Guía de Ejercicios Nº 4: Juntura MOS

Constante	Valor
q	$1{,}602 \times 10^{-19}$ C
m_0	$9{,}109 \times 10^{-31}$ kg
k	$1{,}381 \times 10^{-23}$ J/K $= 8{,}617 \times 10^{-5}$ eV K
h	$6{,}626 \times 10^{-34}$ J s $= 4{,}136 \times 10^{-15}$ eV s
ϵ_0	88,5 fF/cm
ϵ_r(Si)	11,7
$\epsilon_r(SiO_2)$	3,9
T_{amb}	27 °C = 300 K

Parte I: Juntura N+P

1. Dada una juntura MOS con $t_{ox} = 150$ Å y construida en un substrato tipo P con una concentración de $N_A = 5 \times 10^{16}$ cm^{-3}:
   a) Calcule la capacidad por unidad de área, C'_{ox}, y el *body factor coefficient*, γ.
   b) Calcule el espesor de la región de vaciamiento en equilibrio térmico.
   c) Calcule la caída de potencial en la capa de óxido.
   d) Calcule la caída de potencial en la región de vaciamiento.
   e) Calcule el potencial electroestático en la interfaz $SiO_2 - Si$ en equilibrio térmico.
   f) Repita los puntos anteriores para $V_{GB} = 2$ V y $V_{GB} = -2$ V.

2. Dada un juntura MOS de canal N y substrato tipo P, realice diagramas cualitativos de: *a*) densidad de portadores libres, *b*) densidad de carga, *c*) campo eléctrico y *d*) potencial, para los siguientes casos casos: *a*) $V_{GB} < V_{FB}$ *b*) $V_{GB} = V_{FB}$ *c*) $V_{GB} = 0$ *d*) $V_{GB} = V_T$ *e*) $V_{GB} > V_T$ Para este ejercicio puede utilizar los conjuntos de ejes de la figura 4 que se encuentra sobre el final de la guía. En este conjunto de ejes incluye, a modo de ayuda, el caso para $V_{GB} = 0$.

3. Si se tiene una juntura MOS con $t_{ox} = 200$ Å construida en un substrato tipo P con una concentración de $N_A = 5 \times 10^{16}$ cm^{-3},
   a) Determine para qué rango de tensiones aplicadas el capacitor se encuentra en acumulación, vaciamiento e inversión.
   b) Calcule el campo eléctrico en el óxido y la carga por unidad de área en el substrato de silicio para $V_{GB} = -2{,}5$ V.
   c) Calcule el espesor de la región de vaciamiento,la carga por unidad de área en el substrato y el campo eléctrico en el óxido cuando el capacitor está polarizado con $V_{GB} = 2{,}5$ V.
   d) Sabiendo que la ruptura dieléctrica del óxido se produce para $E_{ox} = 5$ MV/cm, calcule el rango de tensiones V_{GB} admisibles.

4. Considere una juntura MOS con $V_{FB} = -0{,}97$ V, $V_T = 0{,}466$ V, $C'_{ox} = 0{,}28\ \mu$F/cm^2, $\gamma = 0{,}65$ V$^{0.5}$. Al aplicarle $V_{GB} = 0$ V:
   a) Indique en qué régimen se encuentra la juntura.
   b) Calcule el nivel de dopaje del sustrato.
   c) Calcule el espesor de la capa de óxido.
   d) Determine el ancho de la zona desierta.
   e) Calcule la caída de potencial en el óxido y en el sustrato.

f) Calcule la densidad de carga superficial en el gate, en la interfaz óxido-sustrato y la carga por unidad de área en el sustrato.

g) Repetir para $V_{GB} = -2\,\text{V}$ y $V_{GB} = \;\; 2\,\text{V}$.

Parte II: Juntura P+N y otras configuraciones

5. Suponga una juntura MOS con polisilicio tipo P^+ y sustrato tipo N con una concentración $N_A = 8{,}5\times10^{15}\,\text{cm}^{-3}$ y espesor de óxido $t_{ox} = 70\,\text{nm}$, a la que se le aplica una tensión $V_{GB} = 0\,\text{V}$.
   - *a*) Calcule los parámetros γ, C'_{ox}, V_{FB} y V_T.
   - *b*) Indique en qué régimen se encuentra la juntura.
   - *c*) Determine el ancho de la zona desierta de la misma.
   - *d*) Calcule la caída de potencial en el óxido y en el sustrato.
   - *e*) Graficar $\log p(x), \log n(x), \rho(x), E(x)$ y $\phi(x)$.
   - *f*) Repetir para $V_{GB} = -2\,\text{V}$ y $V_{GB} = 2\,\text{V}$.

6. Considere una juntura MOS con polisilicio tipo P^+ y sustrato tipo N con parámetros $\gamma = 1{,}32\,\text{V}^{0.5}$, $C'_{ox} = 24{,}65\,\text{nF/cm}^2$, $V_{FB} = 0{,}892\,\text{V}$ y $V_T = -1{,}157\,\text{V}$. Si se le aplica una tensión $V_{GB} = 0\,\text{V}$:
   - *a*) Indique en qué régimen se encuentra la juntura.
   - *b*) Determine el ancho de la zona desierta de la misma.
   - *c*) Calcule la caída de potencial en el óxido y en el sustrato.
   - *d*) Calcule la densidad de carga superficial en el gate, en la interfaz óxido-sustrato y la carga por unidad de área en el sustrato.
   - *e*) Repetir para $V_{GB} = -2{,}5\,\text{V}$ y $V_{GB} = 2{,}5\,\text{V}$.

7. Considere una juntura MOS con polisilicio tipo P^+ y substrato de silicio tipo P con parámetros $t_{\text{ox}} = 20\,\text{nm}$ y $N_a = 1\times10^{15}\,\text{cm}^{-1}$:
   - *a*) Considere el caso $V_{GB} = 0$ y realice los diagramas de I. densidad de portadores libres, II. densidad de carga, III. campo eléctrico y IV. potencial,
   - *b*) ¿En que régimen se encuentra la juntura en este caso?
   - *c*) Calcule: ϕ_B, C'_{ox}, γ, x_{d0}, V_T y V_{FB}.

Parte III: Capacidad de juntura

8. Dada una juntura N^+P actuando como capacitor MOS con una concentración de $N_A = 10^{17}\,\text{cm}^{-3}$, cuya curva de capacidad es la de la figura 1:
   - *a*) A partir de la expresión de la capacidad, $C(V) = \partial Q/\partial V$, explique cómo se obtiene la curva de Capacidad vs. V_{GB} de la figura 1.
   - *b*) Calcule el espesor de la capa de óxido.
   - *c*) Calcule C_{min}.
   - *d*) Calcule el campo eléctrico en el óxido cuando $V_{GB} = V_T + 1\,\text{V}$.
   - *e*) Calcule el campo eléctrico en el óxido cuando $V_{GB} = V_{FB} - 1\,\text{V}$.
   - *f*) Dibujar la curva de capacidad si ahora el capacitor es P^+N con igual t_{ox} e igual concentración de dopantes en el sustrato, solo que esta vez de tipo donor en lugar de aceptor.

9. Se tiene el circuito RC de la figura 2, donde $V_S = 0{,}3\,\text{V}$, $R = 1\,\text{k}\Omega$, el capacitor se encuentra realizado mediante una juntura MOS N^+P. Los parámetros de la juntura son $t_{ox} = 100\,\text{Å}$ y $N_A = 10^{16}\,\text{cm}^{-3}$. La fuente v_s satisface:

$$v_s(t) = \begin{cases} 0 & \text{si } t < t_0 \\ 1\,\text{mV} & \text{si } t \geq t_0 \end{cases}$$

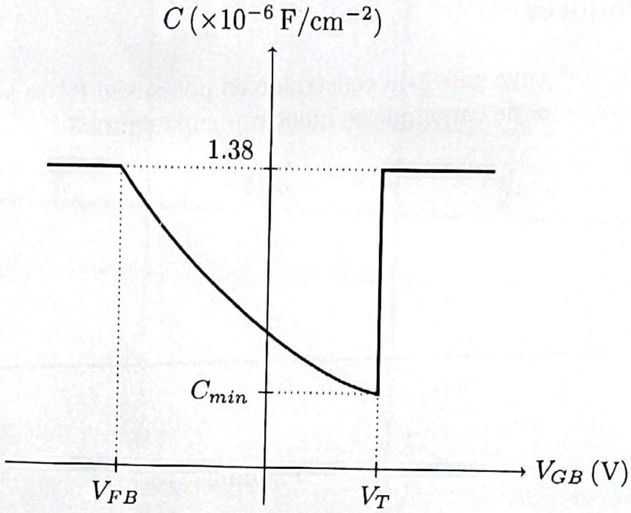


Figura 1

a) Suponiendo que el escalón de tensión no modifica la capacidad de la juntura, hallar la constante de tiempo y graficar $V_c(t)$.

b) ¿Seguiría siendo válida la suposición del ítem anterior si ahora la amplitud del escalón de $v_s(t)$ fuera 100 mV?¿Por qué?

c) ¿Y si ahora $V_S = 1\,\mathrm{V}$ y la amplitud del escalón $v_s(t)$ es de 100 mV? Hallar la constante de tiempo y graficar $V_c(t)$.

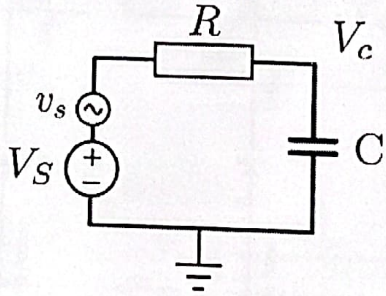


Figura 2

Parte IV: Integradores

10. A una estructura MOS cuyo gate está construido en poli-silicio P$^+$ se le aplica un potencial $V_{GB} = 0{,}8\,\mathrm{V}$ y resultan las densidades de carga que se muestran en la figura 3.

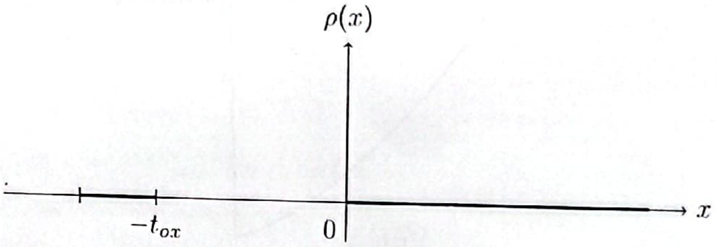


Figura 3

a) ¿En qué estado de polarización (acumulación, inversión, etc.) se encuentra la juntura?

b) ¿El semiconductor es tipo n o tipo p?

c) ¿Cuánto vale la concentración de dopantes en el semiconductor?

d) Para $V_{GB} = V_T$ explique cuánto debe valer $\phi(x = 0)$ e indique la concentración de portadores mayoritarios y minoritarios en $x = 0$.

e) Para $V_{GB} = V_T$ dibuje en forma cualitativa el diagrama del potencial $\phi(x)$ en la juntura, señalando en el diagrama t_{ox}, x_{dmax} y V_{ox}.

f) Sabiendo que el espesor de óxido es $t_{ox} = 10\,\mathrm{nm}$, calcule la tensión umbral (V_T) de la juntura.

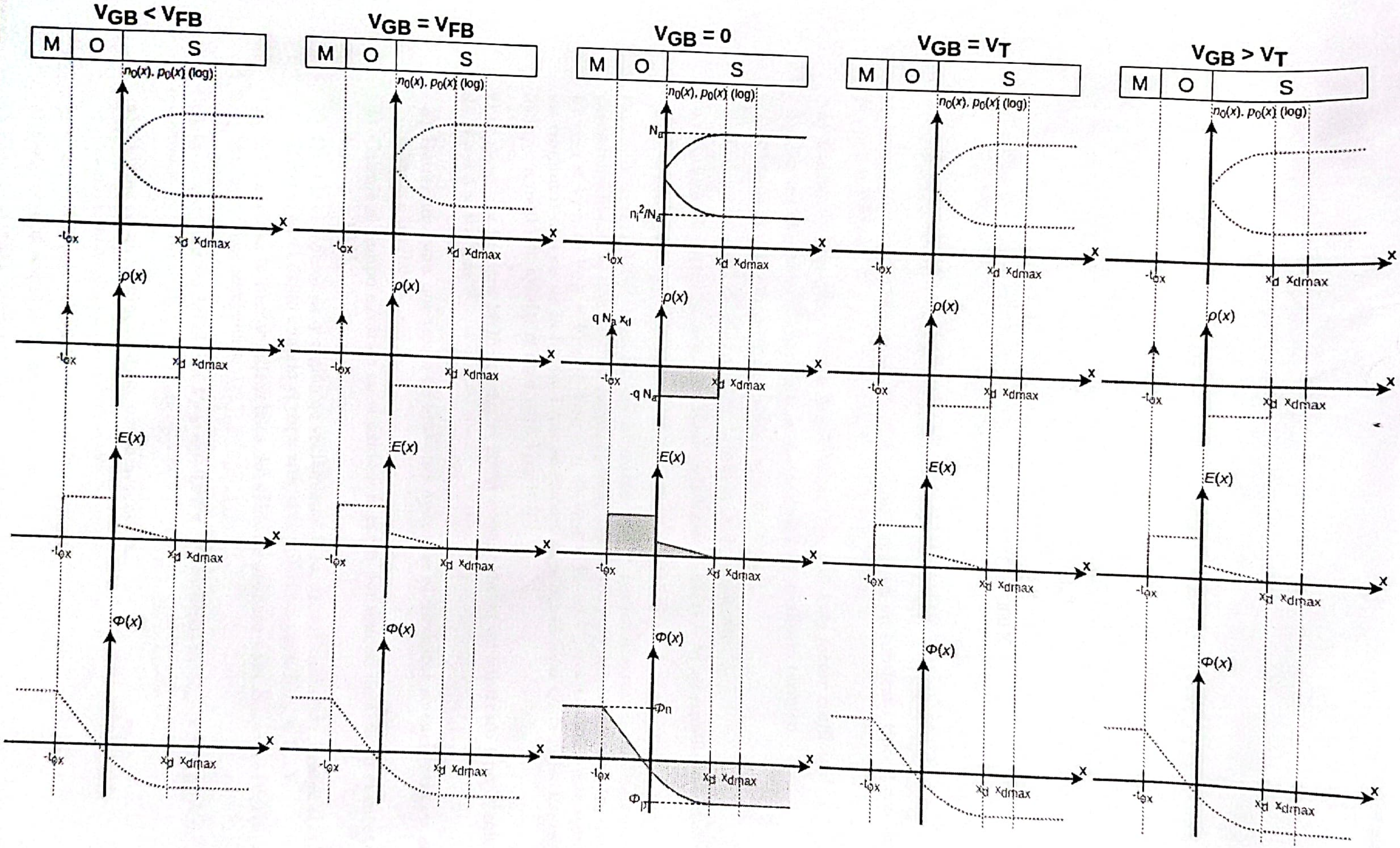

VGB < VFB
VGB = VFB
VGB = 0
VGB = VT
VGB > VT
M
O
S
n0(x), p0(x) (log)
Na
ni2/Na
-tox
xd
xdmax
x
ρ(x)
q Na xd
-q Na
E(x)
Φ(x)
Φn
Φp

Figura 4

GUÍA N°4: JUNTURA MOS

- PARTE I: Juntura N+P

1.a) La capacidad por unidad de área de óxido [F/cm²] se define como:

$$C'_{ox} = \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}}$$

Siendo

$$\epsilon_{ox} = \underbrace{3,9}_{\epsilon_r(SiO_2)\ [\text{óxido de silicio}]} \cdot 8,85 \cdot 10^{-14}\ F/cm^2$$

$$t_{ox} = 150\ Å = 150 \cdot 10^{-10}\ m = 150 \cdot 10^{-8}\ cm$$

Entonces

permitividad relativa del óxido

$$C'_{ox} = \frac{3,9 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14}\ F/cm}{150 \cdot 10^{-8}\ cm}$$

$$\boxed{C'_{ox} = 2,301 \cdot 10^{-7}\ F/cm^2}$$

* el ejercicio dice C_{ox}, pero es C'_{ox} ya que no se tiene el dato del área de la juntura.

El body factor coefficient γ se define como:

$$\gamma = \frac{1}{C'_{ox}} \sqrt{2 \epsilon_s \cdot q\, N_a} \qquad [\gamma] = V^{1/2}$$

↳ permitividad relativa del silicio (semiconductor/sustrato)

Es decir:

$$\gamma = \frac{1}{2,301 \cdot 10^{-7}\ F/cm^2} \cdot \sqrt{2 \cdot 11,7 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14}\ F/cm^2 \cdot 1,602 \cdot 10^{-19}\ C \cdot 5 \cdot 10^{16}\ cm^{-3}}$$

$$\boxed{\gamma = 0,5597\ V^{1/2}}$$

b) Se pide el "espesor" de la región de vaciamiento, pero en realidad se refiere al ancho de la zona de vaciamiento, o extensión de la zona de vaciamiento, que se define como:

$$x_d(V_{GB}) = \frac{\overbrace{\epsilon_s}^{\text{permitividad del silicio/sustrato/semi-conductor}}}{C'_{ox}}\left[\sqrt{1+\frac{4(\phi_B+V_{GB})}{\gamma^2}}-1\right]$$

En régimen de vaciamiento son válidos todos los resultados obtenidos para $V_{GB}=$ cuadrante

$\phi_B \rightarrow \phi_B + V_{GB}$

En un semiconductor (sustrato o substrato), región QNR tipo P vale:

$$p_0 = N_a \Longrightarrow \phi_{SUST} = -\frac{KT}{q}\ln\left(\frac{N_a}{n_i}\right)$$

Potencial de juntura:

$$\phi_B = \phi_{gate} - \phi_{SUST} = 550mV + \frac{KT}{q}\ln\left(\frac{N_a}{n_i}\right)$$

Entonces:

$$\phi_{SUST} = -25,9mV \ln\left(\frac{5.10^{16}cm^{-3}}{6,822.10^{9}cm^{-3}}\right)$$

$$\phi_{SUST} = -408,8mV$$

Por lo que:

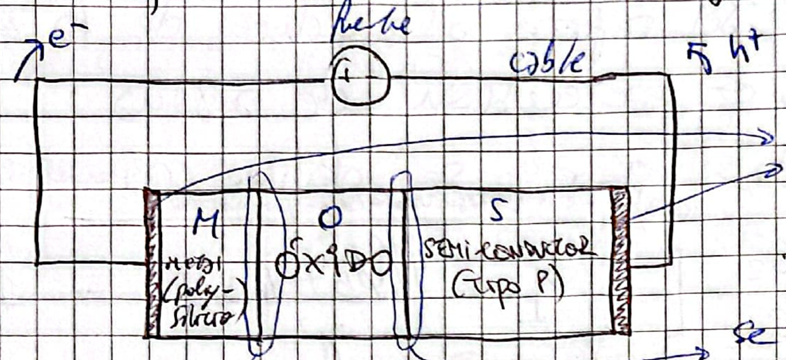
$$\phi_B = 550 + 408,8mV = 958,8mV$$

De esta manera,

$$x_d(0V) = \frac{11,7 . 8,85.10^{-14}F/cm}{2,302.10^{-7}F/cm^2}\left[\sqrt{1+\frac{4(0,9588+0)V}{(0,5597)^2V}}-1\right]$$

$$\boxed{x_d(0V) = 1,1874.10^{-5}\ cm}$$

c) Para que se entienda mejor:



contacto: permite conexión de cables a batería y componente.

Se genera zona desierta en el semi-conductor, cerca del óxido, donde se depositan electrones y "quitan" huecos

Se deposita la carga positiva del semiconductor y es de donde sale la carga e^-

Algunas características destacables:
- Hay neutralidad de carga
- El óxido bloquea la redistribución de carga puesto que es un aislante.
- La fuente y el cable unen al semi-conductor y al silicio que poseen distinto potencial.
- En el polysilicio (metal) la carga se acumula únicamente en la superficie y en contacto con el óxido.

Entonces, de observar los gráficos de carga en el semi-conductor, luego integrando y, así, obteniendo el campo eléctrico $\vec{E}$, luego volviendo a integrar, se obtiene el potencial electrostático.

En el gate (poly silicio dopado tipo N), siempre se asume que está fuertemente dopado, por lo que:

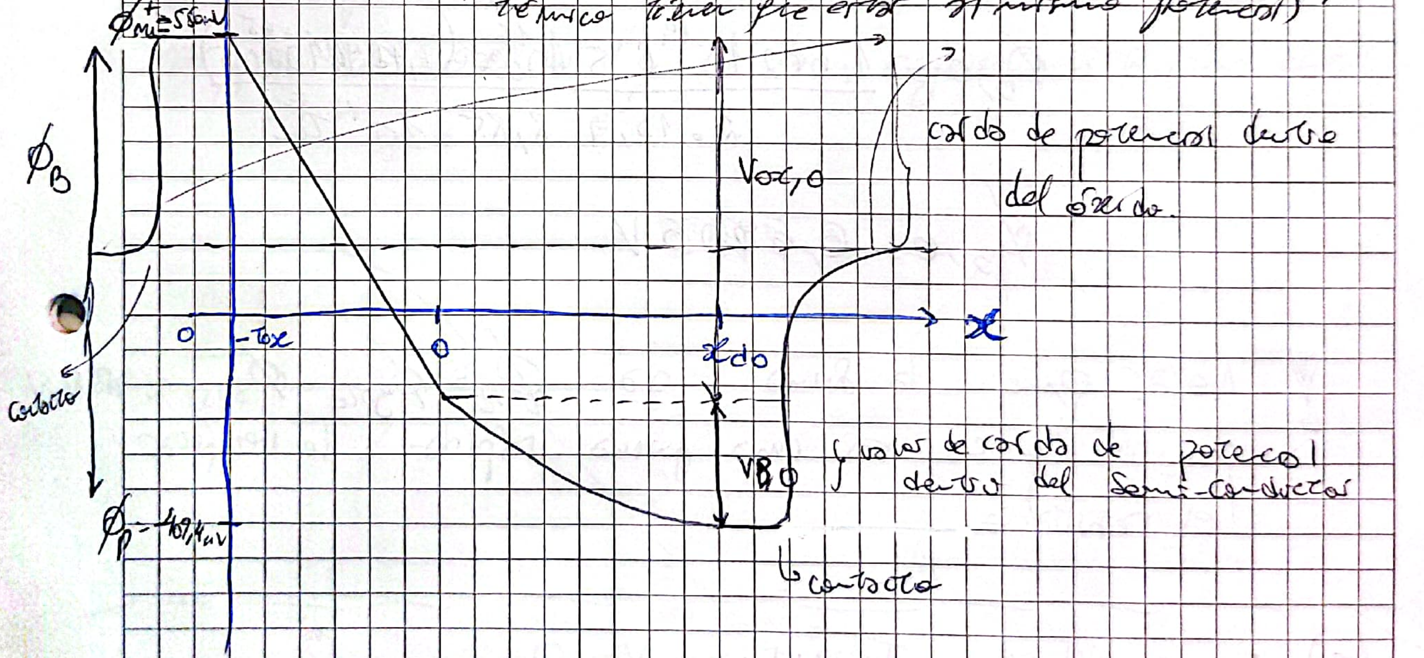
$$\phi_{gate} = 550mV$$

Por otro lado, en el semi-conductor región QNR tipo P vale:

$$p_0 = N_a \Rightarrow \phi_{sust} = -\frac{KT}{q} \ln \frac{N_a}{n_i} = -409,4mV$$

Se tiene:

(cabe aclarar que la diferencia de potencial del built-in no se puede medir directamente, ya que los contactos metálicos forman uniones juntas cuya diferencia de potencial de cada una de las uniones que suman el mismo valor de potencial ϕ_B con lo cual la diferencia de potencial entre contactos termina siendo 0 (tiene sentido que las metalizaciones sean de un mismo material y en equilibrio térmico tienen que estar al mismo potencial)



Regresando al ejercicio original, la caída de potencial en la capa del óxido vale:

$$V_{ox,0} = E_{ox} \cdot t_{ox} = \frac{q N_a x_{do} t_{ox}}{\epsilon_{ox}}$$

reemplazando por los valores:

$$V_{ox,0} = \frac{1{,}602 \cdot 10^{-19} C \cdot 5 \cdot 10^{16} cm^{-3} \cdot 1{,}1874 \cdot 10^{-5} cm \cdot 150 \cdot 10^{-8} cm}{3{,}9 \cdot 8{,}85 \cdot 10^{-14} cm}$$

$$\boxed{V_{ox,0} = 0{,}4133 V}$$

(d) En la región de vaciamiento, el potencial vale:

$$\phi_{B,0} = \frac{q N_a x_{do}^2}{2 \epsilon_s}$$

Es decir

$$\phi_{B,0} = \frac{1{,}602 \cdot 10^{-19} C \cdot 5 \cdot 10^{16} cm^{-3} \cdot (1{,}1874 \cdot 10^{-5} cm)^2}{2 \cdot 11{,}7 \cdot 8{,}85 \cdot 10^{-14} cm}$$

$$\phi_{B,0} = 0{,}5453 V$$

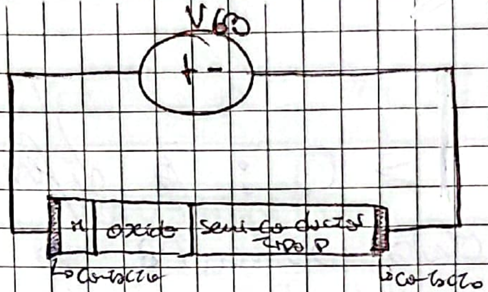
! Notar que la suma da $\phi_B = \phi_{gate} - \phi_{sust} \approx 958{,}8 mV$ por lo que es una forma rápida de verificar el resultado.

(e) En equilibrio térmico $V = 0$, por lo que:

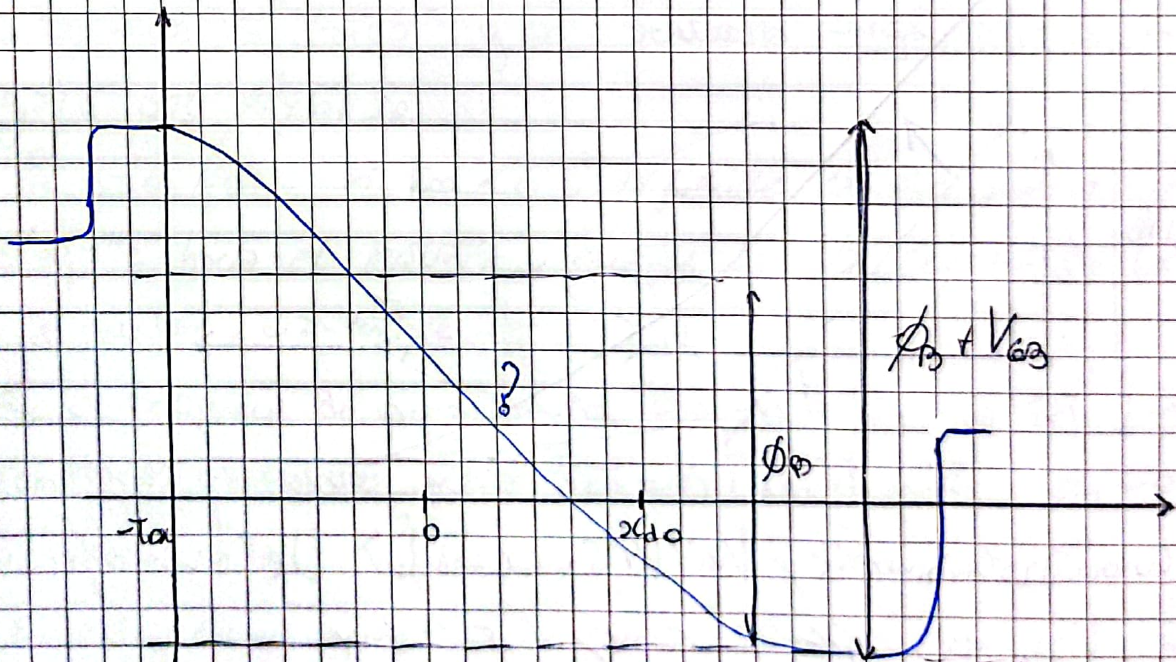
$\phi_B = 958{,}8 mV$ (diferencia entre ambos, como se obtuvo en c).

Debe ser!

f) Al aplicar una tensión al gate con respecto al sustrato semi-conductor la electrostática del MOS se ve afectada ⟹ la diferencia de potencial de potencial a lo largo de la estructura ahora es distinta de cero.



La diferencia de potencial se manifiesta a lo largo del óxido y de la región SCR (zona desierta).

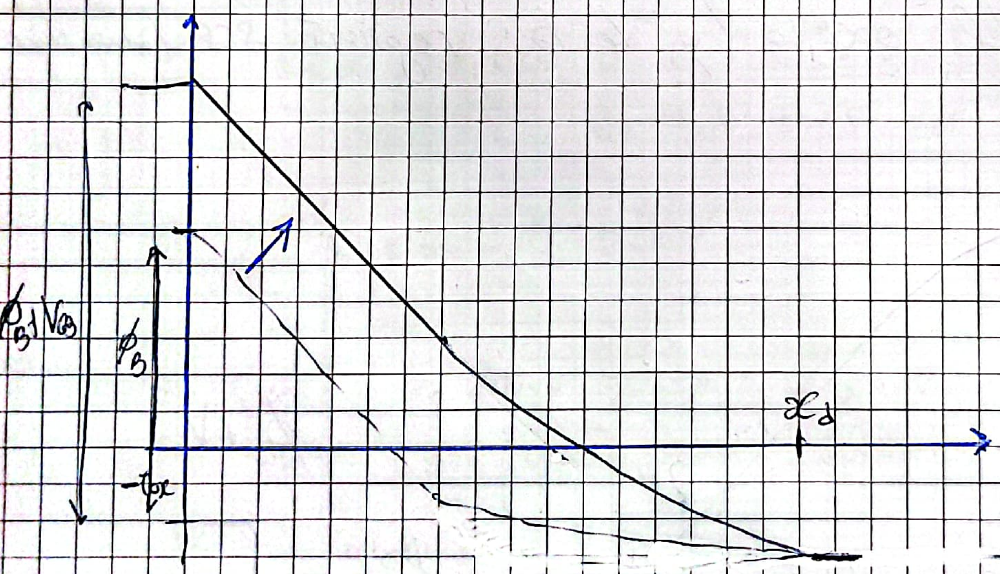


El óxido es un aislante ⟹ no hay corriente en la estructura.
En la SCR (zona desierta), produce una formación de

Cuasi-equilibrio ⇒ nuevo balance entre las corrientes de arrastre y difusión.

- La electrostática es cualitativamente idéntica que sin polarización (pero cambia la cantidad de carga distribuida)
- $n_0 p_0 = n_i^2$

Si V_{GB} es ligeramente > 0: la diferencia de potencial de la estructura aumenta ⇒ mayor dipolo de carga ⇒ la SCR debe expandirse.

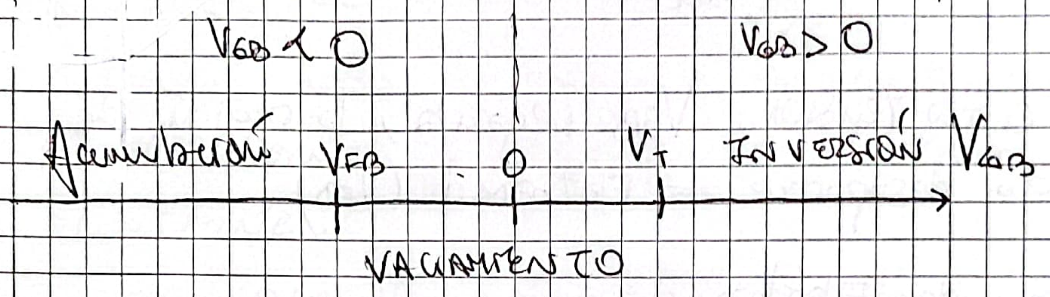


Cuantitativamente, la física no se modifica si V_{GB} es apenas mayor o menor.
Se pueden emplear las mismas ecuaciones sin polarización, pero teniendo en cuenta

$$\phi_B \rightarrow \phi_B + V_{GB}$$

Es necesario identificar el tipo de régimen en el que se encuentra la estructura antes de realizar cálculos:

Existen tres regiones de operación delimitadas por dos tensiones con nombre propio:



• Régimen de vaciamiento: Si $V_{GB} > 0$, la fuente mueve huecos desde el sustrato hacia el gate y la región de vaciamiento crece. Además, el x_d se ensancha debido a los huecos sustraídos y se acumula carga positiva en el gate del polysilicio.

Por otro lado, si $V_{GB} < 0$, la fuente mueve huecos desde el gate hacia el sustrato, entonces la región de vaciamiento se contrae, disminuyendo x_d.

En el régimen de vaciamiento son válidos todos los resultados obtenidos para $V_{GB} = 0$ (eq. térmico) mediante $\phi_B \to \phi_B + V_{GB}$ mientras $|V_{GB}| < |V_{FB}|$ y $|V_{GB}| < |V_T|$.

En este régimen:

$$x_d(V_{GB}) = \frac{\epsilon_s}{C'_{ox}} \left[\sqrt{1 + \frac{4(\phi_B + V_{GB})}{\gamma^2}} - 1 \right]$$

$$\int_{-t_{ox}}^{-t_{ox}^{+}} \rho(x)\,dx =$$

$$Q'(v_{GB}) = q N_a x_d(v_{GB}) \qquad C' = q N_a \left.\frac{\partial x_d(v_{GB})}{\partial v_{GB}}\right|_{V_{GB}} = \frac{C'_{ox}}{\sqrt{1 + \frac{4(\phi_B + v_{GB})}{\gamma^2}}}$$

* v_{GB} es el valor posible V_{GB}, es variable (es lo mismo a sr...)

Asamblea

$$V_B(V_{GB}) = \frac{q N_a x_d^2}{2 \epsilon_s}$$

$$V_{ox}(V_{GB}) = \frac{q N_a x_d \, t_{ox}}{\epsilon_{ox}}$$

- Para cierta tensión V_{GB} negativa, la región de vaciamiento desaparece $\Rightarrow$ Flatband (V_{FB})

Tensión de Flatband:

$$V_{FB} = -\phi_B$$

Entonces, el potencial electrostático es constante a lo largo de toda la estructura, la distribución de carga es $\rho = 0$, el campo eléctrico es nulo y en el semiconductor (tipo p) $p = N_a$ y $n = \frac{n_i^2}{N_a}$

$V_B(V_{GB}) = 0$ $\quad x_d$ es muy pequeña ≈ 0

$V_{ox}(V_{GB}) = 0$

$Q'_{\text{p, óxido}} = 0$ $\Big\} = C'_{ox}(V_{GB} - V_{FB}) = 0$

Ojo que ϕ_B no es cero (o no necesariamente), sólo que $V_{FB} = -\phi_B$. $\Rightarrow V_{GB} = V_{FB}$

- Régimen de acumulación

Si $V_{GB} < V_{FB}$ hay acumulación de huecos en la interfaz Si/SiO_2.

Existe un campo eléctrico dentro del óxido (por ahora, de signo contrario)

Entonces, toda la carga se encuentra en la interfaz con el aislante y el potencial eléctrico se aplica al aislante.

Dado que $V_{GB} < V_{FB}$ es posible considerar que la estructura MOS se comporta como un capacitor de placas paralelas luego de pasar $V_{FB} \Rightarrow Q'_{poly-ox} = C'_{ox}(V_{GB} - V_{FB})$.

$$\cancel{\phi_B} + V_{GB} = \underbrace{\cancel{V_B}}_{=0 \text{ (no hay densidad de carga)}} + V_{ox} \Rightarrow V_{ox} = V_{GB} - V_{FB}$$

$V_{Bulk} = V_B = 0$ xd es muy pequeño, desaparece.

- Tensión umbral (V_T) → threshold.

Para $V_{GB} > 0$ suficientemente grande, la electrostática cambia cuando $n(0) = N_a \Rightarrow$ umbral

Superado el umbral, no es posible despreciar la contribución de los electrones a la electrostática.

V_T es la tensión de compuerta que produce $n(0) = N_a$ (la concentración superficial de e^- es igual a la concentración de huecos inicialmente N_a) en el semi-conductor.

Se asumen válidas las condiciones de electroestática de vaciamiento y se desprecia la concentración de electrones para tensión umbral.

$$V_B(V_T) = -2\phi_p$$

dado que en la región cuasineutral vale ϕ_p y en $x=0$ vale $-\phi_p$. Entonces, dicha diferencia entre ambos vale $-2\phi_p$.

x_d se puede obtener utilizando la relación entre V_B y x_d en vaciamiento, siendo

$$x_d(V_T) = x_{d\,max} = \sqrt{\frac{2\epsilon_s(-2\phi_p)}{q\,N_a}}$$

Entonces:

$$V_{ox}(V_T) = \frac{q\,N_a\,x_d(V_T)}{\epsilon_{ox}}\,t_{ox} = \gamma\sqrt{-2\phi_p}$$

Siendo $\phi_B = -V_{FB}$ se despeja V_T tal que:

$$V_T = V_{FB} - 2\phi_p + \gamma\sqrt{-2\phi_p}$$

Otras conclusiones importantes son:

- Si N_a es mayor, entonces se necesita un V_T mayor. A mayor dopaje, mayor tensión requerida para producir $n(0) = N_a$.
- Si C'_{ox} es mayor ($t_{ox}\downarrow$) entonces V_T será menor. Para óxidos más delgados, es menor la caída de tensión en él.

• Régimen en Inversión ($V_{GB} > V_T$)

La concentración de electrones en la interfaz Si/SiO_2 supera a la concentración de átomos aceptores y se produce la inversión del material.

Para calcular Q'_n vs. V_{GB} se utiliza la aproximación de carga superficial. (La capa de electrones en la superficie del semiconductor es mucho más delgada que cualquier otra dimensión del problema (t_{ox}, x_d))

Se destacan los siguientes fenómenos:

- El ancho de la zona de vaciamiento llega a un valor máximo y se vuelve constante.

$$x_d(V_T) = x_{dmax}$$

- La diferencia de potencial en el sustrato (semi-conductor) alcanza un valor constante

$$V_B(inv) \approx V_B(V_T) = -2\phi_p \Rightarrow \phi_B - V_B + V_{GB} = V_{ox}$$

- Comienza a acumularse carga de forma superficial en la interfaz óxido semi-conductor de signo negativo.

$$|Q'_p| = |Q'_n| + qN_a x_d(max)$$

$V_{ox} = \phi_B - V_{GB} - V_B$

$$Q'_n: \text{Carga de inversión} = -C'_{ox}(V_{GB} - V_T)$$

$$C' = C'_{ox}$$

Se toma un comportamiento similar al capacitor de placas paralelas para $V_{GB} > V_T$.

• El control de Q'_n mediante V_{GB} es la clave de la electrónica del MOS

Entonces, de regreso al ejercicio (el punto a. no cambia)
Obtengo V_{FB} y V_T

$$\boxed{V_{FB} = -\phi_B = -958{,}8\,mV}$$

$$V_T = V_{FB} - 2\phi_p + \gamma\sqrt{-2\phi_p}$$

$$V_T = -958{,}8\,mV - 2\cdot(-409{,}4\,mV) + 0{,}5597\,V^{1/2}\sqrt{-2\cdot(-409{,}4\,mV)}$$

$$\boxed{V_T = 366{,}4589\,mV}$$

Entonces, si $V_{GB} = 2V$, la estructura habrá superado V_T y se encontrará en régimen de inversión.
Por otro lado si $V_{GB} = -2V$, la estructura tendrá $V_{GB} < V_{FB}$, por lo que estará en régimen de acumulación.
De esta manera,
Para $V_{GB} = 2V$:

$$x_d(V_{GB}=2V) \simeq x_{d_{max}} \simeq x_d(V_T) = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s(-2\phi_p)}{q\,N_a}}$$

$$x_d(2V) = \sqrt{\frac{2\cdot 11{,}7\cdot 8{,}85\cdot 10^{-14}\,F/cm\cdot\left(-2\cdot\frac{-409{,}4\,mV}{1000\,mV/V}\right)}{1{,}602\cdot 10^{-19}\,C\cdot 5\cdot 10^{16}\,cm^{-3}}}$$

b) $$\boxed{x_d(2V) = 1{,}4549\cdot 10^{-5}\,cm}$$

d) $V_{BULK} = V_B = -2\phi_p = -2 \cdot (-409{,}4\,mV) = \boxed{818{,}8\,mV}$

c) $V_{ox} = \phi_B + V_{GB} - V_B = 0{,}9588\,V + 2\,V - 0{,}818\,8\,V$

$\boxed{V_{ox} = 2{,}14\,V}$

e) $\phi_B + V_{GB} = 0{,}9588\,V + 2\,V = 2{,}9588\,V$

Para $V_{GB} = -2V$, x_d, el ancho de la zona desierta, es muy pequeña, desaparece y puede considerarse 0

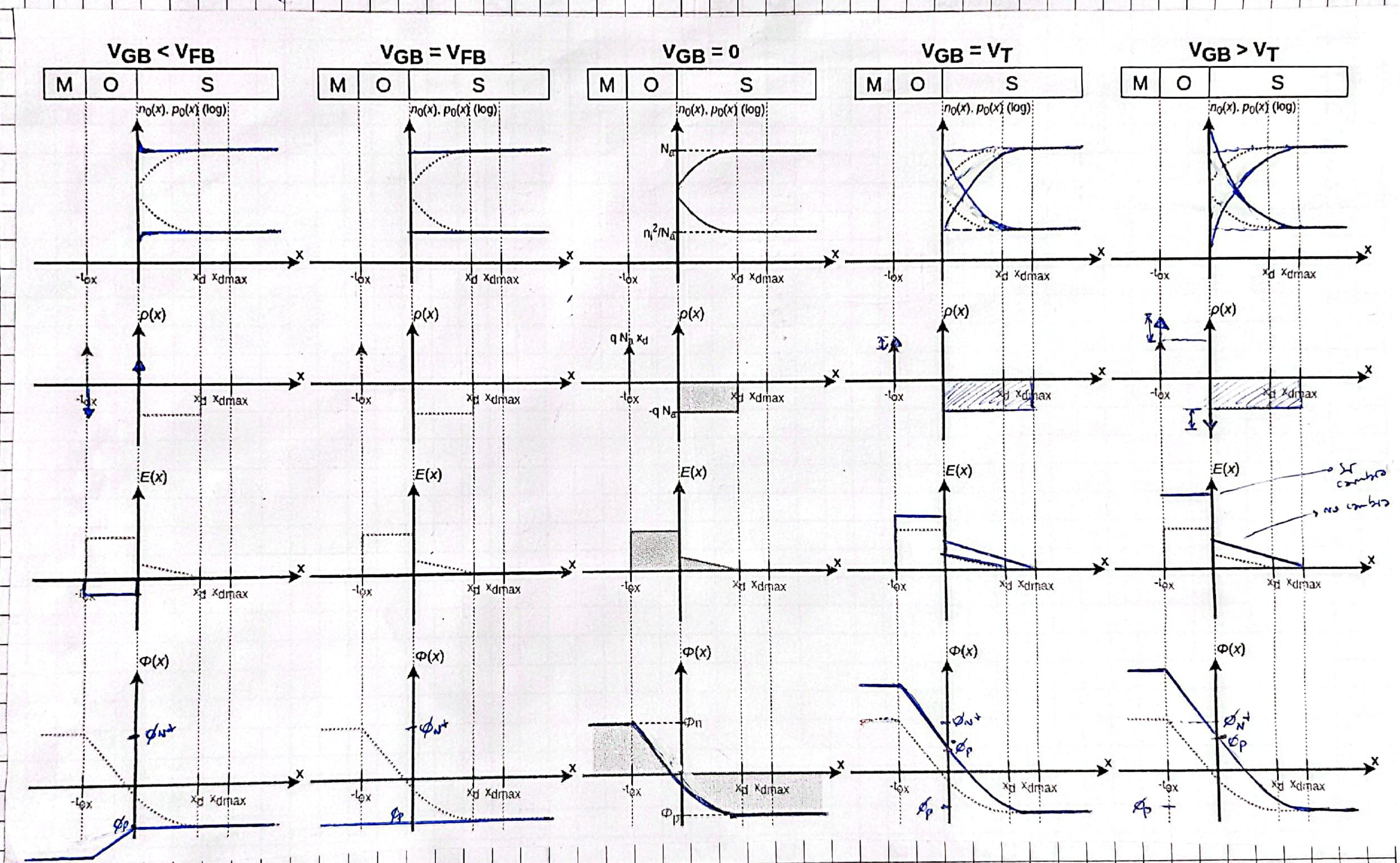
b) en régimen de acumulación.

d) $V_B = 0$ (no hay densidad de carga)

c) $\phi_B + V_{GB} = V_{ox} \Rightarrow V_{ox} = 0{,}9588\,V - 2\,V = \boxed{-1{,}0412\,V}$

e) $\phi_B + V_{GB} = -1{,}0412\,V$

Acumulación Vaciamiento Inversión 2.



Asamblea

3. $t_{ox} = 200\,\text{Å} = 200 \cdot 10^{-8}\,cm = 2 \cdot 10^{-6}\,cm$

sustrato (semi-conductor) de tipo P.

$N_A = 5 \cdot 10^{16}\,cm^{-3}$

$$C'_{ox} = \frac{\varepsilon_{ox}}{t_{ox}} = \frac{3{,}9 \cdot 8{,}85 \cdot 10^{-14}\,F/cm}{2 \cdot 10^{-6}\,cm} = \boxed{1{,}72575 \cdot 10^{-7}\,F/cm^2}$$

$$\gamma = \frac{1}{C'_{ox}} \sqrt{2 \varepsilon_s q N_a} =$$

$$\gamma = \frac{1}{1{,}72575 \cdot 10^{-7}\,F/cm^2} \sqrt{2 \cdot 11{,}7 \cdot 8{,}85 \cdot 10^{-14}\,F/cm \cdot 1{,}602 \cdot 10^{-19}\,C \cdot 5 \cdot 10^{16}\,cm^{-3}}$$

$$\boxed{\gamma = 0{,}7463\ V^{1/2}}$$

a) Para esto se debe obtener V_{FB} y V_T

Dado que:

$$\phi_S = \phi_P = -\frac{KT}{q} \ln \frac{N_a}{n_i} = -25{,}9\,mV \cdot \ln\left(\frac{5 \cdot 10^{16}\,cm^{-3}}{6{,}822 \cdot 10^{9}\,cm^{-3}}\right)$$

$$\boxed{\phi_P = -409{,}41\,mV}$$

$$\boxed{\phi_{G} = 550\,mV}$$

$$\phi_B = \phi_G - \phi_P = 550\,mV + 409{,}41$$

$$\boxed{\phi_B = 959{,}41\,mV}$$

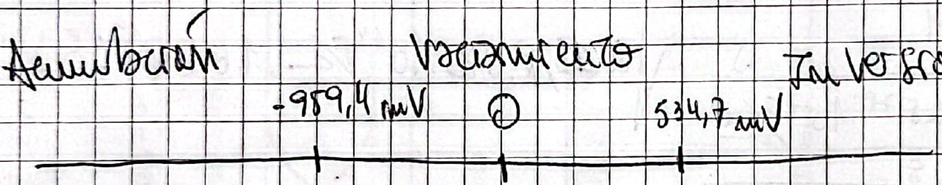
$$V_{FB} = -\phi_B$$

$$\boxed{V_{FB} = -959{,}41 mV}$$

$$V_T = V_{FB} - 2\phi_p + \gamma\sqrt{-2\phi_p}$$

$$V_T = -959{,}41mV - 2\cdot(-409{,}41mV) + 0{,}7463\cdot\sqrt{-2\cdot -0{,}40941 mV}$$

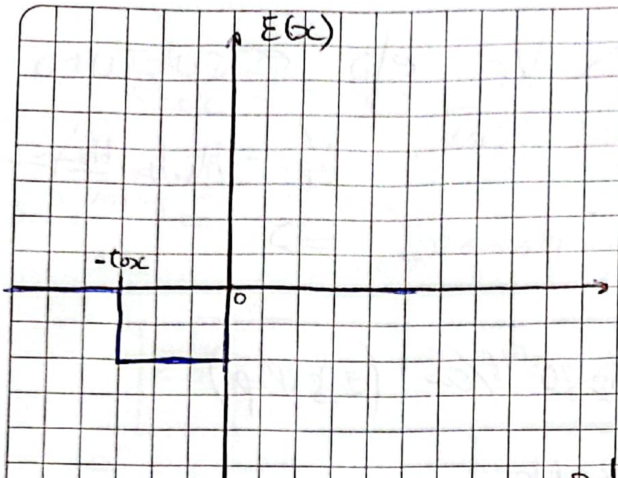
$$\boxed{V_T = 534{,}70 mV}$$



b) Si $V_{GB} = -2{,}5V$, esto significa que la estructura MOS se encuentra en acumulamiento, puesto que $V_{GB} < V_{FB}$.
Para encontrar el campo eléctrico, resulta útil integrar la ecuación de Gauss

$$E_0(x_2) - E_0(x_1) = \frac{1}{\epsilon}\int_{x_1}^{x_2} \rho_0(x)\,dx$$

Resulta útil recordar cualitativamente el gráfico de campo eléctrico en esta situación



recordando que para $V_{GB} < V_{FB}$, la carga se comportaba como en un capacitor de placas paralelas:

$$Q'_{po} = C'_{ox}(V_{GB} - V_{FB}) \Rightarrow$$

$$E_{ox} = \frac{C'_{ox}(V_{GB} - V_{FB})}{\epsilon_{ox}}$$

Entonces:

$$C'_{ox} = \frac{3{,}9 \cdot 8{,}85 \cdot 10^{-14}\,F/cm}{2 \cdot 10^{-6}\,cm} = 1{,}72575 \cdot 10^{-7}\,F/cm^2$$

$$\epsilon_{ox} = 3{,}9 \cdot 8{,}85 \cdot 10^{-14}\,F/cm$$

$$E_{ox} = \frac{1{,}72575 \cdot 10^{-7}\,F/cm^2 \left(-2{,}5 - (-0{,}9594\,V)\right)}{3{,}9 \cdot 8{,}85 \cdot 10^{-14}\,F/cm}$$

$$\boxed{E_{ox} = -770300\,V/cm}$$

La carga por unidad de área se calcula como.

$$Q'_{po} = C'_{ox}(V_{GB} - V_{FB})$$ para el poly-oxido

y para el sustrato es igual pero con el signo cambiado.

$$Q'_s = -C'_{ox}(V_{GB} - V_{FB})$$

$$\boxed{Q'_s = 2{,}6586 \cdot 10^{-7}\,C/cm^2}$$

¿por qué no se tiene en cuenta N_a?

por que $V_{GB} < V_{FB}$ y se "anula" su efecto al sobrepasar V_{FB}.

Asamblea

c) Dado que $V_{GB} = 2,5V > V_T$ la estructura está en régimen de inversión.

$\phi_p = -V_{th} \cdot \ln\left(\frac{Na}{ni}\right) = -409,4 mV$

$$x_d(V_{GB}) = x_d(V_T) = x_{dmax} \Rightarrow$$

$$x_{dmax} = \sqrt{\frac{2 \cdot \varepsilon_S \cdot (-2\phi_p)}{q\,Na}}$$

$$x_{dmax} = \sqrt{\frac{2 \cdot 11,7 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} F/cm \cdot \left(-2 \cdot \left(\frac{-409,4 mV}{1000}\right)\right)}{1,602 \cdot 10^{-19} C \cdot 5 \cdot 10^{16} cm^{-3}}}$$

$$\boxed{x_{dmax} = 1,4549 \cdot 10^{-5} cm}$$

$\rightarrow C' = C'_{ox}$

$$Q'_S = -q\,Na\,x_{dmax} - C'_{ox}(V_{GB} - V_T)$$

$$Q'_S = -1,602 \cdot 10^{-19} C \cdot 5 \cdot 10^{16} cm^{-3} \cdot 1,4549 \cdot 10^{-5} cm$$

$$- \frac{\varepsilon_{ox}}{t_{ox}}(2,5V - 0,5347V)$$

$$Q'_S = -1,1653 \cdot 10^{-7} - \frac{3,9 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} F/cm}{2 \cdot 10^{-6} cm} \cdot 1,9653V$$

$$\boxed{Q'_S = -4,5569 \cdot 10^{-7} C/cm^2}$$

$$Q'_{pox} = -Q'_s = 4{,}5569 \cdot 10^{-7}\ C/cm^2$$

$$\mathcal{E}_{p-ox} = \frac{Q'_{pox}}{\epsilon_{ox}} = \frac{4{,}5569 \cdot 10^{-7}\ C/cm^2}{3{,}9 \cdot 8{,}85 \cdot 10^{-14}\ F/cm}$$

$$\boxed{\mathcal{E}_{p-ox} = 1320266{,}55\ V/cm}$$

---

d) $5\ MV/cm = 5 \cdot 10^6\ V/cm$

$$5 \cdot 10^6\ V/cm > \frac{q\, N_a\, x_{dmax} + C'_{ox}(V_{GB} - V_T)}{\epsilon_{ox}}$$

$$5 \cdot 10^6\ V/cm > \frac{1{,}602 \cdot 10^{-19} C \cdot 5 \cdot 10^{16} cm^{-3} \cdot 1{,}4549 \cdot 10^{-5} cm + 1{,}72575 \cdot 10^{-7} F/cm^2 (*)}{3{,}9 \cdot 8{,}85 \cdot 10^{-14}\ F/cm}$$

$$* = (V_{GB} - 0{,}5347)$$

despejando:

$$\boxed{V_{GB} < 9{,}8594\ V}$$

Pero, también debo calcular para el caso en que $\mathcal{E} = -5 \cdot 10^6\ V/cm$

$$-5 \cdot 10^6\ V/cm < \frac{C'_{ox}(V_{GB} - V_{FB})}{\epsilon_{ox}}$$

$$5 \cdot 10^6\ V/cm > -\frac{1{,}72575 \cdot 10^{-7} F/cm^2 (V_{GB} - (-0{,}9594))}{3{,}9 \cdot 8{,}85 \cdot 10^{-14}\ F/cm}$$

$$\boxed{V_{GB} > -9{,}0406\ V}$$

Entonces:

$$\boxed{-9{,}0406\,V < V_{GB} < 9{,}8594\,V}$$

---

4) $V_{FB} = -0{,}97\,V$

$V_T = 0{,}466\,V$

$C'_{ox} = 0{,}28\,\mu F/cm^2 = 0{,}28 \cdot 10^{-6}\,F/cm^2$

$\gamma = 0{,}68\,V^{0{,}5}$

$V_{GB} = 0\,V$

a) Si $V_{GB} = 0\,V$, el régimen está en $\boxed{\text{vaciamiento}}$ y considero equilibrio térmico.

V_F — 0 — V_T

ACUMULACIÓN | VACIAMIENTO | INVERSIÓN

---

b) Dado que $V_{FB} = -\phi_B \rightarrow \phi_B = 0{,}97\,V$

$$\phi_B = \underbrace{\phi_m}_{550\,mV} - \phi_p \Longrightarrow 0{,}97\,V - 0{,}55\,V = 0{,}42\,V = -\phi_p$$

$$\Rightarrow \phi_p = -0{,}42\,V$$

$$\phi_p = -28{,}9\,mV \ln \frac{Na}{Ni} \Longrightarrow \exp\left(\frac{0{,}42\,V}{25{,}9\,mV} \cdot \frac{1000\,mV}{V}\right) \cdot 6{,}822 \cdot 10^{9}\,cm^{-3} = Na$$

$$\Rightarrow \boxed{Na = 7{,}5253 \cdot 10^{16}\,cm^{-3}}$$

c) $C'_{ox} = \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}} = \frac{3,9 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} F/cm}{t_{ox}} = 0,28 \cdot 10^{-6} F/cm^2$

$$\boxed{t_{ox} = 1,2326 \cdot 10^{-6}\, cm}$$

d) $x_d(V_{GB}) = \frac{\epsilon_s}{C'_{ox}} \left[\sqrt{1 + \frac{4(\phi_B + V_{GB})}{\gamma^2}} - 1\right]$

$$x_d(0V) = \frac{11,7 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} F/cm}{0,28 \cdot 10^{-6} F/cm^2}\left[\sqrt{1 + \frac{4 \cdot 0,97V}{(0,65V^{0,5})^2}} - 1\right]$$

$$\boxed{x_d = 8,1029 \cdot 10^{-6}\, cm}$$

e) $V_{ox,0} = \frac{q\, N_a\, x_{d0}\, t_{ox}}{\epsilon_{ox}}$

$$V_{ox,0} = \frac{1,602 \cdot 10^{-19} C \cdot 7,253 \cdot 10^{16} cm^{-3} \cdot 8,1029 \cdot 10^{-6} cm \cdot 1,2326 \cdot 10^{-6} cm}{3,9 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} F/cm}$$

$$\boxed{V_{ox,0} = 0,3488 V}$$

$$V_B = \frac{q\, N_a\, x_d^2}{2\, \epsilon_s} = \frac{1,602 \cdot 10^{-19} C \cdot 7,5253 \cdot 10^{16} cm^{-3} \cdot (8,1029 \cdot 10^{-6} cm)^2}{2 \cdot 11,7 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} F/cm}$$

$$\boxed{V_B = 0,3822 V}$$

f)

$$\rho_s(x) = -q N_a x_d = -1,602\cdot10^{-19}\,C \cdot 7,5253\cdot10^{16}\,cm^{-3}\cdot 8,1029\cdot10^{-6}\,cm$$

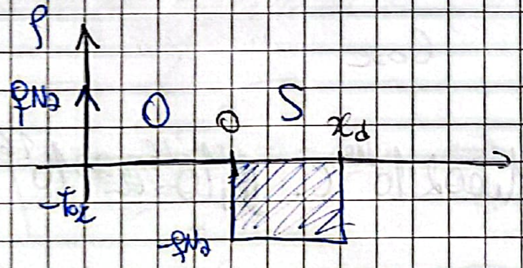
$$\boxed{\rho_s(x) = -9,7684\cdot10^{-8}\,C/cm^2}$$

$$\rho_{ox} = -\rho_s(x) \Rightarrow$$

$$\rho_{ox} = \boxed{\rho_{ox} = 9,7684\cdot10^{-8}\,C/cm^2}$$

En la interfaz óxido-sustrato la densidad de carga es nula, ya que sólo se acumula en la superficie con el metal y, luego, en la SCR del sustrato.

Gráfico cualitativo.



g) a) Si $V_{GB} = -2V$, el régimen se encuentra en acumulación ya que $V_{GB} < V_{FB}$.

Si $V_{GB} = 2V$, el régimen se encuentra en inversión puesto que $V_{GB} > V_T$.

b) ϕ_B no cambia y N_a tampoco

c) C'_{ox} no cambia y, por lo tanto, t_{ox} tampoco

d) $x_d(V_{GB}) = \frac{\epsilon_s}{C'_{ox}} \left[\sqrt{1 + \frac{4(\phi_B + V_{GB})}{\gamma^2}} - 1 \right]$

Si $V_{GB} = -2V$

x_d es prácticamente nula, desaparece la zona desierta en el sustrato.

Si $V_{GB} = 2V$

$x_{dmax} = x_d(2V) \approx x_d(0{,}466V) = \frac{11{,}7 \cdot 8{,}85 \cdot 10^{-14} F/cm}{0{,}28 \cdot 10^{-6} F/cm^2} \left[\sqrt{1 + \frac{4 \cdot (0{,}97V - 0{,}466V)}{(0{,}65)^2}} - 1 \right]$

$\boxed{x_{dmax} = 1{,}7781 \cdot 10^{-6}\ cm}$

e) En Acumulamiento $(V_{GB} = -2V)$ $\boxed{V_B = 0V}$ } caída de potencial en el sustrato

$V_{ox} = V_{GB} - V_{FB}$

$V_{ox} = -2V + 0{,}97V$

$\boxed{V_{ox} = -1{,}03V}$

En Inversión $(V_{GB} = 2V)$

$V_B(V_{GB}) \approx V_B(V_T) = -2\phi_p = 2 \cdot 0{,}42 = 0{,}84$

$\boxed{V_B(2V) = 0{,}84V}$

$V_{ox} + V_B = \phi_B + V_{GB} \Longrightarrow V_{ox} = 0{,}97V + 2V - 0{,}84V$

$\boxed{V_{ox} = 2{,}13V}$

(f) En Acumulación ($V_{GB} = -2V$):

$$Q'_{G} = C'_{ox}\left(V_{GB} - V_{FB}\right)$$

$$Q'_{G} = 0{,}28 \cdot 10^{-6}\, F/cm^2 \left(-2V + 0{,}97V\right)$$

$$\boxed{Q'_{Gate} = -2{,}884 \cdot 10^{-7}\, C/cm^2}$$

$$Q'_{Sustrato} = -Q'_{Gate}$$

$$\boxed{Q'_{S} = 2{,}884 \cdot 10^{-7}\, C/cm^2}$$

En la interfaz óxido-sustrato vale 0.

En inversión ($V_{GB} = 2V$)

Nuevamente, dentro de la interfaz óxido-sustrato vale 0 ya que solo se acumula carga en la superficie.

$$Q'_{Sustrato} = -C'_{ox}\left(V_{GB} - V_{T}\right) + q\, N_a\, x_{d\,max}$$

$$Q'_{S} = -0{,}28 \cdot 10^{-6}\, F/cm \left(2V - 0{,}466V\right) + 1{,}602 \cdot 10^{-19} \cdot 7{,}5253 \cdot 10^{16}\, cm^{-3} \cdot 1{,}7781 \cdot 10^{-6}\, cm^{-3}$$

$$\boxed{Q'_{S} = -4{,}5095 \cdot 10^{-7}\, C/cm^2}$$

$$Q'_{Gate} = -Q'_{S} \Rightarrow$$

$$\boxed{Q'_{Gate} = 4{,}5095 \cdot 10^{-7}\, C/cm^2}$$

- Parte II: Juntura P+N y otras configuraciones

5. Hasta ahora se trabajo una juntura PN+ donde se cumple que:

$\phi_{gate} = 550mV$

$\phi_{bulk} = \phi_{subs} \Rightarrow -550mV < \phi_p < 0$

*recordar

sustrato = bulk

$V_{FB} = -\phi_B \Rightarrow V_{FB} < 0$

$V_T > V_{FB}$.

Para el caso de una juntura P+N se cumple que:

$$\left.\begin{array}{l} \phi_{gate} = -550mV \\ \phi_{bulk} = \phi_{subs} \Rightarrow 550mV > \phi_n > 0 \\ V_{FB} = -\phi_B > 0 \\ V_T < V_{FB} \end{array}\right\}$$

Como puede observarse, el comportamiento es muy similar, solo que cambian muchos signos.

De esta manera, al igual que en el ejercicio 1:

- El ejercicio dice Na, pero CREO que debería ser Nd, sino, no tiene mucho sentido, se supone que el substrato/bulk está dopado tipo N. Entiendo que antes decía N_{bulk} (ver guía vieja) y como ahora NO le dicen bulk, lo cambiaron MAL. Lo tomo como N_{bulk} = "Na" siendo en realidad Nd

Asamblea

a)

$$C'_{ox} = \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}}$$

$t_{ox} = 70 nm = 70 \cdot 10^{-7} cm$

$\epsilon_{ox} = 3,9 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} F/cm$

$$\boxed{C'_{ox} = 4,9307 \cdot 10^{-8} \; F/cm^2}$$

$$\gamma = \frac{1}{C'_{ox}} \sqrt{2 \epsilon_S q N_{bulk}}$$

$$\gamma = \frac{1}{4,9307 \cdot 10^{-8} F/cm^2} \sqrt{2 \cdot 11,7 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} F/cm \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} C \cdot 8,5 \cdot 10^{15} cm^{-3}}$$

$$\boxed{\gamma = 1,0769 \; V^{1/2}}$$

$$\phi_{gate} = -550 mV$$

$$\phi_m = \phi_{BULK} = \frac{KT}{q} \ln \frac{N_{bulk}}{n_i}$$

$$\phi_{BULK} = 363,5174 mV \rightarrow$$

$$\phi_B = \phi_{gate} - \phi_{BULK}$$

$$\boxed{\phi_B = -913,52 mV}$$

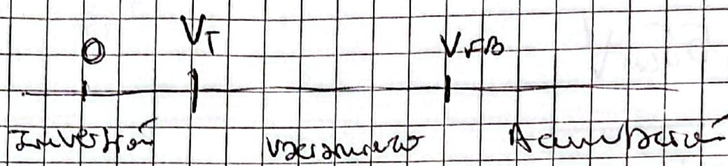
$$V_{FB} = -\phi_B \rightarrow \boxed{V_{FB} = 913,52 mV} > 0$$

$$V_T = V_{FB} - 2\phi_{BULK} - \gamma \sqrt{2\phi_{BULK}}$$

$$V_T = 913,52 mV - 2 \cdot 363,52 - 1,0769 V^{1/2} \sqrt{2 \cdot 363,52 V}$$

$\boxed{V_T = 157,44\,mV} < V_{FB}$

b)



$V_{GB} = 0 \Longrightarrow$ se encuentra a la izquierda entonces está en Inversión.

c) La estructura se encuentra en inversión, lo que significa que:

$$x_d(V_{GB}) = x_d(V_T) = x_{dmax} \Longrightarrow$$

$$x_{dmax} = \sqrt{\frac{2\cdot \epsilon_s \cdot 2\cdot \phi_m}{q\, N_d}}$$

Recordar $\phi_m = \phi_{BULK}$ en este tipo de juntas

$N_d = N_{bulk}$

$$x_{dmax} = \sqrt{\frac{2\cdot 11,7\cdot 8,85\cdot 10^{-14}\,F/cm \cdot 2\cdot 0,3635174\,V}{1,602\cdot 10^{-19}\,C \cdot 8,5\cdot 10^{15}\,cm^{-3}}}$$

$$\boxed{x_{dmax} = 3,3251\cdot 10^{-5}\,cm}$$

d) $V_{BULK}(inv) \approx V_B(V_T) = 2\phi_m = 2\cdot 363,5174\,mV$

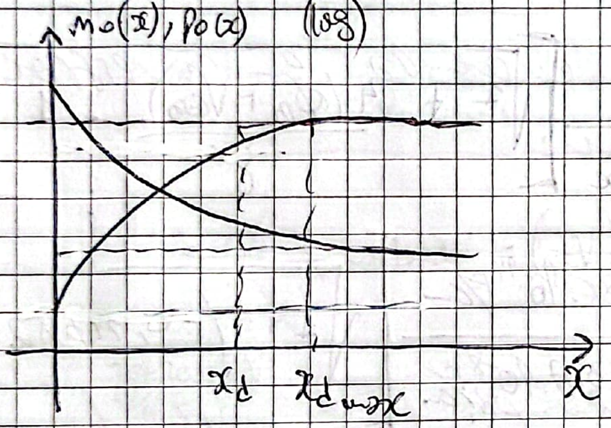
$$\boxed{V_{sustrato} = V_{BULK} = 727,0348\,mV}$$

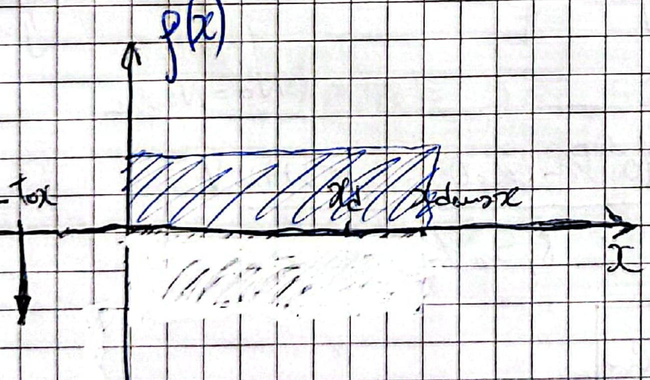
$V_{ox} = \phi_B - V_{SUSTRATO} + V_{GB}$

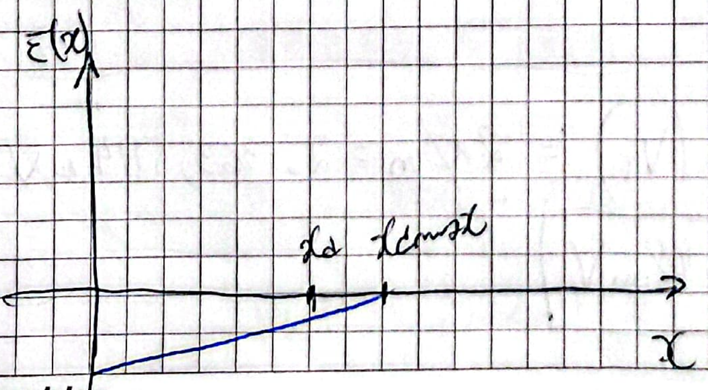
$V_{ox} = -913{,}52mV - 727{,}0348mV + 0mV$

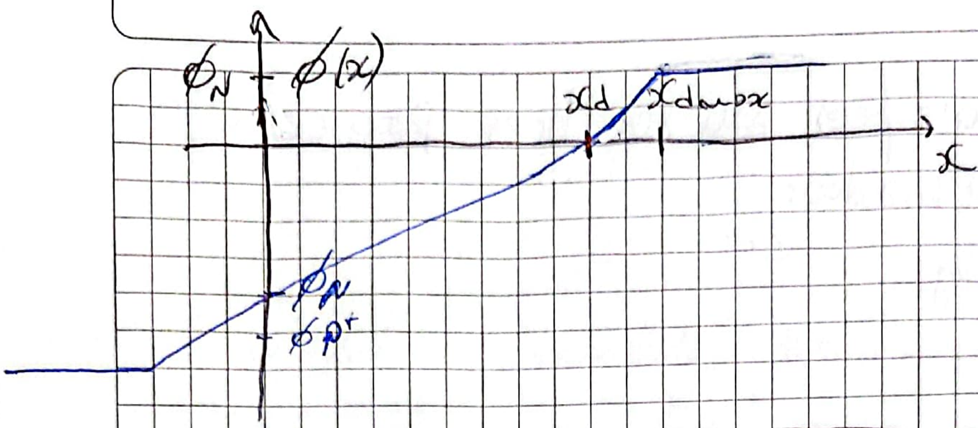
$$\boxed{V_{ox} = -1640{,}55mV}$$

e) El gráfico en Si es similar al del punto 2 con la diferencia en los signos.









f) Repetir para $V_{GB} = 2V$ y $V_{GB} = -2V$.

Para el caso de $V_{GB} = -2V$ la estructura continúa en inversión, por lo que:

a) No cambia
b) Inversión (no cambia)
c) No cambia
d) $V_{sustrato} = 727{,}03mV$ (no cambia)

$V_{ox} = \phi_B - V_{sustrato} + V_{GB}$

$V_{ox} = -0{,}913\,52mV - 0{,}727{,}03mV - 2V$

$\boxed{V_{ox} = -3{,}6405V}$

e) No cambian los gráficos

Para $V_{GB} = 2V > V_{FB} \Rightarrow$ Acumulación (b)

a) No cambian ya que no dependen de V_{GB}.

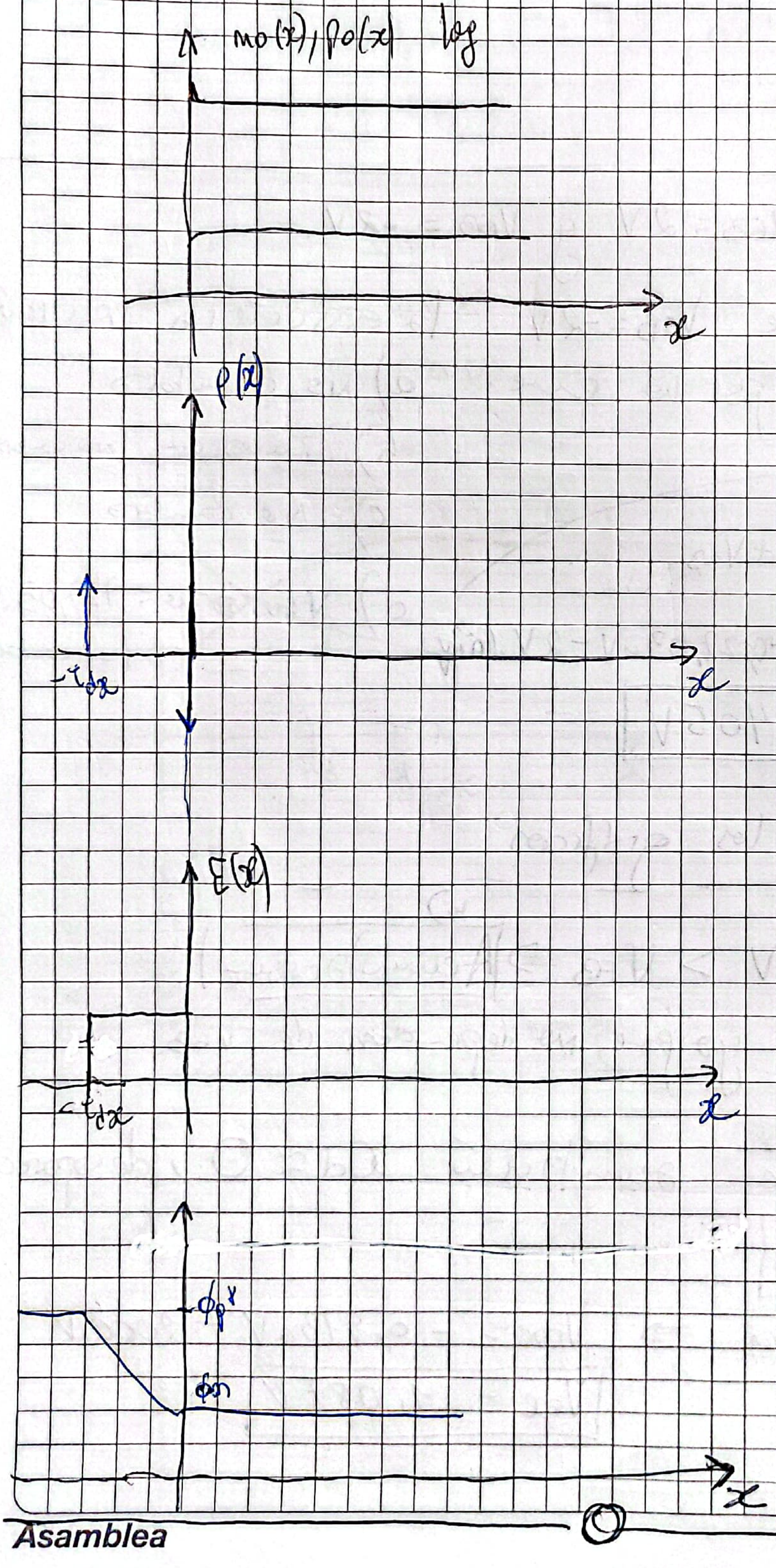
c) En régimen de acumulación $x_d \simeq 0$, desaparece.

d) $\boxed{V_{sustrato} = 0}$

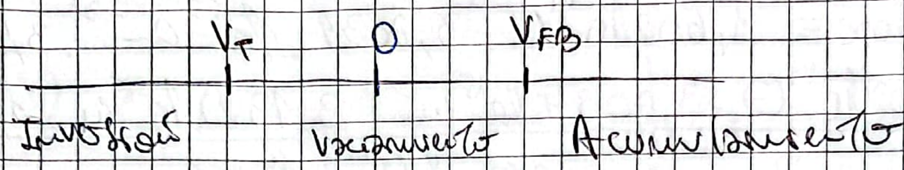
$\cancel{V_{sustrato}} + V_{ox} = \phi_B + V_{GB} \Rightarrow V_{ox} = -0{,}913mV + 2000mV$

$\boxed{V_{ox} = 1{,}087V}$

e) Nuevamente, los gráficos son similares pero con sentidos cambiados:



6. Nuevamente Juntura P^+N



a) $V_{GB} = 0 \Rightarrow$ Se encuentra en vaciamiento.

b)

$$x_d(V_{GB}) = \frac{\epsilon_s}{C'_{ox}}\left[\sqrt{1 - \frac{4(\phi_B + V_{GB})}{\gamma^2}} - 1\right]$$

→ NOTAR EL CAMBIO DE SIGNO EN P^+N !

$$V_{FB} = -\phi_B \Rightarrow \phi_B = -0{,}892\,V$$

$$x_d(0) = \frac{11{,}7 \cdot 8{,}85 \cdot 10^{-14}\,F/cm}{24{,}65 \cdot 10^{-9}\,F/cm^2}\left[\sqrt{1 - \frac{4(-0{,}892V)}{(1{,}32\,V^{1/2})^2}} - 1\right]$$

$$\boxed{x_d(0) = 3{,}1327 \cdot 10^{-5}\,cm}$$

c)

$$V_{ox} = -\frac{q N_d\, x_d(V_{GB}=0)\, t_{ox}}{\epsilon_{ox}}$$

$$t_{ox} = \frac{\epsilon_{ox}}{C'_{ox}} = \frac{3{,}9 \cdot 8{,}85 \cdot 10^{-14}\,F/cm}{24 \cdot 10^{-9}\,F/cm^2}$$

$$t_{ox} = 1{,}4381 \cdot 10^{-8}\,cm$$

$$25{,}9\,mV \ln\left(\frac{N_d}{n_i}\right) = \underbrace{892\,mV - 550\,mV}_{=342\,mV} \Rightarrow N_d = 3{,}7034 \cdot 10^{15}\,cm^{-3}$$

$n_i \to 6{,}822 \cdot 10^{9}\,cm^{-3}$

Asamblea

Entonces:

$$V_{ox} = -\frac{1{,}602 \cdot 10^{-19} C \cdot 3{,}7034 \cdot 10^{15} cm^{-3} \cdot 3{,}1327 \cdot 10^{-5} cm \cdot 1{,}4381 \cdot 10^{-5} cm}{3{,}9 \cdot 8{,}85 \cdot 10^{-14} F/cm}$$

$$\boxed{V_{ox} = -0{,}774\,V}$$

$$-V_{ox} + \phi_B + V_{GB} = V_{sustrato}$$

$$V_{sustrato} = 0{,}774V - 0{,}892V$$

$$\boxed{V_{sustrato} = -0{,}118\,V}$$

d) $\rho_s(x) = q N_d x_d$

$$\rho_s(x) = 1{,}602 \cdot 10^{-19} C \cdot 3{,}7034 \cdot 10^{18} cm^{-3} \cdot 3{,}1327 \cdot 10^{-5} cm$$

$$\boxed{\rho_s(x) = 1{,}8585 \cdot 10^{-8}\ C/cm^2}$$

$$\rho_{ox}(x) = -\rho_s(x)$$

$$\boxed{\rho_{ox}(x) = -1{,}8585 \cdot 10^{-8}\ C/cm^2}$$

En la interfaz óxido-sustrato es nula.

e) a) Para $V_{GB} = -2,5V$, el sistema está en régimen de inversión puesto que $V_{GB} < V_T = -1,157V$

b) $x_d(V_{GB}) = x_{dmax} = \sqrt{\dfrac{2\varepsilon_s \cdot 2\cdot \phi_n}{q\, N_d}}$

$$x_{dmax} = \sqrt{\frac{2\cdot 11,7\cdot 8,85\cdot 10^{-14}\, F/cm \cdot 2\cdot 0,342\, V}{1,602\cdot 10^{-19}\, C \cdot 3,7034\cdot 10^{15}\, cm^{-3}}}$$

$$\boxed{x_{dmax} = 4,8862\cdot 10^{-5}\, cm}$$

c)

$V_{sustrato} \simeq 2\cdot \phi_n = 2\cdot 0,342\, V$

$$\boxed{V_{sust} = 0,684\, V}$$

$V_{ox} = -V_{sust} + \phi_B + V_{GB}$

$V_{ox} = -0,684 - 0,892 - 2,5V$

$$\boxed{V_{ox} = -4,076V}$$

d)

$\rho_s = C'_{ox}(-V_{GB} + V_{FB}) + q\, N_d \cdot x_{dmax}$

$\rho_s = 24,68\cdot 10^{-9}\, F/cm^2 \,(-2,5V - 0,892V) + 1,602\cdot 10^{-19}\, C\cdot 3,7034\cdot 10^{15}\, cm^{-3} \cdot 4,8862\cdot 10^{-5}\, cm$

$$\boxed{\rho_s = 6,8626\cdot 10^{-8}\, C/cm^2}$$

$$\boxed{\rho_{ox} = -6,8626\cdot 10^{-8}\, C/cm^2}$$

En interfaz ox-sust. estudio.

a) Para $V_{GB} = 2{,}5V$, el transistor se encuentra en régimen de acumulación ya que $V_{GB} > V_{FB}$

b) $x_d \approx 0$

c) $\boxed{V_{BUST} = 0}$

$V_{ox} = \phi_B + V_{GB}$

$V_{ox} = -0{,}892V + 2{,}5V$

$\boxed{V_{ox} = 1{,}608V}$

d) $\rho_S = C'_{ox} \left(V_{GB} - \phi_B\right)$

$\rho_S = 24{,}65 \cdot 10^{-9} F/cm^2 \left(2{,}5V - 0{,}892V\right)$

$\boxed{\rho_S = 3{,}96372 \cdot 10^{-8}\ C/cm^2}$

$\boxed{\rho_{ox} = -3{,}96372 \cdot 10^{-8}\ C/cm^2}$

en conjunto a ox-ast. es nula.

①

7. c) Similar al caso anterior

$$\phi_n = 25,9\,mV \ln\left(\frac{1\cdot10^{18}\,cm^{-3}}{6,822\cdot10^{9}\,cm^{-3}}\right)$$

$$\boxed{\phi_n = 308,0892\,mV} = \phi_{SUST}$$

$$\phi_B = -550\,mV - 308,08 =$$

$$\boxed{\phi_B = -858,08\,mV}$$

$$V_{FB} = -\phi_B \Rightarrow \boxed{V_{FB} = 858,08\,mV}$$

$$V_T = V_{FB} - 2\phi_{SUST} - \gamma\sqrt{2\cdot\phi_{SUST}}$$

$$V_T = 0,858 - 2\cdot 0,3080 - 0,1055\,V^{0,5}\cdot\sqrt{2\cdot 0,3080}$$

$$V_T = 0,15916\,V = \boxed{159,16\,mV}$$

$$C'_{ox} = \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}} = \frac{3,9\cdot 8,85\cdot10^{-14}\,F/cm}{20\cdot10^{-7}\,cm}$$

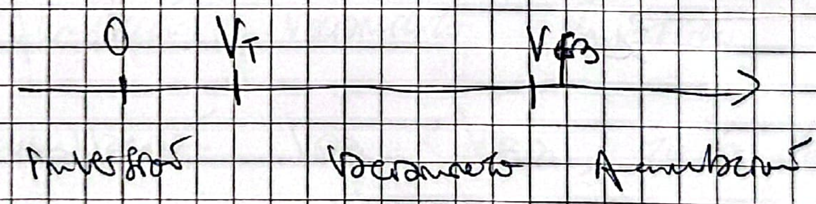
$$\boxed{C'_{ox} = 1,72577\cdot10^{-7}\,F/cm^2}$$

$$\gamma = \frac{1}{C'_{ox}}\sqrt{2\epsilon_s q N_d}$$

$$\boxed{\gamma = 0,1055\,V^{0,5}}$$

$$x_d \approx x_{dmax} = \sqrt{\frac{2\epsilon_s\cdot 2\phi_n}{q N_d}}$$

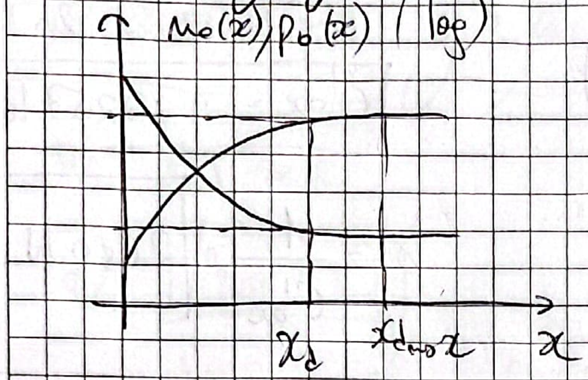
$$\boxed{x_{dmax} = 8,9248\cdot10^{-5}\,cm}$$

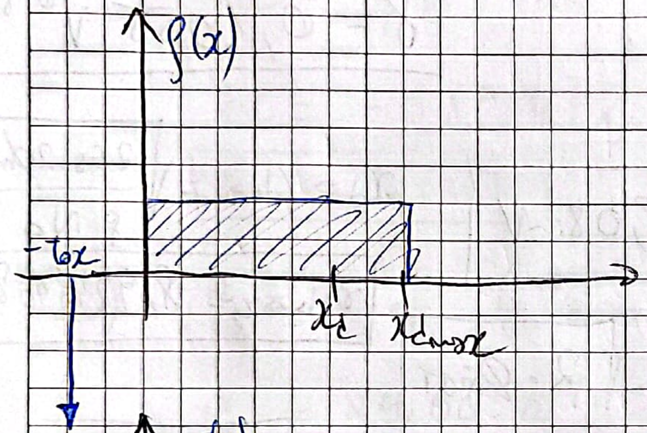


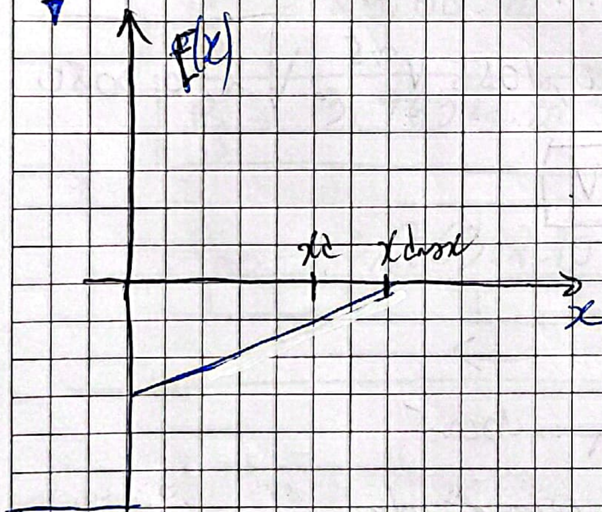
b) La juntura se encuentra en régimen de inversión

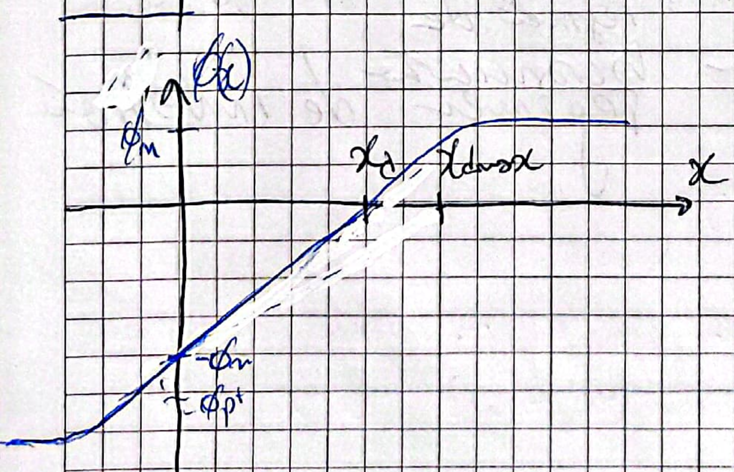
($V_{GB} < V_T$)

a) Los gráficos son similares a los del punto 8.(e)







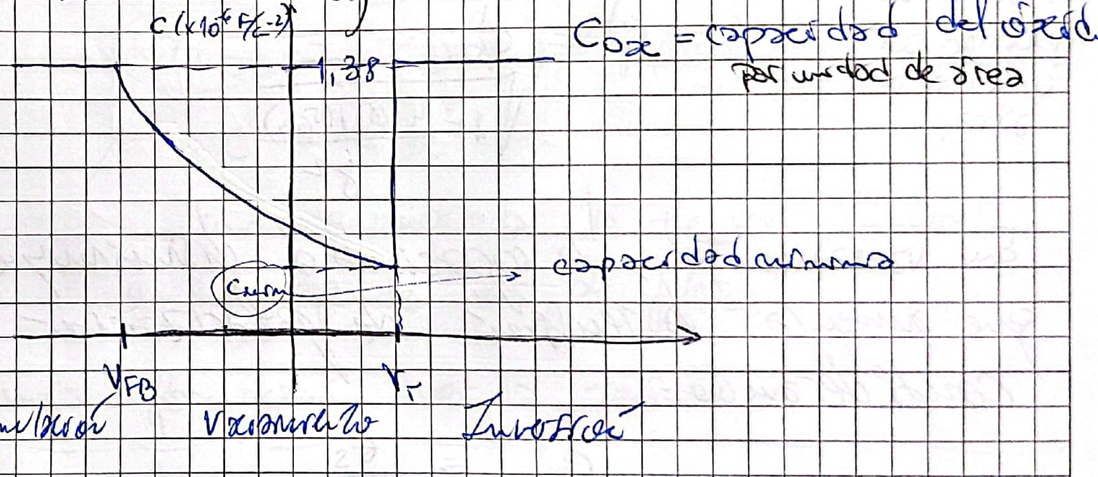


• PARTE III: Capacidad de juntura

8. a) La estructura MOS es muy similar a un capacitor de placas planas paralelas, donde una de las placas se constituye con un semi-conductor en lugar de un metal.

$$C' = \frac{dQ'(V_{GB})}{dV_{GB}}\bigg|_{V_{GB}}$$

Luego, multiplicando por el área de la juntura se obtiene el valor de capacidad.



En acumulación $V_{GB} < V_{FB}$, toda la carga se encuentra en la interfaz con el aislante y el potencial eléctrico se aplica al aislante.

$$V_{ox} = V_{GB} - V_{FB} = \mathcal{E}\, t_{ox}$$

La carga por unidad de área en la compuerta es

$$Q'(V_{GB}) = \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}}(V_{GB} - V_{FB}) = C'_{ox}(V_{GB} - V_{FB})$$

$$\boxed{C' = C'_{ox}}$$

Asamblea

En vaciamiento $V_{FB} < V_{GB} < V_T$:
La carga se distribuye a lo largo de la SCR, la extensión de la SCR depende de V_{GB}

$$Q'(V_{GB}) = q N_{bulk} \, x_d(V_{GB})$$

$$x_d(V_{GB}) = \frac{\epsilon_s}{C'_{ox}} \left[\sqrt{1 + \frac{4(\phi_B + V_{GB})}{\gamma^2}} - 1 \right]$$

$$C' = q N_{bulk} \left. \frac{\partial x_d(V_{GB})}{\partial V_{GB}} \right|_{V_{GB}} =$$

*recordar que el ' solo simboliza la capacidad por unidad de área.

$$C' = \frac{C'_{ox}}{\sqrt{1 + \frac{4(\phi_B + V_{GB})}{\gamma^2}}}$$

En vaciamiento, la capacidad disminuye a medida que aumenta la tensión de polarización considerando:

$$C'_{vac} = \frac{\epsilon_s}{x_d(V_{GB})}$$

Puede reescribirse la ecuación de la siguiente forma:

$$C' = \frac{C'_{vac} \, C'_{ox}}{C'_{vac} + C'_{ox}}$$

Desde el punto de vista eléctrico esto puede considerarse como dos capacitores en serie.

Se tiene una capacidad debido al dieléctrico del óxido y una capacidad en serie debido al semi-conductor.

Finalmente, en inversión $V_{GB} > V_T$

La carga en la SCR se mantiene fija, la extensión de la SCR llega a un valor máximo.

La variación de carga se produce en la capa de inversión en la interfaz con el aislante.

$$q'(V_{GB}) = C'_{ox}(V_{GB} - V_T) + q N_{sub} x_{max}$$

$$x_{max} = x_d(V_T) \neq f(V_{GB})$$

$$C' = C'_{ox}$$

, una vez superada la tensión umbral ya no depende más de $f(V_{GB})$.

* para más información ver la teoría.

---

b)

$$C'_{ox} = \frac{\varepsilon_{ox}}{t_{ox}} \Rightarrow t_{ox} = \frac{\varepsilon_{ox}}{C'_{ox}}$$

Del gráfico de la figura 1 se deduce que si $V_{FB} = V_{GB}$, o bien $V_{GB} < V_{FB} \Rightarrow C = 1{,}38 \cdot 10^{-6}\, F/cm^2$

Además, se encuentra en acumulación para este caso, por lo que: $C' = C'_{ox}$

$$(1{,}38 \cdot 10^{-6}\, F/cm^2)^{-1} \cdot 3{,}9 \cdot 8{,}85 \cdot 10^{-14}\, F/cm = t_{ox} \Rightarrow$$

$$\boxed{t_{ox} = 2{,}501 \cdot 10^{-7}\, cm}$$

c) Resulta útil calcular V_{FB}, V_T y ϕ_B

$$\phi_S = \phi_{sustrato} = -25,9\,mV \ln\left(\frac{10^{17}\,cm^{-3}}{6,822\cdot10^{9}\,cm^{-3}}\right)$$

$$\boxed{\phi_S = -427,36\,mV}$$

$$\phi_B = 550\,mV - \phi_S = 550\,mV + 427,36\,mV$$

$$\boxed{\phi_B = 977,36\,mV}$$

$$V_{FB} = -\phi_B \Rightarrow \boxed{V_{FB} = -977,36\,mV}$$

$$V_T = V_{FB} - 2\phi_S + \gamma\sqrt{-2\phi_S} \Rightarrow V_T = 0$$

Para obtener C_{min} hay que entender que el circuito se encuentra en régimen de vaciamiento

$$C'_{min} = \frac{C'_{ox}}{\sqrt{1 + \frac{4(\phi_B + V_T)}{\gamma^2}}}$$

Tal que:

$C'_{ox} = 1,38\cdot10^{-4}\,F/cm^2$

$\phi_B = 0,97736\,V$

$V_T = 0,85472\,V$

$\gamma = \frac{1}{C'_{ox}}\sqrt{2\varepsilon_s q N_a} = 0,1319\,V^{1/2}$

$$C'_{min} = \frac{1{,}38 \cdot 10^{-6}\ F/cm^2}{\sqrt{1 + \frac{4\,(0{,}97736V + 0{,}854721V)}{(0{,}13191V^{1/2})^2}}}$$

$$\boxed{C'_{min} = 6{,}72036 \cdot 10^{-8}\ F/cm^2}$$

d) $V_{GB} = V_T + 1V$

Si $V_{GB} = 0V + 1V = \boxed{1V}$ ⟹ estoy en régimen de inversión

Entonces: (por estar en inversión)

$$x_{dmax} = \sqrt{\frac{2\,\epsilon_s\,(-2\phi_p)}{q\,N_a}}$$

$$\boxed{x_{dmax} = 1{,}0511 \cdot 10^{-5}\ cm}$$

$$Q'_s = -q\,N_a\,x_{dmax} - C'_{ox}\,(V_{GB} - V_T)$$

$$\boxed{Q'_s = -1{,}5483 \cdot 10^{-6}\ C/cm^2}$$

$$Q'_{ox} = -Q'_s \Rightarrow \boxed{Q'_{ox} = 1{,}5483 \cdot 10^{-6}\ C/cm^2}$$

$$\mathcal{E}_{p\text{-}ox} = \frac{Q'_{ox}}{\epsilon_{ox}} \Rightarrow \frac{1{,}5483 \cdot 10^{-6}\ C/cm^2}{3{,}9 \cdot 8{,}85 \cdot 10^{-14}\ F/cm} =$$

$$\boxed{\mathcal{E}_{ox} = 4486143{,}715\ V/cm}$$

e) $V_{GB} = V_{FB} - 1\,V$

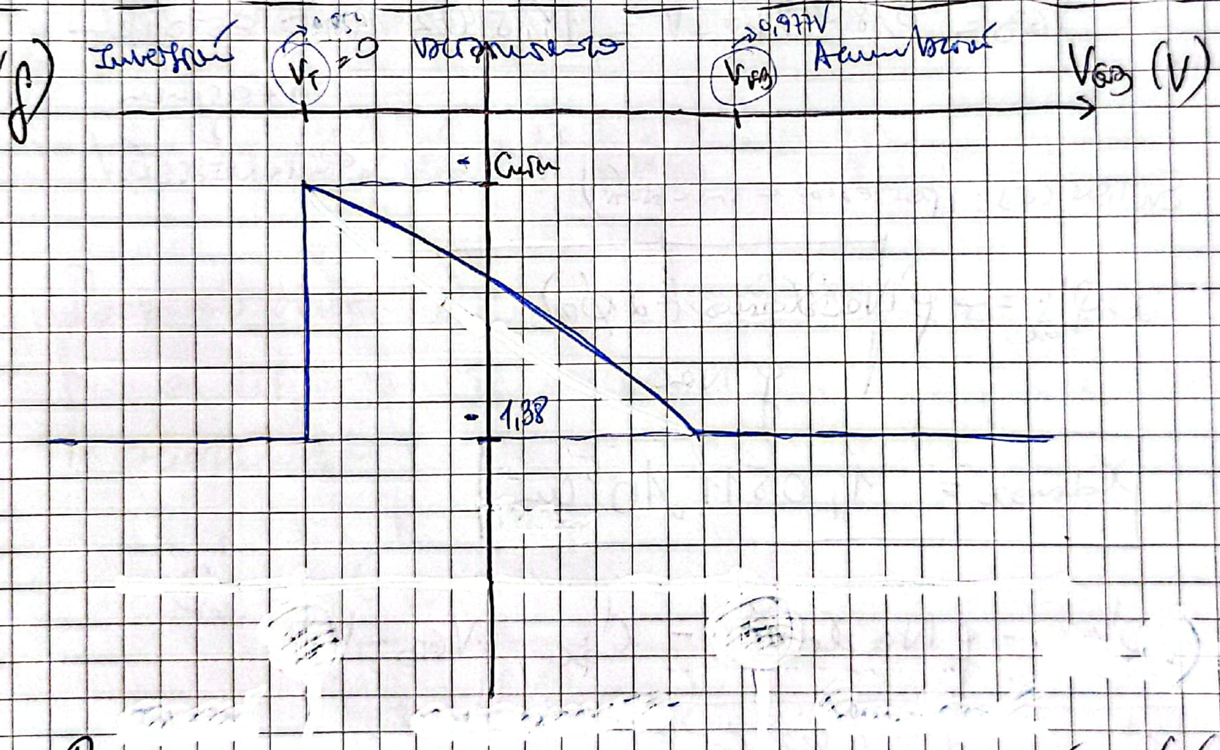
$$\boxed{V_{GB} = -1{,}97736\,V} < V_{FB}$$

Está en régimen de acumulación

$$\mathcal{E}_{ox} = \frac{C'_{ox}\,(V_{GB} - V_{FB})}{\epsilon_{ox}}$$

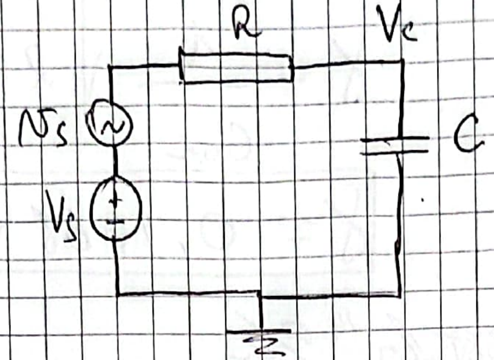
$$\boxed{\mathcal{E}_{ox} = 3998261{,}625\ V/cm}$$

f)



Puede pensarse como una inversión del sistema (notar que se cambian los regímenes de "lado").

9.



$V_S = 0,3V$

$R = 1k\Omega$

Capacitor juntura MOS N^+P

C: $t_{ox} = 100Å = 100\cdot10^{-10}m = 100\cdot10^{-8}cm = 1\cdot10^{-6}cm$

$N_A = 10^{16}\ cm^{-3}$

$C'_{ox} = \frac{\varepsilon_{ox}}{t_{ox}} = 3,4515\cdot10^{-7}\ F/cm^2$

$v_s(t) = \begin{cases} 0 & si\ t < t_0 \\ 1mV & si\ t \geq t_0 \end{cases}$

(a)

$\tau = RC \Rightarrow$

$\gamma = \frac{1}{C'_{ox}}\sqrt{2\varepsilon_s q N_a}$

$\gamma = 0,1668\ V^{1/2}$

$\phi_s = -25,9\ mV\cdot\ln\left(\frac{10^{16}\ cm^{-3}}{6,82\cdot10^{9}\ cm^{-3}}\right)$

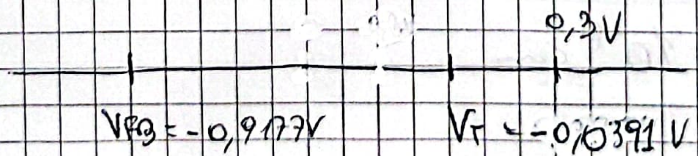
$\boxed{\phi_s = -367,72\ mV}$

$\phi_B = 550\ mV + 367,7\ mV$

$\boxed{\phi_B = 917,72\ mV} = 0,9177\ V$

$V_{FB} = -\phi_B \Rightarrow \boxed{V_{FB} = -0,9177\ V}$

$V_T = V_{FB} - 2\phi_p + \gamma\sqrt{-2\phi_p} \Rightarrow V_T = -0,0391\ V$



Dado que $V_{GB} = 0,3V$ está en régimen de inversión

$$C' = \frac{C'_{ox}}{\sqrt{1 + 4\,\frac{(\phi_B + V_{GB})}{\gamma^2}}}$$

$$\gamma = \frac{1}{C'_{ox}} \sqrt{2\,\epsilon_s q N_a}$$

$$\boxed{\gamma = 0,1668\ V^{1/2}}$$

$$C'_{ox} = \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}} = \frac{3,9 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14}\ F/cm}{10^{-6}\ cm}$$

$$\boxed{C'_{ox} = 3,4515 \cdot 10^{-7}\ F/cm^2} \Longrightarrow$$

$$C' = \frac{3,4515 \cdot 10^{-7}\ F/cm^2}{\sqrt{1 + \frac{4 \cdot (0,9177V + 0,3V)}{(0,1668\ V^{1/2})^2}}}$$

$$\boxed{C' = 2,6023 \cdot 10^{-8}\ F/cm^2}$$

$$x_d(0,3V) = \frac{\epsilon_{Si}}{C'_{ox}} \left[\sqrt{1 + \frac{4(\phi_B + V_{GB})}{\gamma^2}} - 1 \right]$$

$$x_d(0,3V) = 3,6788 \cdot 10^{-5}\ cm$$

b) No, puesto que $v_s(t)$ modificaría el valor de C' ya que depende de V_{GB}, aunque se mantendría el régimen de vaciamiento.

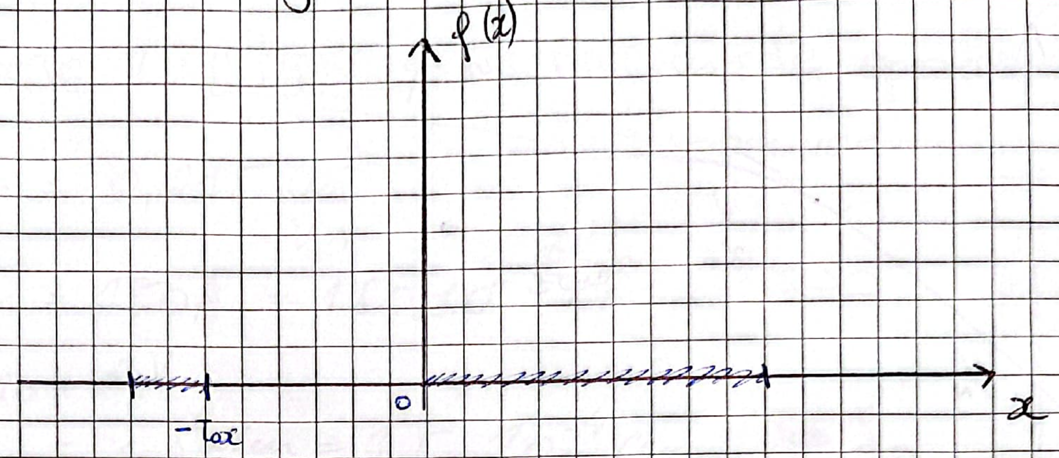
c) $V_S = 1\,V$

$v_S(t) = 100\,mV = 0{,}1\,V$

Si $V_S = 1V \Rightarrow$ el régimen estaría en inversión, por lo que cambiaría $C' = C'_{ox}$.

• PARTE IV: Integradores

10.



polysilicio P^+ con potencia $V_{GB} = 0,8V$

a) está en regimen de acumulación $V_{GB} = V_{FB} = 0,8V \Rightarrow \phi_B = -0,8V$

b) Es de tipo N ya que

$$\phi_B = \phi_g - \phi_{Bulk} = -550mV - \phi_B = -800mV$$

Es de tipo N $\Leftarrow \phi_B = 250mV$ pues es mayor a cero

c) $25{,}9mV \ln\left(\frac{N_d}{n_i}\right) = 250mV \Rightarrow \boxed{N_d = 1,0615 \cdot 10^{14} cm^{-3}}$

d) Para $V_{GB} = V_T$ $\phi(x=0) = -\phi_m$ (ver gráficas 7.a)

$$\boxed{\phi(x=0) = -250mV}$$

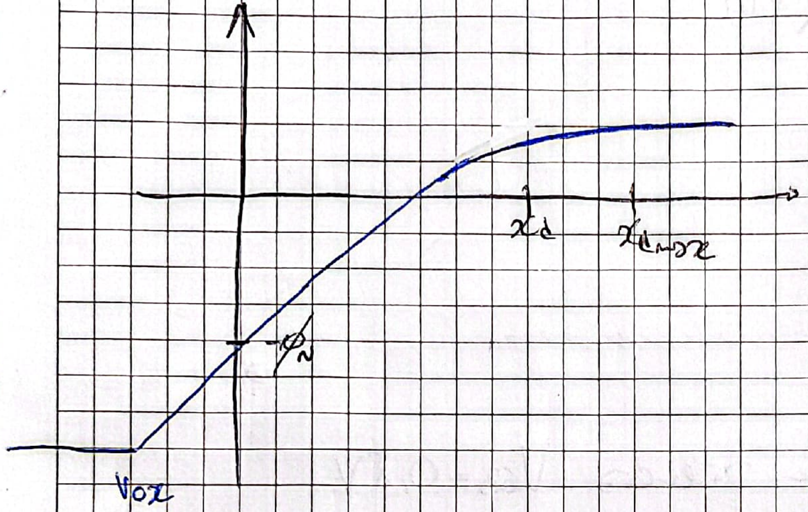
Si $V_{GB} = V_T$ regimen está en inversión, es decir que:

$$p_o(x=0) = N_d = 1,0615 \cdot 10^{14} cm^{-3}$$

$$n_o(x=0) = \frac{n_i^2}{N_d} = 438433,1983 \ cm^{-3}$$

Asamblea

e) $V_{GB} = V_T$



f) tomo a partir del (a) ya que no tiene sentido sino:

$$V_T = V_{FB} + 2\phi_n - \gamma\sqrt{2\phi_n}$$

$$V_T = 0{,}8V + 2\cdot 0{,}25 - \gamma\sqrt{2\cdot 0{,}25}$$

$$C'_{ox} = \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}}$$

$$\gamma = \frac{1}{C'_{ox}}\sqrt{2\epsilon_s q N_a} \Rightarrow \gamma = \frac{t_{ox}}{\epsilon_{ox}}\sqrt{2\epsilon_s q N_d}$$

$t_{ox} \rightarrow 10^{-6}\,cm$

$$\Rightarrow \gamma = 0{,}0171\ V^{1/2}$$

reemplazo en la ecuación de arriba...

$$\boxed{V_T = 1{,}2878V}$$