

# CARGA POSITIVA Y ESTADOS DE INTERFAZ EN ESTRUCTURAS MOS IRRADIADAS GAMMA

R.Lombardi, F. Palumbo, G. Redin, D. Rus, A. Faigón

Laboratorio de Física de dispositivos-Microelectrónica.Fac. de Ingeniería.Paseo Colón 850. Cap. rlombar@fi.uba.ar

Se han estudiado en este trabajo los corrimientos en la capacidad-tensión, y corriente tensión en transistores MOS irradiados con fuente gamma. Se analizaron los datos experimentales en términos de creación de carga positiva en el óxido y de estados electrónicos en la interfaz óxido-semiconductor, detallando las posibles combinaciones de carga y estados, consistentes con los resultados de las mediciones. Se destaca en todos los casos una relación estrecha entre la cantidad de carga positiva que aparece en el óxido tras la irradiación con la cantidad de estados aceptores en la interfaz. Se comparan estos análisis con los que surgen de la aplicación del método de "midgap" [1]

In these investigation we (search) studied shifts on typical electrical measurements on MOS (like capacity and current) devices which were irradiated with gamma source of  $^{60}\text{Co}$

The analysis on measurements was related to creation of fixed charge and surfaces states at  $\text{Si}/\text{SiO}_2$ , then the contribution of each effect was specified to reproduce the experiment. Moreover, we used midgap method to comparative measurements

## I. INTRODUCCION

La generación de pares electrón - hueco es el proceso inicial del daño por radiación ionizante en dispositivos MOS [2]. Estos pares son creados por absorción de fotones de energía superior al del gap del óxido. Varios son los modelos que describen los subsiguientes procesos que conducen a generación de cargas en el óxido, y estados de interfaz. Los modelos del hidrógeno predicen el transporte de hidrógeno -en la interfaz  $\text{Si}/\text{SiO}_2$ - , y los modelos electrónicos predicen el de huecos. En el primero de los modelos, el transporte de hidrógeno es seguido de una reacción con el hidrógeno débilmente enlazado para formar un Si trivalente con un electrón desapareado. En el segundo de los modelos, una parte de los huecos genera estados interfaciales en forma inmediata, y los restantes son atrapados en la interfaz, y convertidos en estados superficiales por captura electrónica[3].

Esencialmente ambos conducen a un mismo modelo eléctrico: creación de cargas fijas y estados permitidos en la interfaz del semiconductor con el óxido.

Es de interés analizar la relación entre cargas y estados a fin de obtener información acerca de los posibles procesos que los originan .

Estudios preliminares[1,3,4] utilizan un método de medición que posibilita la determinación, por separado, de los estados de interfaz y las cargas en el óxido, basado en la suposición -hipótesis del midgap- de estados aceptores (estados que descargados son neutros y cargados son negativos) en la mitad superior del gap, y estados donores (aquellos que descargados son positivos y cargados son neutros) en la mitad inferior del gap ( fig.1).

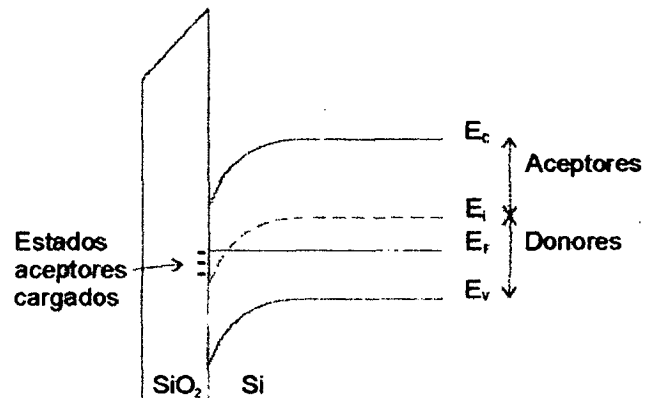


Fig.1 : Esquema de las bandas de energía en la hipótesis de "midgap".

Los resultados de este trabajo se basan en mediciones de curvas capacidad - tensión características del transistor, en dispositivos MOS irradiados a distintas dosis con fotones. Se analizan en detalle los posibles orígenes de los corrimientos observados, en relación a la hipótesis del midgap.

## II. MUESTRAS Y METODOLOGIA

Transistores MOSFET comerciales de canal n y canal p fueron irradiados con fuentes gamma de  $^{60}\text{Co}$ , del departamento de Fuentes Intensas del C.A.E, con dosis integradas variando entre 0.1 a 10 Kgy, sin polarización aplicada al dispositivo. Tras cada irradiación y antes de las 24 hs, se midieron las características capacidad-tensión (C-V) en alta frecuencia (1MHZ) con fuente y sumidero cortocircuitados al sustrato, y las características corriente-tensión del transistor para los regímenes subumbral y de encendido.

### III. ANALISIS DE LA CURVA C-V

Las curvas CV -Fig.2- se deforman con la irradiación de un modo particular. El flanco derecho, correspondiente a tensión de encendido para dispositivos canal-n y a tensión de bandas planas para los canal-p, está poco alterado en los dispositivos irradiados, respecto de los dispositivos vírgenes, indicativo que la carga neta (la del óxido más la de los estados de interfaz) no se ha incrementado para esa polaridad, que corresponde a la mayor parte del gap por debajo del nivel de Fermi en la superficie. Se observa también en dispositivos canal n, un leve corrimiento del flanco derecho hacia valores negativos de la tensión, que no aumenta en las irradiaciones sucesivas, a dosis mayores.

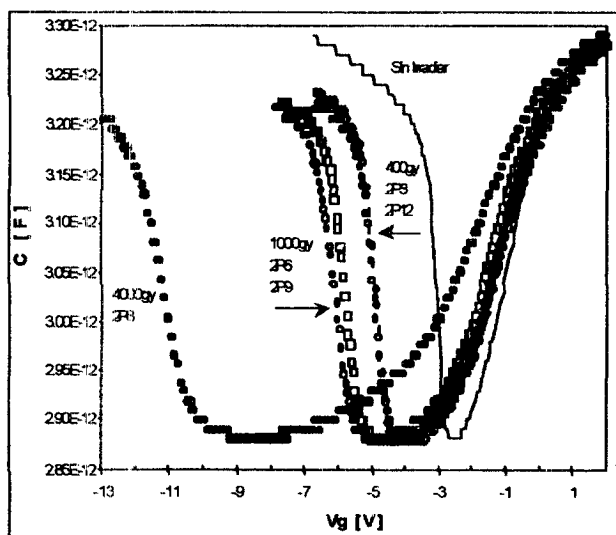


Fig.2: Curvas de capacidad en función de la tensión de puerta para dispositivos canal p y distintas dosis.

Se observan en cambio importantes corrimientos -crecientes con la dosis- del flanco izquierdo de las curvas CV, correspondiente a acumulación en dispositivos de canal n, y a inversión en canal p. La diferencia con la polaridad anterior está en que la mayor parte del gap está por encima del nivel de Fermi en la superficie y por ende los estados de interfaz, en él comprendidos, están descargados. El estiramiento de la curva hacia la izquierda se debe a carga neta positiva. En la interpretación más sencilla, los resultados son consistentes con la creación de estados interfaciales de tipo donador durante la irradiación, que, para polaridad positiva, se comportan como estados neutros. Alternativamente, puede interpretarse como captura de carga positiva en el óxido y creación de estados interfaciales aceptores en la cantidad exacta como para anular el efecto de la polaridad positiva cuando los estados están llenos. De este modo se explicaría el anclaje del flanco derecho observado en las curvas C-V para las distintas dosis de radiación.

### VI. ESTIMACION DE ESTADOS SUPERFICIALES

La Fig 3 muestra el corrimiento de las curvas C-V en función de la distancia del nivel de Fermi al tope de la banda de valencia en la superficie del semiconductor, obtenida a partir de [5]:

$$\psi - \psi_0 = \int_{V_0}^{V_1} \left( 1 - \frac{C(V)}{C_{ox}} \right) \cdot dV \quad (1)$$

La expresión que da estos corrimientos es:

$$\Delta V(E) = \frac{1}{C_{ox}} \left[ Q_{OT} - q \int_{E_V}^E N_{aceptores}(E') dE' + q \int_E^{E_C} N_{donores}(E') dE' \right] \quad (2)$$

donde  $N_{aceptores}$  es la densidad de estados aceptores, y  $N_{donores}$  es la densidad de estados donores,  $C_{ox}$  es la capacidad geométrica. La misma revela formalmente el hecho que estados donores y pares carga más aceptor, producen exactamente el mismo efecto no siendo posible la discriminación a partir de ningún método basado en corrimientos en tensión.

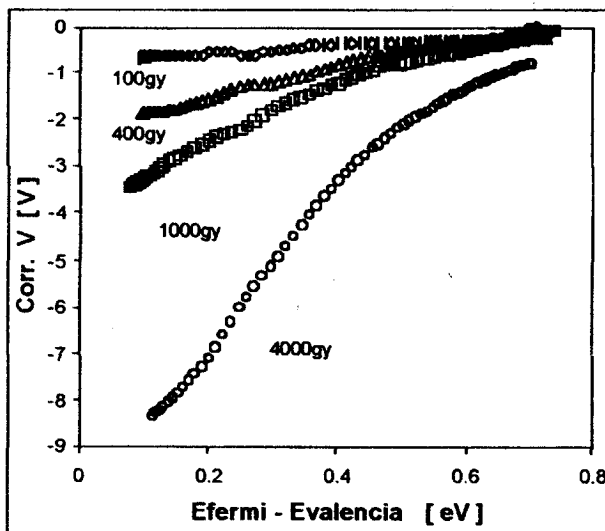


Fig.3 : Curvas de desplazamiento en función de la energía para distintas dosis.

Especializando la eq. (2) para la Energía de Fermi en los extremos del gap se obtienen los corrimientos en los extremos de la CV. Para el extremo derecho:

$$\Delta V(E = E_C) = \frac{q}{C_{ox}} \left[ Q_{OT} - q \int_{E_V}^{E_C} N_{aceptores} dE \right] \quad (3)$$

y para el izquierdo:

$$\Delta V(E = E_V) = \frac{q}{C_{ox}} \left[ Q_{OT} + q \int_{E_V}^{E_C} N_{Donores} dE \right] \quad (4)$$

evidenciando la equivalencia entre ausencia de corrimiento en este flanco y la igualdad entre la cantidad

de carga positiva -medida en número de cargas elementales- y la cantidad de estados aceptores creados en todo el gap.

Una determinación independiente de los estados interfaciales se efectuó a partir de las pendientes de las curvas  $\ln(I_d)$  vs  $V_g$  en la región de subumbral por la aplicación de la teoría de la corriente de difusión en la región de inversión débil [6].

Las curvas experimentales se muestran en la fig.(4). La cantidad de estados creados se obtiene a partir de la pendiente de la región lineal dada por :

$$b = \frac{\log e}{\left(1 + \frac{q N_{FS} + C_B}{C_{0x}}\right) V_T} \quad (5)$$

donde  $b$  es la pendiente,  $N_{FS}$  es la densidad de estados de superficie creados,

$$C_B = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{q N_{AS} \epsilon_S}{\phi_P}},$$

$$C_{0x} = \epsilon_S / x_{0x} \quad ; \quad V_T = kT/q$$

$K$  es la constante de Boltzman,  $T$  es la temperatura absoluta,  $q$  es la carga del electrón,  $N_{AS}$  es el dopaje de la superficie,  $\phi_P$  es la curvatura de bandas en la superficie,  $\epsilon_S$  la permitividad del silicio, y  $X_{ox}$  espesor del óxido.

Los resultados de ambos métodos se correlacionan bien como se muestra en la fig. (4).

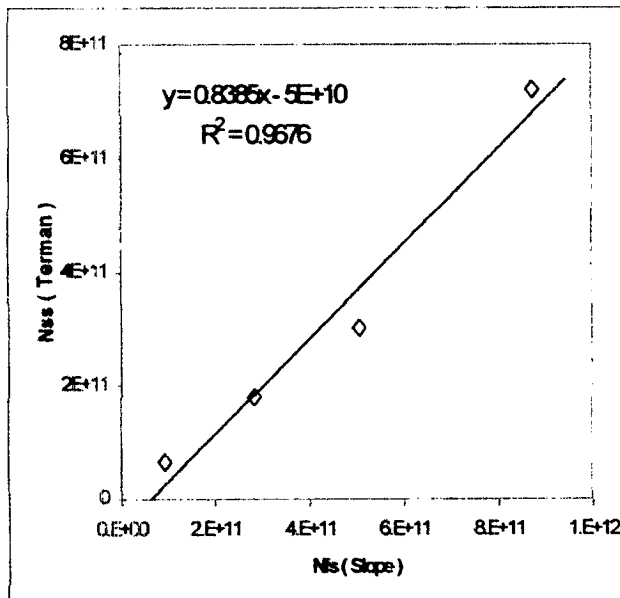


Fig. 4 : Comparación de los métodos de Terman y Pendiente.

## V. DISCUSION

Dado el uso extendido de presentar los corrimientos en las curvas CV e IV estudiados en este trabajo en términos de creación de cargas y de estados

discriminados por la hipótesis del midgap, discutiremos la aplicación del método a nuestros resultados. El mismo se basa en la suposición de que los estados de interfaz son aceptores o donores de acuerdo a su ubicación por encima o por debajo del midgap [1]. Así, polarizado en midgap: -  $E_f = E_i$  en la superficie- los estados no contribuirían con carga y todo corrimiento correspondería a carga en el óxido. Aceptada la hipótesis, se puede discriminar entre carga atrapada en el óxido y creación de estados de interfaz.

Se utilizaron los mismos datos experimentales de las corrientes de subumbral (fig.4) para discriminar entre cargas positivas -corrimientos a tensión de midgap-, y estados de superficie -diferencia entre los corrimientos de midgap,  $E_f = E_i$ , y tensión de encendido  $V_g = V_t$  [1] -. La buena correlación entre los valores de  $N_{FS}$  obtenidos a partir de dicha medición y los obtenidos de las mediciones capacitivas nos permite encarar la interpretación de los resultados independizándonos del método de obtención de los mismos.

El método del midgap estima las contribuciones, al desplazamiento de la tensión, de las cargas positivas y estados, como se indica en la Fig.5, en función de la dosis. En la misma se muestra el corrimiento del flanco izquierdo de las curvas C-V de la Fig.2, correspondiente en este caso a  $V_t$ , que representa  $\Delta V_{it}$  si todos los estados creados fueran donores, y también a  $\Delta V_{ot}$  si fueran aceptores. Las tres curvas son consistentes con los resultados experimentales destacando lo mismo que muestra la eq.(2): de las mediciones no puede decirse cuánta carga hay, ni cómo se reparten los estados entre donores y aceptores, sino una relación entre estas cantidades.

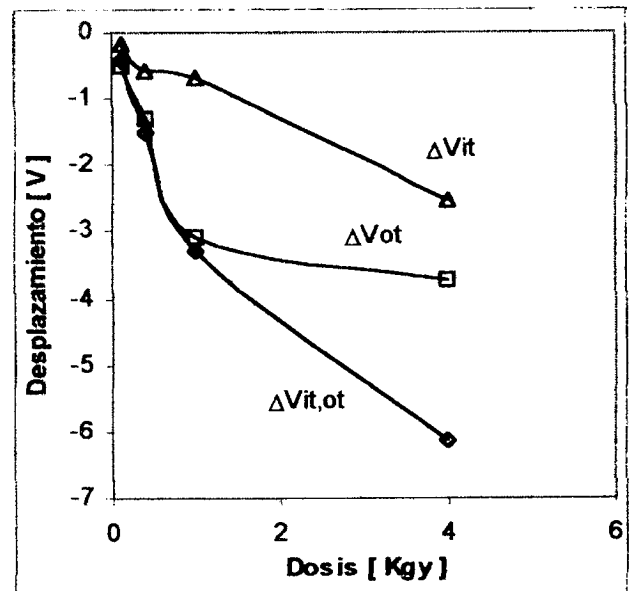


Fig.5 : Estimación de las contribuciones al desplazamiento de las curvas características.  $\Delta V_{ot}$  y  $\Delta V_{it}$  son los desplazamientos debidos a las cargas atrapadas en el óxido y a los estados de interfaz, respectivamente, calculados por el método de midgap.  $\Delta V_{it,ot}$  desplazamiento del flanco izquierdo de curvas C-V en Fig.2.

La suposición del midgap ( la mitad inferior del gap alberga estados donores, y la mitad superior aceptores), si bien sirve a efectos comparativos, puede no estar describiendo correctamente la situación real, y su uso indiscriminado puede oscurecer la interpretación de lo medido. Si hubiésemos aplicado el método sin más, hubiéramos concluido en la repartición entre cargas y estados mostrados en la fig.5, sin percibir lo esencial: en este experimento por cada carga positiva aparece un estado aceptor. Puede ser que no haya ninguna y todo lo observado se deba a estados donores, o en el otro extremo que todos los estados sean aceptores, y por cada uno de ellos haya una carga positiva vecina a la interfaz. En el medio, puede ocurrir que parte de los estados sea de un tipo y parte de otro, pero para describir lo más llamativo del experimento -el flanco derecho de las curvas C-V permanece anclado- es necesario que las cargas y los estados aceptores aparezcan de a pares. Y este hecho hubiera pasado desapercibido por la aplicación del método del midgap.

Tratando el origen de los efectos observados, si bien la interpretación más simple es que, a menos de los corrimientos en el flanco derecho, toda otra deformación se deba a la exclusiva creación de estados donores, no debemos descartar que aquello que se comporta como estado donador pudiera deberse a un hueco capturado en el óxido que habiendo migrado a la interfaz haya inducido un estado aceptor. La dupla daría cuenta de los mismos efectos. Este mecanismo es más acorde con la descripción encontrada en la literatura acerca del origen de los daños por radiación [7,8], y no debe descartarse. Sin embargo la dupla: - carga positiva en la interfaz -estado aceptor- no es otra cosa que un estado donador hasta tanto no encontremos modo de diferenciarlos.

## VI. BIBLIOGRAFIA

- 1 - McWhorter, P.; Winokur, P. Appl. Phys. Lett., 48 (2), 13 Jan 1986. "Simple technique for separating the effects of interface traps and trapped-oxide charge in metal-oxide-semiconductor transistors"
- 2 - Nicollian, E and Brews J. "MOS, Physics and Technology". Cap.11. pp549 .1982.
- 3 - Scharf, S.; Schmidt, M.; Wulf, F.; Braunig; IEEE Transactions on Nuclear Science, D. Vol.41,n3,pp460, jun1994. "Comparison of the Generation of Interface States in MOS Structures due to <sup>60</sup>Co and VUV Irradiation Accompanied with Photoinjection of Electrons"
- 4 - Kelleher A., McDonnell N., O'Neill B., Lane W. IEEE, Transactions on Nuclear Science, D. Vol.41,n3, pp 445, jun1994 "Investigation into the re-use of PMOS Dosimeters"
- 5 - Nicollian E. and Brews J; "MOS Physics and Technology" Ed. Wiley Interscience Publication. 1982. Cap.3 pp 94.
- 6 - Antognetti, P., Caviglia, D.; Profumo, E. IEEE. Journal of Solid-State Circuits. Vol.Sc-17, n.3, Jun. 1982. "CAD Model for Threshold and Subthreshold Conduction in MOSFET's"
- 7- Sze S. M. " Physics of Semiconductor Devices" .Cap.7
- 8- Nicollian, E and Brews J. "MOS, Physics and Technology". Cap.10