



UBA
1821 Universidad
de Buenos Aires



CET-8205
FÍSICA DEL ESTADO SÓLIDO

Programación de una celda de memoria basada en un transistor de puerta flotante

Autora:
Falcon Luciana B.

Padrón:
107316

Fecha:
08/02/2024

Índice

1. Introducción	2
1.1. Objetivo	2
2. Primera parte: El transistor Mosfet	3
2.1. La estructura MOS	3
2.1.1. El semiconductor tipo p dopado	3
2.2. El transistor MOSFET de canal N	4
2.3. El transistor MOSFET de Puerta Flotante	5
2.4. Programacion del MOSFET de Puerta Flotante	7
2.5. Proceso de Inyección de electrones calientes	8
2.5.1. ¿Qué es y qué sucede con la tensión umbral?	9
2.5.2. ¿Qué sucede con la corriente inyectada?	12
3. Segunda parte: Simulaciones	15
3.1. El método de Euler explícito para la simulación temporal de la carga en la puerta flotante	15
3.2. Simulación temporal de la tensión umbral	16
3.3. Simulación temporal de la corriente inyectada en la puerta flotante	18
3.4. Como lograr un Proceso de inyección con una corriente constante para el caso de V_G 11V	21
4. Apéndice	23
4.1. Consideraciones	23
4.2. La estructura MOS: Desarrollo de la ecuación Nivel de Fermi	24
4.3. Método de Euler explícito para la simulación temporal de la carga en la puerta flotante:	25
4.3.1. Código Matlab - Carga en la puerta flotante	25
4.4. Simulación temporal de la tensión umbral:	26
4.4.1. Desarrollo de ecuaciones de V_t	26
4.4.2. Código Matlab - Tension umbral en el tiempo	27
4.5. Simulacion temporal de la corriente inyectada:	28
4.5.1. Desarrollo de ecuaciones de J	28
4.5.2. Código Matlab - Densidad de corriente en el tiempo	32

1. Introducción

1.1. Objetivo

Se quiere programar una celda de memoria basada en un transistor de puerta flotante, con un óxido de interpoly de espesor $t_{ip} = 8nm$ y un óxido de túnel de espesor $t_{to} = 4nm$. El semiconductor es tipo p, con dopaje $Na = 10^{16}cm^3$. Se asumió $\phi_{ms} = 0$ y se depreció la caída de potencial en la superficie del semiconductor γ_s .

En cuanto a las propiedades electrónicas, la masa efectiva de los electrones en el sustrato de silicio se considera igual a la masa del electrón libre m_o , mientras que en el óxido de túnel se tomo como $0,42m_o$. Además, el offset entre las bandas de conducción del sustrato y el óxido es de $\phi_c = 3,15eV$.

La programación de la celda de memoria se basa en la carga de la puerta flotante con electrones, la cual ocurre, únicamente, por inyección de Fowler-Nordheim desde la banda de conducción del sustrato.

Para llevar a cabo este proceso, se requirio:

1. Simular la evolución temporal de la corriente inyectada en la puerta flotante y la tensión umbral, para el caso de una tensión en la puerta de control $V_G = 11V$, determinando el valor máximo alcanzable de V_t .
2. Analizar los cambios en los resultados cuando $V_G = 12V$ y $V_G = 13V$.
3. Explorar estrategias para lograr un proceso de inyección con corriente constante y simular la respuesta para $V_G = 11 V$.

2. Primera parte: El transistor Mosfet

2.1. La estructura MOS

La estructura MOS esta compuesta de dos terminales y tres capas: Un substrato de silicio (puro o poco dopado p o n), sobre el cual se genera una capa de óxido de silicio (SiO_2) que posee características dieléctricas o aislantes. Por último, sobre esta capa, se coloca una capa de metal (Aluminio o polisilicio), que posee características conductoras.

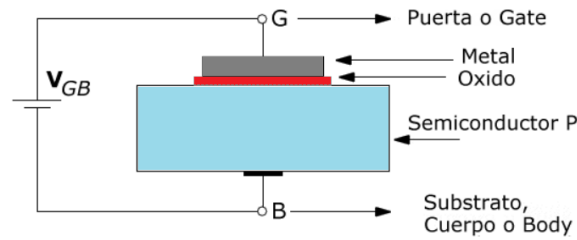


Figura 1: Estructura mos.

2.1.1. El semiconductor tipo p dopado

En los semiconductores intrínsecos, como el silicio, el nivel de Fermi está esencialmente a mitad de camino entre las bandas de valencia y conducción. Aunque no ocurre conducción a $0^{\circ}K$, a temperaturas superiores un número finito de electrones pueden alcanzar la banda de conducción y proporcionar algo de corriente.

Dicho esto, a continuación se va a detallar el funcionamiento del semiconductor DOPADO. En el semiconductor dopado se agregan niveles de energía extras. La aplicación de la teoría de bandas a los semiconductores tipo p y tipo n muestra que hay los niveles adicionales añadidos por las impurezas.

En el material de tipo p, los huecos adicionales (portadores mayoritarios) en la banda prohibida, permiten la excitación de los electrones de la banda de valencia, dejando huecos móviles en la banda de valencia.

El nivel de energía Fermi del semiconductor, E_f , representa el nivel de energía en el que la probabilidad de encontrar un electrón es la mitad. El nivel de Fermi para el semiconductor dopado se puede calcular a partir del nivel de dopaje,

$$E_F = E_{Fi} \pm k_B T * \ln\left(\frac{|N_d - N_a|}{n_i}\right) \quad (1)$$

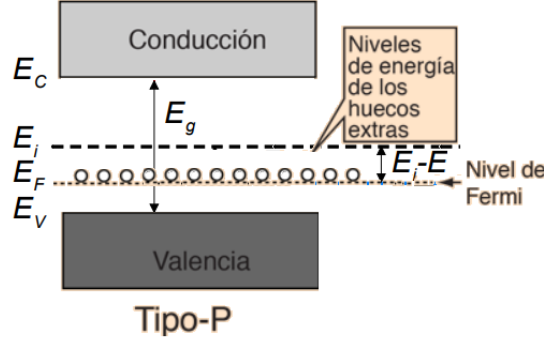


Figura 2: Bandas en semiconductor p dopado.

donde, el signo \pm tiene que ver con si el semiconductor es tipo n ó tipo p.

Para el caso particular del semiconductor tipo p la ecuación anterior del nivel de Fermi queda,

$$E_{Fi} - E_F = k_B T * \ln\left(\frac{p_0}{n_i}\right) \approx k_B T * \ln\left(\frac{N_A}{n_i}\right) \quad (2)$$

donde,

E_{Fi} es el nivel de Fermi intrínseco ($E_{Fi} = E_{gap}/2$, para el SiO_2 es $1.12\text{eV}/2$).

k_B es la constante de Boltzmann, $86,2 \times 10^{-6} \text{eV K}^{-1}$.

T es la temperatura, 300K (condición de ionización completa).

N_a es la concentración de impurezas aceptoras ionizadas.

n_i es la densidad de portadores intrínsecos.

Finalmente mediante lo anterior se puede obtener la ecuación de la posición del nivel de Fermi con respecto al midgap,

$$\phi_B = \frac{k_B T}{q} * \ln\left(\frac{N_a}{n_i}\right) \quad (3)$$

2.2. El transistor MOSFET de canal N

El transistor MOSFET está formado por la estructura MOS, a la que se le adhieren dos difusiones denominados Source y Drain, con un dopaje opuesto y mayor al del sustrato. En el Mosfet se produce una corriente entre el drain y el source que se activa/desactiva por un impulso eléctrico enviado a la gate.

El transistor mosfet de canal N corresponde a un sustrato semiconductor de tipo p. Dicho sustrato semiconductor de tipo p está poco dopado, y a ambos lados de la interfase Oxido-Semiconductor los difusiones de material n se encuentran fuertemente dopado (n+).

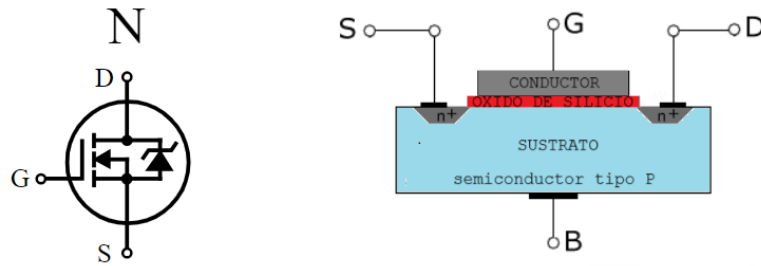


Figura 3: Estructura MOSFET de canal N.

Cuando se aplica una tensión positiva al terminal de puerta de un MOSFET de tipo N, se crea un campo eléctrico bajo la capa de óxido que incide perpendicularmente sobre la superficie del semiconductor P. Este campo, atrae a los electrones hacia la superficie, bajo la capa de óxido, repeliendo los huecos hacia el sustrato. Si el campo eléctrico es muy intenso se logra crear en dicha superficie una región muy rica en electrones, denominada canal N, que permite el paso de corriente de la Fuente al Drenador. Cuanto mayor sea la tensión de Puerta (Gate) mayor será el campo eléctrico y, por tanto, la carga en el canal. Una vez creado el canal, la corriente se origina, aplicando una tensión positiva en el Drenador (Drain) respecto a la tensión de la Fuente (Source).

2.3. El transistor MOSFET de Puerta Flotante

El transistor de Puerta Flotante (floating gate avalanche injection o FAMOS) es un elemento de almacenamiento de información no-volátil, en el cual se inserta al transistor convencional una puerta adicional (floating gate) que es capaz de retener carga (hot electrons) transferida mediante efecto tunel que altera la tensión V_t del transistor MOS.

Esta puerta flotante se encuentra aislada eléctricamente de los demás terminales debido a que esta incrustada dentro del óxido.

Al inyectar electrones calientes desde el canal en la puerta flotante mediante la

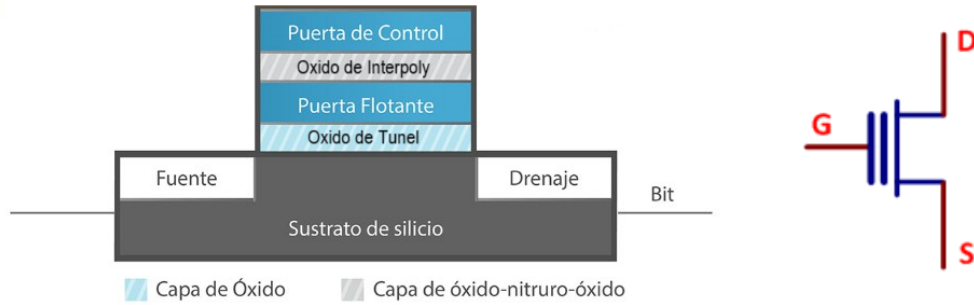


Figura 4: El transistor de Puerta Floante.

inducción de un fuerte campo eléctrico entra la puerta de control y el drenador, se produce una alteración de la tensión umbral V_T . Esto es posible debido a que la carga almacenada en la puerta flotante apantalla el efecto de la puerta de control sobre el canal del transistor (ver figura a continuación). Es decir, la carga almacenada cancela parcialmente el campo que se genera al aplicar una tensión a la puerta de control haciendo necesario un potencial mayor (V_{T2}) para formar el canal de conducción dentro del transistor.

Al estar cerca la puerta flotante aísla eléctricamente una vez que se han inyectado los electrones en ella éstos permanecen allí de forma permanente, alrededor de 10 años, lo que se considera un tiempo suficientemente largo como para considerar que el almacenamiento de la información es permanente.

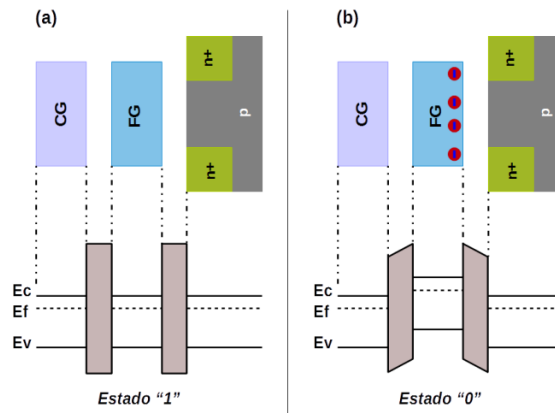


Figura 5: Diagrama de las bandas de energía referido a la estructura del MOSFET con puerta flotante.

2.4. Programacion del MOSFET de Puerta Flotante

La programación de una celda de memoria implica la inyección de carga y tuneleo de electrones en la puerta flotante (proceso de registro) a través del oxido de tunel y se realiza mediante dos métodos **método de tunelización de Fowler-Nordheim, o inyección de electrones calientes.**

La principal diferencia entre ambos métodos radica en la forma en que se facilita el paso de los electrones a través de la barrera. En el caso de la tunelización de Fowler-Nordheim, se aprovecha el fenómeno de la tunelización cuántica, mientras que en la inyección de electrones calientes se suministra energía adicional a los electrones para facilitar su paso.

Similarmente el proceso de borrado de la celda de memoria consiste en eliminar la carga de la puerta flotante y suele hacerse mediante túnel de Fowler-Nordheim. Se aplica un voltaje negativo alto (alrededor de 9 V) a la puerta de control y se aplica un voltaje positivo a la región de la fuente. Esto hace que los electrones hagan un túnel desde la región de la puerta flotante hasta la región de origen (túnel cuántico de Fowler-Nordheim).

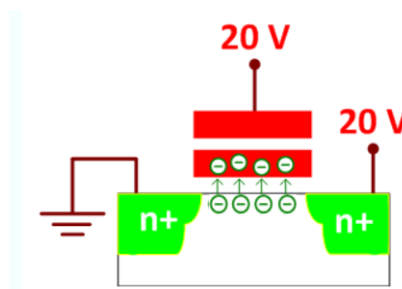


Figura 6: Inyección de electrones calientes.

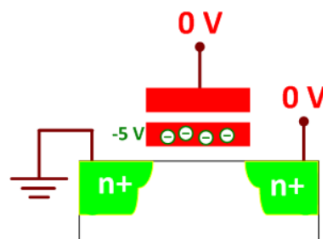


Figura 7: Al retirar la tensión de programación, los electrones son atrapados en la puerta flotante.

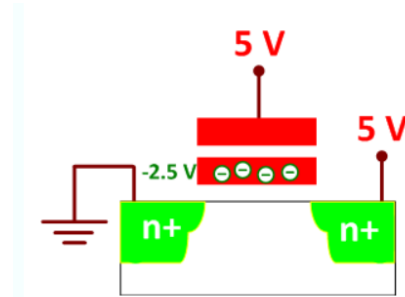


Figura 8: La carga altera la V_T del MOS, la tensión de puerta de 5V no es suficiente para activar la conducción del transistor (MOS off). La carga en la puerta flotante puede mantenerse de 10-20 años.

2.5. Proceso de Inyección de electrones calientes

La siguiente figura describe el proceso de inyección de electrones calientes,

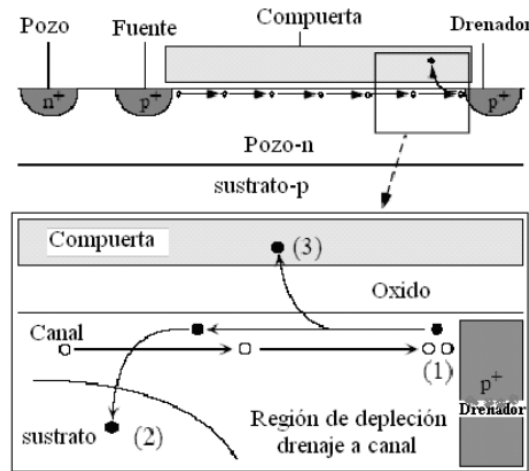


Figura 9: (1) impacto de ionización de huecos calientes el cual genera un par electrón-hueco. El nuevo e^- puede ser repelido hacia el sustrato (2) o hacia la compuerta flotante (3).

Al aplicar una tensión positiva al gate, V_G , las bandas de valencia se curvan hacia abajo y con respecto a la estructura pueden ocurrir dos casos,

1. Entra en Diserción. ocurre cuando se aplica una tensión pequeña. Entonces el alejamiento de las bandas de valencia con respecto al nivel de Fermi lleva a una disminución de la densidad de portadores.

2. Entra en Inversión, ocurre cuando se aplica tensión suficientemente grande. Esto quiere decir que las bandas de valencia se curvan lo suficiente como para que el nivel de Fermi intrínseco en la superficie cruce al nivel de Fermi. Cuando pasa esto el rol de los portadores se invierte, es decir los portadores minoritarios, los e (por ser sustrato tipo p) tienen una densidad mayor que los portadores mayoritarios.

A continuación, en la siguiente sección se desarrollará matemáticamente el proceso de inyección de electrones calientes. Recordar que el análisis se basa en un semiconductor (sustrato) de tipo P y por consiguiente de canal N. También para el desarrollo se consideró al transistor como un capacitor MOS, es decir, como si no estuviesen las difusiones de drain y source.

2.5.1. ¿Qué es y qué sucede con la tensión umbral?

Para llegar a la definición y a la ecuación de la tensión umbral perviamente vamos a desarrollar algunos conceptos importantes.

El potencial de superficie en el semiconductor es,

$$\varphi_s = \varphi(0) \quad (4)$$

Se denomina ϕ_{Bp} la posición del nivel de Fermi con respecto al midgap.

Hay que tener en cuenta que el bandgap del silicio es $E_{gap} = 1.12 \text{ eV}$ y por lo tanto ϕ_B nunca puede ser mayor a la mitad del bandgap,

$$\phi_B < 0,56 \text{ eV} \quad (5)$$

Cuando,

$$\varphi_s > \phi_{Bp} \quad (6)$$

la densidad de electrones es mayor que la densidad de huecos y la superficie se INVIERTE.

Luego si,

$$\boxed{\varphi_s > 2\phi_{Bp}} \quad (7)$$

Significa que la densidad de electrones es igual a la densidad de huecos en el semiconductor. A partir de este punto estamos en la zona de INVERSION FUERTE. Cuando eso pasa, la densidad de carga en la capa de inversión empieza a crecer

exponencialmente con el potencial de superficie. Eso significa que el potencial de superficie ya no puede moverse demasiado porque, de otro modo, la densidad de portadores se iría a valores demasiado grandes.

Por lo tanto la caída de potencial en la superficie está acotada $\varphi_s < q.Egap = 1,12eV$. Todo el razonamiento previo nos está diciendo que cuando la tensión aplicada es muy grande, llega un momento en el que la mayor parte de esa tensión termina cayendo sobre el óxido (o los óxidos en este caso) y sólo una pequeña fracción cae sobre el semiconductor. En nuestro caso, para simplificar, asumimos que,

$$\boxed{\varphi_s \approx 0} \quad (8)$$

Finalmente para dar lugar a la zona de inversion fuerte se debe aplicar una tensión denominada "tension umbral".

Particularmente cuando,

$$\varphi_s = 2\phi_{Bp} \quad (9)$$

ante los cambios de la tensión umbral la estructura responderá modificando la densidad de e^- en la superficie, en cuyo caso la capacidad se eleva y la capacidad total estara dada por la capacidad del óxido,

$$C = C_{ox} \quad (10)$$

Luego, la capacidad por unidad de área del óxido es,

$$\boxed{C_{ox} = \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}}} \quad (11)$$

donde,

$$\epsilon_{ox} = 3,9\epsilon_0.$$

t_{ox} es el espesor de óxido.

Dicho esto hay que tener en cuenta que para el caso de una diferencia de funciones trabajo nula. la tension aplicada es igual a la caída de tension en el óxido y en la superficie del semiconductor,

$$V_G = V_{ox} + \phi_s \quad (12)$$

En el caso de inversion fuerte toda la tensión aplicada estaría cayendo sobre los óxidos, por tanto,

$$\boxed{V_G = V_{ox}} \quad (13)$$

También ,cuando $\varphi_s = 2\phi_{Bp}$, tenemos que la zona desierta alcanza su maximo espesor (toda la carga se debera a ella) resultando que la tensión umbral aumenta al aumentar el dopaje del semiconductor y con respecto al espesor del óxido,

$$V_t = \frac{|Q_s|}{C_{ox}} + \phi_s = \frac{\sqrt{2\epsilon_s q N_a 2\phi_B}}{C_{ox}} + 2\phi_B + V_{FB} \quad (14)$$

donde,

ϕ_{Bp} representa la posición dle nivel de Fermi con respecto al nivel de midgap.

ϵ_s es la permitividad del silicio $-11,7\epsilon_0$.

N_a la densidad de impurezas aceptoras.

V_{FB} es la tensión de flat band.

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

La tensión de falt band (banda plana) es el total externo para mantener la estructura en forma neutra,

$$V_{FB} = \phi_{MS} - \frac{Q_0}{C_{ox}} \quad (15)$$

Como mencionamos previamente la diferencia de funciones trabajo nula osea $\phi_{MS} = 0$, entones,

$$V_{FB} = 0 \quad (16)$$

Reemplazando la ecuacion 16 en la ecuación 14, resulta la ecuacion de la tensión umbral,

$$\boxed{V_t = \frac{\sqrt{2\epsilon_s q N_a 2\phi_B}}{C_{ox}} + 2\phi_B} \quad (17)$$

donde,

ϵ_s es la permitividad del silicio $-11,7\epsilon_0$.

N_a la densidad de impurezas aceptoras $10^{16}cm^{-3}$.

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

ϕ_{Bp} representa la posición dle nivel de Fermi con respecto al nivel de midgap.

En el instante inicial, como no hay carga dentro de la puerta flotante, la tensión umbral es la V_t correspondiente a la ecuación 17.

Sin embargo, a medida que se va inyectando carga dentro de la puerta flotante, los electrones llegan a la puerta flotante, como el nivel de Fermi allí es mucho menor que la energía de la banda de conducción de los óxidos que están a ambos lados, los electrones no pueden "escapar". Es decir, termina siendo como si fuese una trampa, aunque, estrictamente, no lo sea, lo cual produce una distorsión en el campo eléctrico generando un desplazamiento en la tensión umbral,

$$\Delta V_t = -\frac{\Delta Q}{\epsilon_{ox}} * (t_{ox} - x) \quad (18)$$

donde,

t_{ox} es el espesor total de la estructura.

x es la distancia de la estructura.

Como consecuencia, la tensión umbral va a depender del tiempo dado que la carga en la puerta flotante depende del tiempo (por el proceso de inyección). Finalmente, la ecuación de la tensión umbral debido al proceso de inyección será,

$$V_t = \frac{\sqrt{2\epsilon_s q N_a 2\phi_B}}{C_{ox}} + 2\phi_B - \frac{\Delta Q}{\epsilon_{ox}} * (t_{ox} - x) \quad (19)$$

2.5.2. ¿Qué sucede con la corriente inyectada?

El proceso de inyección depende del tiempo porque la corriente de inyección de acuerdo a la expresión de Fowler-Nordheim depende del campo eléctrico en el óxido de túnel.

Cuando la puerta flotante empieza a cargarse con electrones, como se muestra en la figura 8(c), los campos en ambos óxidos son distintos (incluso sin tensión aplicada, el campo en un óxido va para un lado y en el otro óxido cambia de sentido).

Cuando hay una carga no nula en la puerta flotante, se puede usar la ley de Gauss,

$$\frac{dF}{dx} = \frac{Q}{\epsilon_{ox}} \quad (20)$$

donde,
 Q es la carga en la puerta flotante.

Como se trata de una carga Q ubicada en una posición fija, se puede integrar la ecuación de arriba, obteniendo directamente una relación entre los campos en ambos óxidos,

$$\boxed{F_{ip} - F_{to} = \frac{Q}{\epsilon_{ox}}} \quad (21)$$

donde,
 F_{ip} es el campo en el óxido de interpoly.
 F_{to} es el campo en el óxido de túnel.

Esta última es una de las ecuaciones que se necesita para obtener en cada instante de tiempo, el campo en el óxido de túnel F_{to} para poder calcular la corriente de Fowler-Nordheim.

La otra ecuación que necesitamos es la que nos dice que la tensión aplicada es igual a la suma de las caídas de tensión en ambos óxidos,

$$\boxed{V_G = F_{ip}t_{ip} + F_{to}t_{to}} \quad (22)$$

donde,
 V_G es la tensión del gate.
 t_{ip} es el espesor del óxido de interpoly.
 t_{to} es el espesor del óxido de túnel.

NOTA, En el instante inicial, como no hay carga dentro de la puerta flotante, el campo en ambos óxidos es el mismo. Por lo tanto,

$$F = \frac{V_G}{t_{ip} + t_{to}} \quad (23)$$

Ahora, con toda la información obtenida, estamos en condiciones de calcular la corriente inyectada en la puerta flotante, para eso utilizaremos la Formula de Fowler-Nordheim,

$$\boxed{J = \frac{q^3 m_{ef}}{16\pi^2 m_{ox} \hbar q \phi_c} F^2 * e^{-\frac{4\sqrt{2m_{ox}}}{3\hbar q F} (q\phi_c)^{\frac{3}{2}}}} \quad (24)$$

Recordemos que la constante reducida de Planck esta dada por,

$$\hbar = \frac{h}{2\pi} \tag{25}$$

donde h es la constante de Planck cuyo valor es $6,62607015 \times 10^{-34} Js$.

3. Segunda parte: Simulaciones

Para realizar los gráficos de i_{iny} y V_t se tuvieron en cuenta las consideraciones provistas en la sección del Apéndice.

3.1. El método de Euler explícito para la simulación temporal de la carga en la puerta flotante

La corriente que va inyectándose en la puerta flotante genera un aumento progresivo en la carga de la puerta flotante, la cual va modificando el campo F_{to} y, consecuentemente, cambia la corriente inyectada. Por lo que se necesita calcular en cada instante de tiempo el valor de la densidad de corriente, J , para que se vaya actualizando también la carga en la puerta flotante, Q .

Para la simulación es necesaria la carga en la puerta flotante a medida que se va inyectando corriente. Es un proceso continuo pero, en la simulación, se discretiza el tiempo en pasos).

El métodos más sencillo para la resolución es el "método de Euler explícito" (o Euler hacia adelante) y consiste en,

Supongamos:

- t_i , instante de tiempo.
- t_{i+1} , el instante siguiente.
- $\Delta t = t_{i+1} - t_i$, paso temporal.

Luego, teniendo como dato la carga en la puerta flotante en el instante t_i , osea Q_i , la carga en el instante futuro, Q_{i+1} , será:

$$Q_{i+1} = Q_i + J_i \Delta t \quad (26)$$

La última expresión no es más que ir integrando la corriente en el tiempo hecho de forma discreta.

Nota: los valores más razonables para Δt están en el orden del microsegundo.

Mediante un software (ver apéndice para el código) se obtiene el siguiente gráfico que representa la carga en la puerta flotante mediante el proceso de inyección,

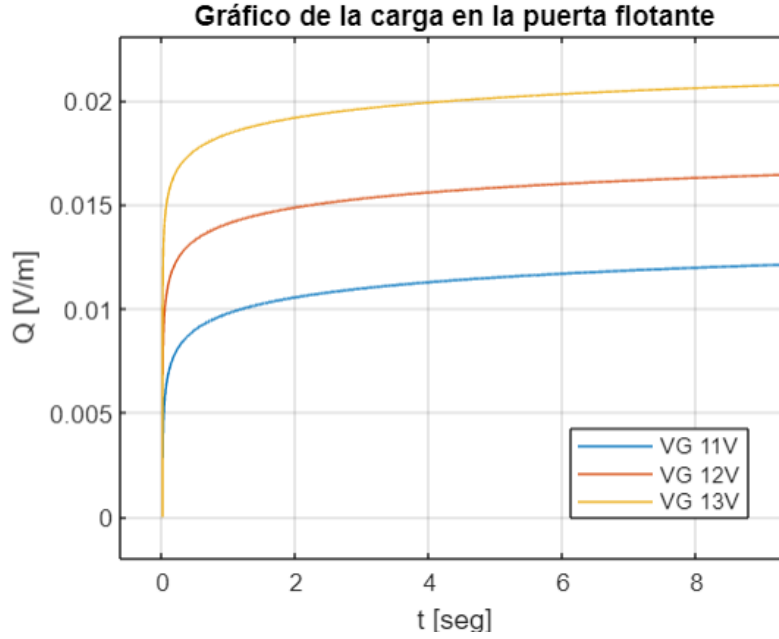


Figura 10: Evolucion temporal de la carga Q según la tensión aplicada - Con tres tensiones diferentes, en el instante inicial $Q = 0$ y evolucionanan logarítmicamente.

3.2. Simulación temporal de la tensión umbral

Vamos a usar la ecuación 17 definida en la sección anterior,

$$V_t = \frac{\sqrt{2\epsilon_s q N_a 2\phi_B}}{C_{ox}} + 2\phi_B \quad (27)$$

Reemplazando las variables (ver apéndice - Simulacion temporal de la tension umbral: Desarrollo de ecuaciones) resulta que la tensión umbral en el instante inicial es,

$$\boxed{V_t = 0,938V} \quad (28)$$

A medida que se va inyectando carga dentro de la puerta flotante, ésta distorsiona el campo eléctrico, generando un desplazamiento en la tensión umbral, con lo cual para represnetar el proceso vamos a usar la ecuación 19 ,

$$V_t = \frac{\sqrt{2\epsilon_s q N_a 2\phi_B}}{C_{ox}} + 2\phi_B - \frac{\Delta Q}{\epsilon_{ox}} * (t_{ox} - x) \quad (29)$$

De la ecuación anterior falta calcular el corrimiento de la tensión ΔV_t ,

$$\Delta V_t = -\frac{\Delta Q}{\epsilon_{ox}} * (t_{ox} - x) \quad (30)$$

donde,

$$\epsilon_{ox} = 3,9\epsilon_o = 3,4515 \times 10^{-11} F.m^{-1}.$$

(ϵ_o es la permitividad del vacío, $8,85 \times 10^{-12} F.m^{-1}$).

t_{ox} es el espesor total de la estructura con puerta flotante, es decir, $t_{ip} + t_{to} = 8nm + 4nm$ (datos del enunciado).

x es la distancia de la estructura con puerta flotante, es decir, $t_{to} = 4nm$.

Reemplazando,

$$\Delta V_t = -\frac{\Delta Q}{\epsilon_{ox}} * (t_{ip}) = -\frac{\Delta Q}{3,4515 \times 10^{-11} F.m^{-1}} * (8nm) * \frac{1m}{1 \times 10^9 nm} \quad (31)$$

Finalmente, como ya calculamos el desplazamiento, la tensión umbral queda,

$$\boxed{V_t(Q) = 0,938V + \Delta Q * 231,783 m^2.F^{-1}} \quad (32)$$

Nota: como en la puerta flotante hay e^- , entonces ΔQ toma valores negativos.

A continuación se muestra mediante un gráfico cómo se modifica la tensión umbral a medida que se va inyectando corriente en la puerta flotante, (ver código en el apéndice)

Para V_G 11V gráficamente se puede ver que **el máximo valor de V_t que puede alcanzarse** es cuando t tiende a infinito, correspondiente a la tensión umbral $V_t \approx 3,8V$, el mismo corresponde a cuando no entran mas cargas en la puerta flotante. Esto se debe a que a medida que pasa el tiempo el proceso de inyección en la puerta flotante hace que se genere una carga en la puerta flotante lo que hace que la densidad de corriente cambie y consecuentemente haya un corrimiento de la tensión umbral que provoca que la tensión aumente a medida que pasa el tiempo.

Mismo razonamiento para V_G 12V, el máximo valor de $V_t \approx 4,8V$ cuando t tiende a infinito. Y para V_t 12V, el máximo valor de $V_G \approx 5,8V$.

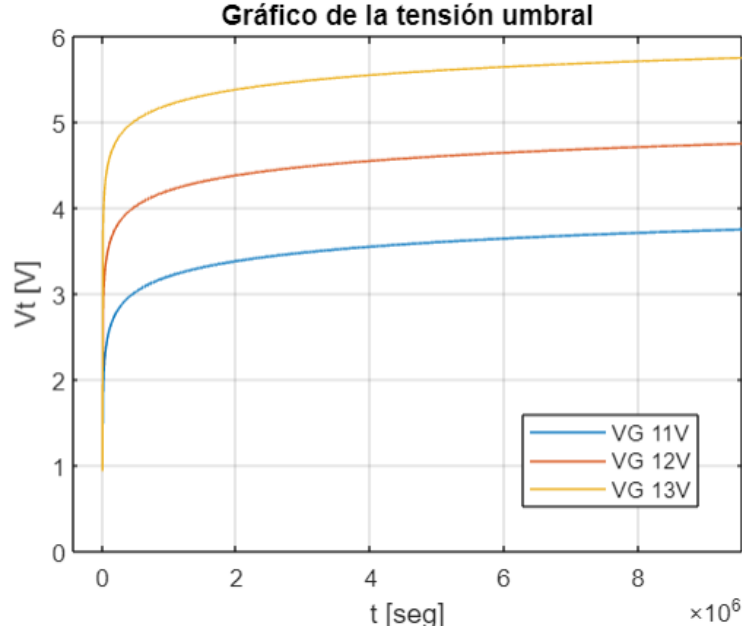


Figura 11: Evolución temporal de la V_t según la tensión aplicada - Con tres V_G diferentes, en el instante inicial $V_t = 0,938V$.

3.3. Simulación temporal de la corriente inyectada en la puerta flotante

Para la corriente de inyección se usa la ecuación 24 definida en la sección anterior,

$$J = \frac{q^3 m_{ef}}{16\pi^2 m_{ox} \hbar q \phi_c} F^2 * e^{-\frac{4\sqrt{2m_{ox}}}{3\hbar q F} (q\phi_c)^{\frac{3}{2}}} \quad (33)$$

Reemplazando las variables (ver apéndice - Simulación temporal de la corriente inyectada: desarrollo de ecuaciones) resulta que la corriente inyectada es,

$$J(Q) = A * F^2 * e^{-B/F} \quad (34)$$

donde,

$$A = \frac{(1,6 \times 10^{-19} C)^2 * m_0}{16\pi^2 * 0,42 m_0 * 1,055 \times 10^{-34} J.s * 3,15 V} = 1,161 \times 10^{-6} C^2 / J.s.V$$

$$B = \frac{4 * \sqrt{2 * 3,82 \times 10^{-31} kg}}{3 * 1,055 \times 10^{-34} J.s * 1,6 \times 10^{-19} C} * (1,6 \times 10^{-19} C * 3,15 V)^{3/2} = -2,47 \times 10^{10} \frac{\sqrt{kg} * (C.V)^{3/2}}{J.s.C}$$

$$F = \frac{V_G - \frac{Q}{\epsilon_{ox}} t_{ip}}{t_{ip} + t_{to}} = \frac{V_G - \frac{Q}{3,45 \times 10^{-11} F/m} 8nm * (\frac{1 \times 10^{-9} m}{nm})}{1,2 \times 10^{-8} m}$$

Particularmente,

Para el caso de 11V:

$$J(Q) = A * F^2 * e^{-B/F} \quad (35)$$

donde,

$$\begin{aligned} A &= 1,161x10^{-6}C^2/J.s.V \\ B &= 2,47x10^{10} \frac{\sqrt{kg.(C.V)^{3/2}}}{J.s.C} \\ F &= \frac{3,795x10^{-10} - (8x10^{-9}*Q)}{4,14x10^{-19}} \end{aligned}$$

Para el caso de 12V:

$$J_2(Q) = A * F_2^2 * e^{-B/F_2} \quad (36)$$

donde,

$$\begin{aligned} A &= 1,161x10^{-6}C^2/J.s.V \\ B &= 2,47x10^{10} \frac{\sqrt{kg.(C.V)^{3/2}}}{J.s.C} \\ F_2 &= \frac{4,14x10^{-10} - (8x10^{-9}*Q)}{4,14x10^{-19}} \end{aligned}$$

Para el caso de 13V:

$$J_3(Q) = A * F_3^2 * e^{-B/F_3} \quad (37)$$

donde,

$$\begin{aligned} A &= 1,161x10^{-6}C^2/J.s.V \\ B &= 2,47x10^{10} \frac{\sqrt{kg.(C.V)^{3/2}}}{J.s.C} \\ F_3 &= \frac{4,485x10^{-10} - 8x10^{-9}*Q}{4,14x10^{-19}} \end{aligned}$$

Luego, con estos valores de corriente y usando el método de Euler explícito en un software se obtienen los gráfico de la corriente inyectada en la puerta flotante, uno por cada caso de tensión aplicada,

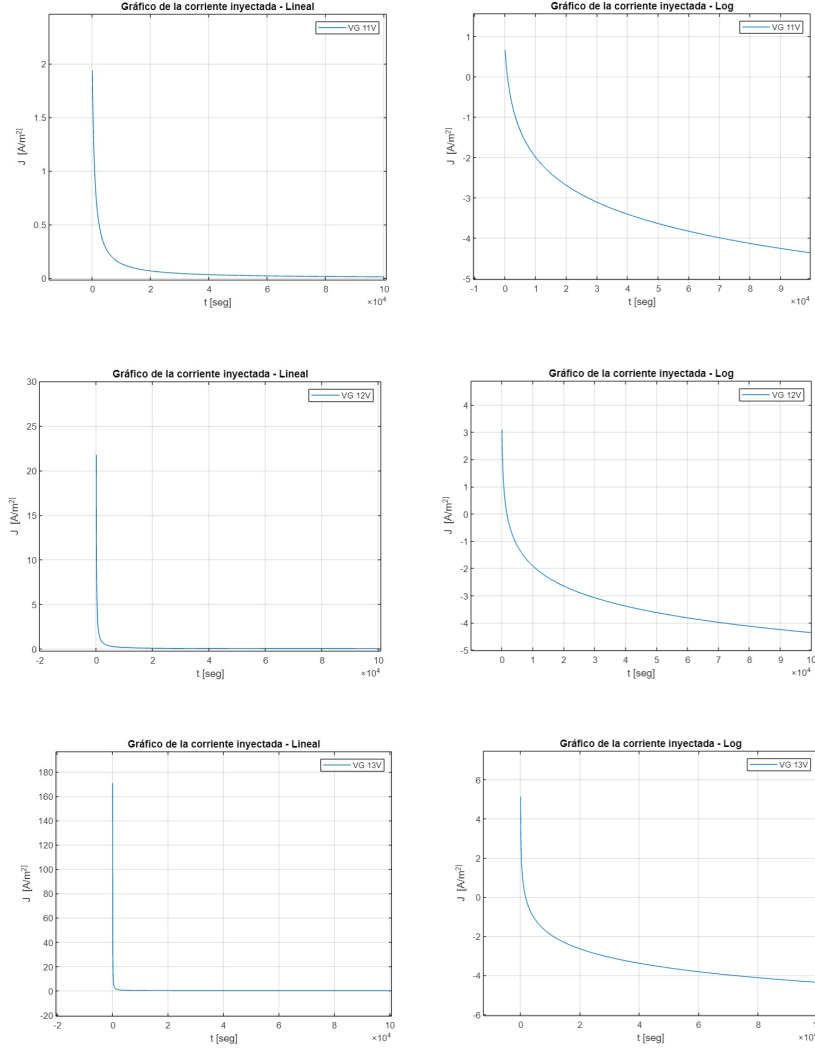


Figura 12: Evolución temporal de la densidad de J con una V_G de 11V, 12V y 13V.

(Apéndice: Código Matlab - Densidad de corriente en el tiempo).

Los gráficos que muestran como la densidad de corriente parte en el instante inicial con un valor $J > 0$ cuyos valores coinciden aproximadamente con los calculados matemáticamente según la ecuación 24 (calculos en el apéndice - Simulación temporal de la corriente inyectada: Desarrollo de ecuaciones de J), es decir cuando $Q=0$ la corriente inyectada es,

Para $V_G=11V$:

$$J(0) = 9,754 \times 10^{11} A.m^{-2} * e^{-26,949} = 1,929 A.m^{-2} \quad (38)$$

Para $V_G=12V$:

$$J_2(0) = 1,161 \times 10^{12} A.m^{-2} * e^{-24,7} = 21,764 A.m^{-2} \quad (39)$$

Para $V_G=13V$:

$$J_3(0) = 1,889 \times 10^{12} A.m^{-2} * e^{-22,8} = 170,782 A.m^{-2} \quad (40)$$

Luego, medida que pasa el tiempo J tiende a 0 en la escala lineal y en la logarítmica a -4, es decir que cuanto t tiende a infinito Q tiene a un valor constante porque no se inyectan mas cargas en la puerta flotante entonces la corriente tambien se hace constante.

3.4. Como lograr un Proceso de inyección con una corriente constante para el caso de V_G 11V

Vimos que para el proceso de inyección de corriente en la puerta flotante se usa la ecuación 24,

$$J = \frac{q^3 m_{ef}}{16\pi^2 m_{ox} \hbar q \phi_c} F^2 * e^{-\frac{4\sqrt{2m_{ox}}}{3\hbar q F} (q\phi_c)^{\frac{3}{2}}} \quad (41)$$

Dicha ecuación muestra que la corriente esta ligada al campo F_{to} . Pero a su vez el campo depende de la carga, tal como vimos en la ecuación 21,

$$F_{ip} - F_{to} = \frac{Q}{\epsilon_{ox}} \quad (42)$$

Entonces para que la densidad de corriente sea constante en el tiempo habria que hacer que el campo F_{to} también lo sea, lograrlo consisten en hacer que la carga sea constante. Así la expresión del campo F_{to} visto en la ecuacion 22,

$$F_{to} = \frac{V_G - \frac{Q}{\epsilon_{ox}} t_{ip}}{t_{ip} + t_{to}} \quad (43)$$

como depende de la carga, va a ser constante.

Sin embargo, como se está inyectando carga en la puerta flotante, entonces Q necesariamente tiene que variar, con lo cual viendo la ecuación 22, se ve que se tiene que ajustar V_G .

A medida que se cargan e^- en la puerta flotante, Q se hace mas grande, por ende $-\frac{Q}{\epsilon_{ox}}t_{ip}$ se hace mas negativo, y para contrarrestar enconces V_G tiene que hacerse mas positivo osea tiene que ser $F_{to} + X$, con $X = \frac{Q}{\epsilon_{ox}}t_{ip}$. De esta manera en cada lapso de tiempo mientras aumenta negativamente la carga un cierto volumen en la puerta flotante, se equilibra la tension en el gate aumentando positivamente el mismo valor de volumen, logrando así mantener el campo F_{to} cte.

Particularmente para $V_G=11V$:

$$F = \frac{V_G}{t_{ip} + t_{to}} = \frac{11V}{8nm + 4nm} = 0,34V/nm \quad (44)$$

$$J(Q) = 9,754x10^{11} A.m^{-2} * e^{-26,949} = 1,929 A.m^{-2} \quad (45)$$

$$V_t(Q) = 0,938V + \Delta Q * 231,783m^2.F^{-1} \quad (46)$$

4. Apéndice

4.1. Consideraciones

$\phi_{ms} = 0$ - Diferencia de funciones trabajo.

$t_{ip} = 8nm$ - Oxido de interpoly de espesor.

$t_{to} = 4nm$ - Oxido de tunel de espesor.

Para que un electrón pueda llegar a la compuerta flotante debe vencer la barrera del óxido, por lo que éste debe tener una energía mayor que la altura de la barrera del óxido $t_{to} = 4nm$. Por lo que la mayoría de la corriente fluirá a través de las zonas donde el óxido es delgado.

$Na = 10^{16}cm^{-3}$ - Dopaje del Semiconductor tipo P.

El semiconductor tipo P quiere decir que está dopado y por lo tanto es extrínseco. El dopaje al se tipo P significa que (además de los portadores generados por la excitación térmica) hay huecos (portadores de carga positiva) generados por el dopado. Dichos huecos son impurezas en la red cristalina del material semiconductor, y se denominan aceptoras porque necesitan 1 electrón para volver a la normalidad.

La densidad de corriente es afectada por la concentracion de dopantes, esto quiere decir que un dispositivo con una mayor concentracion de dopantes proporcionara una corriente de tuneleo mas baja. Por lo tanto la densidad de corriente de tuneleo es inversamente proporcional a la concentracion de dopantes. Na es la densidad de impurezas aceptoras.

$m_n = m_o$ - Masa ef. de los e^- en el silicio es igual a la masa del e^- libre.

Esto quiere decir que en las ecuaciones no debemos modificar la masa del electron libre por la masa efectiva de los electrones en silicio.

$\varphi_s = 0$ - Superficie del semiconductor con caida de pot. despreciable.

El potencial de superficie se define como $\varphi_s = \varphi(o)$. Con base a las propiedades del transistor de puerta flotante, en este dispositivo la cantidad de potencia consumida es mínima, con lo cual la caida de potencial es despreciable en la superficie del semiconductor φ_s .

$0,42m_o$ - Masa de tunel de los electrones en el oxido.

La masa de túnel de los electrones en el óxido se refiere a la masa efectiva de los

electrones que pueden atravesar una barrera de óxido mediante el efecto túnel.

$\phi_c = 3,15\text{eV}$ - Offset entre las bandas de cond. del sustrato y el oxido.

Para que los portadores de carga puedan tunelear a traves del óxido (es decir para que un electron tenga la probabilidad de pasar a través del óxido de compuerta) éstos deben tener una energia igual a 3,15 eV para vencer la barrera de potencial del óxido.

4.2. La estructura MOS: Desarrollo de la ecuación Nivel de Fermi

Vamos a obtener ϕ_B que corresponde al nivel de Fermi con respecto al midgap (nivel intrínseco). Para eso utilizaremos la ecuación 3, $\phi_B = \frac{k_B T}{q} * \ln\left(\frac{N_a}{n_i}\right)$

donde,

k_B es la constante de Boltzmann, $86,2 \times 10^{-6} \text{eV K}^{-1}$.

T es la temperatura, 300K (condición de ionización completa).

q es la carga del e^- , $1,6 \times 10^{-19}$.

N_a es la concentración de impurezas aceptoras ionizadas.

n_i es la densidad de portadores intrínsecos.

$$N_a = 10^{-16} \text{cm}^{-3}$$

Faltaría calcular n_i , para esto vamos a usar la siguiente ecuación,

$$n_i^2 = N_c N_v e^{\frac{E_c - E_v}{kT}} \quad (47)$$

donde, para el SiO_2 :

$$N_c = 3,22 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$$

$$N_v = 1,83 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$$

$$k_B = 86,2 \times 10^{-6} \text{eV K}^{-1}$$

$$T = 300 \text{K}$$

Reemplazando los datos resulta, $n_i \approx 1,45 \times 10^{10} \text{cm}^{-3}$

Ahora que ya tenemos todos los datos que necesitamos podemos reemplazarlos en la ecuación, $\phi_B = 0,409 \text{V}$

4.3. Método de Euler explícito para la simulación temporal de la carga en la puerta flotante:

4.3.1. Código Matlab - Carga en la puerta flotante

CODIGO PARA LA CARGA EN LA PUERTA FLOTANTE

```

Q0 = 0;
t0 = 0;
tf = 100000e-6;
dt = 1e-6;
n = (tf - t0)/dt;

t(1) = t0;
Q(1) = Q0;
Q2(1) = Q0;
Q3(1) = Q0;

for i = 1: n
t(i+1) = t(i) + dt;

A = 1.161e-6;
B = 2.47e10;
F = (3.795e-10 - 8e-9.*Q(i))./(4.14e-19);
F2 = (4.14e-10 - 8e-9.*Q2(i))./(4.14e-19);
F3 = (4.485e-10 - 8e-9.*Q3(i))./(4.14e-19);

JQ(i) = A .* F.^2 .* exp(-B./F);
JQ2(i) = A .* F2.^2 .* exp(-B./F2);
JQ3(i) = A .* F3.^2 .* exp(-B./F3);

VQ(i) = 0.938 + Q(i) .* 231.783; VQ2(i) = 0.938 + Q2(i) .* 231.783; VQ3(i) =
0.938 + Q3(i) .* 231.783;

Q(i+1) = Q(i) + JQ(i)*dt; Q2(i+1) = Q2(i) + JQ2(i)*dt; Q3(i+1) = Q3(i) +
JQ3(i)*dt;

end

plot (t, Q)
title('Gráfico de la carga en la puerta flotante');
xlabel('t [seg]');
ylabel('Q [V/m]');

```

hold on
 plot (t, Q2)
 plot (t, Q3)

NOTA: la ecuación de la densidad de corriente inyectada, JQ, se detalla en la sección del apéndice: Simulación temporal de la corriente inyectada - desarrollo de ecuaciones.

4.4. Simulación temporal de la tensión umbral:

4.4.1. Desarrollo de ecuaciones de V_t

En esta sección vamos a resolver la ecuación 17 que corresponde a la tensión umbral,

$$V_t = \frac{\sqrt{2\epsilon_s q N_a 2\phi_B}}{C_{ox}} + 2\phi_B$$

donde,

ϵ_s es la permitividad del silicio, $11,7\epsilon_0$ ($1,03 \times 10^{-12} F.cm^{-1}$).

q es la carga del e^- , $1,6 \times 10^{-19} C$.

N_a la densidad de impurezas aceptoras.

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

ϕ_{Bp} representa la posición del nivel de Fermi con respecto al nivel de midgap.

$$N_a = 10^{16} cm^{-3}$$

ϕ_{Bp} es $E_{Fi} - E_F$ calculado más arriba (ver apéndice. la estructura MOS: Desarrollo de la ecuación de Nivel de Fermi),

$$\phi_{Bp} = 0,409V$$

C_{ox} sale de la ecuación 11,

$$C_{ox} = \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}}$$

donde,

$$\epsilon_{ox} = 3,9\epsilon_0$$

ϵ_0 es la permitividad del vacío, $8,85 \times 10^{-14} F.cm^{-1}$

t_{ox} es el espesor de óxido (túnel), 4nm

entonces $C_{ox} = 4,31 \times 10^{-7} F.cm^{-2}$

Ahora para calcular la tensión umbral hay que reemplazar las variables calculadas en

la ecuación 17, $v_t = \frac{\sqrt{2*(-1,03x10^{-12}F.cm^{-1})*(-1,6x10^{-19}C)*10^{16}cm^{-3}*(2*0,409V)}}{4,31x10^{-7}F.cm^{-2}} + (2*0,409V)$

Finalmente, $v_t = 0,938V$

Verifico las unidades,

$$v_t = \frac{\sqrt{[F.cm^{-1}]*[C]*[cm^{-3}]*[V]}}{[F.cm^{-2}]} + [V] = \sqrt{\frac{[F.cm^{-1}]*[C]*[cm^{-3}]*[V]}{[F^2.cm^{-4}]}} + [V] = [V]$$

4.4.2. Código Matlab - Tension umbral en el tiempo

Q0 = 0;

t0 = 0;

tf = 10000000e-6;

dt = 1e-6;

n = (tf - t0)/dt;

t(1) = t0;

Q(1) = Q0;

Q2(1) = Q0;

Q3(1) = Q0;

for i = 1: n

t(i+1) = t(i) + dt;

A = 1.161e-6;

B = 2.47e10;

F = (3.795e-10 - 8e-9.*Q(i))./(4.14e-19);

F2 = (4.14e-10 - 8e-9.*Q2(i))./(4.14e-19);

F3 = (4.485e-10 - 8e-9.*Q3(i))./(4.14e-19);

JQ(i) = A .* F^2 .* exp(-B./F);

JQ2(i) = A .* F2^2 .* exp(-B./F2);

JQ3(i) = A .* F3^2 .* exp(-B./F3);

VQ(i) = 0.938 + Q(i) .* 231.783; VQ2(i) = 0.938 + Q2(i) .* 231.783; VQ3(i) = 0.938 + Q3(i) .* 231.783;

```

Q(i+1) = Q(i) + JQ(i)*dt; Q2(i+1) = Q2(i) + JQ2(i)*dt; Q3(i+1) = Q3(i) +
JQ3(i)*dt;
end

```

```

plot (VQ)
title('Gráfico de la tensión umbral');
xlabel('t [seg]');
ylabel('Vt [V]');

```

```

hold on
plot (VQ2)
plot (VQ23)

```

4.5. Simulación temporal de la corriente inyectada:

4.5.1. Desarrollo de ecuaciones de J

Vamos a resolver la ecuación 24 correspondiente a la corriente de inyección,

$$J = \frac{q^3 m_{ef}}{16\pi^2 m_{ox} \hbar q \phi_c} F^2 * e^{-\frac{4\sqrt{2m_{ox}}}{3\hbar q F} (q\phi_c)^{\frac{3}{2}}} \quad (48)$$

donde,

m_{ef} es la masa del $e^- = m_0, 9,1 \times 10^{-31} kg$.

q es la carga del e^- , $-1,6 \times 10^{-19} C$.

\hbar es la constante reducida de Planck, $1,055 \times 10^{-34} Js$.

ϕ_c es la altura de la barrera del SiO_2 .

m_{ox} es la masa efectiva del e^- adentro del óxido.

F es el campo eléctrico.

$$\phi_c = 3,15V$$

$$d_{ox} = 4nm$$

$$m_0 = 9,1 \times 10^{-31} kg$$

$$m_{ox} = 3,822 \times 10^{-31}$$

F en el óxido de túnel, F_{to} , se calcula a partir de la ecuaciones

$$21, F_{ip} - F_{to} = \frac{Q}{\epsilon_{ox}}$$

$$y \ 22, V_G = F_{ip} t_{ip} + F_{to} t_{to}$$

donde,

F_{ip} es el campo en el óxido de interpoly.

F_{to} es el campo en el óxido de túnel.

Q es la carga en la puerta flotante.

$t_{to} = 4\text{nm}$.

$t_{ip} = 8\text{nm}$.

$\epsilon_{ox} = 3,9\epsilon_0 = 3,9 * 8,85x10^{-12} F/m = 3,45x10^{-11} F/m$.

Cuando $t = 0$ no hay carga dentro de la puerta flotante, entonces $Q = 0$. Por lo tanto el campo en los dos óxidos son iguales, osea $F_{to} = F_{ip} = F$, usando la ecuación 22 resulta,

$$F = \frac{V_G}{t_{ip} + t_{to}} \quad (49)$$

reemplazando los valores,

$t_{ip} = 8\text{nm}$

$t_{to} = 4\text{nm}$

$V_G = 11\text{V}$

entonces $F = 0,0833 * V_G/nm$

Reemplazando las variables en la corriente inyectada,

$$J(0) = A * F^2 * e^{-B/F} \quad (50)$$

donde,

$$A = \frac{(1,6x10^{-19}C)^2 * m_0}{16\pi^2 * 0,42m_o * 1,055x10^{-34} J.s * 3,15V} = 1,161x10^{-6} C^2/J.s.V$$

$$B = \frac{4 * \sqrt{2 * 3,82x10^{-31} kg}}{3 * 1,055x10^{-34} J.s * 1,6x10^{-19} C} * (1,6x10^{-19} C * 3,15V)^{3/2} = 2,47x10^{10} \frac{\sqrt{kg} * (C.V)^{3/2}}{J.s.C}$$

$$F = \frac{V_G - 0}{t_{ip} + t_{to}} = 0,0833 * V_G/nm$$

Para el caso de 11V:

$$J(0) = 9,754x10^{11} A.m^{-2} * e^{-26,949} = 1,929 A.m^{-2} \quad (51)$$

donde,

$$A = 1,161x10^{-6} C^2/J.s.V$$

$$B = 2,47x10^{10} \frac{\sqrt{kg} * (C.V)^{3/2}}{J.s.C}$$

$$F = \frac{11V}{1,2x10^{-8}m}$$

Para el caso de 12V:

$$J_2(0) = 1,161x10^{12} A.m^{-2} * e^{-24,7} = 21,764 A.m^{-2} \quad (52)$$

donde,

$$A = 1,161x10^{-6} C^2 / J.s.V$$

$$B = 2,47x10^{10} \frac{\sqrt{kg.(C.V)^{3/2}}}{J.s.C}$$

$$F = \frac{12V}{1,2x10^{-8}m}$$

Para el caso de 13V:

$$J_3(0) = 1,889x10^{12} A.m^{-2} * e^{-22,8} = 170,782 A.m^{-2} \quad (53)$$

donde,

$$A = 1,161x10^{-6} C^2 / J.s.V$$

$$B = 2,47x10^{10} \frac{\sqrt{kg.(C.V)^{3/2}}}{J.s.C}$$

$$F = \frac{13V}{1,2x10^{-8}m}$$

Cuando $t \neq 0$ se van acumulando e^- en la puerta flotante, entonces $Q \neq 0$. Por lo tanto el campo en cada óxido serán distintos entre sí, osea $F_{to} \neq F_{ip}$, usando la ecuación 21 resulta, $F_{ip} = \frac{Q}{\epsilon_{ox}} + F_{to}$ reemplazando esta expresión de F_{ip} en la ecuación 22 resulta,

$$F_{to} = \frac{V_G - \frac{Q}{\epsilon_{ox}} t_{ip}}{t_{ip} + t_{to}} \quad (54)$$

Por ultimo, reemplazando las variables calculadas en la ecuación de la corriente inyectada (notar que al ser $m_n = m_o$ los dejo expresados así para simplificar),

$$J(Q) = A * F^2 * e^{-B/F} \quad (55)$$

donde,

$$A = \frac{(1,6x10^{-19}C)^2 * m_0}{16\pi^2 * 0,42m_0 * 1,055x10^{-34} J.s * 3,15V} = 1,161x10^{-6} C^2 / J.s.V$$

$$B = \frac{4 * \sqrt{2 * 3,82x10^{-31} kg}}{3 * 1,055x10^{-34} J.s * 1,6x10^{-19} C} * (1,6x10^{-19} C * 3,15V)^{3/2} = 2,47x10^{10} \frac{\sqrt{kg.(C.V)^{3/2}}}{J.s.C}$$

$$F = \frac{V_G - \frac{Q}{\epsilon_{ox}} t_{ip}}{t_{ip} + t_{to}} = \frac{V_G - \frac{Q}{3,45 \times 10^{-11} F/m} 8nm * (\frac{1 \times 10^{-9} m}{nm})}{1,2 \times 10^{-8} m}$$

Para el caso de 11V:

$$J(Q) = A * F^2 * e^{-B/F} \quad (56)$$

donde,

$$A = 1,161 \times 10^{-6} C^2 / J.s.V$$

$$B = 2,47 \times 10^{10} \frac{\sqrt{kg} \cdot (C.V)^{3/2}}{J.s.C}$$

$$F = \frac{11V - \frac{Q}{3,45 \times 10^{-11} F/m} 8nm * (\frac{1 \times 10^{-9} m}{nm})}{1,2 \times 10^{-8} m} = \frac{3,795 \times 10^{-10} - (8 \times 10^{-9} * Q)}{4,14 \times 10^{-19}}$$

Para el caso de 12V:

$$J_2(Q) = A * F_2^2 * e^{-B/F_2} \quad (57)$$

donde,

$$A = 1,161 \times 10^{-6} C^2 / J.s.V$$

$$B = 2,47 \times 10^{10} \frac{\sqrt{kg} \cdot (C.V)^{3/2}}{J.s.C}$$

$$F_2 = \frac{12V - \frac{Q}{3,45 \times 10^{-11} F/m} 8nm * (\frac{1 \times 10^{-9} m}{nm})}{1,2 \times 10^{-8} m} = \frac{4,14 \times 10^{-10} - (8 \times 10^{-9} * Q)}{4,14 \times 10^{-19}}$$

Para el caso de 13V:

$$J_3(Q) = A * F_3^2 * e^{-B/F_3} \quad (58)$$

donde,

$$A = 1,161 \times 10^{-6} C^2 / J.s.V$$

$$B = 2,47 \times 10^{10} \frac{\sqrt{kg} \cdot (C.V)^{3/2}}{J.s.C}$$

$$F_3 = \frac{13V - \frac{Q}{3,45 \times 10^{-11} F/m} 8nm * (\frac{1 \times 10^{-9} m}{nm})}{1,2 \times 10^{-8} m} = \frac{4,485 \times 10^{-10} - 8 \times 10^{-9} * Q}{4,14 \times 10^{-19}}$$

Verifico de unidades,

$$[J] = \frac{[C]^2 * [V/m]^2}{[J.s] * [V]} * e^{\frac{\sqrt{[kg]}}{[J.s][C][V/m]}} ([C][V])^{3/2} = \frac{[C]}{[s][m]^2} * e^{\frac{\sqrt{[kg]}}{[s]\sqrt{[C][V]}}} = \frac{[C]}{[m]^2[s]} = \frac{[A]}{m^2}$$

$$\text{Nota: } [J] = [C][V]$$

$$[J] = [kg][m]^2/[s]^2$$

$$[A] = [C]/[s]$$

4.5.2. Código Matlab - Densidad de corriente en el tiempo

```

Q0 = 0;
t0 = 0;
tf = 100000e-6;
dt = 1e-6;
n = (tf - t0)/dt;

t(1) = t0;
Q(1) = Q0;
Q2(1) = Q0;
Q3(1) = Q0;

for i = 1: n
t(i+1) = t(i) + dt;

A = 1.161e-6;
B = 2.47e10;
F = (3.795e-10 - 8e-9.*Q(i))./(4.14e-19);
F2 = (4.14e-10 - 8e-9.*Q2(i))./(4.14e-19);
F3 = (4.485e-10 - 8e-9.*Q3(i))./(4.14e-19);

JQ(i) = A .* F.^2 .* exp(-B./F);

JQ2(i) = A .* F2.^2 .* exp(-B./F2);

JQ3(i) = A .* F3.^2 .* exp(-B./F3);

Q(i+1) = Q(i) + JQ(i)*dt; Q2(i+1) = Q2(i) + JQ2(i)*dt; Q3(i+1) = Q3(i) +
JQ3(i)*dt;
end

plot (JQ) title('Gráfico de la corriente inyectada');
xlabel('t [oseg]');
ylabel('J [A/m²]');

```

```
x = log (JQ)
plot (x)
title('Gráfico de la corriente inyectada - Log');
xlabel('t [seg]');
ylabel('J [A/m²]');
```