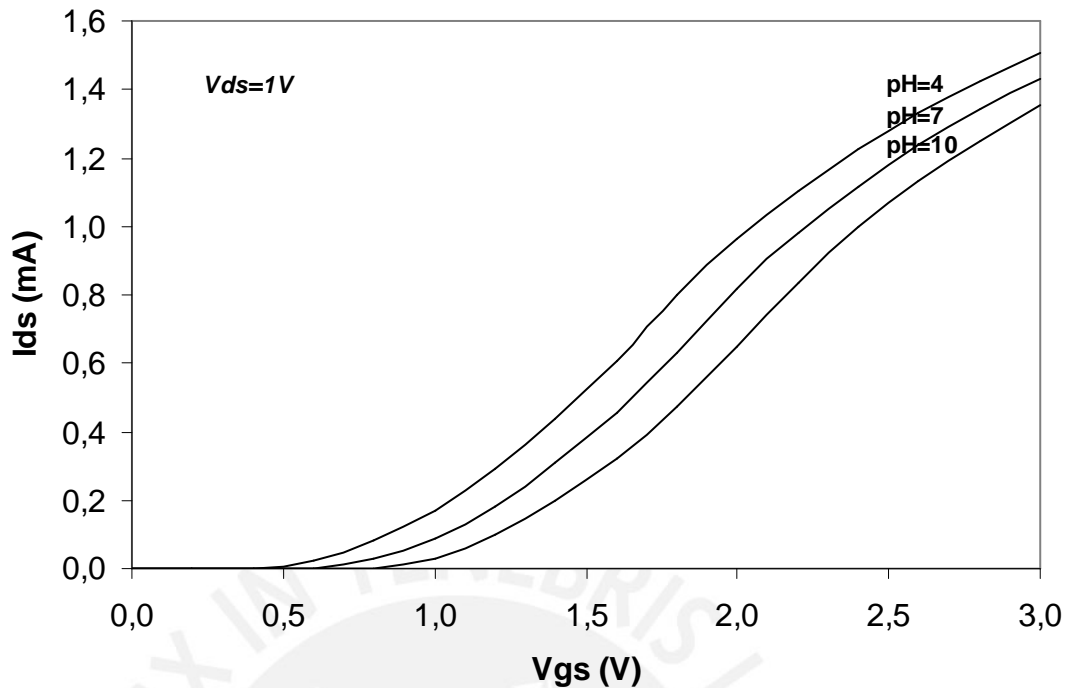


Fig. 3.6. I_{ds} vs V_{GS} en función del pH.

3.2. Parte experimental.

Los ensayos de la parte experimental se realizaron en el Laboratorio de Catálisis y Medio Ambiente, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Ingeniería y en el Laboratorio de Química Analítica, Sección Química, Facultad de Ciencias e Ingeniería, Pontificia Universidad Católica del Perú.

Los ISFETs (figura 3.7) utilizados en el presente trabajo fueron fabricados en el Centro Nacional de Microelectrónica de Barcelona, España.

El chip tiene una dimensión de 3x3 mm (figura 3.8), la puerta tiene una longitud de 10 μm y un ancho de 500 μm . El sustrato del ISFET es de silicio del tipo p dopado con boro de resistividad igual a 40 Ωcm . La membrana inorgánica

sensible al pH es una película delgada de nitruro de silicio (Si_3N_4), la cual está depositada sobre una película de óxido de silicio (SiO_2). Una cubierta epóxica deja únicamente la superficie del Si_3N_4 expuesta al electrolito. El ISFET se encuentra adosado a un circuito impreso y conectado con pistas de cobre.

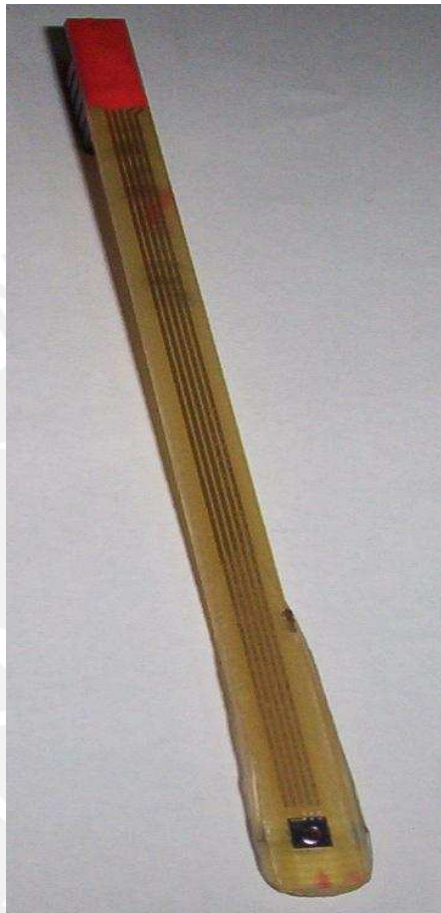


Fig. 3.7. Vista completa del ISFET.



Fig. 3.8. Vista del Chip.

3.2.1. Curvas características del ISFET.

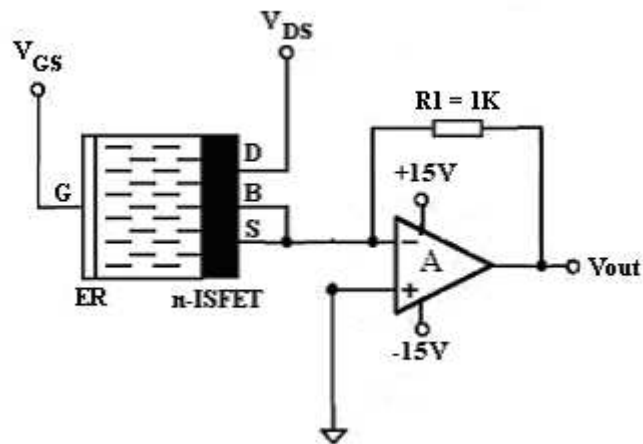


Fig. 3.9. Esquema electrónico del circuito utilizado para obtener las curvas características del ISFET.

El circuito que se usó para la obtención de las curvas características del ISFET esta conformado por un amplificador operacional (OP-07), una resistencia, el ISFET y el electrodo de referencia (figura 3.9). Este circuito es un convertidor de corriente a voltaje que tiene un voltaje de salida V_{out} , cuya ecuación es la siguiente:

$$V_{out} = -I_{DS} * R_1 \quad (3.10)$$

En los ensayos se utilizó soluciones tampón de pH con diferentes valores que van desde 2 hasta 12 y un electrodo de referencia comercial de Ag/AgCl. Para la obtención de las curvas se empleó una tarjeta de adquisición de datos (DAQ) de National Instruments modelo PCI-6229 y para el control de la tarjeta se usó instrumentación virtual, la cual fue desarrollada en el programa LabVIEW. Los ensayos se realizaron en condiciones de oscuridad y a temperatura ambiente.

En la figura 3.10 se presenta el montaje de los elementos utilizados en los ensayos para la obtención de las curvas características del ISFET.

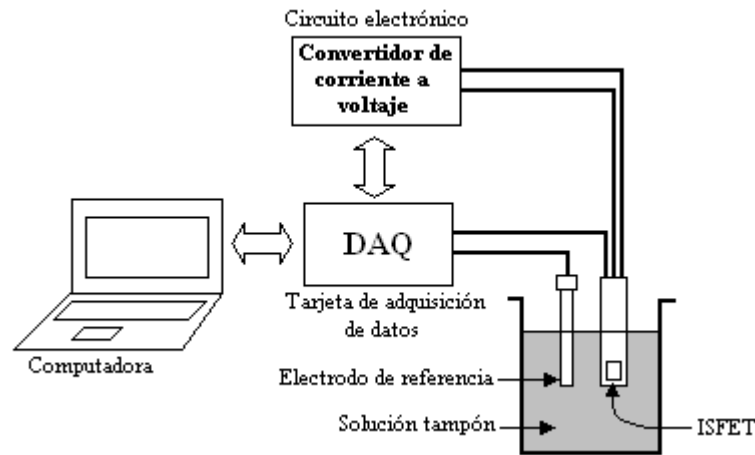


Fig. 3.10. Diagrama del montaje utilizado para la obtención de las curvas características del ISFET.

3.2.1.1. Resultados obtenidos al comparar las curvas obtenidas en las simulaciones y en los ensayos.

Con el propósito de verificar la precisión del modelo utilizado en la simulación del ISFET, algunas de las curvas obtenidas en los ensayos son comparadas con las curvas obtenidas como resultado de las simulaciones. Esto se puede apreciar en las figuras 3.11, 3.12 y 3.13.

Se aprecia que el modelo utilizado en la simulación del ISFET es lo suficientemente preciso para predecir el comportamiento de los parámetros de salida del circuito al ser probado en el laboratorio. Por lo tanto, este modelo puede ser utilizado para simular circuitos asociados al ISFET más complejos.

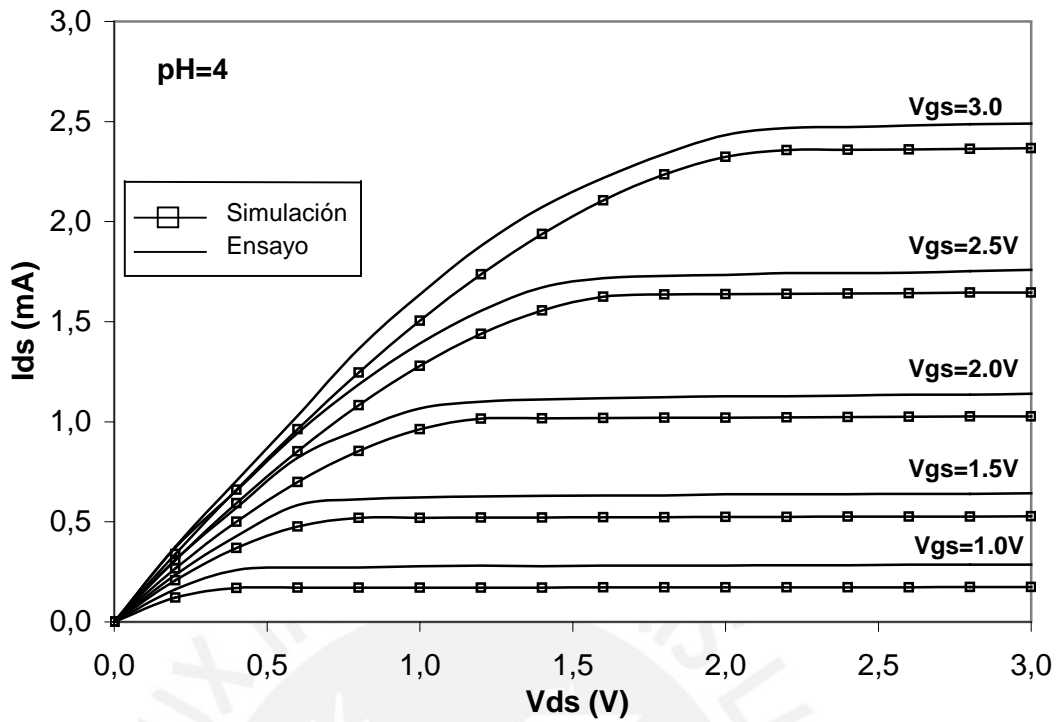


Fig. 3.11. I_{ds} vs V_{ds} en función del V_{gs} .

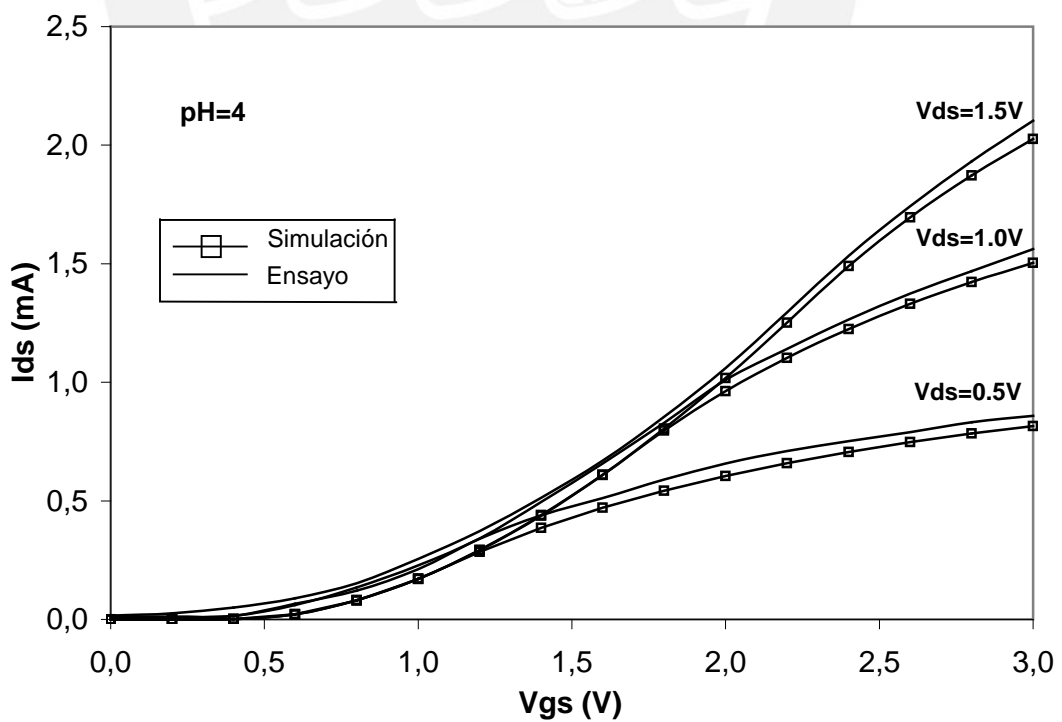


Fig. 3.12. I_{ds} vs V_{gs} en función del V_{ds} .

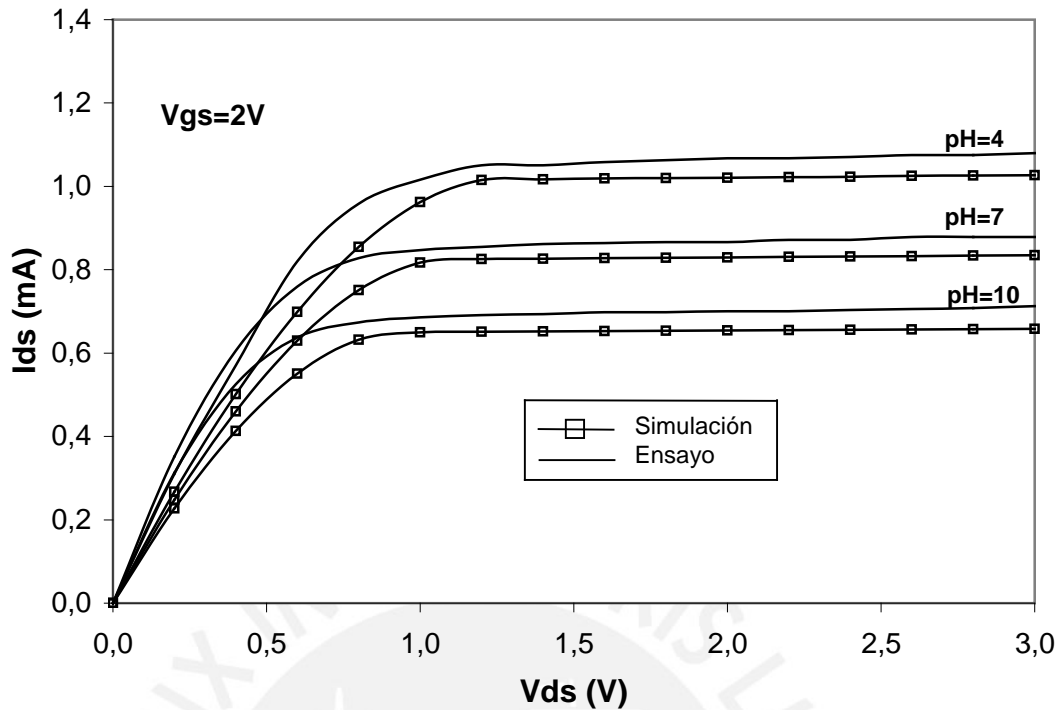


Fig. 3.13. I_{ds} vs V_{ds} en función del pH.

3.2.1.2. Resultados obtenidos al tratar al ISFET como un MOSFET.

Al mantener constante el pH de la solución en los ensayos se consiguió las curvas del ISFET que muestran su característica voltampérica de salida (figuras 3.14, 3.15, 3.16 y 3.17). Estas curvas concuerdan con las curvas típicas del MOSFET, lo cual valida la idea de que un ISFET puede ser tratado como un MOSFET. La idea anterior se fundamenta en todo lo presentado en el primer capítulo del presente trabajo.

3.2.1.3. Resultados obtenidos al observar la influencia del pH en la característica de salida del ISFET.

Para observar la influencia del pH en la característica de salida del ISFET se mantuvo constante el voltaje entre la puerta y la fuente del ISFET, y se varió el pH del electrolito. De esta manera se logró obtener una curva diferente para cada valor de pH (figura 3.18), el resultado obtenido ratifica la idea de que el cambio del voltaje umbral (V_{TH}) del sensor con el pH de la solución es la razón para el cambio de niveles de la I_{DS} . Lo anterior se fundamenta en el hecho de que al analizar las ecuaciones 3.11 y 3.12 de la I_{DS} del ISFET [1, 2], se observa que el único parámetro que hace variar a la I_{DS} es el V_{TH} , ya que los demás parámetros se mantienen constantes.

$$I_{DS} = C_{ef} \mu \frac{W}{L} \left[(V_{GS} - V_{TH}) V_{DS} - \frac{1}{2} V_{DS}^2 \right] \quad (3.11)$$

$$I_{DS} = C_{ef} \mu \frac{W}{2L} (V_{GS} - V_{TH})^2 \quad (3.12)$$

Otra manera de apreciar la influencia del pH en la característica de salida del ISFET es mantener constante el voltaje entre el drenador y la fuente, y modificar el valor del pH de la solución. En el resultado de este proceso (figura 3.19), se aprecia que se obtuvo una curva distinta para cada valor de pH.

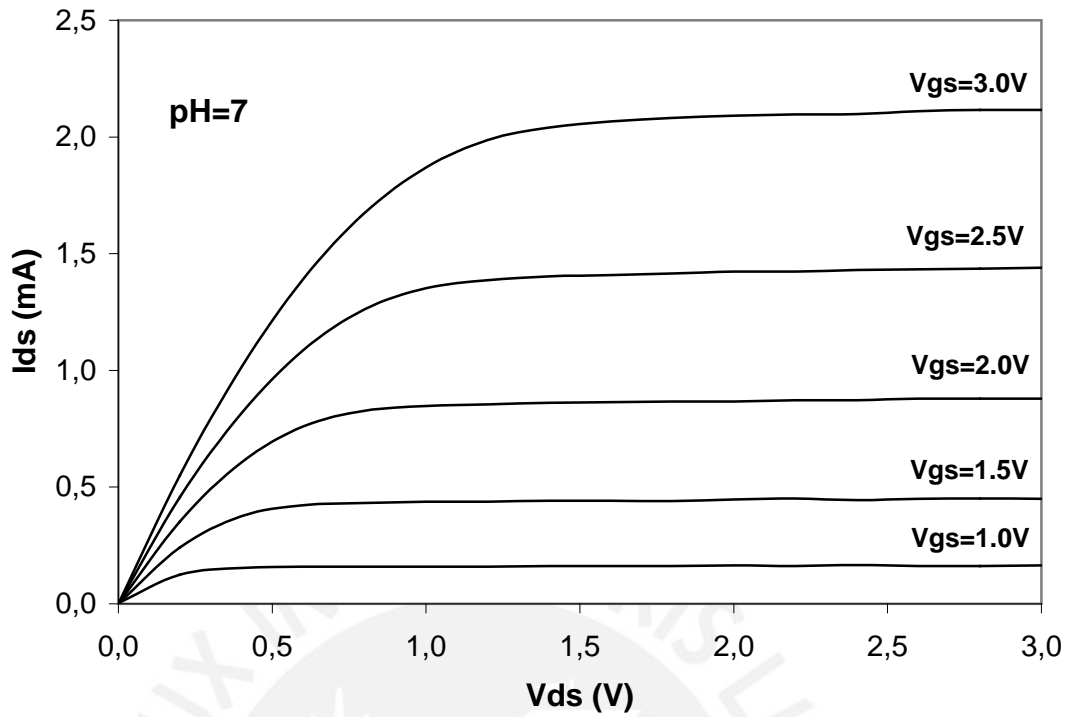


Fig. 3.14. I_{ds} vs V_{ds} en función del V_{gs} para un pH=7.

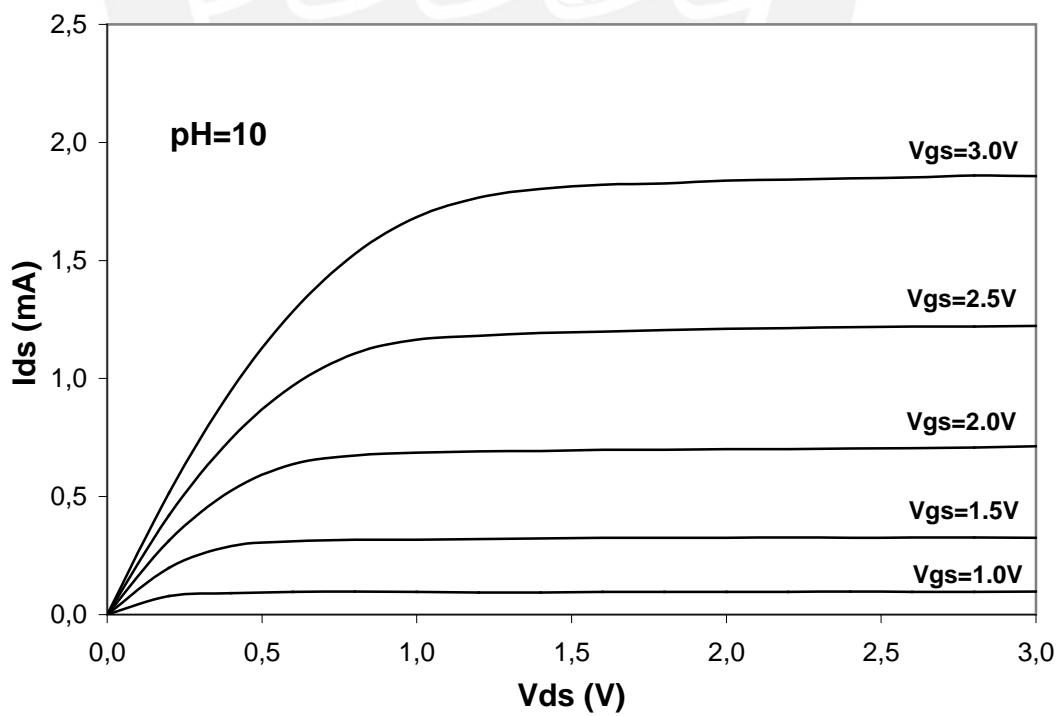


Fig. 3.15. I_{ds} vs V_{ds} en función del V_{gs} para un pH=10.

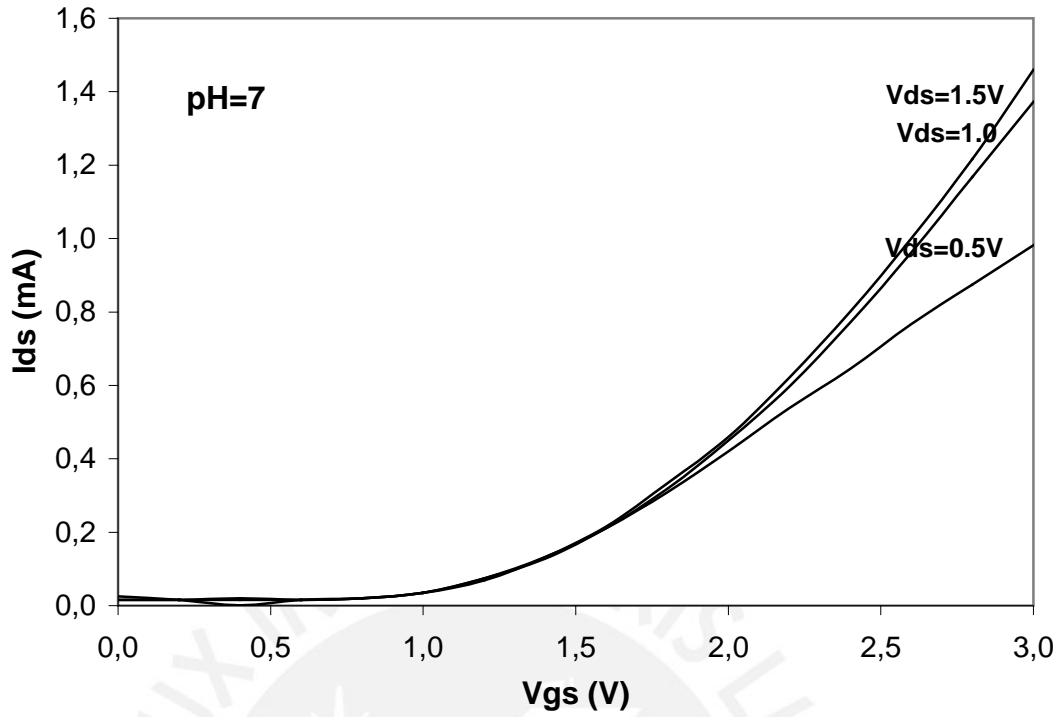


Fig. 3.16. I_{ds} vs V_{GS} en función del V_{DS} para un pH=7.

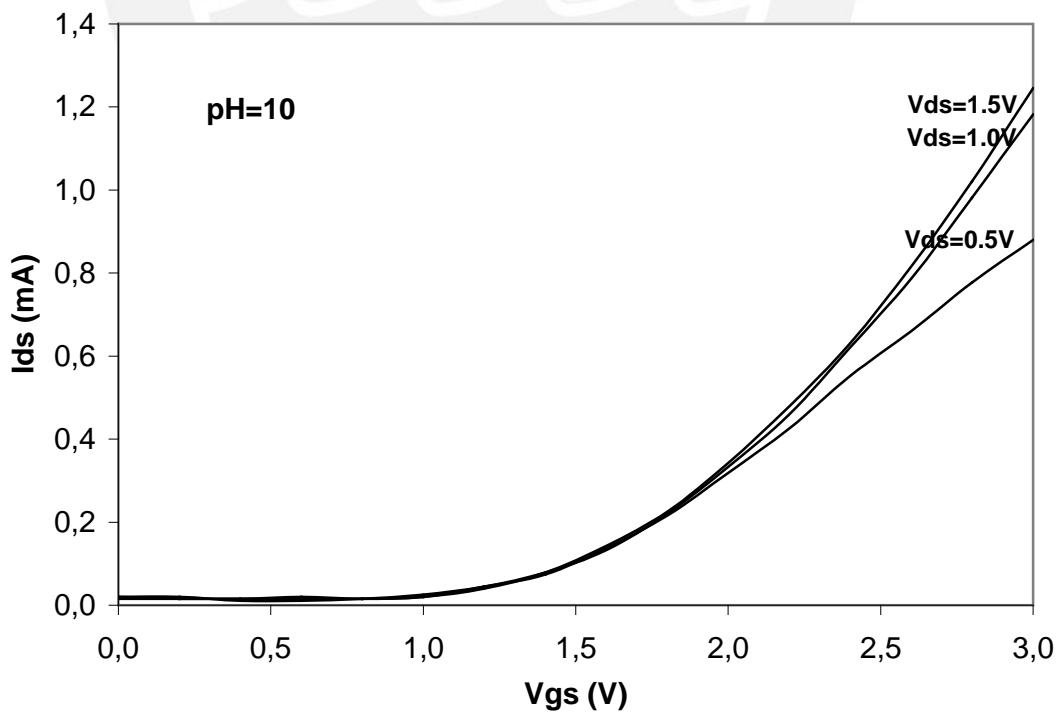


Fig. 3.17. I_{ds} vs V_{GS} en función del V_{DS} para un pH=10.

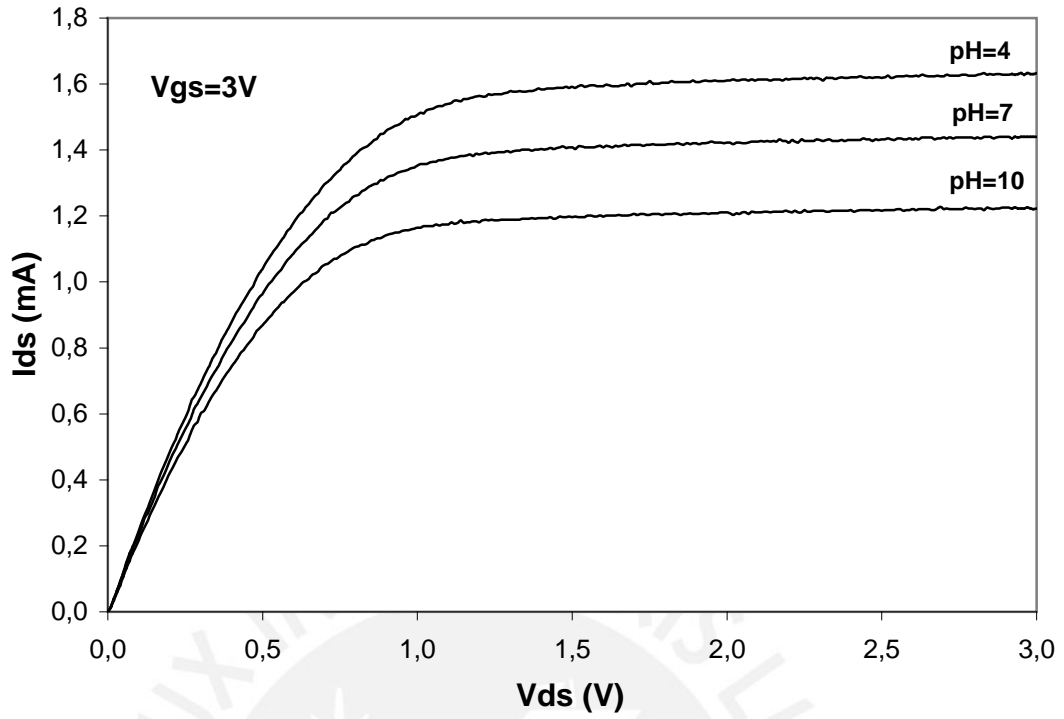


Fig. 3.18. I_{ds} vs V_{ds} en función del pH para un $V_{GS}=3.5V$.

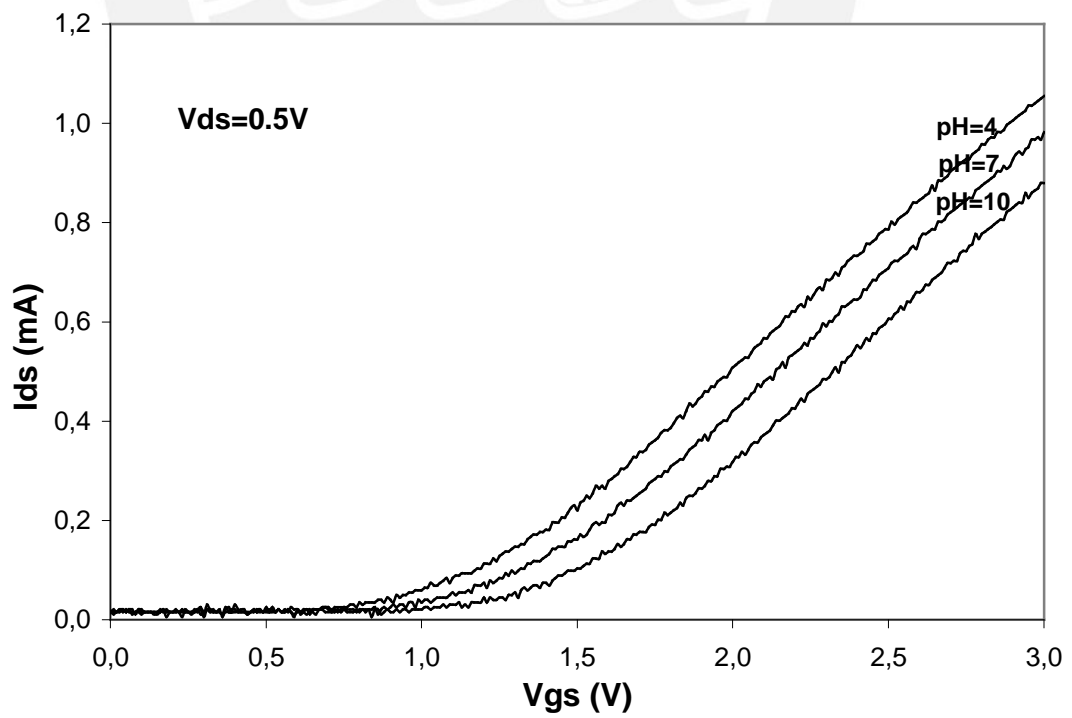


Fig. 3.19. I_{ds} vs V_{gs} en función del pH para un $V_{DS}=2.5V$.

3.2.2. ISFET-metro.

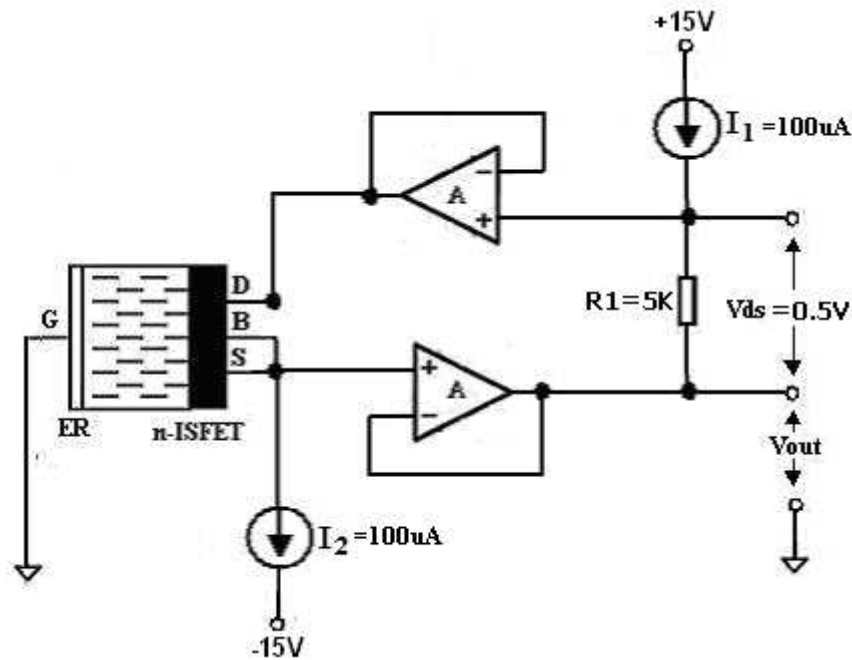


Fig. 3.20. Esquema electrónico del circuito utilizado como ISFET-metro.

El circuito que se muestra en la figura 3.20 esta conformado por dos amplificadores operacionales (OP-07), dos fuentes de corriente (REF200), dos fuentes de voltaje, una resistencia, el ISFET y el electrodo de referencia conectado a tierra, con el cual se cierra el circuito.

Los amplificadores operacionales presentan una impedancia de entrada elevada, por lo que toda la corriente I_1 fluye por R_1 . Además se tiene que la diferencia de potencial en las entradas de los amplificadores operacionales es nula, esto se debe a que los operacionales están realimentados negativamente. De lo anterior, se obtiene la siguiente expresión para el V_{DS} :

$$V_{DS} = I_1 * R_1 \tag{3.13}$$

Para obtener medidas correctas se requiere que I_{DS} y V_{DS} se mantengan constantes, ya que las mediciones son potenciométricas. En el presente trabajo se utilizó fuentes de corriente de 100uA y una resistencia de 5K, con lo cual se trabajó con valores típicos de V_{DS} igual a 0.5 voltios e I_{DS} igual a 100uA.

En los ensayos efectuados se empleó biftalato ácido de potasio ($KHC_8H_4O_4$) como solución tampón, hidróxido de sodio (NaOH) en concentraciones de 0.1M, un electrodo de referencia comercial de Ag/AgCl y un pH-metro comercial marca Hanna Instruments. Los ensayos se efectuaron en condiciones de oscuridad y a temperatura ambiente.

Los ensayos se realizaron de la siguiente manera [21]: En la solución tampón se introdujo el ISFET, el electrodo de referencia y un electrodo de pH. El ISFET y el electrodo de referencia son conectados al ISFET-metro, mientras que el electrodo de pH es conectado al pH-metro. A la solución tampón se le agregaron pequeños volúmenes de NaOH con el propósito de variar el pH, esta variación fue medida por el pH-metro. La variación de pH en la solución, generó un voltaje de salida en el ISFET-metro el cual fue medido con la ayuda de un multímetro comercial.

En la figura 3.21 se muestra el montaje de los elementos utilizados en los ensayos con el ISFET-metro.

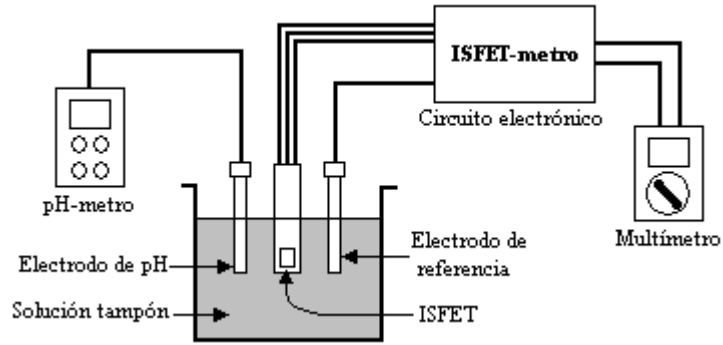


Fig. 3.21. Diagrama del montaje utilizado en los ensayos con el ISFET-metro.

3.2.2.1. Resultados obtenidos en los ensayos con el ISFET-metro.

En las figuras 3.22 y 3.23 se presentan los resultados obtenidos en los ensayos realizados para dos ISFETs.

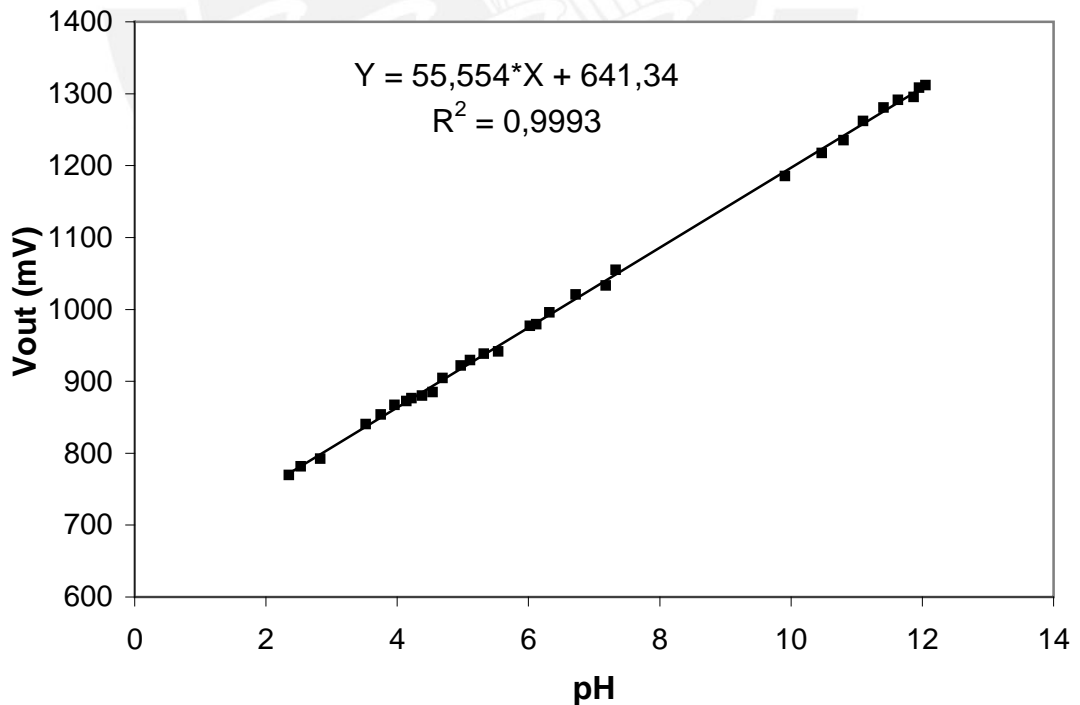


Fig. 3.22. V_{out} vs pH (ISFET1).

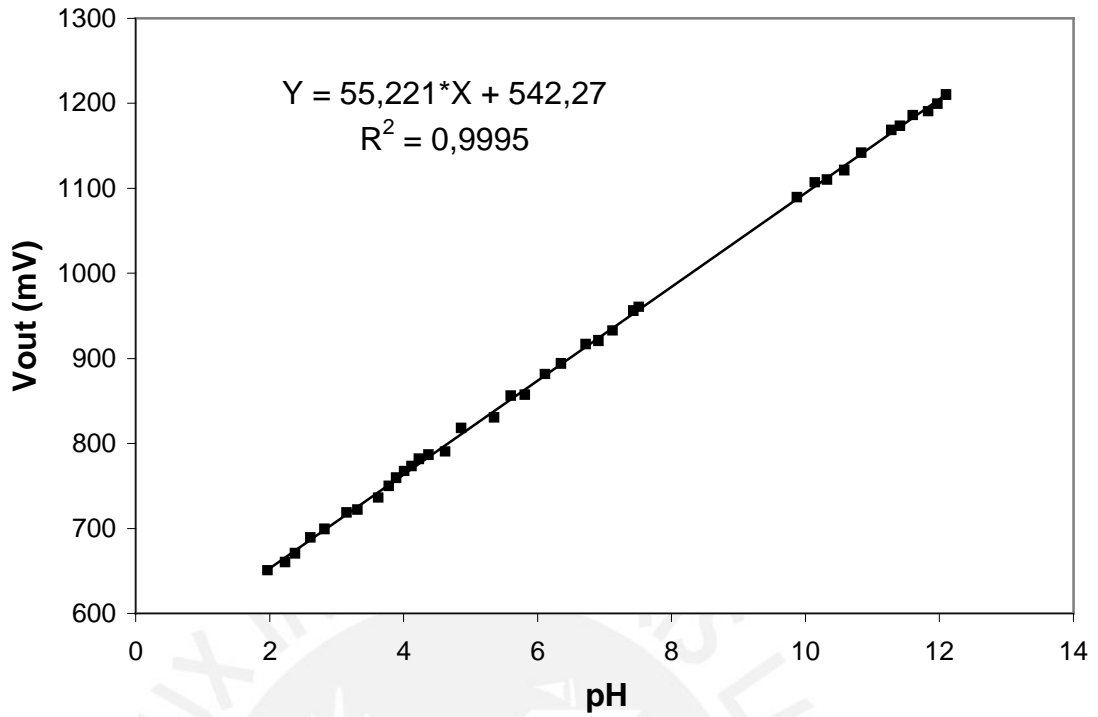


Fig. 3.23. V_{out} vs pH (ISFET2).

En las figuras 3.24, 3.25 y 3.26 se aprecia el montaje de los componentes en laboratorio.

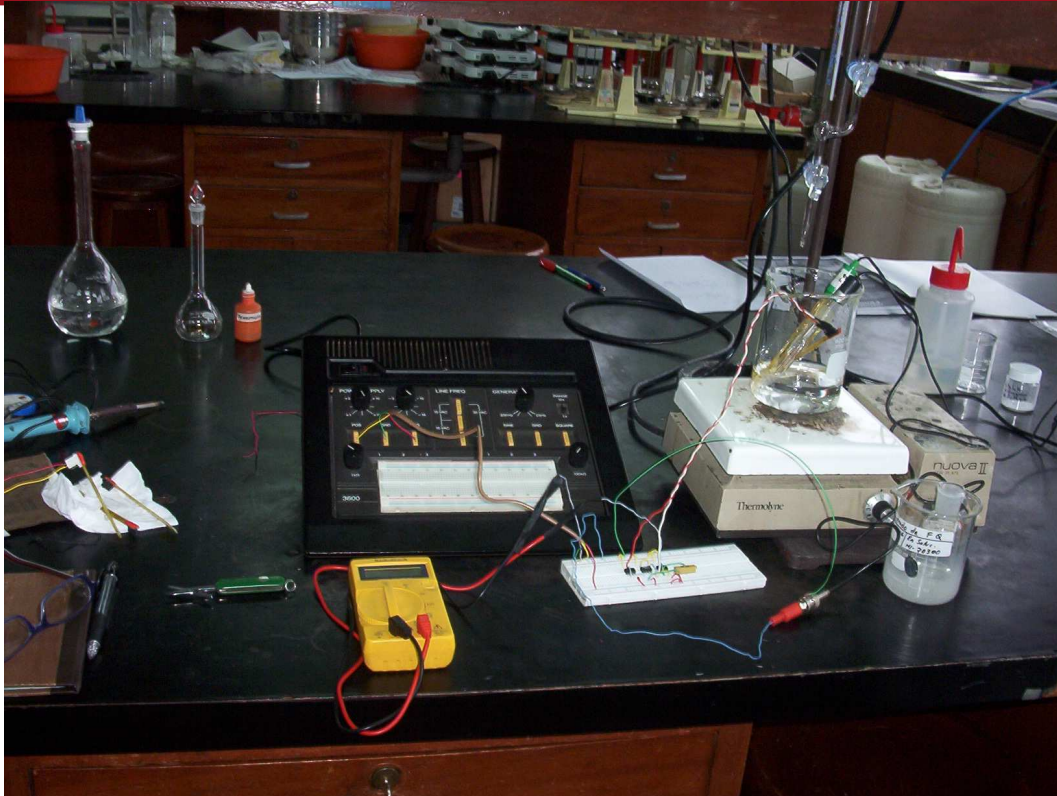


Fig. 3.24. Montaje en laboratorio (1).

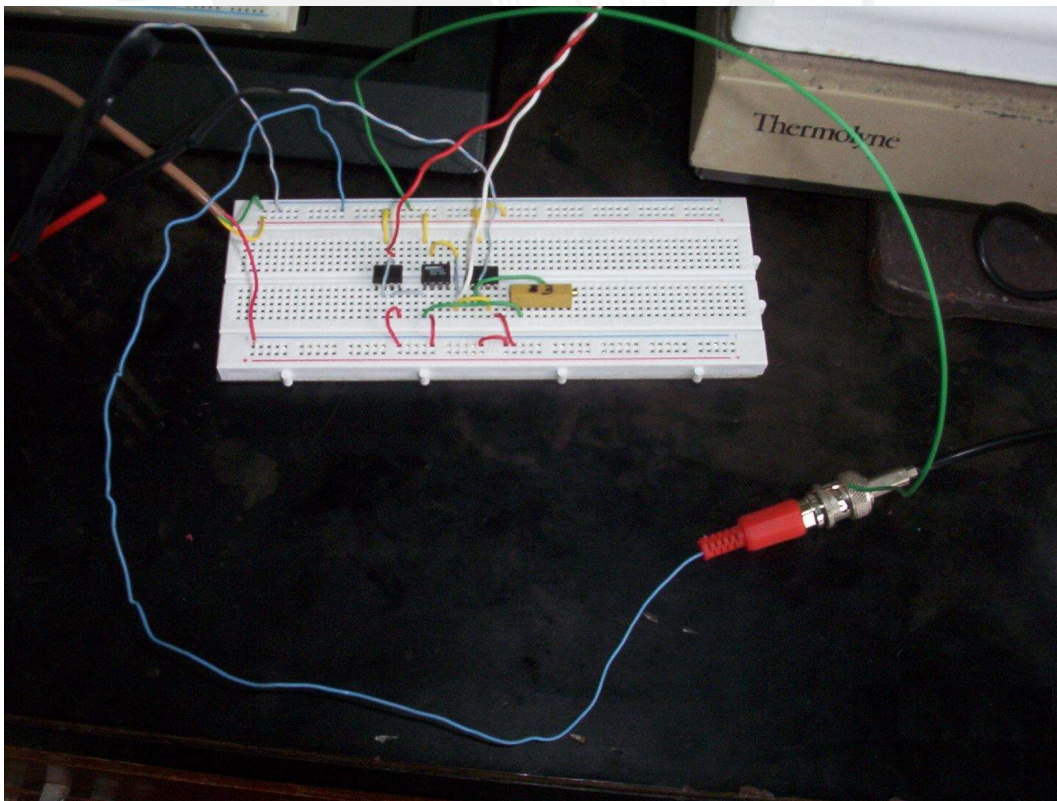


Fig. 3.25. Montaje en laboratorio (2).

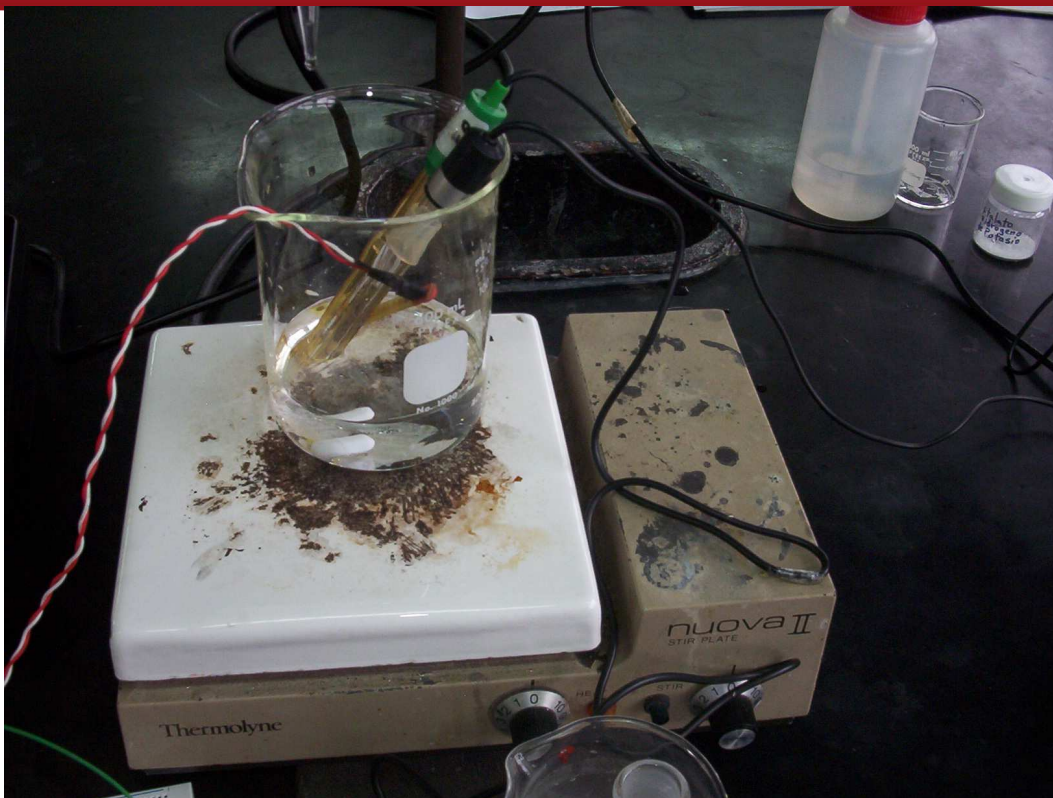
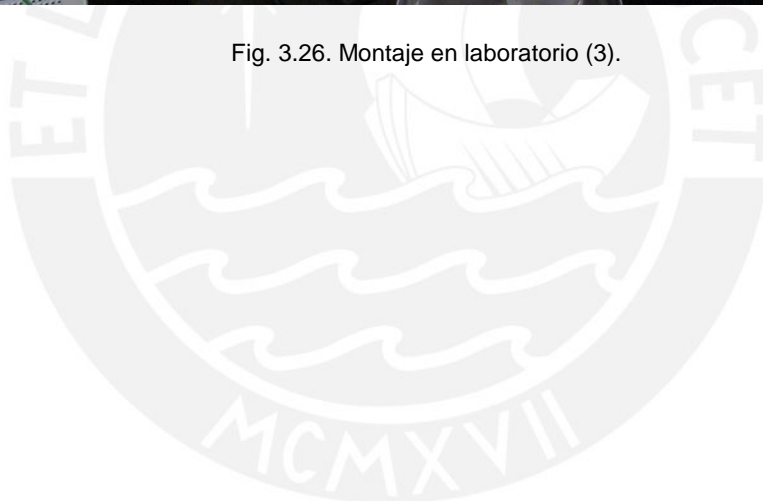


Fig. 3.26. Montaje en laboratorio (3).



CONCLUSIONES

Se ha realizado un estudio del ISFET considerando al MOSFET como dispositivo original y se han observado las similitudes y diferencias entre ambos dispositivos. Los resultados obtenidos comprueban que el ISFET merece ser considerado como un MOSFET.

Los resultados conseguidos en las simulaciones del ISFET muestran concordancia con los resultados obtenidos en los ensayos en laboratorio, lo cual demuestra la fiabilidad del modelo utilizado en las simulaciones. Este modelo puede ser modificado con facilidad para utilizarlo en la simulación de circuitos más complejos.

De los ensayos realizados en laboratorio se obtuvieron las curvas del ISFET que describen sus características eléctricas y electroquímicas. Se consiguieron curvas similares a las de un MOSFET, validando la idea de que el ISFET puede ser tratado como un MOSFET. También se observó la influencia del pH en la característica de salida del ISFET y se verificó que el cambio del voltaje umbral del sensor con el pH de la solución es la razón para el cambio de niveles de la corriente de drenador. Por último, para demostrar la validez del ISFET como dispositivo sensor de pH se trabajó con el ISFET-metro, obteniéndose una respuesta que confirma la factibilidad de usar al ISFET para el monitoreo de distintos tipos de electrolitos.

Con el presente aporte se puede avanzar en los trabajos en biosensores basados en transistores tipo ISFET apuntando a los biosensores de tipo enzimático que implican usar los ISFETs y colocar sobre ellos membranas conteniendo enzimas para medir concentraciones de alguna sustancia.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] E. Valdés, “Análisis Integral del ISFET: Sistema Automatizado de Caracterización”, Memoria presentada como trabajo de investigación de tercer ciclo de Ingeniería Electrónica, Bellaterra, 1997.
- [2] P. Bergveld, “Thirty years of ISFETOLOGY, What happened in the past 30 years and what may happen in the next 30 years”, *Sensors and Actuators B* 88 (2003) 1-20.
- [3] P. Bergveld, “ISFET, Theory and Practice”, IEEE Sensor Conference Toronto, October 2003.
- [4] Y. Ghallab, W. Badawy, K. Kaler, “A novel pH sensor using differential ISFET current mode read-out circuit”, International Conference on MEMS, NANO and Smart Systems, 2003.
- [5] S. Swaminathan, S. Krishnan, L. Kiang, Z. Ahamed, “Microsensor Characterization in an Integrated Blood Gas Measurement System”, IEEE, 2002.
- [6] R. Rani, O. Sidek, “ISFET pH Sensor characterization: towards Biosensor Microchip Application”, IEEE, 2004.
- [7] A. Morgenshtein, “ Design and methodology of ISFET (Ion Sensitive Field Effect Transistor) Microsystems for Bio-Telemetry”, Israel Institute of Technology, April 2003.

- [8] N. Zine, “Desarrollo y Caracterización de Sensores Químicos de Estado Sólido para Aplicaciones Biomédicas”, Memoria presentada para optar al grado de Doctor en Química, Bellaterra, 2004.
- [9] P. Bergveld, A. Sibbald, “Analytical and Biomedical Applications of Ion-Selective Field-Effect Transistors”, in: G. Svehla (Ed.), *Comprehensive Analytical Chemistry*, vol. 23, Elsevier, Amsterdam, 1988.
- [10] D. Yates, S. Levine, T. Healy, “Site-binding Model of the Electrical Double Layer at the Oxide/Water Interface”, *Journal of the Chemical Society-Faraday Transactions 1*, vol. 70 (1974) 1807-1818.
- [11] C. Silva, G. Cava, J. Dávila, S. Mogrovejo, A. Gutarra, “Caracterización Eléctrica y Electroquímica de Sensores tipo Transistor de Efecto de Campo Sensitivo a Iones (ISFET)”, *Revista de la Facultad de Ciencias de la UNI*, vol. 9 (1) (2005) 13-20.
- [12] S. Casans, D. Ramírez, A. Navarro, “Circuit Provides Constant Current for ISFETs/MEMFETs”, *EDN Access, Design Ideas*, 2000.
- [13] S. Martinoia, G. Massobrio, L. Lorenzelli, “Modeling ISFET microsensor and ISFET-based microsystems: a review”, *Sensors and Actuators B* 105 (2005) 14-27.
- [14] G. Massobrio, S. Martinoia, M. Grattarola, “Use of SPICE for modeling silicon-based chemical sensors”, *Sens. Mater.* 6 (2) (1994) 101-123.

- [15] M. Grattarola, G. Massobrio, S. Martinoia, "Modeling H⁺ -sensitive FETs with SPICE", IEEE Trans. Electron Devices, ED 39 (1992) 813-819.
- [16] S. Martinoia, G. Massobrio, M. Grattarola, "An ISFET model for CAD applications", Sensors and Actuators B 8 (1992) 261-265.
- [17] S. Martinoia, G. Massobrio, "A behavioral macromodel of the ISFET in SPICE", Sensors and Actuators B 62 (2000) 182-189.
- [18] S. Martinoia, M. Grattarola, G. Massobrio, "Modeling non-ideal behaviors in H⁺ Sensitive FETs with SPICE", Sensors and Actuators B 7 (1992) 561-564.
- [19] S. Martinoia, L. Lorenzelli, G. Massobrio, P. Conci, A. Lui, "Temperature effects on the ISFET behavior: simulations and measurements", Sensors and Actuators B 50 (1998) 60-68.
- [20] L. Bousse, N. De Rooj, P. Bergveld, "Operation of chemically sensitive field-effect Sensor as a function of the insulator-electrolyte interface", IEEE Trans. Electron Devices ED-30 (10) (1983) 1263-1270.
- [21] C. Silva, "Desarrollo de un ENFET para aplicaciones clínicas", Memoria presentada como trabajo de investigación de tercer ciclo en Ingeniería Informática, Bellaterra, 1999.

ANEXO I

Archivo de entrada para la obtención mediante OrCAD PSpice de las curvas I_{ds} vs V_{ds} en función del V_{gs} para un $pH=2$.

```
.OPTIONS ITL5=10000 LIMPTS=6000
```

```
+ itl1=1000
```

Descripción del circuito

```
VpH 7 0 DC 2
```

```
V1 5 0 DC 15
```

```
V2 6 0 DC -15
```

```
VGS 4 0
```

```
VDS 3 0
```

```
R1 1 2 1000
```

```
XA01 3 4 1 1 7 ISFET
```

```
XA04 0 1 5 6 2 OP-07
```

Parámetros

```
.PARAM
```

```
+k=1.38e-23 T=300 eps0=8.85e-12
```

```
+Ka=15.8 Kb=63.1e-9 Kn=1e-10
```

```
+Nsil=3.0e18 Nnit=2.0e18
```



```

+Cbulk=0.1

+ q=1.6e-19 NAv='6.023e23*1e3'

+ epsw=78.5 epsihp=32 epsohp=32

+ dihp=0.1n dohp=0.3n

+ Eabs=4.7 Phim=4.7 Erel=0.200 Chieo=3e-3 Philj=1e-3

+ ET={q/(k*T)}

+ sq={sqrt(8*eps0*epsw*k*T)}

+ Cb={NAv*Cbulk}

+ KK={Ka*Kb}

+ Ch={((eps0*epsihp*epsohp)/(epsohp*dihp+epsihp*dohp))}

+ Cd={({sq*ET*0.5}*sqrt(Cb))}

+ Ceq={1/(1/Cd+1/Ch)}

*Subcircuitos*

.SUBCKT ISFET 6 1 3 4 101

Eref 1 10 VALUE={Eabs-Phim-Erel+Chieo+Philj}

Ceq 10 2 0.52

EP1 46 0 VALUE={log(KK)+4.6*V(101)}

RP1 46 0 1G

EP2 23 0 VALUE={log(Ka)+2.3*V(101)}

RP2 23 0 1G

EPH 2 10 VALUE={{(q/Ceq)*(Nsil*((exp(-2*V(2,10)*ET)-exp(V(46)))/(exp(-2*V(2,10)*ET)
+ +exp(V(23))*exp(-1*V(2,10)*ET)+exp(V(46))))}
+ +Nnit*((exp(-1*V(2,10)*ET))/(exp(-1*V(2,10)*ET)+(Kn/Ka)*exp(V(23))))}}

RpH 101 0 1K

MIS 6 2 3 4 MISFET L=18u W=804u NRS=5 NRD=5
    
```

```

.MODEL MISFET NMOS LEVEL=2

+VTO=7.99E-01 LAMBDA=7.59E-03 RSH=3.5E+01 TOX=86E-9

+UO=6.53E+02 TPG=0

+UEXP=7.64E-02 NSUB=3.27E+15 NFS=1.21E+11

+NEFF=3.88 VMAX=5.35E+04 DELTA=1.47 LD=2.91E-06

+UCRIT=7.97E+04 XJ=6.01E-09 CJ=4.44E-4 IS=1E-11

+CJSW=5.15E-10 PHI=5.55E-01 GAMMA=9.95E-01

+MJ=0.395 MJSW=0.242 PB=0.585

.ENDS ISFET

.SUBCKT OP-07 1 2 3 4 5

C1 11 12 2.887E-12
C2 6 7 30.00E-12
DC 5 53 DX
DE 54 5 DX
DLP 90 91 DX
DLN 92 90 DX
DP 4 3 DX
EGND 99 0 POLY (2) (3,0) (4,0) 0 .5 .5
FB 7 99 POLY (5) VB VC VE VLP VLN 0 147.3E6 -100E6 100E6 100E6 -100E6
GA 6 0 11 12 113.1E-6
GCM 0 6 10 99 56.69E-12
IEE 10 4 DC 7.501E-6
HLIM 90 0 VLIM 1K
Q1 11 2 13 QX
Q2 12 1 14 QX
R2 6 9 100.0E3
RC1 3 11 8.841E3

```


RC2 3 12 8.841E3

RE1 13 10 1.943E3

RE2 14 10 1.943E3

REE 10 99 26.66E6

RO1 8 5 30

RO2 7 99 30

RP 3 4 12.04E3

VB 9 0 DC 0

VC 3 53 2.900

VE 54 4 2.900

VLIM 7 8 DC 0

VLP 91 0 DC 20

VLN 0 92 DC 20

.MODEL DX D (IS=800.0E-18)

.MODEL QX NPN (IS=800.0E-18 BF=5.357E3)

.ENDS OP-07

Análisis a realizar

.OP

.DC VDS 0 3 0.2 VGS 1 3 0.5

.PRINT DC V(2) I(R1)

.PROBE

.END

ANEXO II

Modificaciones en el archivo de entrada mostrado en el anexo I, para la obtención mediante OrCAD PSpice de las curvas I_{ds} vs V_{gs} en función del V_{ds} para un $pH=2$.

Descripción del circuito

VpH 7 0 DC 2

V1 5 0 DC 15

V2 6 0 DC -15

VGS 4 0

VDS 3 0

R1 1 2 1000

XA01 3 4 1 1 7 ISFET

XA04 0 1 5 6 2 OP-07

Análisis a realizar

.OP

.DC VGS 0 3 0.2 VDS 0.5 1.5 0.5

.PRINT DC V(2) I(R1)

.PROBE

.END

ANEXO III

Modificaciones en el archivo de entrada mostrado en el anexo I, para la obtención mediante OrCAD PSpice de las curvas I_{ds} vs V_{ds} en función al pH para un $V_{gs}=1.5V$.

Descripción del circuito

VpH 7 0

V1 5 0 DC 15

V2 6 0 DC -15

VGS 4 0 DC 1.5

VDS 3 0

R1 1 2 1000

XA01 3 4 1 1 7 ISFET

XA04 0 1 5 6 2 OP-07

Análisis a realizar

.OP

.DC VDS 0 3 0.2 VpH 4 10 3

.PRINT DC V(2) I(R1)

.PROBE

.END

ANEXO IV

Modificaciones en el archivo de entrada mostrado en el anexo I, para la obtención mediante OrCAD PSpice de las curvas I_{ds} vs V_{gs} en función al pH para un $V_{ds}=1V$.

Descripción del circuito

VpH 7 0

V1 5 0 DC 15

V2 6 0 DC -15

VGS 4 0

VDS 3 0 DC 1

R1 1 2 1000

XA01 3 4 1 1 7 ISFET

XA04 0 1 5 6 2 OP-07

Análisis a realizar

.OP

.DC VGS 0 3 0.2 VpH 4 10 3

.PRINT DC V(2) I(R1)

.PROBE

.END