

# Simulación de las corrientes de túnel en estructuras Al-SiON-Si a partir de un modelo semiempírico

E. A. MIRANDA, E. G. REDIN Y A. N. FAIGON

LABORATORIO DE FÍSICA DE DISPOSITIVOS - MICROELECTRÓNICA  
FAC. DE INGENIERÍA - UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES  
PASEO COLÓN 850 (1063) - BUENOS AIRES - ARGENTINA  
*e-mail: emirand@aleph.fi.uba.ar*

En el presente trabajo se aplica un modelo recientemente desarrollado al análisis de las corrientes de túnel en estructuras Al-SiON-Si. Se propone un perfil para la barrera de potencial compatible con las oscilaciones de la corriente observadas en el régimen de inyección Fowler-Nordheim.

In the present work, a recently developed model is applied to the analysis of tunneling currents through Al-SiON-Si structures. A potential barrier profile compatible with the current oscillations observed in the Fowler-Nordheim injection regime is proposed

## Introducción

Las corrientes de túnel a través de óxidos nitrurados (SiON) han sido objeto de investigación en los últimos años debido a las ventajas que este material manifiesta frente al óxido standard (SiO<sub>2</sub>), en particular en aplicaciones con aislante de puerta muy delgado<sup>1</sup>. Es sabido, por estudios analíticos y eléctricos que la nitruración afecta predominantemente la superficie expuesta del óxido. También es sabido por mediciones de fotoemisión que la nitruración reduce la barrera de potencial interfacial<sup>2</sup>.

En trabajos recientes<sup>3,4</sup> se ha intentado obtener información acerca de la altura de barrera en la interfaz nitrurada a partir del análisis de la corriente de túnel en el régimen de Fowler-Nordheim -túnel a la banda de conducción del aislante-. El aumento global de la corriente, respecto al óxido standard, se interpretó como consecuencia de una disminución de la barrera cátodica y por la aparición de un mecanismo de conducción alternativo vinculado a la existencia de trampas en la banda prohibida del material. También se estableció, a partir de un análisis sobre las oscilaciones en la corriente de túnel, que la barrera anódica permanecía inalterada.

En un trabajo posterior<sup>5</sup> presentamos un tratamiento de las corrientes de túnel en estructuras Al-SiO<sub>2</sub>-Si, basado en el formalismo de las matrices de transmisión, que reproduce fielmente la característica corriente vs. tensión (J-V) y la conductancia logarítmica

( $d \log J / dV - V$ ) de tales estructuras en un amplio rango de espesores y de tensiones eléctricas.

En el presente trabajo se intenta conciliar ambos resultados con el propósito de retener una imagen más realista acerca de la forma de la barrera de potencial existente en las estructuras Al-SiON-Si. Se muestra además que, variando solamente dos de los parámetros del modelo de túnel previamente desarrollado, es posible simular de manera satisfactoria la familia de curvas J-V para un espesor dado con distinto tiempo de nitruración.

## Desarrollo experimental y simulación de la corriente de túnel

Las películas aislantes de oxinitruro de silicio se obtuvieron nitrurando en plasma de amoníaco óxidos crecidos térmicamente. El proceso de fabricación de las estructuras capacitivas así como el detalle de las mediciones J-V está descrito en Ref. [4]. Se trabajó con dos grupos de muestras, A y B de espesores medios (d) de 50 Å y 66 Å respectivamente con distinto tiempo de nitruración (0, 0.25, 3 y 6 horas).

En la figura 1, se observa claramente que la corriente aumenta con el tiempo de nitruración para una dada tensión. En la figura 2 se describen las derivadas logarítmicas de las curvas correspondientes al grupo A con las oscilaciones características para este rango de espesores y que se originan por la reflexión parcial de las funciones de onda electrónicas en

la interfaz anódica<sup>6</sup>. Esta estructura fina no es

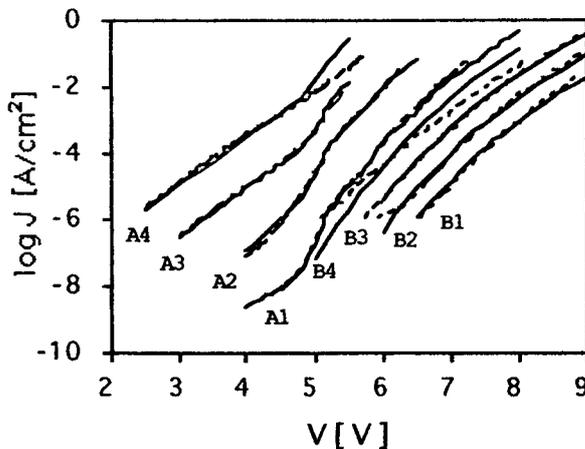


FIG. 1 - Densidad de la corriente de túnel vs. tensión aplicada, experimental (punteado) y teórico (sólido).

visible en las curvas del tipo B, donde se pierde el comportamiento balístico de los electrones en la banda de conducción del aislante.

El modelo de túnel propuesto<sup>5</sup> fue desarrollado para estructuras Al-SiO<sub>2</sub>-Si, y en términos de la aproximación WKB la probabilidad de túnel se puede expresar explícitamente según:

$$P(E) = \exp[-2Ks_t - \alpha(\phi_a - E)] \quad (1)$$

donde E es la energía del electrón incidente medida desde el fondo de la banda de conducción del Si, s<sub>t</sub> es la distancia de túnel, φ<sub>a</sub> es la barrera anódica medida desde la banda de conducción del Si en la interfaz SiO<sub>2</sub>-Si y K=0.376 Å<sup>-1</sup> es el número de onda medio en la banda prohibida del aislante. El segundo término del exponente corresponde a un factor de atenuación que afecta a la probabilidad de transmisión solo en el régimen de túnel directo (metal a banda de conducción del Si) donde E < φ<sub>a</sub> y que está caracterizado por el parámetro α=3 eV<sup>-1</sup> que multiplica a la diferencia entre la energía del electrón y la altura de la barrera anódica. Para poder incluir las oscilaciones en nuestro tratamiento, en lugar de la eq. (1), P(E) se calcula a través del formalismo de las matrices de transmisión<sup>7</sup>, incorporando, además de los factores citados, una relación de dispersión parabólica en la banda de conducción del aislante con masa efectiva m\* = 0.62m<sub>e</sub>. La corriente se calcula

numéricamente en el marco de la aproximación de electrón independiente teniendo en cuenta la conservación del momento transversal.

## Discusión y conclusiones

Los análisis publicados acerca del crecimiento de la corriente para los óxidos nitrurados proponen como alternativas la disminución de las alturas de barreras, o la inclusión de otros mecanismos de conducción<sup>8,9</sup>. En este trabajo se analizan, además de las corrientes, sus derivadas, imponiendo nuevas restricciones al modelo a utilizar.

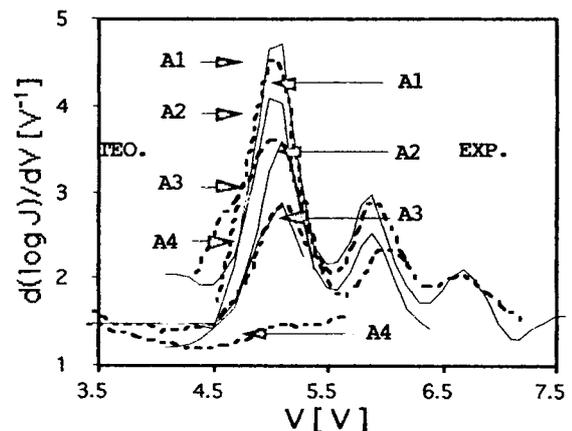


FIG. 2 - Derivadas logarítmicas de la corriente para las muestras A, experimental (punteado) y teórico (sólido).

A partir de simulaciones realizadas con el modelo de túnel propuesto, se ha verificado que la posición en tensiones aplicadas de los picos principales de la conductancia logarítmica es extremadamente sensible a la variación de la altura de las barreras interfaciales. Como en las muestras nitruradas la posición de dichos picos no se modifica, no es posible atribuir el aumento de la corriente a una disminución de φ<sub>c</sub> y/o φ<sub>a</sub>, reteniendo un perfil lineal entre ambos electrodos - ver Figura 3. Por otro lado, el hecho de que la posición de los picos coincida, nos permite argumentar que la barrera de potencial en la región anódica mantiene esencialmente su forma, lo cual es consistente con que la nitruración, al proceder desde la interfaz opuesta, no alcanza a modificar las propiedades del dieléctrico en dicha zona. Como la distribución de nitrógeno dentro del aislante es un factor desconocido, se desconoce

también el perfil exacto de la barrera. El perfil más sencillo compatible con las observaciones anteriores se muestra en la Fig. 3. En el mismo es necesario distinguir la altura de barrera catódica  $\phi_c$  - de aquel valor que proporciona la pendiente de la banda de conducción del aislante, y que se ha fijado en 3.2 eV que corresponde al óxido sin nitrurar.

Dado que en el modelo de túnel utilizado las alturas de barrera intervienen exclusivamente para definir la pendiente de la banda de conducción del aislante, y para discriminar el rango de túnel directo del de Fowler-Nordheim, se han simulado las corrientes en los oxinitruros manteniendo las barreras constantes para todas las muestras. Se ajustaron las curvas para cada muestra modificando los valores de  $K$  y  $\alpha$  - Tabla 1.

TABLA 1 - Parámetros del modelo

MUESTRA	d [Å]	$\alpha$ [eV <sup>-1</sup> ]	K [Å <sup>-1</sup> ]
A1	50	3	0.376
A2	48	5	0.32
A3	50	3.7	0.295
A4	50	3.7	0.245
B1	66	-	0.376
B2	66	-	0.35
B3	66	-	0.326
B4	66	-	0.3

La variación de  $K$  no altera la posición de los picos de la conductancia, pero modifica la amplitud de las oscilaciones en concordancia cualitativa con lo observado en la Fig. 2. El decrecimiento de dichas amplitudes con la nitruración se asocia a la incorporación de una mayor cantidad de centros dispersores en la banda de conducción del aislante. El factor de atenuación  $\alpha$ , por su parte, interviene solo en el régimen de inyección de túnel directo, observable únicamente en las muestras A, y gobierna la pendiente inicial de las curvas -ver Fig. 1. Para las muestras B, el túnel es fundamentalmente del tipo Fowler-Nordheim y las curvas están solo parametrizadas por el valor del número de onda medio dentro del aislante ( $K$ ). La muestra B4, la más nitrurada, no sigue el mismo comportamiento de las ya descritas, posiblemente por la aparición de otro mecanismo de conducción, tal como fue señalado en un trabajo anterior<sup>4</sup>.

En síntesis, expresando mediante la variación de  $K$  y  $\alpha$  las características de cada muestra, resulta, como se ve por el buen ajuste de las curvas J-V y sus derivadas, un mejor tratamiento que el convencional de modificar las alturas de las barreras.

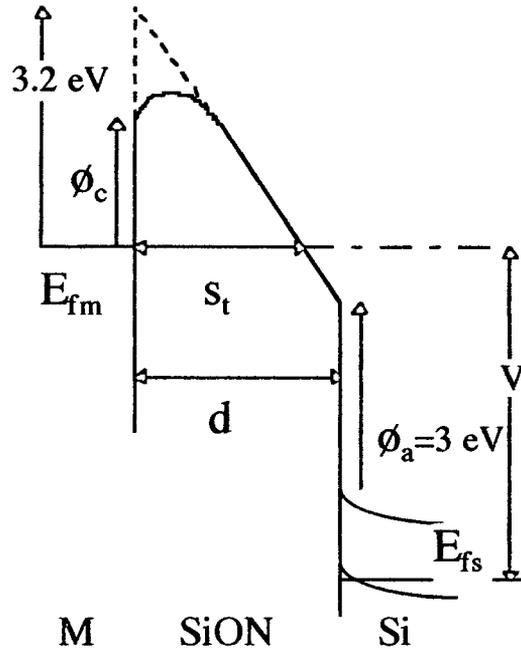


FIG. 3 - Estructuras Al-SiO<sub>2</sub>-Si (punteado) y Al-SiON-Si (lleno) con tensión negativa aplicada al metal.

### Referencias

1. M. Moslehi, K. Saraswat, IEEE Trans. on Electron. Dev. **ED-32**, 106 (1985).
2. M. Emanuel, A. Faigón and J. Shappir, J. Appl. Phys. **57**, 2285 (1985).
3. A. Faigón, A. Straboni, E. Miranda y G. Redin, ANALES AFA Vol. **3**, 371 (1991).
4. A. Faigón, A. Straboni, E. Miranda y G. Redin, Thin Solid Films **230**, 133 (1993).
5. A. Faigón, F. Campabadal, E. Miranda y G. Redin, ANALES AFA Vol. **4**, 263 (1992).
6. J. Masserjian, The Physics and Chemistry of SiO<sub>2</sub> and the Si-SiO<sub>2</sub> Interface, Plenum Press, New York, 1988.
7. Y. Ando y T. Itoh, J. Appl. Phys. **61**, 1497 (1987).
8. X. Cheng, Y. Cheng and B. Liu, J. Appl. Phys. **63**, 797 (1988).
9. E. Suzuki and D. Schroder, J. Appl. Phys. **60**, 3616 (1986).