

## Caracterización de sustratos de silicio de alta y baja resistividad mediante la estructura Al/SRO/Si y comparación con técnicas utilizando estructuras MOS

J. A. Luna-López, M. Aceves-Mijares, O. Malik  
 INAOE, Calle Enrique Erro no.1, Tonantzintla, Puebla  
 (Recibido: 4 de octubre de 2003; Aceptado: 15 de mayo de 2004)

Con los requerimientos de integración surgidos últimamente de manera especial en sensores optoelectrónicos, es cada vez más común el uso de sustratos de alta resistividad ( $N_d < 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ ). Sin embargo, las suposiciones normalmente consideradas para la caracterización de sustratos de baja resistividad ( $N_d > 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ ) no son válidas. El uso de métodos tradicionales para obtener la concentración del sustrato y el tiempo de generación no arroja resultados correctos, debido a efectos complejos asociados con la alta resistencia que aparece en serie con la capacitancia MOS (Metal-óxido-Semiconductor). Por lo que se proponen otros métodos a ser usados.

El presente trabajo estima la concentración de obleas de silicio de alta y baja resistividad usando métodos novedosos en estructuras MOS (Metal-Óxido-Semiconductor) y Aluminio/Óxido rico en Silicio (Silicon Rich Oxide)/Silicio (Al/SRO/Si), realizamos una comparación de estos métodos que utilizan curvas Capacitancia-Voltaje (C-V). Obtenemos la concentración para sustratos de silicio de alta resistividad en estructuras MOS, con una modificación al método de capacitancia máxima y mínima. El método empleado con estructuras Al/SRO/Si, utiliza para obtener la concentración del sustrato de silicio la aproximación de la unión inducida P-N. Otro método empleado para obtener la concentración del sustrato es mediante la región de carga espacial W en la misma estructura Al/SRO/Si. El tiempo de generación se obtiene de las curvas W-V (ancho de la región de carga espacial-Voltaje) e I-V (Corriente- Voltaje) en la estructura de Al/SRO/Si, por lo que representa una ventaja con respecto a las técnicas empleadas con capacitores MOS. Se presenta una comparación de los diferentes resultados teóricos y experimentales en sustratos de alta y Baja Resistividad con  $\text{SiO}_2$  y SRO. Los métodos propuestos son confiables y cualquiera de ellos puede ser usado para caracterizar sustratos de alta resistividad. Además, la estructura Al/SRO/Si proporciona el tiempo de vida de generación.

**Palabras clave:** MOS; Óxido de silicio rico en silicio;  $\text{SiO}_2$ ; Características C-V en alta y baja frecuencia; Tiempo de vida

Nowadays Si high Resistivity substrates ( $N_d < 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ ) are commonly used, especially in optoelectronic integrated circuits. However, standard MOS characterization methods fail to predict correctly the impurity density and the generation life time. This is due to the high resistance in series with the MOS capacitor produced by the high Resistivity of the Si substrate. To overcome this restriction, different characterization methods are proposed.

In this work low and high resistive silicon substrates are characterized using new methods. The standard MOS maximum/minimum capacitance method cannot be used to characterize high Resistivity substrates, and then a modification using low/high frequency C-V measurements is proposed. Also, using the Al/SRO/Si structure the impurity density and the lifetime is estimated. The results for both type of substrates and for the different methods are compared. It is shown that the results are similar and any of these methods produce reliable result, but the Al/SRO/Si structure has the advantage that the generation lifetime is easily obtained.

**Keywords:** MOS; Silicon oxide rich in silicon;  $\text{SiO}_2$ ; High and low frequency C-V characteristics; Lifetime

### 1. Introducción

El uso de curvas Capacitancia-Voltaje (C-V) y Capacitancia-tiempo (C-t) en estructuras Metal-Óxido-Silicio (MOS) es un método tradicional para la evaluación de la densidad de dopante del sustrato del semiconductor y del tiempo de generación mediante la recuperación del

capacitor en empobrecimiento profundo. Con el uso cada vez más común de sustratos de alta resistividad ( $N_d < 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ ), han surgido algunas dificultades con los métodos de evaluación, estas dificultades están asociadas con la alta resistencia que aparece en serie con la capacitancia MOS. Este fenómeno es bastante complejo, pero puede ser solucionado bajo ciertas condiciones. El método de

**Tabla 1.** Resultados de los diferentes sustratos en la Estructura MOS.

Valores Esperados					Valores Obtenidos Experimentalmente					
$\rho$ ( $\Omega \cdot \text{cm}$ )	$T_{ox}$ ( $\text{Å}$ )	$C_{ox}$ (pF)	$C_s$ (pF)	$C_{inv}$ (pF)	$N_d$ ( $\text{cm}^{-3}$ )	$C_{ox}$ (pF)	$C_s$ (pF)	$C_{inv}$ (pF)	$N_d$ (Método de Nicollian) ( $\text{cm}^{-3}$ )	$N_d$ (Método de Schroder) ( $\text{cm}^{-3}$ )
2 a 2.6	636	814	257	195	$2.15 \times 10^{15}$	807	257	185	$2.15 \times 10^{15}$	$2.15 \times 10^{15}$
2000 a 5000	636	814	12.6	12.4	$2.15 \times 10^{12}$	805	10.7	9.3	$1.4 \times 10^{12}$	$1.4 \times 10^{12}$
> 4000	636	814	9.6	9.5	$1 \times 10^{12}$	809	6.7	6	$0.44 \times 10^{12}$	$0.44 \times 10^{12}$

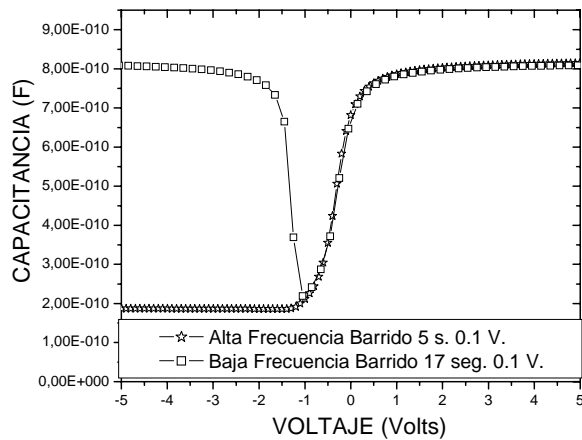


Figura 1. Curvas C-V en Alta y Baja Frecuencia de la Estructura MOS para el sustrato de baja resistividad (2-2.6 Ω-cm).

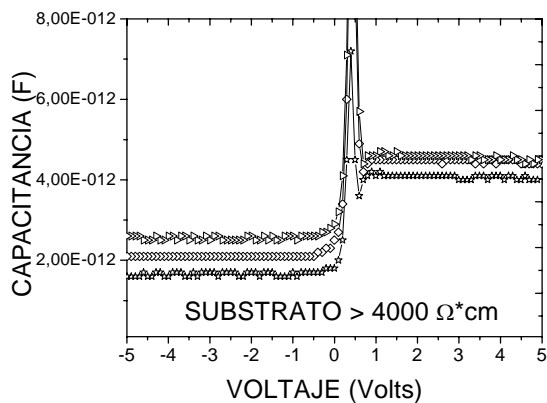
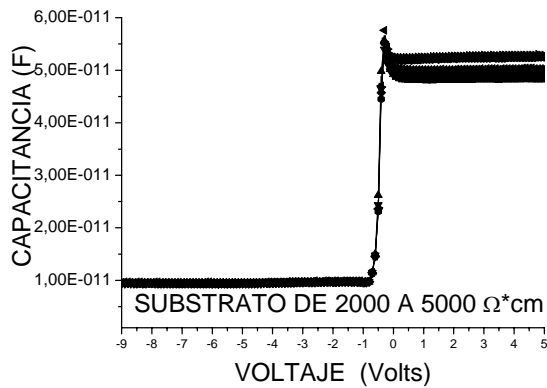


Figura 2. Curvas C-V en Alta Frecuencia del MOS para los sustratos de Alta resistividad. El valor de capacitancia máxima y mínima para el sustrato de 2000 a 5000 Ω-cm es de 50 ± 2 pF y 9.4 ± 0.5 pF, respectivamente. Para el sustrato >4000 Ω-cm es de 4.3 ± 0.3 pF y 2 ± 0.5 pF respectivamente.

capacitancia máxima y mínima aplicado a sustratos de baja resistividad da resultados muy satisfactorios para determinar la densidad de dopado del sustrato. Al utilizar este método para determinar la densidad de dopado en sustratos de alta resistividad en estructuras MOS no se determina correctamente la densidad de dopante.

Por lo tanto, se propone una variación al método de capacitancia máxima y mínima realizando mediciones C-V en alta y baja frecuencia para obtener la densidad de dopado en sustratos de alta resistividad.

Las propiedades del óxido rico en silicio (SRO) han sido extensamente estudiadas debido a sus interesantes características eléctricas [1-3]. Aprovechando estas características, Aceves et al [4] propuso que es posible caracterizar el sustrato de silicio utilizando una estructura Al/SRO/Si. En el presente trabajo se realiza un análisis de estructuras MOS con sustrato de alta y baja resistividad mediante curvas C-V en alta y baja frecuencia y se aplica el método modificado y tradicional de capacitancia máxima y mínima, para obtener la concentración en estructuras MOS. También utilizamos la estructura Al/SRO/Si para obtener la densidad de dopado mediante curvas C-V en Alta Frecuencia y el tiempo de generación. Presentamos una comparación de los diferentes resultados obtenidos para cada método en las estructuras MOS y Al/SRO/Si.

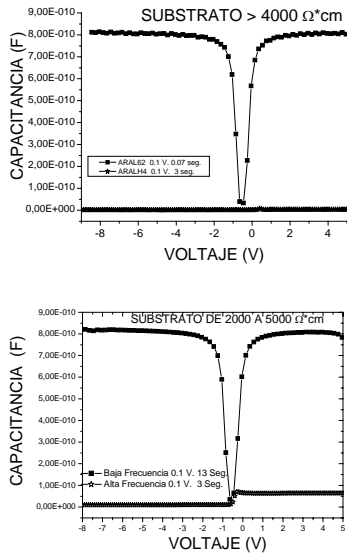
## 2. Experimento

### 2.1. Estructura MOS

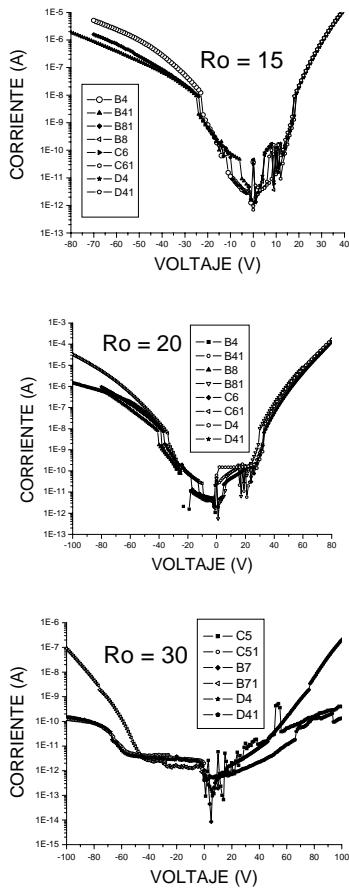
Las películas de SiO<sub>2</sub> (dióxido de silicio) fueron crecidas térmicamente en un horno de oxidación a 1000 °C, con una mezcla de gases de O<sub>2</sub> (Oxígeno) y TCE (Tricloroetileno), posteriormente se les da una aleación en N<sub>2</sub> (Nitrógeno) durante 30 minutos. Los sustratos de silicio usados fueron tipo n (100) de baja resistividad (2-2.6 Ω-cm) y alta resistividad (2000- 5000 Ω-cm y > 4000 Ω-cm). Los sustratos de alta resistividad fueron implantados con fósforo por la parte trasera (E = 150 keV, dosis = 4 x 10<sup>15</sup> cm<sup>-2</sup>). Fue evaporado aluminio por el frente y por atrás de la oblea para realizar contactos. Por el frente fue diseñado un dispositivo cuadrado con área de 1.5 x 10<sup>-2</sup> cm<sup>2</sup>.

### 2.2. Estructuras Al/SRO/Si

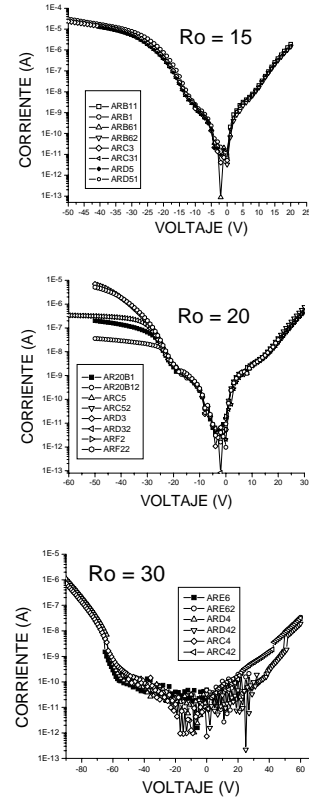
Las Películas de SRO fueron depositadas sobre obleas de silicio (100) tipo n de baja resistividad (2-5 Ω-cm) y alta resistividad (>4000 Ω-cm), en un sistema LPCVD (Low Pressure Chemical Vapor Deposition) con Silano (SiH<sub>4</sub>) y óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), como los gases reactivos a temperatura de 700 °C, la presión fue variada desde 1.93 hasta 2.51 Torr para cada Ro (15, 20 y 30) donde Ro = [N<sub>2</sub>O]/[SiH<sub>4</sub>]. Posteriormente son densificadas a 1000 °C durante 30 minutos en N<sub>2</sub>. Se diseñó un dispositivo de rejillas para las obleas de silicio de alta resistividad y un dispositivo cuadrado para las obleas de baja resistividad,



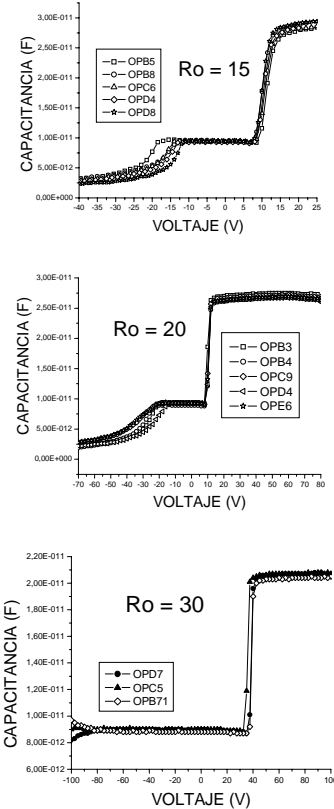
**Figura 3.** Curvas C-V del MOS en Alta y Baja Frecuencia para los substrato de Alta resistividad. El valor de capacitancia máxima es obtenido de la curva en baja frecuencia y la capacitancia mínima de la curva en Alta frecuencia. Para el substrato de 2000 a 5000  $\Omega\cdot\text{cm}$ , la capacitancia máxima y mínima es de  $805 \pm 5$  pF y  $185 \pm 3$  pF respectivamente. Para el substrato  $> 4000 \Omega\cdot\text{cm}$  la capacitancia máxima y mínima es de  $810 \pm 3$  pF y  $6 \pm 1$  pF.



**Figura 4.** Curvas I-V para  $R_o$  15, 20 y 30 en substrato de Baja resistividad (2-5  $\Omega\cdot\text{cm}$ ).



**Figura 5.** Curvas I-V para  $R_o$  15, 20 y 30 en substrato de alta resistividad ( $> 4000 \Omega\cdot\text{cm}$ ).



**Figura 6.** Curvas C-V de Alta Frecuencia para  $R_o$  15, 20 y 30 en substrato de Baja resistividad (2-5  $\Omega\cdot\text{cm}$ ).

las áreas para cada dispositivo son  $3.3 \times 10^{-2} \text{ cm}^2$  y  $9 \times 10^{-4} \text{ cm}^2$  respectivamente. En el contacto trasero fue evaporado aluminio ( $1 \mu\text{m}$ ). Posteriormente las estructuras se sinterizaron a  $450 \text{ }^\circ\text{C}$  en forming gas.

El espesor del  $\text{SiO}_2$  y SRO fue medido después del depósito usando un Elipsómetro Gaertner L117 con un láser de He-Ne a  $632.8 \text{ nm}$ .

Las características I-V y C-V fueron medidas usando un sistema controlado por computadora. La corriente se midió utilizando un electrómetro Keithley 6517 A, con una rampa de paso de voltaje de 2 segundos, la cual se aplicó a las muestras para obtener las curvas I-V. Las mediciones C-V se realizaron en un analizador C-V Keithley 590 a una frecuencia de  $100 \text{ kHz}$  y un medidor cuasiestático C-V Keithley 595 a una frecuencia  $< 10 \text{ Hz}$ . Todas las mediciones fueron realizadas en oscuridad. Para todas las estructuras se midieron al menos 5 dispositivos.

### 3. Teoría

Un método simple para determinar la densidad de dopado del semiconductor en un dispositivo MOS en equilibrio, es midiendo en alta frecuencia la capacitancia máxima del dispositivo MOS en acumulación ( $C_{ox}$ ), y la capacitancia mínima en inversión ( $C_{inv}$ ) [5]. La técnica de capacitancia máxima-mínima ha sido extensamente usada por su simplicidad. Estas mediciones se realizan en fuerte inversión, y utilizan la dependencia del ancho de la región de carga espacial de un capacitor MOS con la densidad de dopado del sustrato.

De [6], obtenemos la relación para la concentración:

$$N_d = \frac{4\phi_F}{q\epsilon_{si}\epsilon_0 A^2} \frac{C_{inv}^2}{(1 - \frac{C_{inv}}{C_{ox}})^2} = \frac{4\phi_F}{q\epsilon_{si}\epsilon_0 A^2} \frac{R^2 C_{ox}^2}{(1-R)^2} \quad (1)$$

Donde  $\phi_F$  es el potencial superficial,  $q$  es la carga electrónica,  $\epsilon_{si}$  y  $\epsilon_0$  son la permitividad dieléctrica del silicio y del vacío,  $A$  es el área del dispositivo,  $C_{ox}$  y  $C_{inv}$  son la capacitancia máxima y mínima y  $R = \frac{C_{inv}}{C_{ox}}$ .

Otro método para determinar esta concentración es el método empleado por Nicollian el cual se resuelve por iteración y la ecuación es [3]:

$$N_d = \frac{4kT(\epsilon_{ox})^2}{q^2 \epsilon_{si} (Tox)^2} \left( \frac{C_{ox}}{C_{inv}} - 1 \right)^{-2} \left( \ln\left(\frac{N}{n_i}\right) + \frac{1}{2} \ln\left(2 \ln\left(\frac{N}{n_i}\right) - 1\right) \right) \quad (2)$$

Donde,  $k$  es la constante de Boltzmann,  $q$  es la carga electrónica,  $T$  es la temperatura,  $n_i$  la concentración intrínseca y  $Tox$  espesor del óxido.

La aproximación entre los dos métodos mencionados es la aproximación propuesta para el doblamiento de la banda en la región de inversión, en este caso es aproximado al potencial de Lindner [7].

Para determinar la concentración en la estructura Al/SRO/Si consideramos la unión P-N inducida por el voltaje de compuerta [5, 8, 9], en la curva experimental C-V, donde determinamos [8]:

$$C = \sqrt{\frac{q\epsilon_s N_d}{2(\phi_B \pm V)}} \quad (3)$$

De esta ecuación obtenemos la diferencial de la capacitancia con respecto al voltaje y obtenemos la pendiente para determinar la concentración del sustrato, por lo tanto, de ecuación (3) obtenemos:

$$N_d = \frac{2}{q\epsilon_s} \frac{d(1/C^2)}{dV} \quad (4)$$

Siendo  $\frac{d(1/C^2)}{dV}$  la pendiente obtenida de las curvas  $1/C^2$ -

V. En este caso,  $\phi_B$  no tiene el mismo significado como en una unión PN, porque en una unión PN la  $\phi_B$  es el resultado de la transferencia de carga entre el semiconductor P y N, y depende solo de la concentración del sustrato. Dicho de una manera simple, el voltaje donde el comportamiento PN comienza deberá ser considerado como  $\phi_B$  para estos dispositivos [10].

Otra posibilidad utilizando la estructura Al/SRO/Si es mediante la estimación propuesta en [10]. Donde:

$$W(V) = \sqrt{\frac{2\epsilon_{si} |\phi_B - V|}{qN_d}} \quad (5)$$

Donde graficando  $W^2$  contra V obtenemos una función lineal con pendiente  $m$ , entonces:

$$N_d = \frac{2\epsilon_{si}}{qm} \quad (6)$$

#### 3.1. Tiempo de generación

En otros trabajos [4, 10, 11], ya ha sido propuesto que por debajo del voltaje de inversión, la corriente es limitada por la generación térmica en la región de deserción, entonces la corriente puede ser expresada como:

$$I = \frac{qn_i W(V)}{\tau_g} A \quad (7)$$

Entonces el tiempo de generación,  $\tau_g$ , puede ser estimado como:

$$\tau_g = \frac{qn_i W(V)}{I} A \quad (8)$$

### 4. Resultados

La Fig. 1 muestra el comportamiento típico de las curvas C-V en alta y baja frecuencia en sustrato de baja

**Tabla 2.** Resultados Experimentales Obtenidos en la estructura Al/SRO/Si.

Ro	Concentración y Tiempo de Generación en Substrato de Baja Resistividad					Concentración y Tiempo de Generación en Substrato de Alta Resistividad				
	Tox (Å)	Area (cm <sup>2</sup> )	P-N (10 <sup>15</sup> cm <sup>-3</sup> )	W (10 <sup>15</sup> cm <sup>-3</sup> )	τ (μs)	Area (cm <sup>2</sup> )	P-N (10 <sup>12</sup> cm <sup>-3</sup> )	W (10 <sup>12</sup> cm <sup>-3</sup> )	τ (ms)	
15	1167	0.0009	2.4	2.4	3.6	0.033	80	85	1.04	
20	1158	0.0009	3.2	3	4.8	0.033	8.5	8.4	2.12	
30	1445	0.0009	2.04	1.8	9.1	0.033	22	23	1.01	

resistividad. En la Fig. 2 se muestran las curvas C-V en alta frecuencia obtenidas de las estructuras MOS con substrato de alta resistividad, la capacitancia del óxido es de un valor muy bajo con respecto al obtenido en la figura 1, este efecto es debido a la alta resistividad del substrato. En la Fig. 3 se muestran las curvas C-V en alta y baja frecuencia de los substratos de alta resistividad, se observa una gran diferencia entre la capacitancia del óxido, debido a la alta resistividad que afecta las características de la capacitancia del óxido.

Para la estructura Al/SRO/Si en substrato de Alta y Baja Resistividad obtuvimos las características C-V en alta frecuencia e I-V, para cada Ro = 15, 20 y 30. En las Fig. 4 y 5 se muestran el comportamiento de la corriente a diferentes Ro. En las Fig. 6 y 7 las curvas C-V muestran diferentes comportamientos de la capacitancia para cada Ro.

**4.1. Estimación de los valores esperados para la estructura MOS**

Obtenemos el valor de la densidad de dopado del substrato del valor de la resistividad dada por el fabricante, con la siguiente relación teórica:

$$N_d = \frac{1}{q\mu\rho} \tag{9}$$

Donde q = 1.602 x 10<sup>-19</sup>Coulomb es la carga electrónica, μ = 1450 cm<sup>2</sup>/Volt-s es la movilidad del silicio a

temperatura ambiente, ρ = 2 Ω-cm es la resistividad del substrato (para alta resistividad consideramos ρ = 2000 Ω-cm y ρ = 4000 Ω-cm). y el resultado obtenido de la densidad de dopado es N<sub>d</sub> = 2.152 x 10<sup>15</sup> cm<sup>-3</sup>, el valor estimado de la capacitancia del óxido esta dado por:

$$C_{ox} = \frac{\epsilon_{ox} * A}{Tox} \tag{10}$$

Donde ε<sub>ox</sub> es la permitividad del óxido, A es el área del dispositivo (1.5 x 10<sup>-2</sup> cm<sup>2</sup>) y Tox es el espesor del óxido (636 Å), el valor obtenido es C<sub>ox</sub> = 814 pico Farads. El valor esperado de la capacitancia de inversión se obtiene de:

$$C_{inv} = \frac{C_{ox}C_s}{C_{ox} + C_s} \tag{11}$$

Los valores esperados obtenidos para los tres diferentes substratos se listan en Tabla I.

**4.2. Resultados de la Estructura Al/SRO/Si**

Para obtener la densidad de dopado del substrato de baja resistividad medimos la curva en alta frecuencia. Con los datos experimentales de la curva C-V en alta frecuencia (C<sub>ox</sub> y C<sub>min</sub>) realizamos los cálculos de acuerdo con ecuación (2). Por ejemplo, para el substrato con ρ = 2-2.6 Ω-cm, de la curva experimental C-V tenemos que C<sub>ox</sub> = 807 picoFarads y C<sub>inv</sub> = 185 picoFarads, sustituimos estos

**Tabla 3.** Comparación de los métodos empleados para obtener la concentración en la estructura MOS y Al/SRO/Si.

Métodos	Estructura MOS			Estructura Al/SRO/Si					
	ρ (Ω*cm)			ρ =2 a 5 (Ω*cm)			ρ > 4000 (Ω*cm)		
	2 a 2.6	2000 a 5000	> 4000	Ro = 15	Ro = 20	Ro = 30	Ro = 15	Ro = 20	Ro = 30
Nicollian (cm <sup>-3</sup> )	2.1 x 10 <sup>15</sup>	1.4 x 10 <sup>12</sup>	0.44 x 10 <sup>12</sup>	√	√	√	√	√	√
Schroder (cm <sup>-3</sup> )	2.1 x 10 <sup>15</sup>	1.4 x 10 <sup>12</sup>	0.44 x 10 <sup>12</sup>	√	√	√	√	√	√
P-N (cm <sup>-3</sup> )	√	√	√	2.4 x 10 <sup>15</sup>	3.2 x 10 <sup>15</sup>	2.04 x 10 <sup>15</sup>	80 x 10 <sup>12</sup>	8.5 x 10 <sup>12</sup>	22 x 10 <sup>12</sup>
W (cm <sup>-3</sup> )	√	√	√	2.4 x 10 <sup>15</sup>	3 x 10 <sup>15</sup>	1.8 x 10 <sup>15</sup>	85 x 10 <sup>12</sup>	8.4 x 10 <sup>12</sup>	23 x 10 <sup>12</sup>

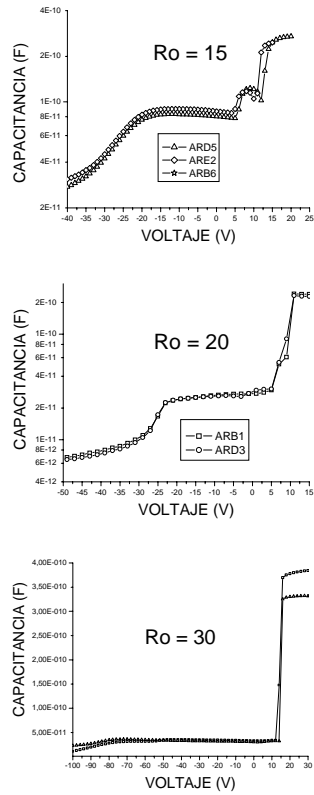


Figura 7. Curvas C-V de Alta Frecuencia para Ro 15, 20 y 30 en sustrato de alta resistividad (> 4000 Ω-cm)..

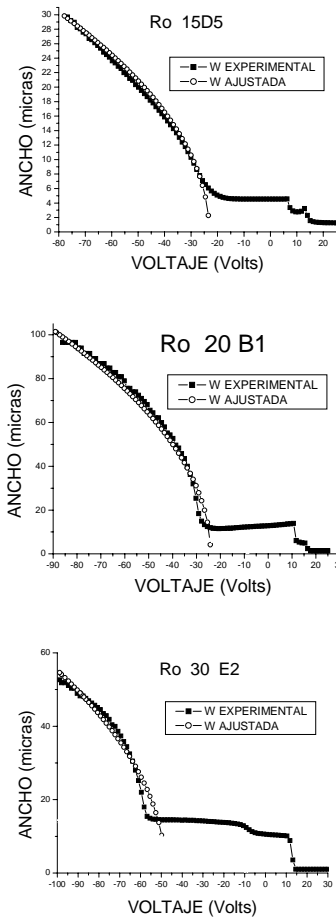


Figura 9. Ancho de desorción como una función del Voltaje usando la aproximación PN, a) Muestra 15D5,  $C_B = 8 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ ,  $\phi_b = -23 \text{ V}$ ., b) Muestra 20B1,  $C_B = 8.5 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ ,  $\phi_b = -21.7 \text{ V}$ . c) Muestra 30E2,  $C_B = 2.2 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ ,  $\phi_b = -48 \text{ V}$ .

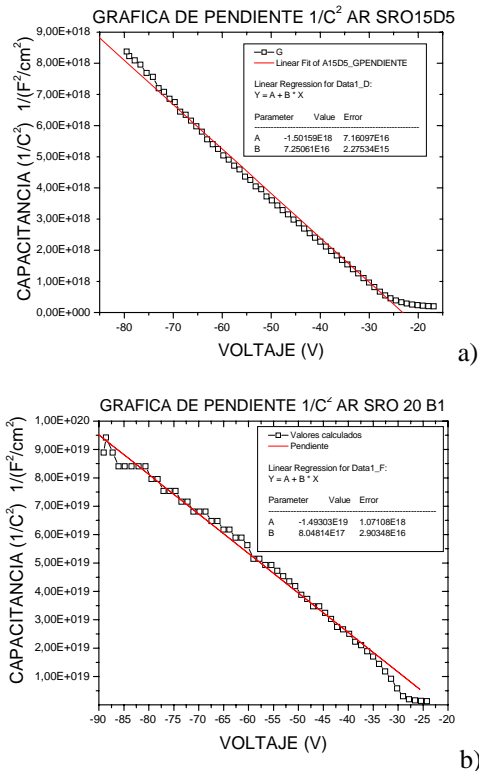


Figura 8. Graficas para obtener la pendiente,  $\phi_B$  y la concentración del sustrato por medio de la unión inducida p-n para a) Ro =15, y b) Ro = 20.

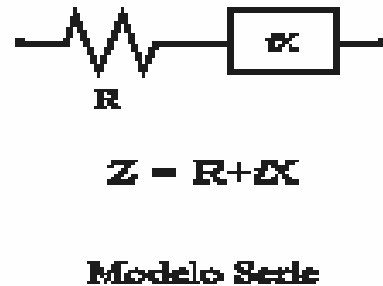


Figura 10. Arreglo de la impedancia Serie.

valores en la ecuación (2) y obtenemos la concentración de  $N_d = 2.15 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ , de aquí calculamos el potencial de Fermi ( $\phi_F = 0.308 \text{ Volts}$ ) y el potencial superficial  $\phi_{s(\text{inv})} = 2\phi_F$ , ( $\phi_s = 0.616 \text{ Volts}$ ),  $W = 0.613 \mu\text{m}$  (micras), de manera similar se obtiene la densidad de dopante por el método de

Schroder. En substratos de alta resistividad no es posible obtener la concentración de la curva C-V de alta frecuencia, debido al efecto de alta resistividad del sustrato, por lo que se modifica el método de capacitancia máxima y mínima, empleando curvas en alta y baja frecuencia. Por ejemplo, para el sustrato con  $\rho = 2000\text{-}5000 \Omega\text{-cm}$ , de la curva C-V en baja frecuencia obtenemos el valor de  $C_{ox} = 805 \text{ pF}$  y de la curva C-V en alta frecuencia obtenemos el valor de  $C_{inv} = 9.3 \text{ pF}$ , sustituyendo estos valores en ecuación (2) obtenemos la concentración de  $N_d = 1.4 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ . En la Tabla I concentramos los valores promedio obtenidos de los diferentes substratos en varios dispositivos medidos.

#### 4.3. Resultados Experimentales de la Estructura MOS

De las mediciones I-V y C-V en la estructura Al/SRO/Si se calculó la concentración de donadores y el tiempo de generación utilizando los métodos mencionados en la sección de teoría. Para obtener la concentración, realizamos curvas  $1/C^2\text{-V}$  de las curvas C-

V en alta frecuencia, consideramos que la región de la unión inducida P-N comienza después de la región de inversión, en esta región se determina la pendiente como se muestra en la Fig. 8, y sustituimos en ecuación (4) obteniendo la densidad de dopado del sustrato. Para el método de la región de carga espacial (W), mediante la ecuación  $W = \frac{\epsilon_{si} A}{C}$ , obtenemos la curva W-V como se

muestra en la Fig. 9, donde  $\epsilon_{si}$  es la permitividad dieléctrica del silicio, A es el área del dispositivo y C es la capacitancia obtenida experimentalmente, ahora de la curva  $W^2\text{-V}$  determinamos la región lineal y obtenemos la pendiente, la cual sustituimos en ecuación (6) y calculamos la concentración. Para obtener el tiempo de generación, por ejemplo, para  $R_o = 15$  en sustrato de alta resistividad, se consideran los valores para I y W a un voltaje de  $-10 \text{ volts}$ , donde la curva W-V se obtuvo del caso mencionado anteriormente, siendo  $I = 3.39 \times 10^{-11} \text{ A}$ ., y  $W = 4.63 \mu\text{m}$ ., sustituimos estos valores en la ecuación (7), y obtenemos  $\tau_g = 1.04 \text{ ms}$ . En la Tabla II se listan los valores obtenidos por los métodos mencionados anteriormente.

## 5. Discusión

Una técnica simple para determinar la densidad de dopado del semiconductor en un dispositivo MOS en equilibrio, es midiendo la capacitancia máxima en acumulación  $C_{ox}$  y la capacitancia mínima en inversión  $C_{inv}$  en una curva C-V de Alta Frecuencia. Esta técnica de capacitancia máxima-mínima es extensamente usada por su

simplicidad, la cual funciona correctamente para substratos de baja resistividad, como se muestra en los resultados obtenidos en el presente trabajo. Al aplicar esta técnica a substratos de alta resistividad en dispositivos MOS, la capacitancia máxima medida en alta frecuencia no se aproxima al valor esperado, debido al efecto de la alta resistividad del sustrato, lo cual modifica las curvas C-V obtenidas experimentalmente. La explicación es la siguiente, el analizador Keithley 590 considera al dispositivo bajo prueba como un arreglo en serie de una resistencia y una capacitancia como se muestra en la Fig. 10 [13]. Por lo cual  $Z = R + iX$ , donde Z es la impedancia con parte real igual a R (resistencia) y parte imaginaria igual a X (reactancia). Si se asume que la reactancia X es capacitiva, puede sustituirse por el término  $-\frac{1}{wC_s}$ , siendo

w la frecuencia angular de la señal aplicada para la prueba (en nuestro caso,  $w = 2\pi(100 \times 10^3) \text{ rad/seg}$ ). Cuando el sustrato es de baja resistividad se cumple la condición  $R_s \ll \frac{1}{wC}$  [14, 15]. Por lo que  $C_{ox}$  es medida con precisión.

En substratos de alta resistividad esta condición no se cumple, y la  $C_{ox}$  medida pierde validez. Para cumplir esta condición utilizamos el medidor cuasiestático, el cual opera a muy baja frecuencia ( $< 10 \text{ Hz}$ ). De la curva C-V en baja frecuencia obtenemos la capacitancia  $C_{ox}$  y la capacitancia  $C_{inv}$  de la curva C-V en alta frecuencia, como se muestra en la Fig. 3. Como se observa en las curvas C-V de Alta y baja frecuencia, la  $C_{inv}$  se considera correcta.

En la estructura Al/SRO/Si obtuvimos la concentración del sustrato, utilizando aproximaciones que aprovechan la corriente a través del SRO y la unión PN inducida por el voltaje aplicado. Como se muestra, en substratos de baja resistividad se calcula la concentración de impurezas con precisión y en concordancia con otros métodos. Cuando el sustrato es de alta resistividad una vez más las curvas C-V en alta frecuencia se comportan diferentes a las obtenidas en substratos de baja resistividad. Como se puede observar la capacitancia máxima tiene un valor menor al esperado, especialmente para  $R_o 15$  y  $20$ . Sin embargo, al contrario de los métodos que utilizan el capacitor MOS, esto no afecta el cálculo. Por otro lado, debido al intercambio de carga entre el sustrato y el SRO [16], las graficas C-V en alta frecuencia también se afectan en la región de inversión superficial, particularmente para  $R_o 15$ , una vez más esto no es significativo para los resultados. Al realizar la comparación de los métodos empleados en Tabla III, se observa que los resultados son similares, por lo que cualquiera de estos métodos podría usarse como un estimador de las características del sustrato de alta resistividad. Sin embargo, una ventaja de utilizar la estructura Al/SRO/Si para caracterizar el sustrato es que el tiempo de generación puede ser obtenido en forma simple.

Por otro lado, las mediciones con el método combinado cuasiestático y de alta frecuencia son la solución para el problema de la alta resistencia que se presenta en

estructuras MOS con sustrato de alta resistividad. Al combinar mediciones C-V en alta y baja frecuencia, obtenemos la capacitancia máxima ( $C_{ox}$ ) de la curva de baja frecuencia y la capacitancia mínima ( $C_{inv}$ ) en la curva de alta frecuencia, lo cual proporciona el valor de la concentración en sustratos de alta resistividad y su aplicación es tan sencilla como la misma técnica

Los tiempos de generación obtenidos están dentro del rango esperado, para el sustrato de baja resistividad el tiempo de vida esta en acuerdo con resultados reportados en experimentos anteriores [17], y el de alta resistividad coincide con lo estimado por el fabricante (1 a 4 ms). Por lo tanto consideramos que el método empleado puede utilizarse para estimar el tiempo de generación.

## 6. Conclusiones

Se caracterizaron estructuras MOS en sustrato de alta y baja Resistividad para determinar la densidad de dopado. Se determino que la técnica de capacitancia máxima y mínima aplicada en sustratos de baja resistividad es adecuada para la obtención de la densidad de dopado del semiconductor. Para sustratos de alta resistividad hemos modificado esta técnica, mediante curvas C-V en alta y baja frecuencia, midiendo en graficas de alta frecuencia la capacitancia de inversión ( $C_{inv}$ ) y en la curva cuasiestática el valor de la capacitancia máxima ( $C_{ox}$ ), así determinamos la densidad de dopado del sustrato de alta resistividad. Se obtuvieron las curvas características I-V y C-V para sustratos de baja y alta resistividad en la estructura Al/SRO/Si para diferentes valores de  $R_o$ . En estructuras Al/SRO/Si, mediante la unión inducida P-N se obtuvo la densidad de dopado del sustrato, utilizando las curvas  $1/C^2-V$ .

Se realizan las curvas W-V para cada  $R_o$ , con el fin de obtener el valor de W y con las curvas I-V poder determinar el tiempo de generación.

Se realiza una comparación de los métodos analizados para obtener la densidad de dopado del sustrato. Los métodos propuestos demostraron que pueden ser utilizados eficazmente para obtener la densidad de dopado en sustratos de Alta y Baja Resistividad. Además, el método utilizando SRO permite estimar el tiempo de generación para sustratos de alta y baja resistividad.

## Agradecimientos

Damos las gracias a Pablo Alarcón, Mauro Landa, Carlos Zúñiga, Ignacio Juárez, Netzhuacoyotl Carlos, por la ayuda prestada en la preparación de las muestras. Proyecto apoyado por CONACYT.

## Referencias

- [1] Kalnitsky, A. R. Boothroyd, J. P. Ellul. *Solid-State Electronics* **33**, 893 (1990).
- [2] M. Aceves, C. Falcony, A. Reynoso, W. Calleja, A. Torres. *Solid-State Electronics* **39**, 637 (1996).
- [3] M. Aceves, C. Falcony, J. A. Reynoso, W. Calleja, R. Pérez. *Material science in semiconductor processing* **2**, 173 (1999).
- [4] M. Aceves, C. Falcony, A. Reynoso, W. Calleja, R. Pérez, J. de la Hidalga. *CIE-96*, 340 (1981).
- [5] B.E. Deal, A.S. Grove, E.H. Snow, and C.T. Sah. *J. Electrochem. Soc.* **112**, 308 (1965).
- [6] Schroder, D. K., *Semiconductor Material and Device Characterization*, 2<sup>nd</sup> Edition, John Wiley & Sons, USA, 73 (1998).
- [7] R. Lindner, *Bell Sist. Tech. Journal.* **41**, 803 (1962).
- [8] S. M. Sze. "Physics Semiconductor Devices", John Wiley & Sons Second Edition. Murray Hill, New Jersey, (1981).
- [9] Uri Macias, Mariano Aceves et al *CIE* **2003**, 123. (2003).
- [10] J. Alberto Luna-López, Mariano Aceves-Mijares, Jesús Carrillo-López, Richard Glaenger, Estudio de las propiedades electro-ópticas de la estructura Al/SRO/Si. Octava conferencia de Ingeniería Eléctrica, 401, *CIE-2002*.
- [11] M. Aceves, R. Glaenger, J. Carrillo, A. Malik, A. Luna. *J. Vac. Sci. Technol. B* **20**, (2002).
- [12] E.H. Nicollian and J.R. Brews. *Physics and Technology*, John Wiley & Sons, USA, 407 (1982).
- [13] Keithley Instruments; *Analizer C-V Keithley 590*, Inc. (1992).
- [14] C. T. Sah, A. B. Atole and R. F. Pierret. *Solid-State Electronics*, **12**, 689 (1969).
- [15] M. Estrada del Cueto and A. C. Altuzarra. *Solid-State Electronics*, **39**, 1519 (1996).
- [16] Zhenrui Yu, Mariano Aceves, Jesús Carrillo y Francisco Flores. *Nanotechnology* **14**, 959 (2003).
- [17] P. Peykov, T. Dias, M. Aceves. *Revista Mexicana de Física*, **46**, 485 (2000).