

## Trabajo Práctico N° 3

### Capacitor MOS

#### Condiciones del trabajo

- Grupos de dos o tres estudiantes.
- La fecha de entrega y devolución es la que se indica en el campus o en la página web de la materia.
- El trabajo deberá ser claro, conciso y correctamente redactado.
- Los gráficos y tablas deberán llevar títulos y estar numerados (por ejemplo: ver Fig. 1).
- El trabajo completo, incluyendo la carátula o primera página, deberá tener **10 páginas o menos**, y debe utilizarse tipografía tamaño 10pt.
- No es necesaria una carátula en una hoja aparte: en la primera página, además del nombre de los autores, los datos del curso y el resumen, puede presentarse también parte de los contenidos del trabajo.

#### Objetivos del trabajo

##### Objetivos generales

- Entender la estructura MOS desde el punto de vista de la teoría de bandas.
- Familiarizarse con los diferentes “metales” usados para implementar el *gate*.
- Estudiar y simular el efecto capacitivo de una estructura MOS para los diferentes regímenes de funcionamiento.
- Verificar que las ecuaciones dadas en la teoría son consistentes con las simulaciones de los transistores de los modelos más complejos.

##### Objetivos particulares

- Simular la curva de capacitancia por unidad de área  $C'_g$  en función de la tensión para un capacitor MOS de un transistor MOSFET con el programa LT-SPICE (*Simulation Program with Integrated Circuits Emphasis* desarrollado por *Linear Technology*).
- Comparar los valores característicos de la curva ideal y “real” usando el parámetro *CAPMOD* disponible en el modelo nivel 49.
- Determinar el tipo de metal y óxido del modelo.
- Obtener la curvas de la carga por unidad de superficie en el *body*  $Q'_s$  en función de la tensión superficial  $\psi_s$  y de *gate*  $V_G$ .

## 1. Cálculos teóricos

En esta sección se analizan las variables  $Q'_s$ ,  $\psi_s$  y  $C'_g$  de una estructura MOS basada en polisilicio n<sup>+</sup>, óxido de silicio y un sustrato de silicio tipo P y que forma parte de un transistor canal N cuyas características principales se muestran en la tabla 1.<sup>a</sup>

TABLA 1: DATOS DEL TRANSISTOR MOSFET PARA  $T = 300$  K

Grupo	$v_{G\min}$ [V]	$v_{G\max}$ [V]	$t_{ox}$ [nm]	$N_{ch}$ [1/cm <sup>3</sup> ]	$N_{sub}$ [1/cm <sup>3</sup> ]	$W$ [μm]	$L$ [μm]	CAPMOD
1	-1,8	1,2	20	$5 \times 10^{16}$	$5 \times 10^{16}$	100	100	0/2
2	-1,7	1,3	18	$4 \times 10^{16}$	$4 \times 10^{16}$	90	90	0/2
3	-1,75	1,25	19	$6 \times 10^{16}$	$6 \times 10^{16}$	80	80	0/2
4	-1,9	1,1	17	$3 \times 10^{16}$	$3 \times 10^{16}$	95	95	0/2
5	-1,85	1,15	21	$7 \times 10^{16}$	$7 \times 10^{16}$	105	105	0/2
6	-2,0	1,0	16	$2 \times 10^{16}$	$2 \times 10^{16}$	85	85	0/2

### Obtención de las curvas $Q'_s$ vs. $\psi_s$ y $\psi_s$ vs. $V_G$

Obtener la curva de la densidad de carga superficial en el sustrato o *body*  $Q'_s$  en función de la tensión superficial  $\psi_s$  definida como:

$$\psi_s = \frac{1}{q} [E_i(x \gg 0) - E_i(x = 0)] \quad (1)$$

Comparar la curva anterior con las expresiones aproximadas realizadas en clase para cada una de los **tres regímenes de funcionamiento**.

Además, confeccionar un gráfico donde se presenten las densidades superficiales de carga correspondientes a las impurezas “descompensadas”  $Q'_d$  y de inversión  $Q'_i$  en función de  $\psi_s > 0$  y obtener el valor de  $\psi_s$  para el cual  $Q'_i$  supera  $Q'_d$ . ¿Cuál curva presenta una mayor variación con  $\psi_s$ ? ¿Se puede decir que en inversión  $Q'_d$  prácticamente no cambia? ¿Para qué valor de  $\psi_s$ ,  $Q'_d = Q'_i$ ? Indicarlo en la curva.

Por otro lado, se pide también determinar la curva  $\psi_s$  en función de la tensión aplicada  $V_G$  recordando la ecuación que relaciona ambos parámetros es:

$$V_G = \psi_s - \frac{Q'_s(\psi_s)}{C'_{ox}} + V_{FB} \quad (2)$$

### Primera aproximación de la característica C-V

Obtener la curva C-V “aproximada” con las expresiones teóricas estudiadas en clase suponiendo que  $\phi_m = \chi_s$  y usando los datos de la tabla 1. **Detallar qué suposiciones se llevaron a cabo.**

## 2. Simulación

¿Cómo se puede simular la curva de la capacitancia  $C$  en función de la tensión aplicada  $v_C$ ?

En primer lugar hay que recordar como se relaciona la corriente y la tensión en un capacitor:

<sup>a</sup>El parámetro CAPMOD es un parámetros de simulación.  $N_{ch}$  y  $N_{sub}$  son las concentraciones de dopaje del substrato cerca y lejos del canal, respectivamente.

$$i_C(t) = C \frac{dv_C(t)}{dt} \quad (3)$$

Si la tensión aplicada tiene una variación constante,

$$v_C(t) = m t \quad \Rightarrow \quad \frac{dv_C(t)}{dt} = m = \frac{\Delta v_C}{\Delta t} \quad (4)$$

Por lo tanto, la capacitancia por unidad de área se puede obtener como,

$$C' = \frac{C}{A} = \frac{1}{A} \frac{\Delta t}{\Delta v_C} i_C(t) \quad (5)$$

Para simular esto se debe hacer uso de un modelo de transistor MOSFET nivel 49 y una fuente de tensión rampa cuyo tiempo de trepada sea lo suficientemente lento para permitirle al dispositivo alcanzar el régimen de funcionamiento. En este trabajo, un segundo, es un tiempo adecuado. El resto de los parámetros necesarios para la simulación de detallan en la tabla 1. El transistor que se debe usar para armar el esquemático es el MOSFET monolítico de 4 terminales cuyas características a definir son las siguientes:

```
.MODEL myTransistor NMOS(Level=49
+ Tox=
+ Nch=
+ Nsub=
+ CAPMOD=
)
```

Recordar que la temperatura default del LTSPICE es 27 °C y en la versión XVII los valores de  $W$  y  $L$  se configuran presionando el botón derecho con el puntero sobre el dispositivo.

Se deben simular las curvas  $C'_g$  vs.  $v_{GB}$  para el caso ideal y “real”. En este sentido, en el esquemático, se sugiere utilizar dos transistores idénticos en paralelo con distintos parámetros *CAPMOD*.

A continuación se detallan algunas preguntas que deben ser respondidas a partir de los datos encontrados en esta sección:

1. Verificar que la permitividad del óxido del transistor simulado es dióxido de silicio.
2. ¿Cómo está conformado el *gate*? ¿es metal o polisilicio? ¿cuál es el valor de  $\phi_m$ ?
3. ¿Cuáles son los valores de  $V_{FB}$  y  $V_T$ ? ¿Son similares a los valores teóricos?
4. ¿Coinciden ambas curvas? ¿Qué diferencias existen en comparación con la curva teórica calculada en la sección anterior?

### 3. Detalles sobre el informe

#### Resumen del trabajo

El trabajo deberá estar encabezado por un breve resumen que detalle su contenido (objetivos, lo realizado, resultados y conclusiones). El resumen debe ser escrito de forma tal de despertar el interés y la curiosidad del lector por el trabajo.

## Desarrollo

En el informe se debe **como mínimo**:

1. Presentar **las ecuaciones** usadas para obtener los resultados pedidos en este trabajo. Por otro lado, el *script* de los algoritmos utilizados se debe insertar como apéndice.
2. En **dos gráficos**, presentar las curvas  $|Q'_s|$  vs.  $\psi_s$  (en escala semilogarítmica) y  $\psi_s$  vs.  $V_G$ . En ambas figuras deben resaltarse los diferentes regímenes de funcionamiento de la estructura: acumulación, vaciamiento e inversión.
3. Confeccionar **un gráfico** donde se presente la curvas  $|Q'_s|$  vs.  $\psi_s$  junto con otras tres que tengan las aproximaciones de  $Q'_s$  para cada régimen de funcionamiento (acumulación, vaciamiento e inversión).
4. Hacer **un gráfico** donde se presente la curvas  $|Q'_d|$  y  $|Q'_i|$  vs.  $\psi_s$  en escala semilogarítmica para  $\psi_s > 0$  indicando la tensión donde  $|Q'_i|$  supera a  $|Q'_d|$ .
5. Para los resultados provenientes de la simulación confeccionar **dos gráficos**, uno del esquemático y otro con las curvas simuladas de la capacitancia por unidad de área  $C'_g$  ideal y “real” en función de  $v_{GB}$ .
6. Confeccionar **un gráfico** que comparen las curvas simuladas junto la curva teórica (primera aproximación), todas normalizadas al valor teórico de  $C'_{ox}$
7. Realizar una comparación **exhaustiva** de los valores obtenidos en las secciones 1 y 2. **Se deben utilizar las expresiones descriptas y detalladas en las clases de la materia** para explicar las similitudes y las diferencias encontradas.
8. El informe debe incluir todo lo necesario que aporte al análisis de los resultados de cada uno de los casos calculados y simulados.

## Análisis y comparación de los resultados

Todo resultado presentado en el informe debe estar analizado. Se deben comparar los resultados obtenidos para los diferentes casos simulados. Debe analizarse si los resultados son compatibles o no con la física de semiconductores. De existir diferencias, éstas deben ser cuantificadas y deben presentarse posibles explicaciones para estas diferencias.

Los gráficos deben ser claros, siguiendo lo lineamientos mencionados más arriba y con una leyenda indicando a qué corresponde cada curva.

## Conclusiones

El informe debe culminar con las conclusiones, que deben ser breves y conceptuales. Deben estar focalizadas en los objetivos que se cumplieron en el trabajo y eventualmente en resultados interesantes adicionales que se hubieran obtenido.

## Condiciones de entrega

- La entrega debe ser en formato papel y también a través del Aula Virtual en el Campus Grado FIUBA (<https://campusgrado.fi.uba.ar>) y la fecha y horario de entrega está publicada en la misma Aula Virtual.
- Para el formato digital, la entrega debe ser un único documento .pdf.
- Se evaluará tanto la prolíjidad y claridad de la resolución como la precisión de los resultados.
- Se deben enunciar todas las fórmulas utilizadas para la resolución y todos los resultados parciales.
- Los resultados presentados deben tener 3 cifras significativas, y evitar redondear en los resultados parciales para no propagar errores de redondeo.
- Todos los gráficos y figuras deben estar correctamente etiquetadas en sus ejes, indicando las unidades de cada una de las variables.