

# TUNEL EN ESTRUCTURAS ALUMINIO-OXINITRURO DE SILICIO-SILICIO

A. Faigón, A. Straboni\*, E. Miranda, G. Redin

*Laboratorio de Física de Dispositivos-Microelectrónica, Departamento de Física,  
Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires, Paseo Colón 850, 1063 Buenos Aires.*

Se investigaron las barreras de túnel en estructuras MOS con aislantes de oxinitruro de silicio obtenidos por nitruración de dióxido de silicio en plasma de amoníaco. De las oscilaciones de la corriente asociadas a la reflexión parcial de los electrones en la interfase Si-aislante se obtuvo información acerca de la barrera en dicha interfase. Se presenta un cálculo autoconsistente para la determinación de la barrera catódica por el método de Fowler-Nordheim para aislantes delgados. Los resultados obtenidos muestran una disminución en la altura de la barrera catódica con el tiempo de nitruración y que para nitruraciones prolongadas el mecanismo de conducción deja de ser túnel Fowler-Nordheim puro.

## INTRODUCCION

El fenómeno del transporte de cargas por efecto túnel a través del aislante de grilla en los dispositivos MIS (Metal-Aislante-Semiconductor), ha sido objeto de numerosas investigaciones tanto teóricas como experimentales [1,2].

El dieléctrico habitualmente utilizado en este tipo de estructuras es el dióxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ). Sus especiales características [3] han permitido desarrollar las tecnologías de alta densidad de integración de dispositivos. Sin embargo, la reducción del espesor del aislante de grilla, requerido por dichas tecnologías, trae aparejado nuevos problemas relacionados con la creación de defectos tanto en su seno como en la interfase con el silicio. Este proceso de degradación del dieléctrico, provocado por la inyección de portadores, constituye actualmente la limitación esencial a la vida útil de los dispositivos [4].

Un potencial sustituto del  $\text{SiO}_2$  es el oxinitruro de silicio ( $\text{SiON}$ ), material que presenta importantes ventajas respecto al  $\text{SiO}_2$  [5,6]. La información referida a la conducción eléctrica en óxidos nitrurados es escasa y concierne mayormente a  $\text{SiON}$  obtenido por nitruración térmica [7,8,9,10], y no por nitruración en plasma. El atractivo que presenta esta clase de nitruración en plasma. El atractivo que presenta esta clase de nitruración es el de reducir la temperatura del proceso de fabricación, en concordancia con las tendencias actuales en microelectrónica.

Es sabido que la nitruración del óxido reduce la barrera de potencial para túnel [8], y que afecta de distinto modo a las barreras de cada interfase. Se sabe además que la nitruración introduce, en ciertos casos, trampas que favorecen la conducción (Poole-Frenkel o túnel asistido por trampas) [9]. Por estos motivos, la falta de conocimiento acerca del perfil de la barrera y la posibilidad de otras contribuciones a la corriente hace que el análisis usual para la determinación de las barreras a partir de un gráfico del tipo Fowler-Nordheim (F-N) [11] conduzca, aplicado acriticamente, a resultados incorrectos.

Del estudio de las oscilaciones de la corriente asociada a la reflexión de las funciones de onda electrónicas en la interfase aislante-semiconductor [12] se pueden discriminar las muestras en que el análisis de F-N es válido y además se puede establecer la altura de la barrera anódica  $\Phi_a$ . Conocido  $\Phi_a$ , y a partir de un método iterativo, la barrera catódica  $\Phi_c$  se obtiene de la pendiente del gráfico F-N consistente con el valor de  $\Phi_a$ .

## MEDICIONES

Las muestras utilizadas son obleas con dispositivos de testeo procesadas en los laboratorios del CNET (Centre National d'Etudes des Télécommunications) en Grenoble (Francia). El aislante de grilla se obtuvo nitrurando en plasma de amoníaco óxidos crecidos térmicamente, de espesores nominales de 50 y 70 Å. La oxidación se realizó por 12 y 26 minutos a 850 °C en oxígeno seco. La nitruración en plasma se llevó a cabo en un ambiente de  $\text{NH}_3$  a 950 °C y 50 microbars. Para su realización se utilizó el URANOS III (Unit of

\* El autor pertenece al Centre Nationale d'Etudes des Télécommunications (CNET), Grenoble, Francia.

Reactive Anodization for Nitridation and Oxidation of Semiconductors) [13] con potencia de RF de 600 W. Los electrodos de grilla son de Al definidos por fotolitografía a cuadrados de 100  $\mu\text{m}$  de lado.

La determinación del espesor de las muestras es crítica para el análisis de las corrientes de túnel. Se utilizó una técnica que combina resultados de mediciones capacitivas con las mediciones elip-sométricas [14] y que proporciona simultáneamente los valores del espesor, la constante dieléctrica y el índice de refracción (ver tabla I).

mues-tra	tiempo de nitruración [horas]	Espesor [Å]	K	n
A1	0	47	3.9	1.46
A2	0.25	44.9	4.07	1.49
A3	3	44.9	4.49	1.57
A4	6	48.9	4.96	1.64
B1	0	60	3.9	1.46
B2	0.25	57.5	4.08	1.49
B3	3	59.1	4.31	1.53
B4	6	63.3	4.66	1.59

Tabla I: Tiempo de nitruración, espesor, constante dieléctrica e índice de refracción para las muestras utilizadas.

Las curvas I-V se obtuvieron aplicando una rampa de voltaje y por pulsos de corriente. En el último caso se pudo seguir la evolución de la carga atrapada en el aislante a través de la medición de la tensión de bandas planas  $V_{fb}$  entre pulsos sucesivos. El corrimiento de  $V_{fb}$ , que en ningún caso superó los 0.2 V, se utilizó para corregir el cálculo del campo eléctrico en el aislante [15].

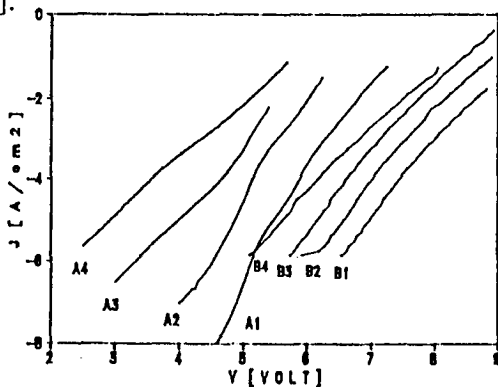


Figura 1: Curvas  $\log(J)$  vs.  $V$  aplicado para las muestras descritas en la tabla I.

En la Figura 1 se muestran las curvas  $\log J$  vs.  $V$ , donde  $J$  es la densidad de corriente que circula por el aislante y  $V$  es el voltaje de grilla. Se observa un crecimiento de la corriente de túnel a igual voltaje de grilla con la nitruración de la muestra.

## DETERMINACION DE LAS BARRERAS INTERFACIALES

En la Figura 2 se presenta la derivada logarítmica de  $J$  vs.  $V$  para las muestras A, las más delgadas. Los picos de las curvas corresponden a los primeros niveles resonantes debidos a la reflexión parcial de las funciones de onda en la interface anódica (aislante-semiconductor). El análisis detallado de estas oscilaciones en la corriente es complicado y se encuentra en la referencia [16]. Aquí es suficiente señalar que la coincidencia en  $\pm 0.1$  V en la posición del primer pico para las muestras A2 y A3 con la A1 (sin nitrurar) indica que la barrera anódica no se ha modificado por la nitruración. La altura de la misma es entonces igual a la del óxido para el cual  $E_{ci}-E_{vs}=4.1$  eV [16] en la interfase Si-SiO<sub>2</sub>. Las diferencias observadas en las posiciones de los picos siguientes son consistentes con las variaciones en el espesor de las muestras. La muestra A4, la más nitrurada, en la cual falta una estructura definida, es afectada aparentemente por alguno de los mecanismos de conducción mencionados anteriormente.

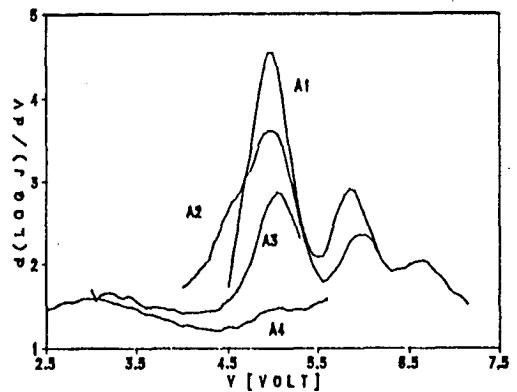


Figura 2: Derivada logarítmica de  $J$  vs.  $V$  aplicado para muestra A.

La dependencia  $J$  vs.  $V$  para el rango de voltajes en que la barrera es triangular,  $v > \Phi_a$ , Fig. 3 está dada por la expresión de Fowler-Nordheim [11]:

$$J = A \cdot (F_{ox})^2 \cdot \exp(-B/F_{ox}) \quad (1)$$

donde A y B son constantes que dependen de  $\Phi_c$  y  $m_{ox}$  es la masa efectiva del electrón en la banda de conducción del aislante,

$$B = 6.83 \times 10^7 \cdot (m_{ox}/m)^{1/2} \cdot (\Phi_c)^{3/2} \quad [\text{V/cm}] \quad (2)$$

y  $F_{ox}$ , que en el caso de una barrera simétrica es el campo eléctrico en el óxido, es en el caso más general la pendiente de la banda de conducción del aislante. Con referencia a la Figura 3,

$$F_{ox} = [V + \Phi_c - \Phi_a] / S \quad (3)$$

con

$$\Phi_a = (E_{ci} - E_{vs})_s + \delta_s - (E_{fs} - E_{vs})_b \quad (4)$$

donde V es la tensión de puerta, s es el espesor,  $E_{ci}$  es la banda de conducción del aislante,  $E_{vs}$  es la banda de valencia del silicio,  $\delta_s$  es la curvatura de la bandas del silicio y  $E_{fs}$  es su nivel de Fermi. El sufijo b significa calculado en el seno del semiconductor y el sufijo s significa calculado en la interfase. No se incluye ningún efecto producido por carga imagen [1].

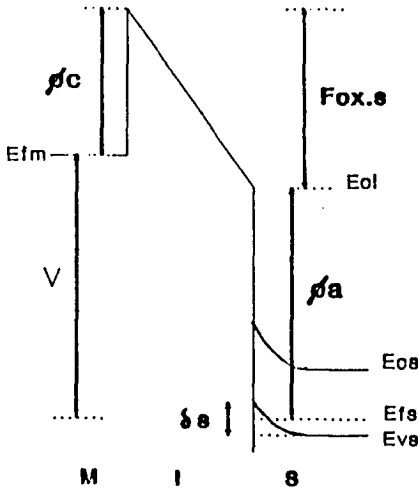


Figura 3: Diagrama de bandas con una estructura MIS con metal negativo.

La expresión (1) se puede reescribir

$$\ln (J/F_{ox}^2) = -B \cdot (1/F_{ox}) + \ln A \quad (5)$$

por lo que la dependencia de  $\ln(J/F_{ox}^2)$  con  $1/F_{ox}$

resulta lineal. Conocida la relación entre las masas, a partir de la pendiente de esta recta, se puede hallar  $\Phi_c$  de (2). La recta correspondiente a la muestra B1 se detalla en la Figura 4.

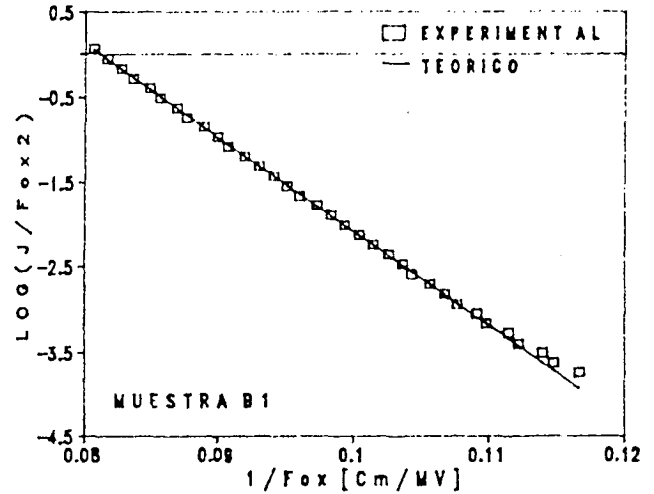


Figura 4: Gráficos F-N para la muestra B1 experimental ( $\square$ ) y teórico (-)

La dificultad que presenta este método aplicado a muestras delgadas reside en que el valor que se quiere determinar,  $\Phi_c$ , es necesario para el cálculo previo de  $F_{ox}$  en (3). Para ello se implementó un procedimiento iterativo que encuentra el  $\Phi_c$  consistente con las expresiones anteriores y con

$$\Phi_c' = \Phi_c \cdot (B'/B)^{2/3} \quad (6)$$

obtenida de (2), donde los valores primados corresponden a la muestra en estudio, y los sin primar al óxido para el cual  $\Phi_c = 3.2$  eV. Se ha supuesto igual valor de las masas efectivas del electrón en el SiON y en el SiO<sub>2</sub>. Los restantes valores se tomaron:  $(E_{ci} - E_{vs})_s = 4.1$  eV, valor que no se modifica por la nitruración;  $\delta_s = 0.4 \pm 0.5$  eV en el rango que nos ocupa, calculado a partir de la medición CV; y  $(E_{fs} - E_{vs})_b = 0.3$  eV obtenido a partir del dopaje de la muestra.

Utilizando (3), (4) y (5) para B1 (muestra sin nitrurar), por cuadrados mínimos se obtiene  $b=254$  MV/cm, valor que está en el rango de valores reportados en la literatura [9]. El proceso iterativo se ejecuta para las muestras B2, B3 y B4. Se comienza con  $\Phi_c' = 3.2$  eV y con el espesor correspondiente a cada muestra se calcula  $F_{ox}$  de (3) lo que permite construir un gráfico del tipo F-N. A partir del mismo se calcula por cuadrados mínimos sobre la parte lineal de las curvas la pendiente B', valor con el cual se puede obtener según (6)  $\Phi_c'$ . Con

este nuevo valor se recalcula  $F_{ox}$  en (3) y el procedimiento se repite hasta que  $\Phi_c'$  converge. Los valores así obtenidos se detallan en la tabla II y las curvas F-N correspondientes en la Figura 5.

muestra	$\Phi_c$ [eV]	B [MV/cm]
B1	3.2	254
B2	2.93	223
B3	2.54	180
B4	1.46	80

Tabla II: Valores de  $\Phi_c$  y B para las muestras B1, B2, B3 y B4.

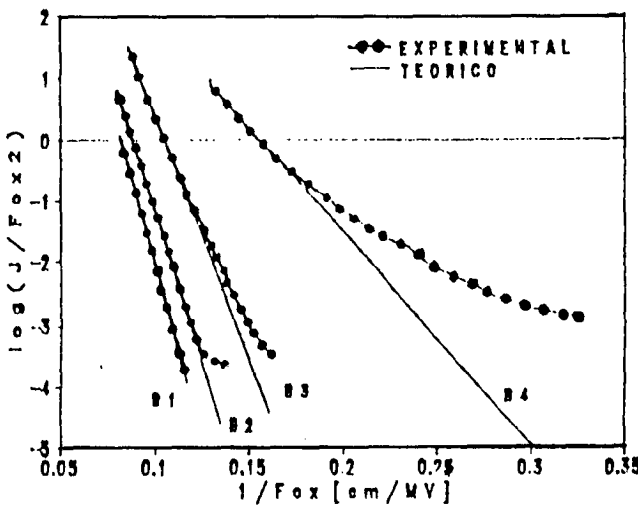


Figura 5: Gráficos F-N para la muestra B, experimentales (o) y teóricos (---). Los parámetros de ajuste se detallan en la tabla II.

Los valores de  $\Phi_c$  obtenidos para las muestras B2 y B3 son consistentes con los conocidos para la barrera Al-SiO<sub>2</sub> (3.2 eV) y Al-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> (2.1 eV). El valor de 1.46 eV para la muestra B4 no es razonable y se asocia con la ya señalada ausencia de oscilaciones definidas (Figura 2).

Respecto a los resultados, es de notar que la barrera anódica se determinó para las muestras delgadas -50 Å- y que dicho valor se utilizó para determinar las barreras catódicas de las muestras de 70 Å. El motivo de ello es que sólo en las muestras más gruesas se puede barrer un rango

suficiente de tensiones en la región de barrera triangular -  $v > \Phi_a$  - como para determinar la pendiente de la recta en el gráfico F-N. Y sólo en las más delgadas es posible ver las oscilaciones. Son los resultados mismos los que justifican esta combinación: si en las muestras más delgadas la nitruración no afectó la interfase con el Si, entonces la nitruración procede superficialmente y garantiza, en consecuencia, que en las muestras más gruesas el SiO<sub>2</sub>, cercano al Si tampoco está alterado.

## CONCLUSIONES

En el presente trabajo se ha considerado que en el rango de tensiones investigadas la barrera es triangular. Esto implica una estructura de bandas definidas para el aislante que es un material amorfo, e interfaces abruptas con los electrodos. Estos puntos fueron demostrados para el SiO<sub>2</sub>, en los trabajos de Maserjian [16] quien acotó la zona de cambio gradual en la interface Si-SiO<sub>2</sub>, a menos de 3 Å. La coincidencia en la posición y ancho del primer pico de las oscilaciones en la derivada logarítmica de la característica I-V de las muestras nitruradas con el óxido indica que tal es el caso para el SiON aquí estudiado. La atenuación en la magnitud de la oscilación con la nitruración pareciera indicar una reducción del libre camino medio de los electrones en la banda de conducción del aislante.

A partir de un cálculo autoconsistente se pudieron determinar las alturas de las barreras interfaciales. Se encontró que la barrera Al-SiON decrece con el tiempo de nitruración y que la nitruración procede desde la superficie expuesta. Este resultado, que creemos es la primera vez que se comprueba en mediciones eléctricas, es consistente con los perfiles Auger obtenidos en oxinitruros, y particularmente en nitruración plasma [17].

Para tiempos de nitruración prolongados la corriente es dominada por mecanismos de conducción alternativos (Poole-Frenkel o túnel asistido por trampas) basados aparentemente en la elevada densidad de defectos introducidos en el aislante durante la nitruración.

## BIBLIOGRAFIA

- 1) Z. Weinberg, J. Appl. Phys. **53**, 5052 (1982)
- 2) C. Duke, *Tunneling in Solids, Solid State Physics* (Academic, New York, 1969), Vol. 10, Suppl.

- 3) P. Balk, "The Si-SiO<sub>2</sub> system" - Materials Science Monographs, 32 - Elsevier (1988)
- 4) E. Avni, J. Shappir, J. Appl. Phys. **64**, 743 (1988)
- 5) M. Moslehi, K. Saraswat, IEEE Trans. on Electron. Dev. ED-32, 106 (1985)
- 6) A. Faigón, A. Straboni, E. Miranda, G. Redin, Anales AFA 1990, pag. 252
- 7) C. Chen, F. Tseng, C. Chang, J. Electrochem. Soc. **131**, 875 (1984)
- 8) E. Suzuki, D. Schroder, J. Appl. Phys. **60**, 3616 (1986)
- 9) X. Cheng, B. Liu, Y. Cheng, J. Appl. Phys. **63**, 797 (1988)
- 10) X. Cheng, B. Liu, Y. Cheng, INFOS 87, Bélgica
- 11) R. Fowler, L. Nordheim, Proc. Roy. Soc. (London) Ser.A **119**, 173 (1928)
- 12) J. Maserjian, N. Zamani, J. Appl. Phys. **53**, 559 (1982)
- 13) M. Berenguer, A. Straboni, B. Vuillermoz, P. Debenest, K. Barla, International Colloquium on Plasmas for Deposition and Dry Etching, France 1989
- 14) A. Faigón, Tesis doctoral 1985 (no publicada)
- 15) Y. Nissan-Cohen, J. Shappir, D. Frohman-Bentchkowsky, Solid State Electronics **28**, 717 (1985)
- 16) G. Lewicki, J. Maserjian, J. Appl. Phys. **46**, 3032 (1975)
- 17) M. Moslehi, C. Han, K. Saraswat, C. Helms, S. Shatas, J. Electrochem. Soc. **132**, 2189 (1985).

CEILAP  
 CITEFA - CONICET  
 ZUFRIATEGUI Y VARELA  
 1603 - VILLA MARTELLI  
 REPUBLICA ARGENTINA