

GENERACIÓN DE ESTADOS SUPERFICIALES EN LA INTERFACIA SiON-Si POR INYECCIÓN TUNEL EN TRANSISTORES PMOS

G. Redin, E. Miranda y A. Faigón

Laboratorio de Física de Dispositivos, Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires,
Paseo Colón 850, Buenos Aires, Argentina.

Se investigó la generación de estados superficiales por inyección túnel en la interface aislante-silicio y su distribución energética en función de la carga inyectada y de la polaridad de inyección en transistores PMOS con películas delgadas de dióxido de silicio y oxinitruro de silicio como aislantes de puerta. Comparando los resultados obtenidos, se observó que, para ambas polaridades, la generación de estados superficiales en las muestras nitruradas es menor. Para los dos materiales, el mecanismo de creación de dichos estados resulta ser más efectivo en el caso en que la puerta está polarizada negativamente, es decir cuando los electrones son inyectados en el semiconductor desde la banda de conducción del aislante.

I. INTRODUCCIÓN

Películas delgadas de oxinitruro de silicio (SiON) sobre silicio están siendo investigadas en los últimos años como potenciales sustitutos del dióxido de silicio (SiO₂) como aislantes de puerta de dispositivos Metal-Oxido-Semiconductor (MOS) de longitud de canal submicrónica.

Son conocidas algunas ventajas del SiON sobre el SiO₂ térmico, a saber: elevada barrera de difusión para una gran variedad de iones, alta resistencia a la radiación, baja reactividad con diversos materiales de puerta¹⁻². El comportamiento eléctrico de la interface con el silicio parece depender sensiblemente de los procesos de obtención de las películas, y en este aspecto sus posibles ventajas respecto de las del SiO₂ no están firmemente demostradas³⁻⁴. La nitruración en plasma presenta el atractivo de reducir la temperatura, en concordancia con las tendencias actuales en microelectrónica⁵⁻⁶. Las posibles ventajas de utilización del SiON como sustituto del SiO₂ en dispositivos integrados deben surgir de un análisis comparativo de, entre otros factores, la estabilidad de la interface aislante-semiconductor, cuando la misma se ve sometida a pruebas de envejecimiento eléctrico.

II. LAS MUESTRAS

Las muestras utilizadas son obleas con dispositivos de testeo procesadas en los laboratorios del CNET - Grenoble con tecnología CMOS, puerta de polisilicio y longitud de canal de 2 µm. El aislante de puerta se obtuvo nitrurando en plasma de amonía

óxidos térmicos de 240 Å de espesor. La oxidación se realizó a 950 °C en oxígeno seco. El ambiente nitrurante es NH₃ a 3x10⁻² mBar, 950 °C, en el que se crea plasma RF de 13 MHz a través de electrodos externos con 600 W de potencia⁵. Las mediciones se realizaron sobre transistores de canal *p* de área 8.64x10⁻⁴ cm² con los mencionados oxinitruros como aislantes de puerta. Con fines comparativos las mediciones fueron repetidas sobre dispositivos con idéntico proceso sin la etapa de nitruración.

III. DISTRIBUCIÓN ENERGÉTICA DE LOS ESTADOS DE SUPERFICIE

En la Fig. 1 se muestran los diagramas energéticos de una estructura MOS polarizada. La inyección de electrones se realizó en el régimen de túnel Fowler-Nordheim a una corriente fija $J_{inj}=10^{-2}$ A/cm² en ambas polaridades. La densidad de trampas interfaciales en la banda prohibida del Si, d_{it} , se determinó a partir de las curvas capacidad vs. voltaje (C-V) medidas a alta frecuencia C_{HF} (1 MHz) y cuasiestática C_{LF} , de acuerdo a la siguiente relación⁷:

$$d_{it}(V) = \left\{ \left[\frac{C_{HF}}{C_i - C_{LF}} \right] - \left[\frac{C_{HF}}{C_i - C_{HF}} \right] \right\} \frac{C_i}{qA} \quad [cm^{-2} eV^{-1}]$$

donde C_i es la capacidad del aislante, A es el área del electrodo de puerta y q la carga del electrón. El potencial superficial Φ_s y por lo tanto la localización energética del estado interfacial en la banda

prohibida del Si, se calculó a partir de la curva C_{LF} según:

$$\Phi_s [V] = \int_{V_{fb}}^V \{ -[C_{LF}(V)/C_i] \} dV \quad [V]$$

donde V_{fb} es la tensión de bandas planas. Combinando ambas expresiones se obtiene d_{it} vs. Φ_s que, mediante un sencillo cambio de variable, se transforma en d_{it} vs. $E - E_v$, donde E_v es el tope de la banda de valencia del Si. Las curvas C-V para ambos aislantes iniciales e inyectadas con $Q_{inj} = +10 \text{ Coul/cm}^2$, utilizadas para el cálculo de d_{it} , se muestran en Figs. 2 y 3 respectivamente. El desplazamiento de las curvas en el eje de tensiones está asociado al atrapamiento de carga en el seno del aislante y no se considera en el presente trabajo⁸.

Los resultados obtenidos se detallan en la Fig. 4, donde se observa que la creación de estados superficiales es menor para las muestras con SiON que para las muestras con SiO₂ en ambas polaridades de inyección. Es de notar que, inicialmente, las muestras nitruradas poseen una densidad de estados superficiales algo mayor que las no nitruradas.

IV. CREACIÓN DE ESTADOS SUPERFICIALES

A partir del ensanchamiento de las curvas C-V medidas en alta frecuencia con fuente y sumidero conectados al sustrato se puede obtener información sobre la cantidad total de estados creados durante la inyección⁹. Esta técnica por su simplicidad se utilizó para investigar la dinámica de generación de estados. Dicho ensanchamiento es proporcional al número de estados de superficie por unidad de área, D_{it} , que se calcula según:

$$D_{it} = (dV_{fb} - dV_t) C_i / qA \quad [\text{cm}^{-2}]$$

donde dV_{fb} es la variación de la tensión de bandas planas y dV_t la variación de la tensión de encendido del transistor. La inyección de electrones se realizó a $J=10^{-2} \text{ A/cm}^2$ en ambas polaridades y se evaluó D_{it} cada 0.25 Coul/cm^2 al comienzo y cada 1 Coul/cm^2 a partir del primer Coulomb inyectado.

En forma consistente con los resultados obtenidos en el punto anterior, la creación de estados de superficie es inferior en las muestras nitruradas para ambas polaridades de inyección, ver Fig. 5. También, se observa que las curvas que se obtuvieron inyectando positivamente saturan, mientras que

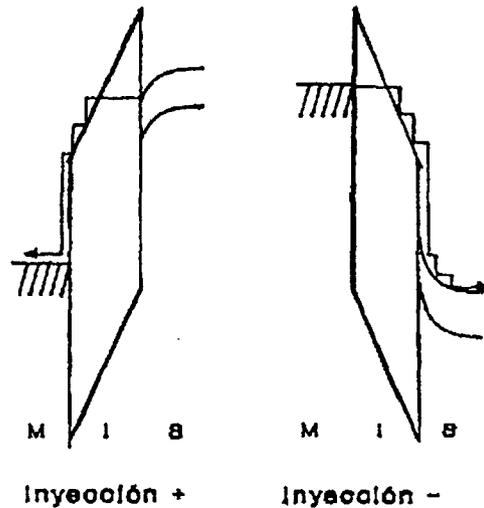


Fig. 1: Esquema energético de una estructura MOS polarizada en régimen de inyección Fowler-Nordheim.

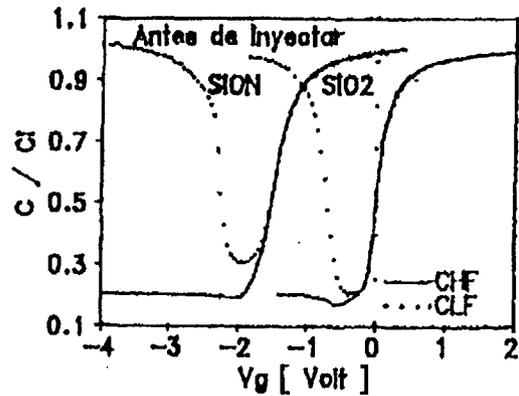


Fig. 2: Curvas C_{HF} y C_{LF} vs. voltaje antes de inyectar.

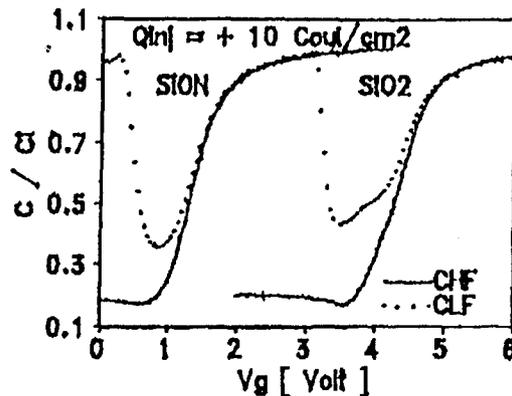


Fig. 3: Curvas C_{HF} y C_{LF} vs. voltaje luego de inyectar positivamente 10 Coul/cm^2 .

las correspondientes a la polaridad opuesta no lo hacen. Las posibles causas se discuten en el siguiente punto.

V. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

De las Figs. 4 y 5 resulta que, para ambos materiales, la creación de estados interfaciales es superior cuando los electrones son inyectados desde la puerta (inyección negativa). En estas condiciones los electrones atraviesan por efecto túnel la barrera de potencial triangular que les presenta la banda prohibida del aislante y son inyectados en el Si desde la banda de conducción del aislante, donde son acelerados por el campo eléctrico aplicado. El impacto directo de tales electrones energéticos sobre la interface aislante - silicio sería el responsable de la ruptura de un mayor número de enlaces atómicos en concordancia con el modelo de ligaduras rotas¹⁰. Así, el distinto comportamiento en la dinámica de la creación de estados entre ambas polaridades -Fig. 5- podría atribuirse a la diferente energía con que los electrones atraviesan la interface en uno y otro caso -Fig. 1.

De acuerdo a lo expuesto en el punto anterior, las curvas correspondientes a inyección positiva para los dos materiales saturan (Fig. 5). Este comportamiento indica que existe una densidad máxima de trampas interfaciales que se pueden generar por este mecanismo de inyección. Estos centros de captura tendrían su origen en el desatrapamiento de electrones débilmente ligados inicialmente presentes y cuyo número estaría limitado. El mecanismo activador sería la inyección de portadores o la ionización por el alto campo aplicado. El hecho de que el nivel de saturación para el nitruro sea inferior al del óxido es índice de que la incorporación de nitrógeno a la interface aislante-Si *incrementa su resistencia frente a la degradación*, pero que no alcanza para inhibir totalmente la creación de defectos. Por el contrario en el caso de inyección negativa, los electrones impactan en la interface creando continuamente nuevos defectos. El efecto de tales electrones, al menos para los niveles de carga inyectada, no parece estar limitado y, nuevamente, la tasa de generación de estados para el nitruro resulta ser menor.

La mayor estabilidad de la interface oxinitruro-silicio frente a la inyección de carga fue demostrada previamente para el caso de inyección positiva⁸⁻¹¹. En el presente trabajo se ha verificado que lo mismo ocurre para inyección negativa y que la distribución energética de los estados generados

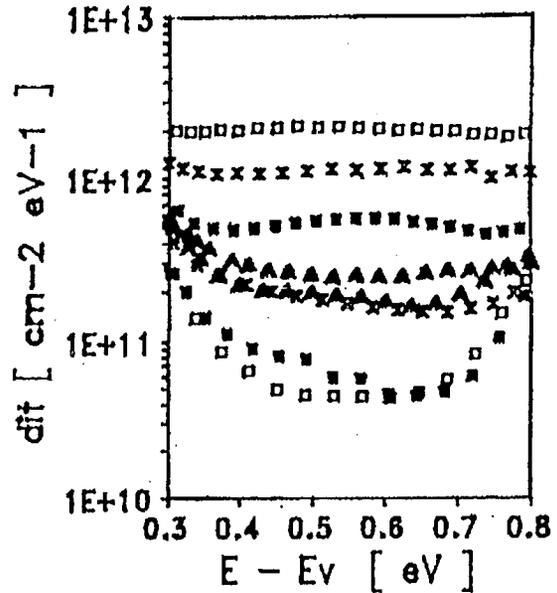


Fig. 4: Densidad de estados de superficie vs. energía en la banda prohibida del silicio, donde E_v es el tope de la banda de valencia. Los símbolos corresponden a: triángulo: +SiON, cuadrado lleno: +SiO₂, cruz: -SiON y cuadrado vacío: -SiO₂. El signo \pm está asociado a la polaridad de inyección. Para cada símbolo la curva inferior corresponde a la muestra antes de inyectar carga.

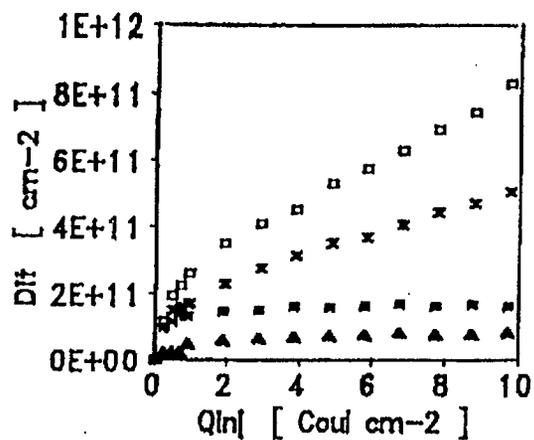


Fig. 5: Creación de estados interfaciales vs. densidad de carga inyectada. Los símbolos están definidos en la Fig. 4.

en la banda prohibida del Si es uniforme dentro del rango de energías accesible por el método de análisis implementado. Se ha evidenciado una diferencia cualitativa en la dinámica de la creación de estados interfaciales según la polaridad de inyección.

REFERENCIAS

1. T. Ito, T. Nakamura, y H. Ishikawa, IEEE Trans. Electron Devices, ED-29,498 (1982)
2. S. K. Lai, J. Lee y V.K.Dham, IEDM Tech.Dig.,p190 (1983)
3. T. Hori, H. Iwasaki y K. Tsuji, IEEE Transactions on Electron Devices 35, 904 (1988)
4. S. K. Lai, D. W.Dong y A. Harstein , J.Electrochem. Soc., 129, 2042 (1982)
5. M. Berenguer, A. Straboni, B. Vuillermoz, P. Debenest y K. Barla, *International colloquium on plasmas por deposition and dry etching*, CIPG 89 France
6. S. S Wong y W. G.Oldham, IEEE Trans. Electron Dev. ED-32, 978 (1985)
7. E. Nicollian y J. Brews, MOS Physics and Technology, Wiley & Sons, 1982
8. A. Faigón, E. Miranda y G. Redin, Anales Asociación Física Argentina 2, 252 (1990)
9. A. Faigón, A. Straboni, E. Miranda y G. Redin, *I Jornadas Argentinas en Ciencias de los Materiales*, Mar del Plata 1991
10. S. Horiguchi, T. Kobayashi y K. Saito, J. Appl. Phys. 58, 387 (1985)
11. E. Miranda, G. Redin, A. Faigón y A. Straboni, J. Phys.:Condens. Matter 5, A319 (1993)