

# Túnel Fowler-Nordheim en estructuras MOS con carga atrapada en el aislante

E.A. Miranda, E.G. Redin 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 la corriente de túnel a través del aislante de puerta de una estructura Al-SiO<sub>2</sub>-Si con carga atrapada en el óxido, puede ser descrita por una expresión del tipo Fowler-Nordheim modificada, donde el campo catódico es reemplazado por la pendiente de la barrera de potencial a la energía correspondiente al nivel de Fermi en el cátodo. La carga atrapada en el aislante se considera uniformemente distribuida y su valor se deduce a partir del corrimiento de la tensión de bandas planas.

In this work it is shown that the tunneling current through the gate insulator of an Al-SiO<sub>2</sub>-Si structure with trapped charge within the oxide, can be described by a modified Fowler-Nordheim expression, where the cathode field is substituted by the slope of the potential barrier at the energy corresponding to the Fermi level at the cathode. The trapped charge at the insulator is considered to be uniformly distributed and its value is calculated from the flat band voltage shift.

## I. INTRODUCCIÓN

El transporte de electrones a través de óxidos cargados en estructuras Metal-Oxido-Semiconductor (MOS) ha sido intensamente estudiado en las últimas décadas<sup>1-5</sup>. Dos razones impulsan este tipo de investigaciones: por un lado un interés teórico como estructura de túnel y por el otro el interés tecnológico como célula fundamental de numerosos dispositivos microelectrónicos. Se acepta en general que, para altos campos eléctricos, la corriente a través de tales estructuras puede ser descrita por la expresión de Fowler-Nordheim<sup>6,7</sup>

$$J = K_1 F(0)^2 \exp(-K_2/F(0)) \quad (1)$$

la cual corresponde a la corriente de túnel a través de una barrera de potencial triangular y donde  $F(0)$  es el campo eléctrico catódico.  $K_1$  y  $K_2$  son constantes que dependen del material.

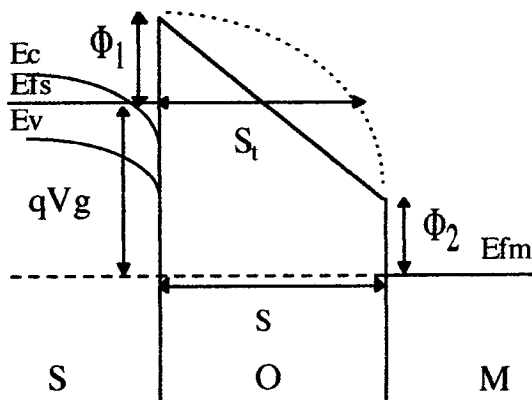


Figura 1- Diagrama energético de una estructura MOS polarizada. La línea punteada corresponde a la barrera de potencial exageradamente deformada con carga negativa atrapada en su interior.

Si se desprecia la caída de potencial en el semiconductor frente a los voltajes aplicados, resulta  $F(0) \approx V_g/s$ , donde  $V_g$  es la tensión aplicada a la puerta y  $s$  es el espesor del aislante. Sin embargo, bajo condiciones de inyección prolongada se observa experimentalmente una fuerte desviación del comportamiento ideal predicho por la relación (1)<sup>8,9</sup>. Esta diferencia aparece como consecuencia del atrapamiento de carga en el aislante, la cual determina la deformación del campo local  $F(x)$  respecto al campo medio aplicado  $V_g/s$  y que se manifiesta macroscópicamente como una variación de la tensión de bandas planas.

En este trabajo se muestra que es posible describir el flujo de carga a través del aislante en función de la carga inyectada ( $J-Q_{inj}$ ) para distintos niveles de inyección. Para ello se utiliza una forma modificada de la expresión (1), donde el campo  $F(0)$  es reemplazado por  $F(S_t)$ , con  $S_t$  la distancia de túnel calculada para los electrones que son inyectados desde el nivel de Fermi del silicio ( $E_{fs}$ ), y al que llamaremos campo de túnel.

## II. EL MODELO

La figura 1 muestra el diagrama energético de una estructura MOS polarizada con puerta positiva. Si consideramos que la carga atrapada en el aislante  $Q_t$  está uniformemente distribuida, integrando la ecuación de Poisson se obtiene el perfil de la barrera de potencial

$$\Phi(x) = Ax^2 + Bx + C \quad (2)$$

con

$$A = -\frac{\rho}{2\epsilon}$$

$$B = \frac{\Phi_2 - \Phi_1 - qV_g}{s} - A s$$

$$C = qV_g + \Phi_1$$

donde  $x$  es la distancia dentro del aislante medida desde el electrodo inyector.  $\rho$  es la densidad de carga atrapada.  $\epsilon$  la permitividad del dieléctrico.  $q$  la carga del electron.  $\Phi_1$  y  $\Phi_2$  las barreras catódica y anódica respectivamente. Los valores de los parámetros utilizados se detallan en la Tabla I. El campo de tunel se obtiene a partir de las relaciones  $\Phi(S_1) = qV_g$  y  $F(S_1) = -2AS_1 - B$ . de donde resulta

$$F(S_1) = \sqrt{B^2 - 4A\Phi_1} \quad (3)$$

En la siguiente sección se mostrará que los resultados experimentales son compatibles con una expresión análoga a la (1).

$$J = K_1^* F^2(S_1) \exp(-K_2^*/F(S_1)) \quad (4)$$

donde  $K_1^*$  y  $K_2^*$  son dos constantes que pueden ser determinadas a partir de los datos experimentales.

TABLA I - Valores asignados a los parámetros del modelo

PARÁMETROS	VALORES
$\Phi_1$ [eV]	2.9
$\Phi_2$ [eV]	3.2
$\epsilon$	$3.9 \epsilon_0$
$K_1^*$ [A/V <sup>2</sup> ]	$7.08 \times 10^{-4}$
$K_2^*$ [MV/cm]	301.46
$S$ [Å]	240

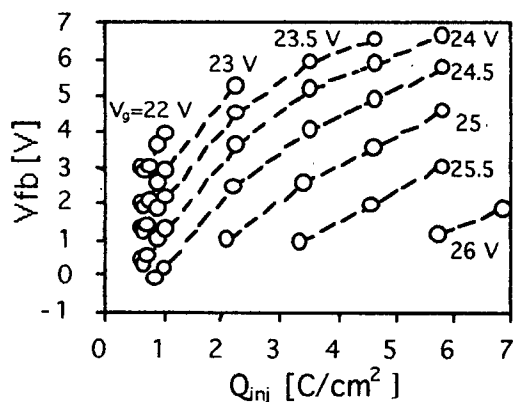


Figura 2- Tensión de bandas planas en función de la carga inyectada medida experimentalmente para distintos niveles de inyección.

### III. MEDICIONES Y DETERMINACIÓN DE LA CARGA ATRAPADA

Las mediciones fueron realizadas sobre capacitores MOS con aislante de puerta de 240 Å de espesor y área de  $8.64 \times 10^{-4} \text{ cm}^2$ . La degradación de la muestra se realizó por

inyección túnel a corriente constante  $J_0 = 10^{-2} \text{ A/cm}^2$ , y el ciclo de inyección-medición utilizado fue el siguiente: inyección a corriente constante  $J_0$ , medición de la tensión de bandas planas ( $V_{fb}$ ) a partir de la curva C-V (Figura 2) y medición de la corriente correspondiente a los niveles estacionarios de atrapamiento<sup>10,11</sup> (Figura 3) para distintos voltajes de puerta. El rango de voltajes está limitado por la sensibilidad de la medición de corriente y por la ruptura del dieléctrico. El ciclo de degradación se repitió hasta la ruptura del aislante.

La carga atrapada en el óxido está relacionada con la variación de la tensión de bandas planas según<sup>12</sup>

$$\Delta V_{fb} = \left( \frac{s - \bar{s}}{\epsilon} \right) Q_t \quad (5)$$

donde  $\bar{s}$  es el centroide de carga y  $Q_t$  la carga atrapada. Si consideramos que el atrapamiento es uniforme entonces  $\bar{s} = s/2$  y de esta manera es posible obtener la densidad de carga atrapada a partir de los datos experimentales.

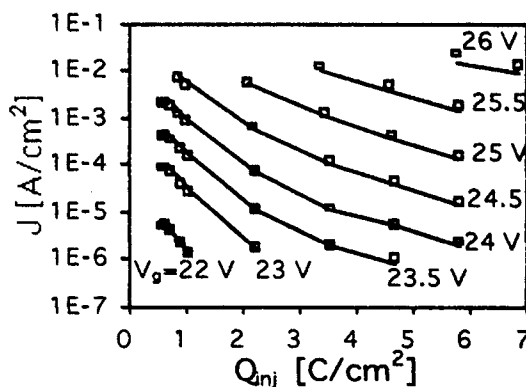


Figura 3- Corriente de tunel a través del aislante en función de la carga inyectada para distintos niveles de inyección. Los puntos representan los datos experimentales y la línea sólida los resultados teóricos.

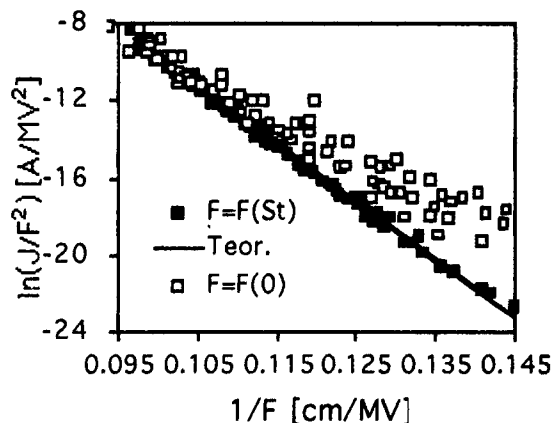


Figura 4- Gráfico Fowler-Nordheim para el modelo propuesto (4) con los datos experimentales y los resultados teóricos (línea sólida) que se muestran en la Figura 3.

A partir de la expresión de túnel propuesta (4), la determinación de los parámetros del modelo se realiza disponiendo los datos de la figura 3 en un gráfico del tipo Fowler-Nordheim -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. En la figura 4, también se muestran los mismos datos experimentales pero graficados en función del campo catódico  $F(0)=-B$ .

#### IV. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en este trabajo muestran que la corriente de electrones a través del aislante de puerta en una estructura MOS con carga atrapada puede ser descrita por una expresión simple del tipo Fowler-Nordheim en la cual el campo de túnel juega un papel fundamental. Las diferencias observadas son razonables si se considera la sobresimplificación del problema: carga atrapada uniforme, inyección monoenergética de los electrones, etc. Modelos de este tipo resultan esenciales para estudiar y caracterizar la estabilidad del óxido de puerta en estructuras MOS frente a la inyección prolongada de carga, factor fundamental que determina la

vida útil de tales estructuras como componentes de dispositivos microelectrónicos.

#### Referencias

1. D. Geppert, J. Appl. Phys. 33, 2993 (1962).
2. P. Olivo, B. Riccò and E. Sangiorni, J. Appl. Phys. 54, 5267 (1983).
3. C. Chen and C. Wu, Solid-State Electronics 29, 1059 (1986).
4. S. Oh and Y. Yeow, Solid-State Electronics 32, 507 (1989).
5. S. Elharbi, M. Jourdain and A. Meinertzhagen, J. Appl. Phys. 76, 1013 (1994).
6. R. Fowler and L. Nordheim, Proc. Roy. Soc. (London) Ser. A. 119, 173 (1928).
7. F. Lenzlinger and E. Snow, J. Appl. Phys. 40, 278 (1969).
8. Y. Nissan-Cohen, J. Shappir and D. Frohman-Bentchowsky, Solid-St. Electron. 28, 717 (1985).
9. P. Solomom, J. Appl. Phys. 48, 3843 (1977).
10. E. Avni and J. Shappir, J. Appl. Phys. 64, 734 (1988).
11. A. Faigón, A. Straboni, E. Miranda y G. Redin, ANALES AFA Vol.2, 252 (1990).
12. E. Nicollian y J. Brews en MOS. Physics and Technology, Wiley (New York), 1982.