

# Programa para la determinación de perfiles de distribución de impurezas en semiconductores

José Carlos León Ortega, Magali Estrada del Cueto. Instituto Central de Investigación Digital

## RESUMEN

---

En el presente trabajo se describe un programa desarrollado para la determinación de perfiles en semiconductores a partir de la medición de C-V en estructuras MOS y en junturas.

El programa permite el cálculo a partir de tres modelos: el de la aproximación de empobrecimiento; el de Ziegler-Klausmman, que permite la determinación del perfil hasta la superficie, y el de Kennedy y O'Brien que contempla la presencia de zonas no neutrales en el semiconductor; corrección importante en el caso de perfiles que varían bruscamente.

Se comparan los resultados del programa con los esperados a partir de datos teóricos, donde se observa la excelente concordancia con lo que predice el modelo de partida.

Se muestran resultados de la utilización del programa en la determinación de perfiles en muestras experimentales con concentración uniforme y en regiones implantadas.

## INTRODUCCIÓN

---

La determinación de la concentración de impurezas y su distribución a lo largo de una dirección dada en el semiconductor, resulta de gran importancia para caracterizar procesos tecnológicos.

En el presente trabajo se describe un programa de computación para la determinación de perfiles de impurezas, a partir de mediciones C-V en diferentes estructuras.

## MODELOS FÍSICOS UTILIZADOS

El programa permite el cálculo de perfiles de impurezas utilizando los siguientes modelos físicos: /1-3/

a) Modelo de la aproximación de empobrecimiento (MADE)

En este modelo se hacen las siguientes suposiciones básicas:

- En la zona de carga espacial las únicas cargas presentes son las debidas a los átomos de impurezas.
- En el resto del volumen del semiconductor hay total neutralidad eléctrica.

La expresión que se obtiene para la determinación del perfil es: /1,4/

$$N(w) = \frac{C^3}{q \epsilon_s} \left[ \frac{dC}{dV} \right]^{-1} \quad (1)$$

con 
$$w = \frac{\epsilon_s}{C_D} \quad (2)$$

y 
$$w = \epsilon_s \left( \frac{1}{C} - \frac{1}{C_0} \right) \quad (3)$$

donde:

$N(w)$  - perfil de impurezas

$w$  - anchura de la zona de carga espacial

$C$ ,  $C_0$  y  $C_D$  - capacidad medida, del óxido y de empobrecimiento respectivamente

$V$  - voltaje aplicado a la estructura

$q$  - carga del electrón

$\epsilon_s$  - constante dieléctrica del semiconductor.

Las expresiones (1) y (2) se utilizan para junturas, mientras que (1) y (3) para capacitores MOS.

El modelo no permite obtener el perfil real para  $x < 3 L_D$ , ni cuando la concentración de impurezas varía fuertemente con la coordenada.

b) Modelo de Ziegler-Klausmman (MZK)

Este modelo toma en consideración la presencia de portadores mayoritarios en la región de carga espacial, pero las expresiones que se obtienen son aplicables solamente a perfiles constantes o suavemente variables.

Las expresiones para el cálculo del perfil para la técnica de medición de C-V de alta frecuencia y de pulso se dan en /2/, sin embargo, de forma general el modelo plantea que:

$$N(w) = \bar{n} \frac{2}{q\epsilon_s} \left[ \frac{dCD^{-2}}{d\psi_s} \right]^{-1} g_2 \quad (4)$$

$$y \quad w = \frac{\epsilon_s}{C_D} (1 - g) \quad (5)$$

donde  $\psi_s$  es el potencial superficial, y  $g_2$  y  $g$  son parámetros de corrección que se relacionan con los datos experimentales mediante ecuaciones paramétrico-trascendentes. /2/.

Este modelo permite hallar el perfil hasta la superficie ( $N(0)$ ).

c) Modelo de Kennedy y O'Brien (MKO)

Este modelo toma en consideración la no neutralidad en el volumen del semiconductor por la presencia de portadores mayoritarios, aunque no los considera en la región de carga espacial. El modelo permite un cálculo más preciso de perfiles abruptos a distancias de la superficie mayores que  $3 L_D$ .

La expresión del perfil para este modelo es: /3,5/

$$N(x) = P_0(x) - \frac{KT}{q} \frac{\epsilon_s}{q} \frac{d}{dx} \left[ \frac{1}{P_0(x)} \frac{dP_0(x)}{dx} \right]_{x=w} \quad (6)$$

y

$$P_0(x) = \bar{n} \frac{2}{q\epsilon_s} \left[ \frac{dC^{-2}}{dV} \right]^{-1} \quad (7)$$

### CÁLCULO DE LA DERIVADA $dC/dV$

---

Como puede observarse en estos tres modelos, el perfil se relaciona con la característica C-V mediante la derivada  $dC/dV$ , la cual tiene que calcularse a partir de un conjunto de puntos experimentales. Para esto se usó una aproximación polinomial para la función  $C=C(V)$ , que está dada por puntos experimentales, los cuales poseen errores de medición. La aproximación se tomó de la forma:

$$C(V) = \sum_{n=0}^M b_n P_n(V) \quad (8)$$

donde:

$b_n$  - son los coeficientes del desarrollo

$P_n(v)$  - polinomios ortogonales de Gram /6/

$M$  - grado del polinomio

La función de aproximación se obtiene empleando el método de mínimos cuadrados, y puede ser algebraicamente tratada, por lo que se deriva respecto a  $V$  para obtener la derivada  $dC/dV$  /7/.

Se realizó un estudio de la precisión con que el método de aproximación funcional permite la descripción de la curva C-V en función del número de

puntos procesados y de la región de la curva que se analiza, determinando las condiciones donde se obtenían mejores resultados /8/.

## CARACTERÍSTICAS DEL PROGRAMA

El programa permite el cálculo del perfil utilizando uno de los tres modelos físicos anteriormente expuestos, a fin de que el usuario, teniendo un conocimiento previo de las características generales de su perfil, pueda elegir el modelo más conveniente a su caso. Además permite la obtención de los perfiles a partir de la C-V de alta frecuencia y de la C-V de pulso, tanto en junturas como en capacitores.

Por la extensión del programa, el mismo está estructurado en tres bloques: el primero es el encargado de la entrada de datos y cálculo del voltaje de Banda Plana, mediante un algoritmo desarrollado a este efecto /9/, con una precisión igual al intervalo de medición de voltaje, el segundo fragmento calcula la función de aproximación y la derivada y el tercero corrige el cálculo del voltaje de Banda Plana, alcanzándose una precisión de 1mV, calcula el perfil según el modelo e imprime los resultados de forma gráfica y tabulada.

El programa está escrito en lenguaje Basic N-88. Un diagrama en bloques del mismo se muestra en la figura 1.

## RESULTADOS DE LAS CORRIDAS

A fin de poder comprobar la aproximación del cálculo del programa con respecto a los modelos de partida, se desarrollaron dos programas adicionales que calculan la curva C-V teórica de un semiconductor con un perfil constante y otro con un perfil gaussiano, para el modelo MZK y MADE respectivamente. /9/

En la figura 2 se muestran los resultados del cálculo del programa de un perfil a partir de curvas C-V teóricas en una estructura MOS con  $N=1.5E15 \text{ cm}^{-3}$ ,  $X_0=94.2 \text{ nm}$ , usando el modelo MZK y el MADE. Se observa que el perfil calculado difiere del perfil de partida en menos de 1 % de error para el caso del MZK. Para el caso del MADE se observa la subida esperada en la región cercana a la superficie y la región utilizable del perfil es muy pequeña.

En la figura 3 se muestra el perfil obtenido a partir de la curva C-V teórica para una distribución gaussiana a partir del modelo MADE con  $\sigma = 200 \text{ nm}$ ,  $R_p = 0$  y  $X_0 = 100 \text{ nm}$ ;  $N_0 = 1E17 \text{ cm}^{-3}$  y  $N_B = 1E15 \text{ cm}^{-3}$ . Se observa que el perfil calculado y el teórico difieren en menos de 1 %.

La figura 4 muestra un perfil experimental correspondiente a un capacitor MOS con  $X_0=94.2 \text{ nm}$  y 240000 micras cuadradas de área. Se observa un empobrecimiento del perfil hacia la superficie por la segregación de boro, debido a los procesos térmicos a que fue sometida la lámina.

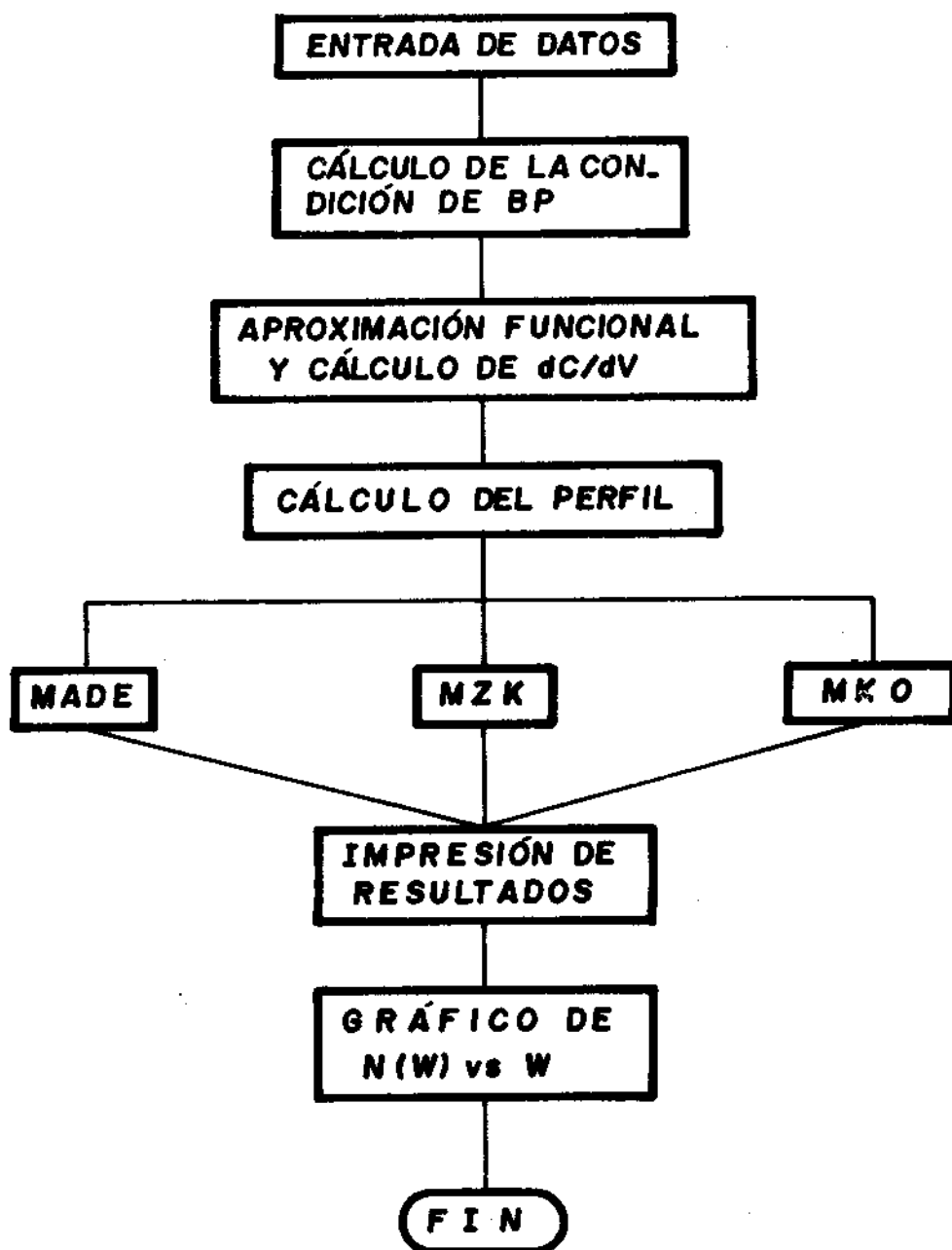


Figura 1. Diagrama en bloques del programa.

En la figura 5 se muestra un perfil implantado con boro a 30 keV de energía y  $0.18 \mu\text{C}$  de dosis, sobre un sustrato P de  $1\text{E}15 \text{ cm}^{-3}$ . La medición se realizó en un capacitor MOS con  $X_0=98 \text{ nm}$ . El empobrecimiento hacia la superficie de la concentración se debe a las causas explicadas anteriormente.

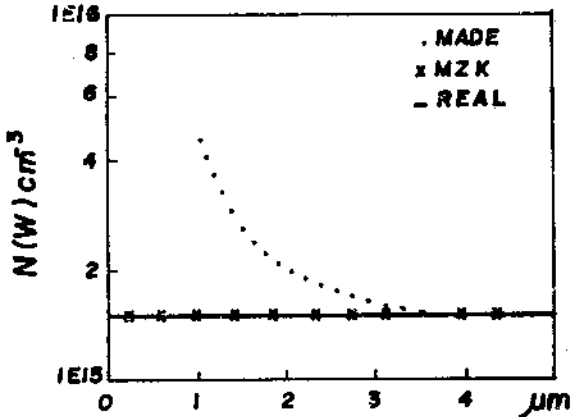


FIG. 2 - CORRIDAS CORRESPONDIENTE A UN PERFIL CONSTANTE

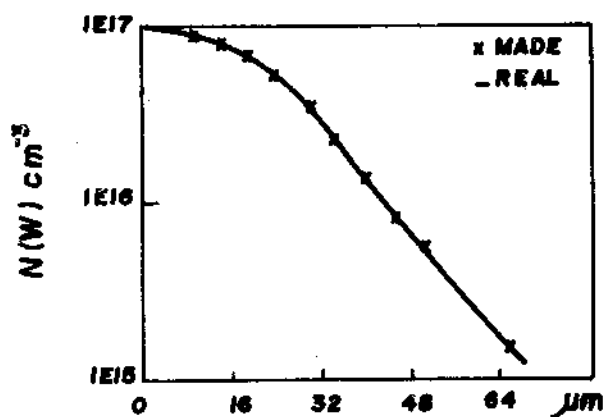


FIG. 3 - CORRIDA CORRESPONDIENTE A UN PERFIL GAUSSIANO.

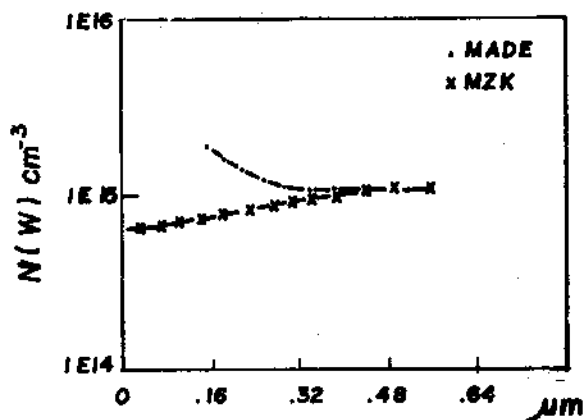


FIG. 4 - PERFIL EXPERIMENTAL.

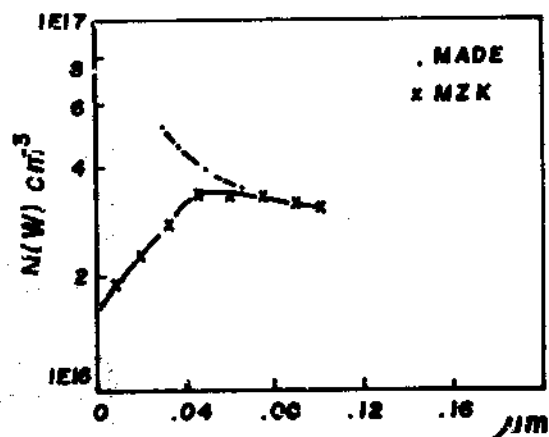


FIG. 5 - PERFIL GAUSSIANO EXPERIMENTAL

## CONCLUSIONES

Se desarrolló un programa en lenguaje Basic que permite determinar la concentración de impurezas en substratos homogéneos, así como en aquellos en que la concentración varía suave y fuertemente con la coordenada. Los resultados se muestran de forma tabulada y gráfica. El error introducido por el algoritmo de cálculo en la determinación de los perfiles es despreciable en comparación con los que se introducen por el método de medición y aproximación de los modelos.

## BIBLIOGRAFÍA

- /1/ Grove, A.S.  
Physics and technology of semiconductor devices. John Wiley & Sons, Inc. 1967, New York, Cap. 6.
- /2/ Ziegler, K. and E. Klausmman  
Solid St. Elect. vol. 18, 189 (1975).

- /3/ Kennedy, D.R. and P.C. Murley  
IBM Journal Res. Devel. 12, pag. 399 (1968).
- /4/ Baccarani, G. and M. Rudan  
Solid St. Elect., vol. 23, pag. 65, (1980).
- /5/ Kennedy, D.P. and R.R. O'Brien  
IBM Journal Res. Devel 13, pag. 212 (1969)
- /6/ Ralston, A.  
Introducción al Análisis Numérico Limusa-Wiley S.A. (1970)
- /7/ León, J.C. y M. Estrada  
Determinación de perfiles de impurezas por el método C-V. IV Conferencia Científica de Ciencias Naturales. UH enero (1984).
- /8/ León, J.C. y J.R. Carrocera  
Ajuste de curvas experimentales por Mínimos Cuadrados. Para ser publicado en la Revista Cubana de Física.
- /9/ León, J.C.  
Programa para la determinación de perfiles de impurezas en un semiconductor. Proyecto de curso, ISPJAE, febrero 1985.