

Transitorios en la corriente de túnel en estructuras polySi-SiO₂-Si asociados a la captura-liberación de carga en el aislante

E.G. Redin, E.A. Miranda y A.N. Faigón

Laboratorio de Física de Dispositivos-Microelectrónica
 Facultad de Ingeniería - Universidad de Buenos Aires
 Paseo Colón 850 (1063) - Buenos Aires - Argentina
 e-mail: emirand@aleph.fi.uba.ar

En este trabajo se muestra que un modelo sencillo para la corriente de túnel a través del óxido de puerta en una estructura polySi-SiO₂-Si reproduce fielmente los transitorios de la corriente asociados al fenómeno de atrapamiento-desatrapamiento de carga en el aislante. El mismo se basa en una expresión modificada de la relación de túnel Fowler-Nordheim donde, el campo eléctrico catódico es reemplazado por el campo eléctrico dentro del aislante correspondiente a la energía del nivel de Fermi en el cátodo (Si). El estado de carga del óxido se obtiene a partir del corrimiento de la tensión de bandas planas inducido por la inyección de carga a tensión constante.

In this work it is shown a simple model for the tunneling current through the gate oxide of a polySi-SiO₂-Si structure that reproduces with great detail the current transitorios associated with the charge trapping-detrapping phenomena occurring within the insulator. It is based on a modified Fowler-Nordheim tunneling expression, where the cathode electric field is substituted by the electric field at the insulator corresponding to the cathode Fermi energy (Si). The oxide state of charge is obtained from the flat band voltage shift induced by constant voltage charge injection.

I. INTRODUCCIÓN

El objetivo central de las actuales tecnologías de fabricación de circuitos integrados VLSI (Very Large Scale Integration) y ULSI (Ultra Large Scale Integration) es la reducción de las dimensiones laterales de los dispositivos microelectrónicos. El propósito es claramente el de lograr un incremento en la densidad de integración, es decir, aumentar el número de funciones eléctricas por unidad de área. Numerosas y conocidas son las ventajas que esto conlleva. Sin embargo, esta reducción trae aparejada una serie de fenómenos físicos que no pueden obviarse cuando se quiere obtener una imagen completa del comportamiento de un dispositivo.

Si en particular nos referimos a transistores Metal - Oxido - Semiconductor (MOS), sus reglas de dimensionamiento señalan que dicha disminución lateral debe ir acompañada por una reducción proporcional del espesor del aislante de puerta. Como las tensiones aplicadas, usualmente, no se reducen concordantemente, los campos aplicados resultan lo suficientemente intensos para originar corrientes de túnel a través del aislante que provocan su envejecimiento prematuro. La degradación eléctrica de este tipo de estructuras ha sido ampliamente estudiada en las últimas décadas²⁻⁶. Parte de la carga inyectada queda atrapada en el óxido, lo que constituye la principal causa de inestabilidades en tales dispositivos. Estos fenómenos afectan también la integridad del óxido de túnel en memorias dinámicas, y eventualmente terminan produciendo la ruptura dieléctrica del aislante. Se trata entonces de investigar de manera controlada la interrelación entre la generación-ocupación electrónica de las trampas en el aislante y la corriente de túnel. En este trabajo se tratará este último punto, ya que el fenómeno de creación de trampas ha sido discutido previamente^{7,8}.

En un trabajo anterior⁹, se mostró que la corriente a través del óxido de puerta de una estructura MOS con

carga atrapada en el óxido en el estado estacionario de conducción podía describirse según

$$J = K_1 F^2(S_t) \exp(-K_2/F(S_t)) \quad (1)$$

donde J es la densidad de corriente y F(S_t) es el campo eléctrico local en S_t, la distancia de túnel calculada para los electrones que son inyectados desde el nivel de Fermi del silicio (E_f) -ver figura 1-

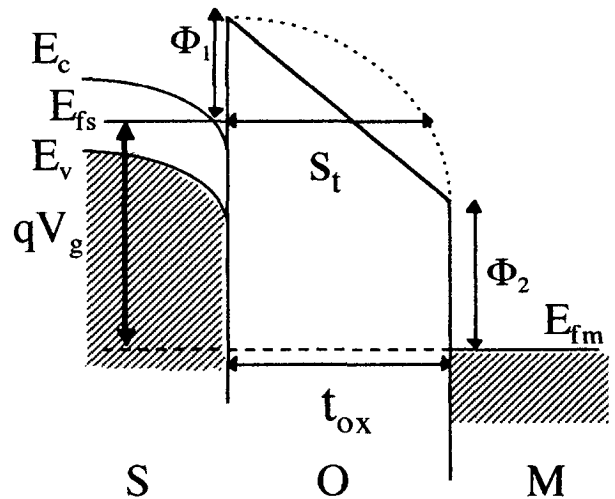


Figura 1. Esquema energético de una estructura MOS polarizada positivamente. La línea punteada corresponde a la barrera de potencial con carga negativa atrapada en su interior.

A este campo lo llamaremos campo de túnel. K_1 y K_2 son dos constantes que se determinan a partir de los datos experimentales. Cabe aclarar, que en la expresión original de túnel Fowler-Nordheim¹⁰ (FN) el campo que gobierna la corriente es el campo catódico $F(0)$. Si consideramos que la carga atrapada en el aislante está uniformemente distribuida, el campo de túnel es

$$F(S_t) = \sqrt{B^2 - 4A\Phi_1} \quad (2)$$

con

$$A = -\frac{\rho}{2\epsilon} \quad B = \frac{\Phi_2 - \Phi_1 - qV_g}{t_{ox}} - A t_{ox}$$

donde ρ es la densidad volumétrica de carga, ϵ la permitividad del dieléctrico, q la carga del electrón, Φ_1 y Φ_2 las barreras catódica y anódica respectivamente, V_g la tensión de puerta, y t_{ox} el espesor del óxido.

En este trabajo se muestra que también es posible aplicar la expresión (1) a los transitorios de conducción que se producen al cambiar la tensión aplicada a la puerta. Dichos transitorios están asociados al atrapamiento-desatrapamiento de carga en el aislante, y son el resultado de dos fenómenos locales que compiten: captura e ionización por impacto¹¹. Cuando ambos procesos se equilibran, se alcanza un estado estacionario de carga (captura igual a liberación). Experimentalmente se observa que cada tensión que se aplica tiene asociado un nivel estacionario de ocupación de las trampas existentes hasta ese momento.

II. MEDICIONES Y RESULTADOS OBTENIDOS

Las mediciones se realizaron sobre transistores de canal tipo p procesados con tecnología CMOS, puerta de polisilicio y longitud de canal de 2 μm . El aislante de puerta es de 24 nm de espesor y su área de $8.64 \times 10^4 \text{ cm}^2$. Sobre el dispositivo, se realiza la secuencia de mediciones que a continuación se describe: a) se somete la muestra a condiciones severas de inyección de carga por túnel ($J=10^{-3} \text{ A/cm}^2$ y carga total inyectada $\approx 1 \text{ Coul/cm}^2$), b) se aplica una tensión constante y se mide continuamente la tensión de bandas planas (V_{fb}) (figura 2) y la corriente de túnel (J) (figura 3) hasta alcanzar el nivel estacionario de atrapamiento correspondiente al voltaje de puerta aplicado (orden de la carga inyectada en el transitorio de $10^{-3} \text{ Coul/cm}^2$), c) se modifica la tensión de puerta y se repite el punto b). Finalmente se repite la degradación descrita en a) y la secuencia de medición comienza. Las figuras 2 y 3 reflejan lo que ocurre típicamente durante una secuencia de transitorios particular luego de una inyección de unos pocos Coul/cm^2 . Información adicional acerca de los efectos de la inyección a largo plazo se puede consultar en las referencias [7] y [9].

El rango de voltajes que se puede aplicar está limitado por la sensibilidad del instrumento en la medición de la corriente y por la ruptura del dieléctrico. Se observa claramente en las figuras citadas la existencia de los niveles estacionarios de atrapamiento así como la reversibilidad del fenómeno en cuestión. La carga atrapada en el óxido se obtiene a partir de la variación de la tensión de bandas planas -figura 2- según¹²

$$\Delta V_{fb} = \left(\frac{t_{ox} - \bar{s}}{\epsilon} \right) Q_t \quad (3)$$

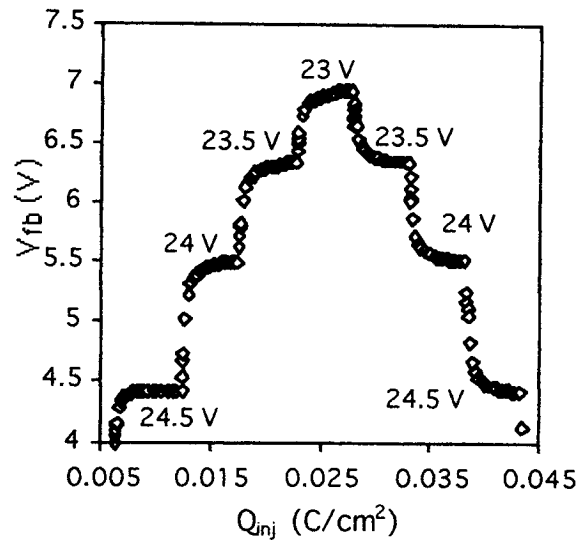


Figura 2. Transitorios en la tensión de bandas planas en función de la carga inyectada medida experimentalmente para distintos niveles de inyección. Se observa la reversibilidad del fenómeno de captura-liberación de carga.

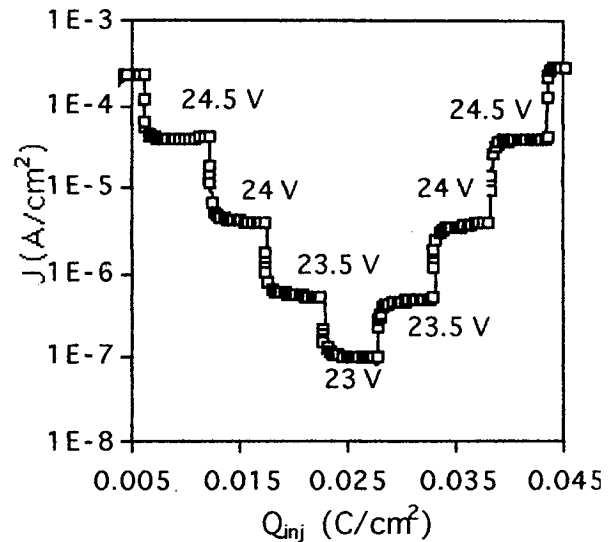


Figura 3. Transitorios en la corriente de túnel en función de la carga inyectada para distintos niveles de inyección a tensión de puerta constante. Los cuadrados representan los datos experimentales y la línea sólida los resultados teóricos.

donde \bar{s} es el centroide de carga atrapada y Q_t su densidad por unidad de área. Si consideramos que el atrapamiento es uniforme entonces es $\bar{s} = t_{ox}/2$. A partir de la expresión de túnel propuesta (1), la determinación de los parámetros del modelo se realiza disponiendo los datos de la Figura 3 en un gráfico del tipo FN -ver Figura 4-. Por cuadrados mínimos se obtuvieron los valores K_1 y K_2 que se detallan en la TABLA I. El ajuste teórico se muestra en la misma figura.

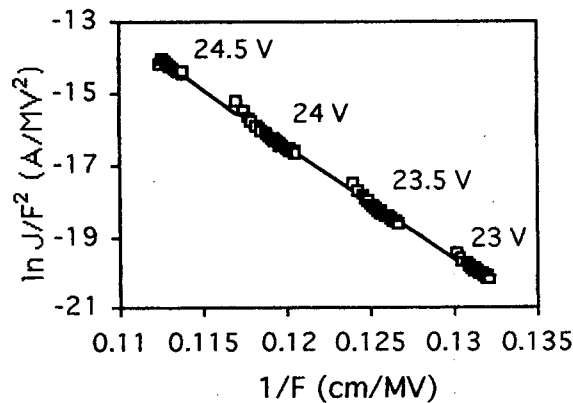


Figura 4. Gráfico del tipo Fowler-Nordheim para el modelo propuesto ec.(1) con $F=F(s_1)$ utilizando los datos experimentales de la Figura 3 correspondientes a la secuencia creciente de tensiones de puerta. Los resultados teóricos (línea sólida) se muestran también en la Figura 3.

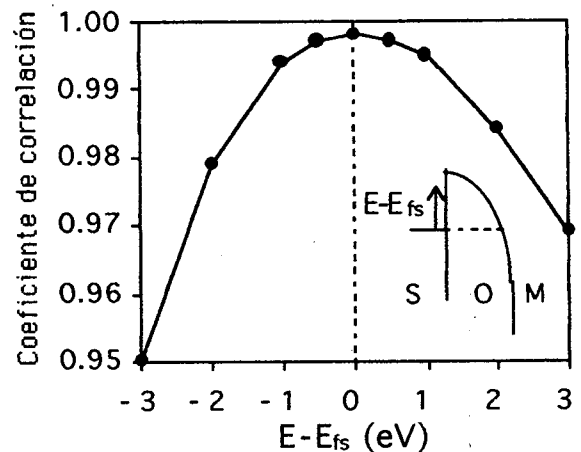


Figura 5. Coeficiente de correlación para los puntos experimentales de la Figura 4 en función de la distancia energética entre la energía de túnel y el nivel de Fermi en el Si. $E-E_f=2.9$ eV corresponde al campo catódico.

TABLA I- Valores asignados a los parámetros del modelo

PARÁMETROS	VALORES
Φ_1 [eV]	2.9
Φ_2 [eV]	3.2
ϵ	$3.9 \epsilon_0$
K_1 [A/V ²]	7.08×10^{-4}
K_2 [MV/cm]	301.46
t_{ox} [nm]	24

Por último, en la Figura 5 se exhibe el coeficiente de correlación lineal (CCL) que se obtiene al disponer los puntos experimentales en el gráfico FN -como en la figura 4- en función de la distancia energética al nivel de Fermi del Si. Se observa claramente que la máxima linealidad se obtiene cuando la energía a la cual se calcula el campo en el aislante coincide con dicho nivel de Fermi. El CCL que se obtiene con el tratamiento usual, es decir utilizando el campo catódico corregido por la carga atrapada en la expresión de FN ($F(0)$), corresponde a tomar $E-E_f=2.9$ eV en el eje de las abscisas de la figura 5.

III. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha aplicado un modelo de túnel semiempírico para reproducir los transitorios de conducción a través del aislante de puerta en una estructura MOS sujeta a condiciones de envejecimiento eléctrico. El modelo utilizado fue originalmente desarrollado para dar cuenta de los estados estacionarios de conducción y se basa en una expresión modificada de la corriente de túnel Fowler-Nordheim, corregida por un campo de túnel efectivo, el cual da cuenta de la carga atrapada en el aislante.

Referencias

1. R. Muller y T. Kamins, Device Electronics for Integrated Circuits, p. 497, Wiley (New York), 1986.
2. D. Geppert, J. Appl. Phys. **33**, 2993 (1962).
3. P. Olivo, B. Riccò y E. Sangiorni, J. Appl. Phys. **54**, 5267 (1983).
4. C. Chen y C. Wu, Solid-State Electronics **29**, 1059 (1986).
5. S. Oh y Y. Yeow, Solid-State Electronics **32**, 507 (1989).
6. S. Elharbi, M. Jourdain y A. Meinertzhagen, J. Appl. Phys. **76**, 1013 (1994).
7. A. Faigón, A. Straboni, E. Miranda y G. Redin, Anales AFA Vol. 2, 252 (1990).
8. Aceptado para su publicación en Anales de la Asociación Química Argentina 1996.
9. Aceptado para su publicación en Anales AFA 1995.
10. F. Lenzlinger y E. Snow, J. Appl. Phys. **40**, 278 (1969).
11. E. Avni y J. Shappir, J. Appl. Phys. **64**, 734 (1988).
12. Nicollian y J. Brews, MOS, Physics and Technology, Wiley (New York), 1982.