

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 674 618**

51 Int. Cl.:

G01N 27/414 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **22.06.2005** **E 10194215 (9)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **28.03.2018** **EP 2295957**

54 Título: **Circuito de procesamiento de señales digitales que comprende un transistor de efecto de campo sensible a iones y método de monitorización de una propiedad de un fluido**

30 Prioridad:

13.07.2004 GB 0415633

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:

02.07.2018

73 Titular/es:

**DNAE GROUP HOLDINGS LIMITED (100.0%)
Ugli Campus Block C, 56 Wood Lane
London W12 7SB, GB**

72 Inventor/es:

**TOUMAZOU, CHRISTOFER;
PREMANODE, BHUSANA y
SHEPHERD, LEILA**

74 Agente/Representante:

RIZZO, Sergio

ES 2 674 618 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín Europeo de Patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre Concesión de Patentes Europeas).

DESCRIPCIÓN

Circuito de procesamiento de señales digitales que comprende un transistor de efecto de campo sensible a iones y método de monitorización de una propiedad de un fluido

Campo de la invención

5 **[0001]** La presente invención se refiere a transistores de efecto de campo sensibles a iones y a sistemas de control y procesamiento que utilizan transistores de efecto de campo sensibles a iones.

Antecedentes de la invención

10 **[0002]** El transistor de efecto de campo sensible a iones (ISFET) está basado en un MOSFET con una puerta remota (o «electrodo de referencia») que se encuentra por debajo de un aislador sensible químicamente. La superficie del aislador está expuesta a un electrolito sobre el cual se llevan a cabo mediciones. Un escenario de uso típico de un ISFET se ilustra en la Figura 1. Los efectos de campo de la interacción de carga iónica en la superficie del aislador provocan cambios en la corriente de drenador del ISFET frente a la característica de tensión entre puerta y fuente (I_D - V_{GS}) como se ilustra en la Figura 2. El aislador en contacto con el electrolito se selecciona de acuerdo con sus propiedades químicas y sensibilidad a un ion en concreto.

15 **[0003]** Para los ISFET diseñados para medir el pH de un electrolito, es decir, el contenido de iones H^+ del electrolito, se emplean comúnmente membranas de nitruro de silicio y óxido de aluminio para aislar la puerta. Pueden realizarse ISFET sensibles a iones distintos de H^+ al elegir la membrana sensible a iones, con lo que se añade un elemento de selectividad de iones. Los ISFET cuya membrana se modifica para que sea selectiva con respecto a una especie iónica determinada se denominan CHEMFET, con una variación adicional denominada ENFET que usa enzimas muy cerca de la superficie de la membrana. También se ha demostrado que incluso los pH-ISFET convencionales con unas membranas de Si_3N_4 sin modificar presentan una sensibilidad limitada pero cuantificable a iones de K^+ y Na^+ . Dicho esto, las aplicaciones prácticas y comerciales del ISFET para aplicaciones que no sean la detección del pH son inusuales. No obstante, en la siguiente exposición, el término ISFET se emplea tanto de forma específica para hacer referencia a un sensor de pH y de forma general para hacer referencia a todos los FET sensibles a iones y enzimas que funcionan con unos principios similares.

20

25

[0004] El atractivo de los ISFET y de sus homólogos basados en FET radica en que son compatibles con los procesos estándar de fabricación que se emplean para la producción en masa de chips informáticos y, por tanto, pueden producirse de forma fiable y económica. Lo más importante es que los circuitos de procesamiento puedan integrarse en el mismo chip que el propio dispositivo ISFET. La integración de circuitos inteligentes con el propio dispositivo de detección es lo que se necesita para el desarrollo de los llamados «sensores inteligentes» que requieren robustez frente a condiciones de detección no ideales, así como para proporcionar electrónica que distinga entre los compuestos químicos «en el chip».

30

[0005] El modo operativo normal de un ISFET es la fuerte región de inversión de la característica I_D - V_{GS} . En esta región, la tensión entre puerta y fuente sobrepasa la tensión umbral V_{TH} , lo que da lugar a una fuerte inversión del canal subyacente a la puerta. Para este modo operativo, la corriente de drenador está relacionada con la tensión de puerta por medio de una relación cuadrática o lineal.

35

[0006] Haciendo referencia de nuevo a la Figura 1, cualquier tensión que se aplique al electrodo de referencia de un ISFET está acoplada de forma capacitiva a través del electrolito a la superficie del aislador, donde una carga de iones dependiente de pH sobre esta interfaz modula la corriente del canal, lo que provoca los cambios observados en la característica de transferencia del ISFET, modulando de este modo su tensión umbral V_{th} . Suponiendo que el ISFET funciona en el modo de corriente de drenador constante, con una tensión drenador fuente constante, la tensión entre puerta y fuente refleja directamente el potencial interfacial sensible al pH en la interfaz de la puerta, es decir:

40

$$pH = pH_{cal} + V_{gs}/S, \quad (1)$$

45 donde pH_{cal} es el pH de un líquido de calibración a 37 °C y S es la sensibilidad al pH del ISFET. La derivación de esta relación se detalla con mayor profundidad en «ISFET, Theory and Practice», P. Bergveld, IEEE Sensor Conference, Toronto, Octubre 2003. No obstante, este enfoque supone una temperatura constante, y en cualquier enfoque práctico debe aplicarse una compensación de temperatura.

[0007] El enfoque convencional para compensar las mediciones para los efectos de temperatura consiste en modelar la dependencia de la temperatura de un sistema, medir la temperatura en paralelo con el pH y corregir el pH medido en función del modelo y la temperatura medida. Aunque es efectivo, este enfoque presenta una serie

50

de desventajas. En primer lugar, depende de la provisión de un sensor de temperatura, que normalmente comprende una resistencia sensible a la temperatura integrada en el mismo chip que el ISFET. En segundo lugar, debe proporcionarse una potencia de procesamiento para llevar a cabo la corrección. En tercer lugar, el proceso de corrección de los valores de pH medidos toma su tiempo. En un sistema típico, los valores de pH y temperatura se convierten en sus equivalentes digitales antes de llevar a cabo el procesamiento adicional con un microprocesador o CPU. Si es necesario, las salidas de control digital se convierten en equivalentes análogos antes aplicarse en un dispositivo a controlar.

[0008] Desde hace tiempo se reconoce que una de las áreas clave en la que pueden aplicarse los ISFET es en los sensores implantables y ponibles. Los requisitos de un diseño convencional de ISFET expuestos en el párrafo anterior no encajan con dichos sensores, que tienen que ser pequeños, consumir niveles bajos de energía y ser extremadamente precisos. Especialmente en aquellos casos en que los sensores forman parte de un bucle de control, p. ej., controlando un sistema de administración de medicamentos, deben ser también extremadamente precisos.

[0009] El documento US4793825A describe un implante médico que lleva un medio de procesamiento de señales que proporciona una salida en respuesta a una señal de entrada. La entrada puede ser acústica, electromagnética, de temperatura, valor de pH o química. La salida puede ser acústica, electromagnética o química. Puede usarse un CHEMFET para detectar un compuesto químico y accionar la liberación de un medicamento contenido en el dispositivo.

[0010] El documento GB2019090A da a conocer un oscilador que comprende un circuito lógico cuyos periodos de encendido-apagado dependen de condiciones ambientales.

[0011] El documento EP1217364 da a conocer una célula de detección que comprende un transistor de película delgada y un medio receptor acoplado a un electrodo de puerta del transistor de película delgada para recibir una muestra para su identificación.

Sumario de la invención

[0012] De acuerdo con un primer aspecto de la presente invención, se proporciona un circuito de procesamiento de señales digitales, comprendiendo el circuito al menos un transistor de efecto de campo sensible a iones y al menos un transistor semiconductor de óxido metálico, configurado de tal forma que al menos un transistor de efecto de campo sensible a iones y al menos un transistor semiconductor de óxido metálico juntos formen un inversor de contactor CMOS.

[0013] El o cada transistor de efecto de campo sensible a iones puede comprender una membrana sensible a los analitos que está configurada para exponerse en el uso a un medio que vaya a monitorizarse.

[0014] El circuito de procesamiento de señales digitales puede estar configurado para funcionar de comparador para comparar un valor de un parámetro medido por el transistor de efecto de campo sensible a iones con un valor umbral, estando dispuestos el transistor de efecto de campo sensible a iones y el transistor semiconductor de óxido metálico en una configuración de inversor. Preferiblemente, uno entre el transistor de efecto de campo sensible a iones y el transistor semiconductor de óxido metálico es un dispositivo de canal n y el otro es un dispositivo de canal p.

[0015] El circuito de procesamiento de señales digitales puede estar dispuesto para implementar una o varias de las siguientes funciones: AND, NAND, OR, XOR, NOR.

[0016] Preferiblemente, el circuito de procesamiento de señales digitales comprende un medio de polarización para polarizar el o cada transistor de efecto de campo sensible a iones en la región de inversión débil.

De acuerdo con un segundo aspecto de la presente invención se proporciona un método de implementación de una función lógica que tiene como una de sus entradas el valor de un parámetro de un medio, comprendiendo el método:

proporcionar un transistor de efecto de campo sensible a iones y un semiconductor de óxido metálico que juntos forman un inversor de contactor CMOS;

exponer el transistor de efecto de campo sensible a iones a dicho medio para conmutar el inversor de contactor CMOS; y

generar una señal digital derivada de la operación de conmutación CMOS, cuya señal es una evaluación de una función lógica que tiene como una de sus entradas el valor del parámetro del medio.

Breve descripción de los dibujos

[0017]

- 5 La Figura 1 ilustra de forma esquemática un ISFET en un escenario de uso típico;
- La Figura 2 muestra las características I_D - V_{GS} del ISFET de la Figura 1 a diversos niveles de pH;
- La Figura 3 ilustra de forma esquemática un MOSFET de silicio de canal p;
- La Figura 4 comprende un espejo de corriente que comprende un ISFET;
- La Figura 5 ilustra un HCell para medir la concentración de ion hidrógeno;
- 10 La Figura 6 muestra la característica IV del Hcell de la Figura 5;
- La Figura 7 ilustra de forma esquemática un inversor CMOS.
- La Figura 8 muestra la característica de conmutación del inversor de la Figura 7;
- La Figura 9 ilustra el cambio del umbral de conmutación provocado por el pH cambiante en un inversor CMOS que comprende un ISFET;
- 15 La Figura 10 muestra las propiedades de conmutación de un inversor ISFET a distintas tensiones de entrada;
- La Figura 11 muestra un ISFET basado en una puerta NAND y la correspondiente tabla de verdad; y
- La Figura 12 muestra un ISFET basado en una puerta NOR y la correspondiente tabla de verdad.

Descripción detallada de determinadas formas de realización de la invención

20 **[0018]** Un FET de canal n como el ilustrado en la Figura 3 es un dispositivo de cuatro terminales que consiste en un sustrato de silicio de tipo p (B) y dos pocillos de tipo n muy impurificados conocidos como fuente (S) y drenador (D). La superficie de silicio está cubierta con un aislador de dióxido de silicio. Un contacto de puerta de polisilicio (G) controla la carga dentro de la región bajo la superficie del aislador entre la fuente y el drenador, denominado canal.

25 **[0019]** Conforme aumenta la tensión V_G que se aplica a la puerta, la carga positiva se repele inicialmente desde el canal formando una capa de agotamiento sin portadores de carga móviles y una carga negativa neta. Conforme aumenta más la tensión de puerta, esta capa de agotamiento se ensancha hasta que los electrones empiezan a extraerse de la fuente y drenarse hacia el canal, formando una capa de inversión. El transistor normalmente funciona por encima de una tensión umbral determinada para la cual el canal se invierte fuertemente y los electrones móviles en la capa de inversión derivan a través del canal cuando se aplica una diferencia de potencial entre el drenador y la fuente. Como ya se ha indicado, para este modo operativo la corriente de drenador está relacionada con la tensión de puerta por medio de una relación cuadrática o lineal.

30 **[0020]** El modo operativo denominado de «inversión débil» implica mantener la tensión de puerta inferior a la tensión umbral de modo que el canal se agote y únicamente exista una capa de inversión fina. En la inversión débil, la carga móvil en la capa de inversión fina es muy baja para que contribuya significativamente a cualquier corriente de deriva a través del campo eléctrico horizontal. La corriente de drenador en la inversión débil se debe a la difusión de electrones a través de un gradiente de concentración entre fuente y drenador. Puesto que las concentraciones de electrones en la fuente y drenador y a lo largo del canal están relacionadas con los potenciales de barrera en dichos puntos por la distribución de Boltzmann, se desprende que la corriente de drenador está exponencialmente relacionada con V_s , V_d y V_g con respecto a V_b , escalado mediante la tensión térmica $U_T = kT/q$ o RT/F . Es decir:

$$I_d = I_0 \exp(V_G/nU_T) [\exp(-V_S/U_T) - \exp(-V_D/U_T)] \quad (2)$$

donde I_0 es el multiplicador preexponencial y n es el factor de pendiente subumbral.

5 **[0021]** Para el ISFET, el electrodo de referencia actúa de puerta remota y la membrana sensible químicamente depositada en la parte superior del aislador de SiO_2 se expone directamente a la solución de muestra. El alcance de la inversión en el canal por debajo del aislador depende no solo de la tensión aplicada al electrodo de referencia, sino también de la acumulación de carga de los iones en solución sobre la membrana de detección. La acumulación de iones en la superficie de la membrana está relacionada con la concentración de las especies iónicas en la muestra por medio de los modelos de unión en el sitio y de doble capa de Gouy y Chapman. Puesto que cualquier acumulación de carga positiva en la superficie de la membrana debe tener su reflejo en una acumulación de carga negativa en el canal, los cambios en la concentración iónica de la muestra se reflejarán directamente en la corriente de drenador de inversión débil del ISFET.

15 **[0022]** Conocer la relación entre la carga de la superficie de la membrana y la concentración de especies, junto con el hecho de que la corriente del ISFET de inversión débil es proporcional a la carga de la superficie de la membrana, significa que los circuitos electrónicos que llevan a cabo una manipulación matemática sencilla pueden usarse para obtener una relación directa entre la concentración de especies y la corriente incluso en CHEMFET y ENFET. Asimismo, la sensibilidad de la corriente del ISFET de inversión débil con respecto a la concentración de iones es independiente de la temperatura, puesto que las distribuciones de Boltzmann en escala de temperatura tanto de los electrones del canal como de los iones en solución se cancelan mutuamente.

[0023] La ecuación de gran señal para la corriente de drenador en un MOSFET polarizado en la región de inversión débil viene proporcionada por:

$$I_D = I_0 \exp\left(\frac{V_{GS}}{nU_T}\right) \left(1 - \exp\left(\frac{-V_{DS}}{U_T}\right)\right) \\ = \left[2n \frac{KW}{L} U_T^2 \exp\left(\frac{V_{GS} - V_{T0}}{nU_T}\right) \exp\left(\frac{(n-1)V_{BS}}{nU_T}\right)\right] \left(1 - \exp\left(\frac{-V_{DS}}{U_T}\right)\right) \quad (3)$$

20

25 donde $\beta=KW/L$, V_{T0} es la tensión umbral para $V_{BS}=0$ y n es el factor de pendiente subumbral y se supone saturación para $V_{DS} > 4U_T$. Esta ecuación también vale para un ISFET invertido débilmente, puesto que todos los fenómenos químicos adicionales están representados como la modulación de su tensión umbral por un potencial a través del electrolito que es linealmente proporcional al pH. Puesto que el pH está exponencialmente relacionado con la concentración de ion hidrógeno, puede desarrollarse una relación directa entre la concentración de ion hidrógeno y la corriente de drenador de inversión débil.

30 **[0024]** Cualquier circuito que extraiga el potencial a través del electrolito y lo convierta en una señal de corriente de inversión débil es de interés significativo para el procesamiento químico de señales en tiempo real, puesto que la concentración de ion hidrógeno es un parámetro más natural para el procesamiento de señales que el pH. El espejo de corriente, ilustrado en la Figura 4, es el circuito más sencillo de este tipo.

[0025] Si un ISFET conectado a diodos está polarizado con una fuente de corriente y su electrodo de referencia está conectado a la puerta de un MOSFET como en la Figura 4, y suponiendo unos dispositivos geométrica y eléctricamente equilibrados e ignorando el error ΔV_{DS} , entonces $I_1 \neq I_2$ debido al ΔV_{th} entre el ISFET y el MOSFET, que se conoce de (1) que es igual a V_{chem} .

35 **[0026]** Usando la ecuación (3) para dispositivos saturados y perfectamente equilibrados:

$$\frac{I_{D2}}{I_{D1}} = \exp\left(\frac{V_{chem}}{nU_T}\right) \quad (4)$$

[0027] Sustituyendo en la relación logarítmica entre pH y concentración de ion hidrógeno, $\text{pH} = -\log_{10}[\text{H}^+]$, se observa que la relación de corrientes I_{D2}/I_{D1} es proporcional a una potencia *conocida* de concentración de ion hidrógeno y es *independiente* de los efectos de la temperatura:

$$\begin{aligned} \frac{I_{D2}}{I_{D1}} &= \exp\left(\frac{\gamma}{nU_T}\right) \exp\left(\frac{2.3U_T \alpha pH}{nU_T}\right) \\ &= \exp\left(\frac{\gamma}{nU_T}\right) \exp\left(\frac{-\alpha \ln[H^+]}{n}\right) \\ &= K_{chem} \cdot [H^+]^{-\alpha/n} \end{aligned} \quad (5)$$

5 **[0028]** Este resultado significativo demuestra que la corriente de drenador en un ISFET débilmente invertido está controlada exponencialmente por sus potenciales de puerta-fuente y masa-fuente, y está escalado por un parámetro independiente de la temperatura que es proporcional a una potencia conocida (inferior a la unidad puesto que $0 < \alpha < 1$ y $n > 1$) de la concentración de ion hidrógeno, es decir:

$$I_{D(ISFET)} = I_{D(MOS)} \cdot K_{chem}^{-1} \cdot [H^+]^{\alpha/n} \quad (6)$$

10 **[0029]** La insensibilidad a la temperatura del ISFET polarizado en la región de inversión débil lo hace idóneo para su uso en la etapa de transducción de un sensor químico. El uso de MOSFET en inversión débil también resulta ventajoso para los circuitos de procesamiento en el chip puesto que la relación exponencial entre la corriente de drenador y las tensiones de terminal puede explotarse para implementar una manipulación matemática por medio de circuitos de baja potencia muy sencillos.

15 **[0030]** Con el fin de obtener una corriente de salida que sea directamente proporcional a $[H^+]$, se necesita una manipulación adicional de la ecuación (5). Pueden usarse circuitos translineares que exploten la relación lineal entre transconductancia y corriente de drenador en transistores MOS de subumbral para llevar a cabo la multiplicación, división y funciones de ley potencial en las señales de corriente (aunque pueden usarse de forma alternativa o adicional transistores bipolares que presenten esta relación).

20 **[0031]** El circuito ilustrado en la Figura 5 se presenta como ejemplo de una etapa de entrada cuya salida es una corriente I_{out} directamente proporcional al número de iones H^+ (protones) en la masa del electrolito. Este circuito se denomina «HCell» en el presente documento. Es ilustrativo de lo apropiado que resulta para explotar el comportamiento exponencial de los transistores de efecto de campo en inversión débil para obtener directamente parámetros químicos reales. El ISFET usado en el HCell tiene su membrana sensible a iones adaptada químicamente de tal modo que su sensibilidad al pH da $\alpha/n=0,5$.

[0032] Suponiendo saturación e ignorando el error ΔV_{DS} , se observa de la ecuación (3) que las corrientes de drenador entre el ISFET X2 y el MOSFET M1 están relacionadas por:

$$\frac{I_{xis}}{I_{b1}} = \frac{n_2 \beta_2}{n_1 \beta_1} \exp\left(\frac{-\Delta V_{T0}}{nU_T}\right) \exp\left(\frac{(n-1)(V_{b2} - V_{b1})}{nU_T}\right) \exp\left(\frac{V_{S1} - V_{S2}}{U_T}\right) \quad (7)$$

25 donde $\Delta V_{T0} = V_{T0(ISFET)} - V_{T0(MOS)} = V_{chem}$

[0033] Para el circuito mostrado en la Figura 5, suponiendo unos dispositivos geométrica y eléctricamente equilibrados con unas dimensiones de dispositivo iguales y masas conectadas a tierra, la ecuación (7) se convierte en:

$$\begin{aligned} \frac{I_{xis}}{I_{b1}} &= \exp\left(\frac{-\gamma - 2.3\alpha U_T pH}{nU_T}\right) \exp\left(\frac{-V_{ref}}{U_T}\right) \\ &= K_{chem} [H^+]^{0,5} \exp\left(\frac{-V_{ref}}{U_T}\right) \end{aligned} \quad (8)$$

30 donde

$$K_{chem} = \exp\left(\frac{-\gamma}{nU_T}\right)$$

[0034] La tensión de referencia V_{ref} se usa para establecer el punto de polarización de tal forma que tanto M1 como X2 funcionen en inversión débil. El límite en el intervalo de entrada de pH es el intervalo de tensión de la región de inversión débil operable y la sensibilidad al pH S. Para regiones de inversión débil en el intervalo de aproximadamente $400mV V_{GS}$, unos ISFET típicos con sensibilidades de $50mV/pH$ tienen 7 u 8 unidades de pH de intervalo dinámico.

[0035] Los transistores M3 a M6 forman un bucle translineal para el cual, usando el principio translineal, obtenemos la relación:

$$I_{out} = \frac{I_{xis}^2}{I_{b2}}$$

[0036] Sustituyendo en el resultado de (8)

$$I_{out} = \frac{I_{b1}^2 \exp\left(\frac{-2V_{ref}}{nU_T}\right) K_{chem}^2 [H^+]^2}{I_{b2}} \quad (9)$$

[0037] Estableciendo $I_{b1}=I_{b2}$ se obtiene una relación directa entre la relación de corrientes I_{out}/I_{b1} y $[H^+]$:

$$\frac{I_{out}}{I_{b1}} = \exp\left(\frac{-2V_{ref}}{nU_T}\right) K_{chem}^2 [H^+]^2 \quad (10)$$

[0038] Este enfoque ratiométrico al procesamiento de señales reduce la dependencia del circuito de la temperatura, suponiendo que los dispositivos estén en proximidad cercana. Usando una tensión de referencia V_{ref} proporcional a la temperatura absoluta (PTAT), y asumiendo que K_{chem} y α son independientes de la temperatura hasta una aproximación de primer orden, se observa que la relación de corrientes es directamente proporcional a la concentración de ion hidrógeno con una compensación de temperatura inherente.

[0039] El circuito de la Figura 5 se simuló en tecnología AMS de $0,8\mu$ por medio de una versión simplificada del macromodelo de Martinoia para un ISFET de nitruro de sodio con $pH_{pzc}=3$ y una sensibilidad al pH perfectamente lineal (α constante para todos los pH y temperaturas). Se ha observado que $n \approx 1,43$, y se seleccionó que α fuera $0,715$ correspondiente a una sensibilidad de $42,6mV/pH$ a $T=300K$.

[0040] $V_{dd} = 1,8V$, $I_{b1}=I_{b2}=10nA$, y se seleccionó que V_{ref} fuera $50mV$ para centrar la región de funcionamiento en pH 7. La corriente de salida, mostrada en la Figura 6, proporciona una buena linealidad para el intervalo de pH

$$\frac{d \ln(I_{out})}{dpH} = -2.303 \pm 0.19 .$$

5 a 9, para el que Se seleccionaron grandes dimensiones ($W=432\mu m$, $L=8\mu m$) para X2 y M1 para minimizar el efecto de los errores de equilibrado. W/L para los transistores M3 a M6 fue de $40\mu m/8\mu m$.

[0041] Extender los principios aquí introducidos a un circuito con varios ISFET, cada uno de ellos codificando una concentración iónica distinta, permitiría que cualquier ecuación química que incluya productos, cocientes y relaciones de la ley potencial de concentración iónica se procesara en tiempo real. Explotar los cuatro terminales del ISFET mediante el uso de la masa o «puerta de atrás» como segunda entrada para manipulaciones translineales aumenta además la flexibilidad de estos principios. Asimismo, la inclusión de condensadores abre este principio a todo un campo de ecuaciones diferenciales de cinética química.

[0042] El espejo ISFET-MOSFET es la etapa más sencilla de entrada de modo corriente y se ha presentado aquí para ilustrar lo apropiado que resulta convertir la modulación de tensión umbral provocada por fenómenos químicos en una corriente. Sustituir el MOSFET de esta configuración por un ISFET casi insensible al pH (denominado REFET) permitiría usar un electrodo de cuasireferencia en estado sólido puesto que el potencial de electrodo inestable y desconocido es común tanto de ISFET como de REFET y se cancela en la topología de espejo de corriente. La diferencia en la tensión umbral ΔV_{TH} es más pequeña entre un ISFET y un REFET que entre un ISFET y un MOSFET, disminuyendo los errores de ΔV_{DS} y reduciendo la V_{bias} necesaria, con lo que se reduce de este modo el consumo energético. El equilibrado también podría mejorarse. Para un circuito más robusto con una relación señal-ruido mayor, cabría usar una etapa de entrada completamente diferencial.

[0043] Entre los conceptos de detección inteligente basados en la operación de inversión débil de las aplicaciones de transistores más allá de la discriminación química usando la selectividad de las membranas se incluyen:

- Monitorización de reacciones en tiempo real y procesamiento de datos analíticos
- Secuenciación de ADN
- 5 • Titulaciones rápidas de base-ácido usando modelos cinéticos para extraer la información analítica buscada, mucho antes de alcanzar el punto de equivalencia
- Implementación de «árboles de decisión químicos» que usen ISFET y otros sensores directamente como dispositivos lógicos (verdadero/falso) con umbrales ajustables
- 10 • Diagnósticos médicos que usan monitorización en tiempo real de proporciones de metabolitos en sangre y orina
- Puentes neuronales
- Detección de impurezas

15 **[0044]** Además de su adecuación para usarse en una etapa de entrada de transductor, el ISFET que funciona en la inversión débil puede proporcionar un bloque de construcción básico para el procesamiento digital de señales químicamente relacionadas.

[0045] El inversor CMOS estándar ilustrado en la Figura 7 presenta la característica de transferencia de tensión mostrada en la Figura 8, cuando funciona en la región de inversión débil. Para la región de inversión débil, en saturación y suponiendo que $V_{BS}=0$, la corriente de drenador viene dada por:

$$20 \quad I_D = 2n\beta U_T^2 \exp\left(\frac{V_{GS} - V_{T0}}{nU_T}\right) \quad (11)$$

donde n es el parámetro de pendiente subumbral, $\beta=KW/L$, U_T es la tensión térmica y V_{T0} es la tensión umbral intrínseca.

[0046] En el umbral de conmutación V_{inth} , M1 y M2 tienen corrientes de drenador iguales.

$$V_{inth} = \frac{V_{DD} - |V_{TOp}| + \ln\left(\frac{I_{sn}}{I_{sp}}\right)V_{TOn}}{1 + \ln\left(\frac{I_{sn}}{I_{sp}}\right)} \quad (12)$$

25 donde las pendientes de subumbral para NMOS y PMOS se suponen iguales.

[0047] Si el NMOS, M1 de la Figura 7 se sustituye por un ISFET de canal n, entonces, dado que $V_{th(ISFET)} = V_{th(MOS)} + V_{chem}$, el umbral de conmutación vendrá dado como:

$$V_{inth} = \frac{V_{DD} - |V_{TOp}| + \ln\left(\frac{I_{sn}}{I_{sp}}\right)[V_{TOn} + V_{chem}]}{1 + \ln\left(\frac{I_{sn}}{I_{sp}}\right)} \quad (13)$$

30 es decir, un descenso en el umbral de conmutación para $pH < 11$ y un aumento para $pH > 11$.

[0048] La Figura 9 ilustra el cambio en el umbral de conmutación provocado por el cambio de pH. Una consecuencia de esta característica es que si v_i es fijo, entonces la conmutación se producirá exclusivamente a consecuencia de cambios en el pH. Asimismo, puede establecerse el umbral de pH en el cual se produzca esta conmutación por medio de la selección de v_i como se muestra en la Figura 10. A título ilustrativo, se muestra que la salida es alta para $pH \leq 4$ cuando v_i es fijo en 0V y para $pH \leq 8$ cuando $v_i=100mV$.

35

[0049] La importancia de esto es que el circuito de la Figura 7 puede usarse de comparador cuya salida es alta para un pH mayor que un umbral definido por la tensión de entrada fija en la puerta, vi.

5 **[0050]** También pueden construirse puertas lógicas usando el ISFET que funciona en la región de inversión débil. En el circuito de la Figura 11, por ejemplo, V_{GA} establece el umbral de pH p_{thA} y V_{GB} establece p_{thB} . El ISFET de canal n está en saturación para $pH < p_{th}$. La salida Y solo será 0 cuando ambos ISFET estén en saturación; para el resto de estados la salida es 1 como se muestra en la tabla de verdad NAND. Visto desde otra perspectiva, podemos decir que la salida es alta para $pH_A \leq p_{thA}$ OR $pH_B \leq p_{thB}$

10 **[0051]** Mediante un análisis similar, la salida en el circuito de la Figura 12 es alta únicamente cuando $pH_A \leq p_{thA}$ AND $pH_B \leq p_{thB}$ como puede deducirse de la tabla de verdad NOR (suponiendo de nuevo que V_{GA} establece el umbral de pH p_{thA} y V_{GB} establece p_{thB}).

[0052] Se ha demostrado que los ISFET pueden usarse para implementar las puertas lógicas básicas, que se desencadenan no por 0 y 1 en la entrada de puerta, sino por un $pH < o >$ que un umbral seleccionado. Por tanto, los ISFET son especialmente apropiados para la implementación directa de funciones lógicas más complejas.

15 **[0053]** Aunque el modo operativo preferido para los ISFET/MOSFET que forman dichos circuitos digitales es el modo de inversión débil, ello no resulta fundamental, y pueden funcionar alternativamente en el modo de saturación. Los circuitos pueden usar una combinación de dispositivos de modo de inversión débil y modo de saturación.

20 **[0054]** Los expertos en la materia apreciarán que pueden realizarse diversas modificaciones a las formas de realización anteriormente descritas sin desviarse del alcance de la invención. En una modificación, el ISFET de una sola puerta descrito anteriormente se sustituye por un ISFET de puertas múltiples. En otra modificación, la «puerta de atrás» o sustrato se usa como una entrada adicional del dispositivo.

25 **[0055]** También cabrá apreciar que pueden crearse sistemas matemáticos «dinámicos» que incluyen sistemas de compresión instantáneos al añadir condensadores a las puertas de los ISFET (y otros MOSFET de los circuitos asociados), convirtiendo de este modo las características en funciones bioquímicas de dominio temporal no lineal y de gran señal, p. ej., filtros y procesadores de dominio log y procesadores. Dicha funcionalidad depende de las características exponenciales/logarítmicas del MOSFET de inversión débil.

REIVINDICACIONES

- 5 1. Circuito de procesamiento de señales digitales, comprendiendo el circuito al menos un transistor de efecto de campo sensible a iones y al menos un transistor semiconductor de óxido metálico, configurado de tal forma que al menos un transistor de efecto de campo sensible a iones y al menos un transistor semiconductor de óxido metálico juntos formen un inversor de contactor CMOS.
- 10 2. Circuito de acuerdo con la reivindicación 1, en el que el o cada transistor de efecto de campo sensible a iones comprende una membrana sensible a los analitos que está configurada para exponerse en el uso a un medio que se va a monitorizar.
- 15 3. Circuito de acuerdo con la reivindicación 1 o 2, en el que el circuito está configurado para funcionar de comparador para comparar un valor de un parámetro medido por el transistor de efecto de campo sensible a iones con un valor umbral.
- 20 4. Circuito de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que uno entre el transistor de efecto de campo sensible a iones y el transistor semiconductor de óxido metálico es un dispositivo de canal n y el otro es un dispositivo de canal p.
- 25 5. Circuito de acuerdo con la reivindicación 1 o 2, estando dispuesto el circuito de procesamiento de señales digitales para implementar una o varias de las siguientes funciones: AND, NAND, OR, XOR, NOR.
- 30 6. Circuito de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, comprendiendo el circuito de procesamiento de señales digitales un medio de polarización para polarizar el o cada transistor de efecto de campo sensible a iones en la región de inversión débil.
- 35 7. Circuito de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, comprendiendo además cada uno del uno o los varios inversores de contactor CMOS un electrodo de referencia que se puede exponer al medio que se va a monitorizar.
- 40 8. Circuito de acuerdo con la reivindicación 7, en el que el electrodo de referencia está dispuesto para establecer un umbral en el que se produce la conmutación.
- 45 9. Circuito de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que cada uno del uno o los varios inversores de contactor CMOS comprende dos o más transistores de efecto de campo sensibles a iones.
- 50 10. Circuito de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que el o cada transistor de efecto de campo sensible a iones está dispuesto para codificar una concentración iónica diferente.
11. Circuito de acuerdo con la reivindicación 10, y comprendiendo además una salida que proporciona una señal digital derivada de las distintas concentraciones iónicas.
12. Método de evaluación de una función lógica que tiene como una de sus entradas el valor de un parámetro de un medio, comprendiendo el método:
 - proporcionar un transistor de efecto de campo sensible a iones y un transistor semiconductor de óxido metálico que juntos forman un inversor de contactor CMOS;
 - exponer el transistor de efecto de campo sensible a iones a dicho medio para conmutar el inversor de contactor CMOS; y
 - generar una señal digital derivada de la operación de inversor de contactor CMOS, cuya señal es una evaluación de una función lógica que tiene como una de sus entradas el valor del parámetro del medio.

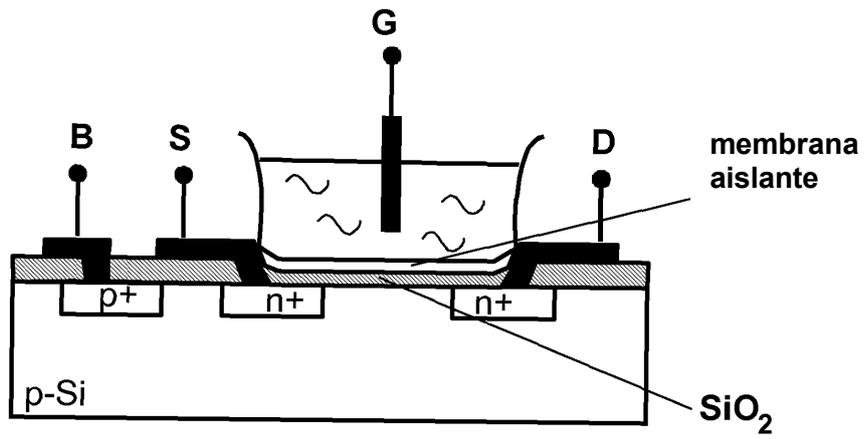


Figura 1

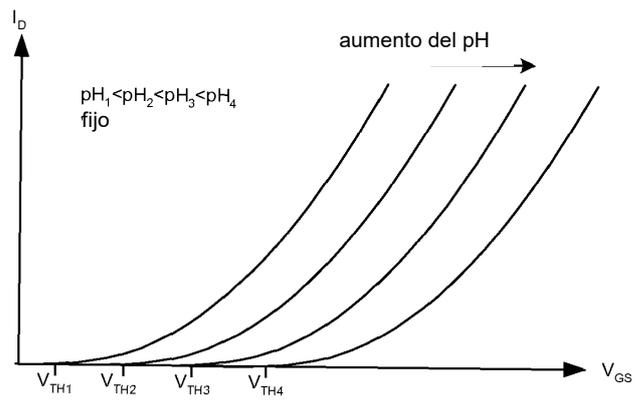


Figura 2

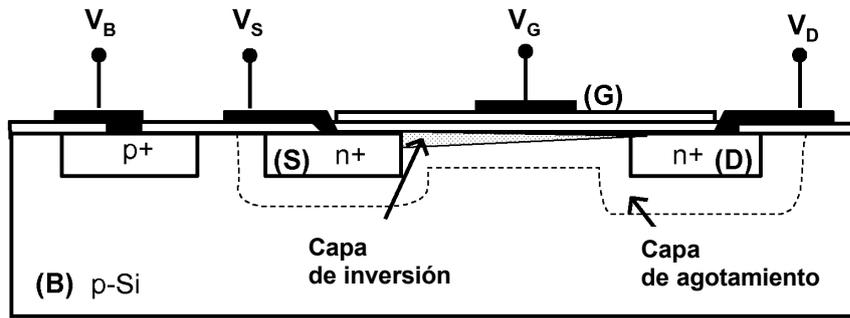


Figura 3

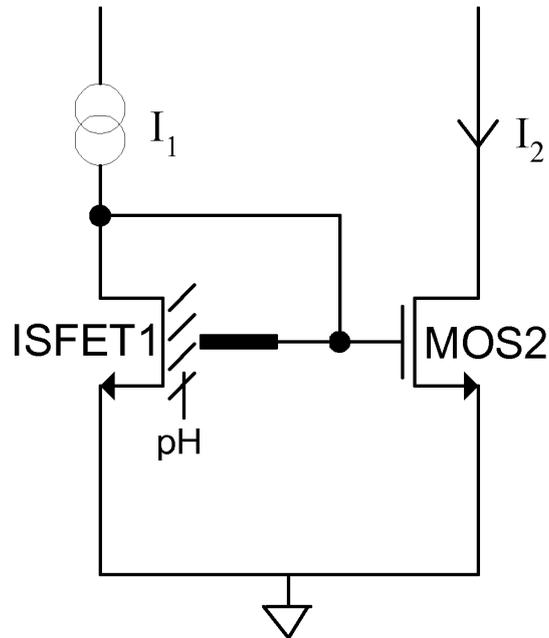


Figura 4

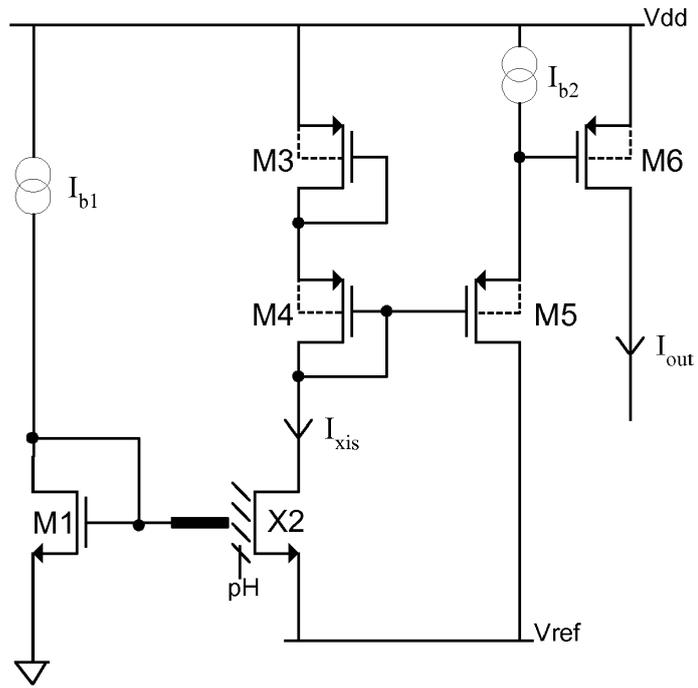


Figura 5

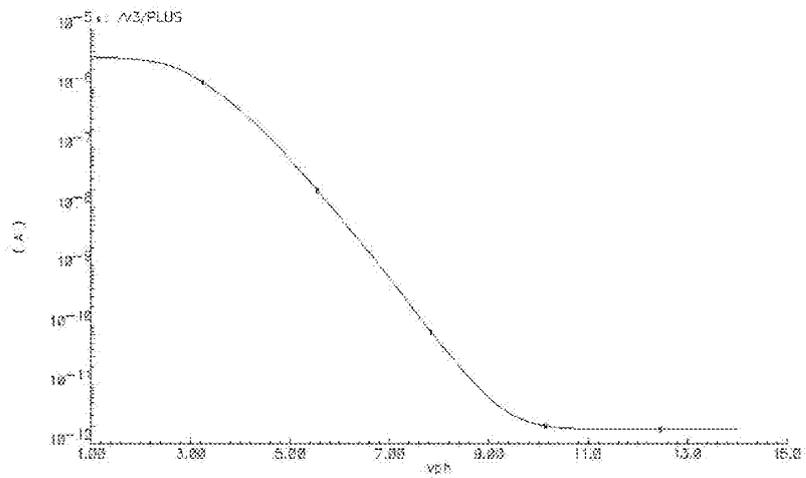


Figura 6

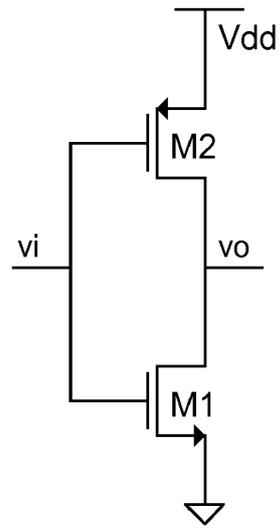


Figura 7

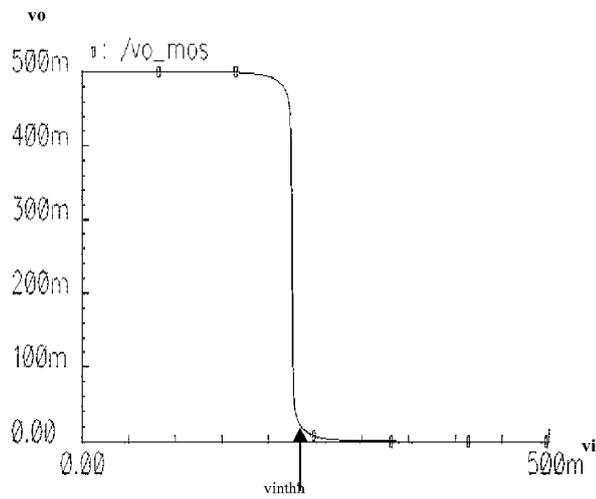


Figura 8

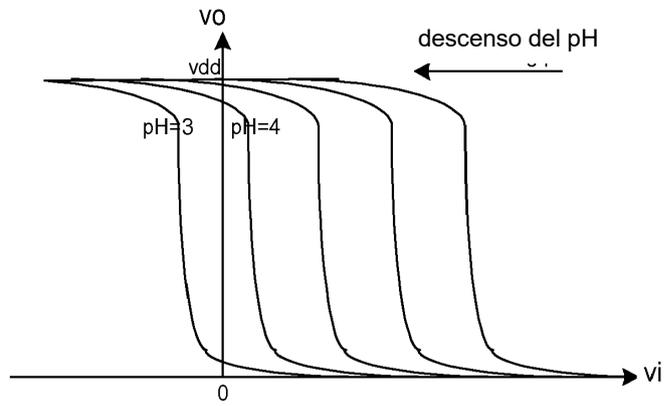


Figura 3: cambio en VTC debido al pH

pH	Vinth (mV)
1	-63.5
2	-37.6
3	-11.63
4	14.24
5	40.0
6	65.8
7	91.7
8	117.7
9	143.7
10	169.7
11	195.7
12	221.7
13	247.6
14	273.6

Figura 9

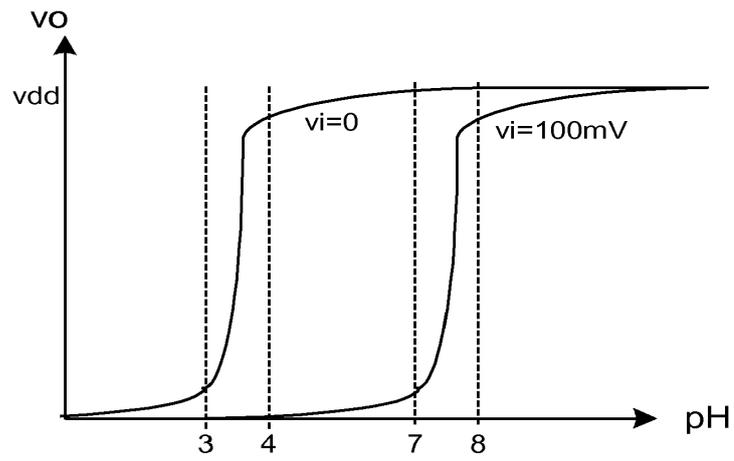


Figura 10

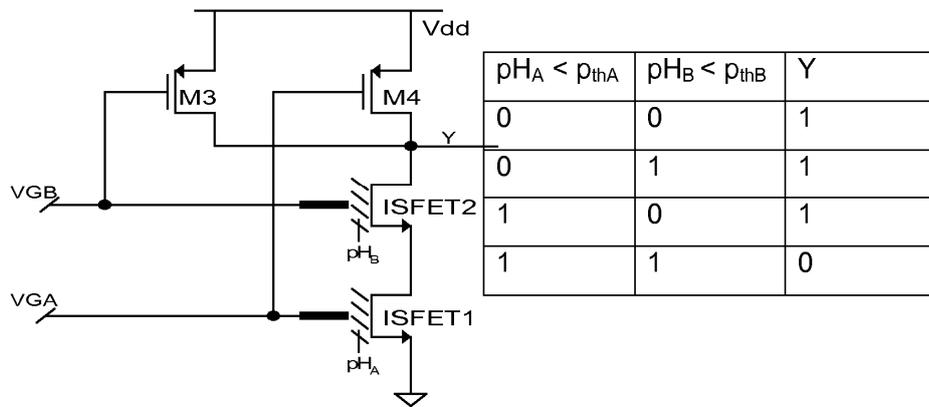


Figura 11

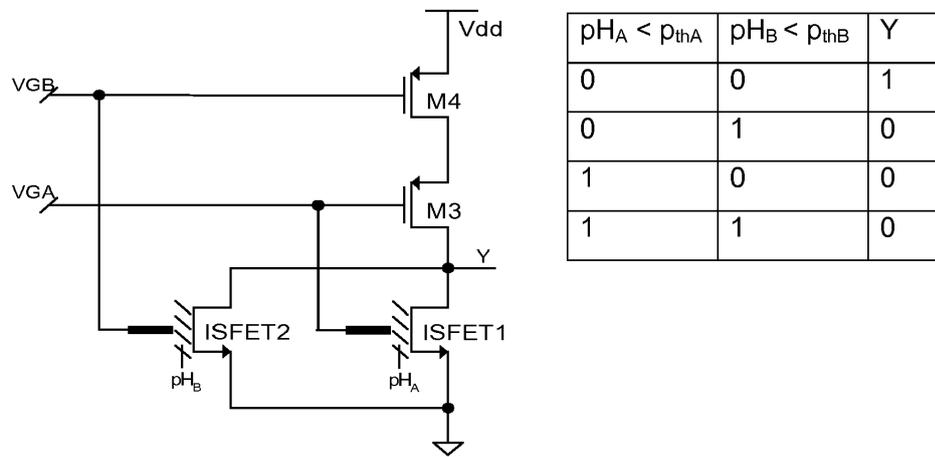


Figura 12