

# Sensores de presión en silicio: una revisión

M. ACEVES-MIJARES Y F. SANDOVAL-IBARRA

*Laboratorio de Microelectrónica*

*Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica*  
*Apartados postales 51 y 216, 72000 Puebla, Pue., México*

Recibido el 14 de diciembre de 1992; aceptado el 15 de marzo de 1994

**RESUMEN.** Se presenta una revisión de los sensores de presión que usan las propiedades piezorresistiva y de micromaquinado del silicio (Si). Se muestran los principios físicos, los sensores más comunes, sus aplicaciones, consideraciones de diseño y diferentes estructuras alternativas para fabricar esta clase de transductores.

**ABSTRACT.** We present a review of the pressure sensors, which use the silicon piezoresistive effect and micromachining technique. Typical pressure sensors, applications, design and other different structures are presented.

PACS: 29.40.p; 85.30

## 1. INTRODUCCIÓN

Las técnicas estándar de fabricación de circuitos integrados (CI) en Si han permitido que se desarrollen diferentes tipos de transductores que aprovechan tanto las características de los semiconductores así como la miniaturización. En particular, los sensores de presión en Si debido a sus características, que incluyen biocompatibilidad y relativa facilidad de fabricación, tienen gran demanda y están en constante estudio y desarrollo.

Este trabajo muestra una recopilación de las características mecánicas, eléctricas y los principios físicos de los sensores de presión, presentando un panorama completo para todo aquel lector interesado en el diseño de sensores, así como para quienes se quieren introducir en este campo y desean tener un panorama completo en una sola referencia.

## 2. PIEZORRESISTIVIDAD DEL SILICIO

A partir de que Smith [1] publicó resultados experimentales de piezorresistencia (PR) en materiales semiconductores, una intensa investigación se inició para determinar sus propiedades y su dependencia con la temperatura, concentración de impurezas, etc. La piezorresistencia es el cambio de resistividad que experimenta un material debido a una presión aplicada  $P$ . La presión genera pequeños cambios dimensionales que causan cambios en la resistividad  $\rho$ . Las variaciones en  $\rho$  son causadas por los cambios en la movilidad o en el número de portadores de carga [2]. En materiales semiconductores, la presión provoca un cambio  $\delta v$  en el volumen induciendo un cambio  $\delta E_g$  en la región prohibida

$E_g$  del material. De esta manera, existe un número mayor de portadores en la banda de conducción.

El análisis de la PR puede partir de la ley de Ohm. Si ocurre un cambio en la resistividad  $\rho$  debido a  $P$ , entonces se experimenta un cambio en el campo eléctrico  $E$ , y si la densidad de corriente  $J$  permanece constante, se obtiene la ecuación

$$\frac{\delta E_i}{\rho} = \Delta_{ij} J_j \tag{1}$$

donde

$$\Delta_{ij} = \frac{1}{\rho} (\delta\rho)_{ij}. \tag{2}$$

Aquí  $(\delta E)_i$  es el cambio en  $E$  y  $(\delta\rho)_{ij}$  es una matriz  $3 \times 3$  simétrica que representa el cambio en  $\rho$ . La matriz  $\Delta_{ij}$  consta de nueve elementos, de los cuales seis son diferentes [3]. Cuando éstos se representan como una matriz renglón,

$$\Delta = [\Delta_{11} \quad \Delta_{22} \quad \Delta_{33} \quad \Delta_{23} \quad \Delta_{31} \quad \Delta_{12}]^T, \tag{3}$$

$\Delta_{ij}$  y una tensión mecánica aplicada  $\sigma$  están relacionados por

$$\Delta = \pi \sigma, \tag{4}$$

donde  $\pi$  es una matriz  $6 \times 6$  que contiene los coeficientes piezorresistivos (CP) fundamentales [1].

Para ejes coordenados alineados con los ejes,  $\langle 100 \rangle$ . En una estructura de diamante o de zinc-blenda, la matriz  $\pi$  tiene la forma siguiente:

$$\pi = \begin{pmatrix} \pi_{11} & \pi_{12} & \pi_{12} & 0 & 0 & 0 \\ \pi_{12} & \pi_{11} & \pi_{12} & 0 & 0 & 0 \\ \pi_{11} & \pi_{12} & \pi_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \pi_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \pi_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \pi_{44} \end{pmatrix} \tag{5}$$

A partir de los coeficientes fundamentales se han calculado los coeficientes piezorresistivos para casos particulares. Así los coeficientes piezorresistivos longitudinal  $\pi'_{11}$  y transversal  $\pi'_{12}$ , reportados por Smith en 1954, se pueden representar en función de los CP fundamentales de acuerdo a los trabajos de Pfann y Thurston [5], de la siguiente manera:

$$\pi'_{11} = \pi_{11} - 2(\pi_{11} - \pi_{12} - \pi_{44})(l_1^2 m_1^2 + l_1^2 n_1^2 + m_1^2 n_1^2), \tag{6}$$

$$\pi'_{12} = \pi_{12} + 2(\pi_{11} - \pi_{12} - \pi_{44})(l_1^2 l_2^2 + m_1^2 m_2^2 + n_1^2 n_2^2), \tag{7}$$

TABLA I. Coeficientes  $\pi'$  para diferentes direcciones cristalográficas.

Dirección longitudinal	$\pi'_{11}$	Dirección transversal	$\pi'_{12}$
001	$\pi_{11}$	010	$\pi_{12}$
001	$\pi_{11}$	110	$\pi_{12}$
111	$\frac{1}{3}[\pi_{11} + 2\pi_{12} + 2\pi_{44}]$	111	$\frac{1}{3}[\pi_{11} + 2\pi_{12} + 2\pi_{44}]$
111	$\frac{1}{3}[\pi_{11} + 2\pi_{12} + 2\pi_{44}]$	112	$\frac{1}{3}[\pi_{11} + 2\pi_{12} + 2\pi_{44}]$
110	$\frac{1}{2}[\pi_{11} + \pi_{12} + \pi_{44}]$	111	$\frac{1}{3}[\pi_{11} + 2\pi_{12} + 2\pi_{44}]$
110	$\frac{1}{2}[\pi_{11} + \pi_{12} + \pi_{44}]$	001	$\pi_{12}$
110	$\frac{1}{2}[\pi_{11} + \pi_{12} + \pi_{44}]$	110	$\frac{1}{2}[\pi_{11} + \pi_{12} + \pi_{44}]$
110	$\frac{1}{2}[\pi_{11} + \pi_{12} + \pi_{44}]$	112	$\frac{1}{6}[\pi_{11} + 5\pi_{12} - \pi_{44}]$
112	$\frac{1}{2}[\pi_{11} + \pi_{12} + \pi_{44}]$	110	$\frac{1}{6}[\pi_{11} + 5\pi_{12} - \pi_{44}]$
110	$\frac{1}{2}[\pi_{11} + \pi_{12} + \pi_{44}]$	221	$\frac{1}{9}[4\pi_{11} + 5\pi_{12} - 4\pi_{44}]$
221	$\pi_{11} - \frac{16}{27}[\pi_{11} - \pi_{12} - \pi_{44}]$	110	$\frac{1}{9}[4\pi_{11} + 5\pi_{12} - 4\pi_{44}]$

TABLA II. Coeficiente  $\pi'$  como función de  $\pi_{11}$  y  $\pi_{44}$ .

Dirección longitudinal	Tipo-n $\pi'_{11}$	Tipo-p $\pi'_{11}$	Dirección transversal	Tipo-n $\pi'_{12}$	Tipo-p $\pi'_{12}$
001	$\pi_{11}$	0	001	$-\pi_{11}/2$	0
001	$\pi_{11}$	0	110	$-\pi_{11}/2$	0
111	0	$2\pi_{44}/3$	110	0	$-\pi_{44}/3$
111	0	$2\pi_{44}/3$	112	0	$-\pi_{44}/3$
110	$\pi_{11}/4$	$\pi_{44}/2$	111	0	$-\pi_{44}/3$
110	$\pi_{11}/4$	$\pi_{44}/2$	001	$-\pi_{11}/2$	0
110	$\pi_{11}/4$	$\pi_{44}/2$	110	$\pi_{11}/4$	$-\pi_{44}/2$
110	$\pi_{11}/4$	$\pi_{44}/2$	112	$-\pi_{11}/4$	$-\pi_{44}/6$
112	$\pi_{11}/4$	$\pi_{44}/2$	110	$-\pi_{11}/4$	$-\pi_{44}/6$

donde  $l$ ,  $m$  y  $n$  representan cosenos directores [6]. Además, los CP  $\pi'_{11}$  y  $\pi'_{12}$  para diversas direcciones cristalográficas se dan en función de los CP fundamentales en la Tabla I [5], y en la Tabla II se muestran los valores obtenidos como una función de los CP  $\pi_{11}$  y  $\pi_{44}$  [7].

C. Herring obtiene las expresiones para los CP para pequeñas tensiones en Si tipo n [10]. En las Ecs. (8) se muestra el coeficiente longitudinal y su relación con  $\pi_{12}$  y  $\pi_{44}$ :

$$\pi_{11} = \pi_{11}(0) \frac{F_{(y+1)/2(n)}}{F_{(y-1)/2(n)}}$$

$$\pi_{12} = -\frac{\pi_{11}}{2}, \quad (8)$$

$$\pi_{44} = 0,$$

$$\pi_{11}(0) = \frac{2\Xi_{\mu}(\kappa - 1)}{3(C_{11} - C_{12})(2\kappa + 1)kT}. \quad (9)$$

$\Xi_{\mu}$  es el potencial de deformación,  $C_{11}$  y  $C_{12}$  son constantes cuyos valores son  $1.675 \times 10^{12}$  y  $0.650 \times 10^{12}$  dinas/cm<sup>2</sup> respectivamente [11];  $\kappa = \mu_{\perp}/\mu_{\parallel}$  es la movilidad anisotrópica y  $\eta$  el nivel de Fermi reducido [12].

En estas expresiones se supone que la dispersión de los portadores de carga se describe a través de un tiempo de relajación  $\tau$  que depende de la energía  $E$  de la siguiente forma:

$$\tau = \tau(0)E^y, \quad (10)$$

donde  $y$  es un factor de ajuste que depende de la concentración de impurezas.

Tufte *et al.* [13] usaron este modelo y experimentaron en muestras de Si tipo n con concentraciones de impurezas de  $10^{15}$  a  $10^{20}$  átomos/cm<sup>-3</sup>. La variación de  $\pi_{11}$  con la concentración de impurezas y con la temperatura se muestra en la Fig. 1. Éstas corresponden a valores de  $\eta$  suponiendo una banda parabólica, la relación de  $\eta$  con la concentración de impurezas  $N$  está dada por

$$\eta \left[ \frac{3}{\pi} \right]^{2/3} \left[ \frac{h^2}{8m_0kT} \right] N^{2/3}, \quad (11)$$

donde  $m_0$  es la masa efectiva. La Fig. 2 es una gráfica de  $\pi_{11}$  en función de la concentración de impurezas y  $y$ .

A partir de estas gráficas calculan  $\pi_{11}(0)$  a bajas temperaturas (77 K) y bajas concentraciones. A concentraciones altas consideran que  $\pi_{11}(0)$  varía con la concentración, lo que produce la variación de  $\pi'_{11}$ . Mientras que para explicar la dependencia de  $\pi'_{11}$  con la temperatura, se concluye que es el potencial de deformación el que depende de ella, de acuerdo con la relación que se muestra en la Ec. (12), donde  $\alpha$  tiene el valor de  $1.4 \times 10^{-3}$  K<sup>-1</sup> para bajas temperaturas (menor a 100 K):

$$\Xi_{\mu} = \Xi_0(1 + \alpha T). \quad (12)$$

En resumen para semiconductores de banda indirecta como el silicio y el germanio, se sabe que: 1) la PR es positiva cuando se usa compresión, *i.e.* cuando al sensor se le aplican dos fuerzas de dirección contraria por ambas caras comprimiéndolo, y negativa cuando se usa presión, es decir cuando se le aplica una fuerza por una sola cara que lo deforma [8]; 2) en capas difundidas la PR es independiente de la profundidad de unión  $x_j$  [4]; y 3) presenta una no linealidad con la temperatura y con la concentración de impurezas [3] (véase la Fig. 1).

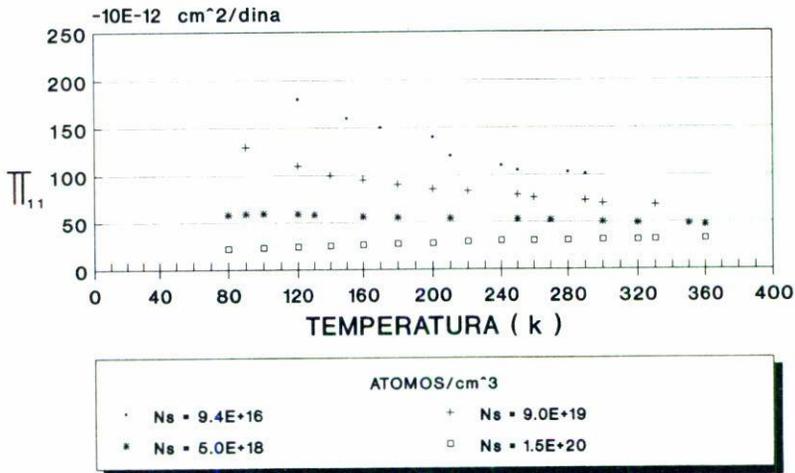


FIGURA 1. Coeficiente piezorresistivo longitudinal vs. temperatura para silicio tipo n, para diversas concentraciones de impurezas [3].

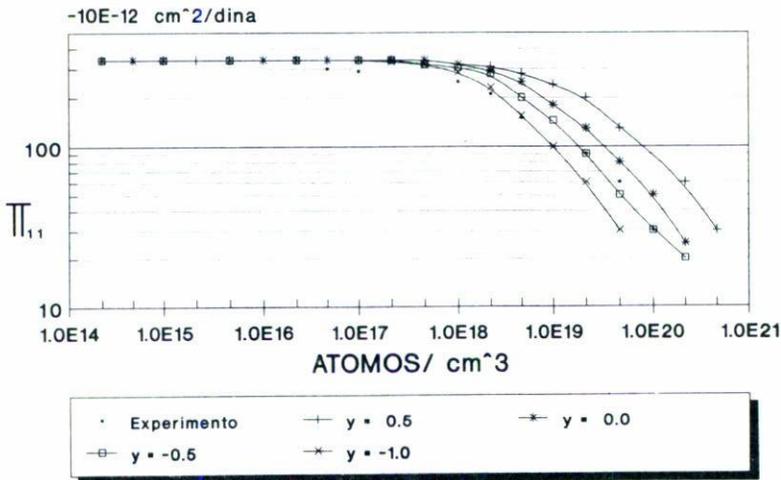


FIGURA 2.  $\pi_{11}$  como función de la concentración de impurezas [3].

### 3. DISPOSITIVOS DE EFECTO PIEZORRESISTIVO

Con el conocimiento de la PR en materiales semiconductores y a partir de que Fulker-son [13] en 1969 reportó la fabricación de un sensor de fuerza con circuitería de control integrada, una gran cantidad de dispositivos fueron apareciendo; por ejemplo, el desarrollo de un transductor extensométrico con alta linealidad en la respuesta [14]; un transductor de presión digital para aplicación industrial [15]; desarrollo de un sensor de presión de diafragma con circuitería bipolar para aplicación biomédica [16]; desarrollo de un sensor de presión con tecnología MOS [17], etc.

La posibilidad de fabricar diafragmas delgados de silicio para sensar baja presión, como la intravenosa y la urinaria, provocó el desarrollo que hoy tienen estos transductores [18].

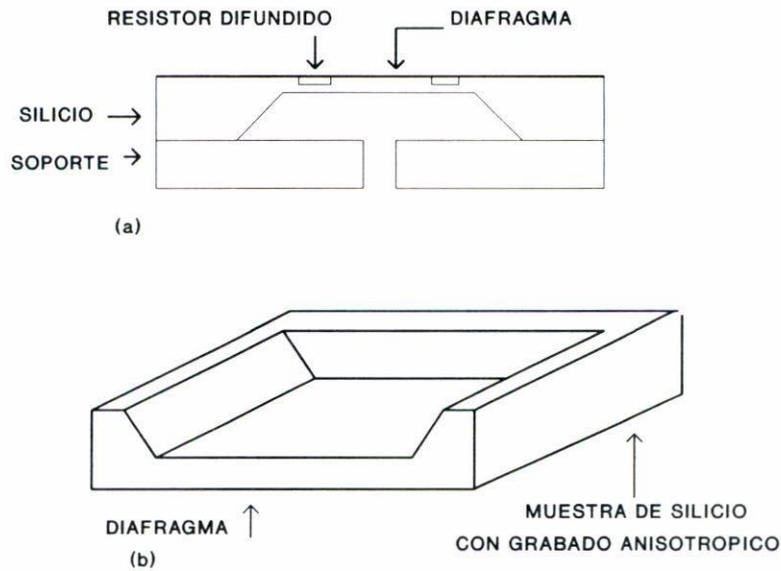


FIGURA 3. (a) Sensor de presión piezorresistivo. (b) Corte transversal que muestra el diafragma obtenido con ataque anisotrópico.

El elemento sensor es un diafragma de Si que tiene resistores difundidos de valor  $R$  conectados como puente de Wheatstone, de manera que al aplicar una presión el puente resistivo genera una señal  $V_{out}$  que es proporcional a la presión aplicada.

Para la obtención de un diafragma delgado de Si de grosor  $h$  se requiere de grabado anisotrópico [19]. Para grabar Si y obtener microestructuras se deben de considerar tres puntos fundamentales: 1) perfección cristalográfica del material a grabar; 2) la mascarilla que contiene la geometría del patrón debe estar perfectamente alineada con el sustrato; y 3) tener control del grabado [20]. La sensibilidad de estos sensores depende de la calidad cristalina y del control sobre el grosor del diafragma [21]. Un diafragma se obtiene grabando la parte posterior de la oblea (véase la Fig. 3b).

Diversas técnicas han surgido para la realización de diafragmas delgados ( $10\text{--}20\ \mu\text{m}$ ) en Si [21,22,23,24]. Todas concluyen en tener un diafragma muy delgado con geometría cuadrada o circular. La estructura típica de un sensor que usa el efecto piezorresistivo tiene la forma que se muestra en la Fig. 3a. En ella se ve un corte transversal y el resultado del ataque realizado al sustrato para la obtención del diafragma, así como los resistores difundidos. Toda la estructura está montada sobre un soporte que puede o no tener una perforación que comunique la cavidad con el exterior; si ocurre lo primero, el dispositivo mide presión diferencial, y cuando sucede lo segundo, el transductor sensa presión absoluta.

Un sensor de presión piezorresistivo tiene una dependencia directa de las propiedades del material usado para su fabricación. Las características físicas del material gobiernan la respuesta del diafragma a la presión aplicada, además la respuesta a la presión depende de la naturaleza de la estructura y de su rigidez. La montura o base en la cual está apoyado el sensor, es de las primeras consideraciones de importancia. Una montura de tipo absorbente separa al sensor de las presiones externas, de manera que el diafragma sólo es afectado por la presión de interés.

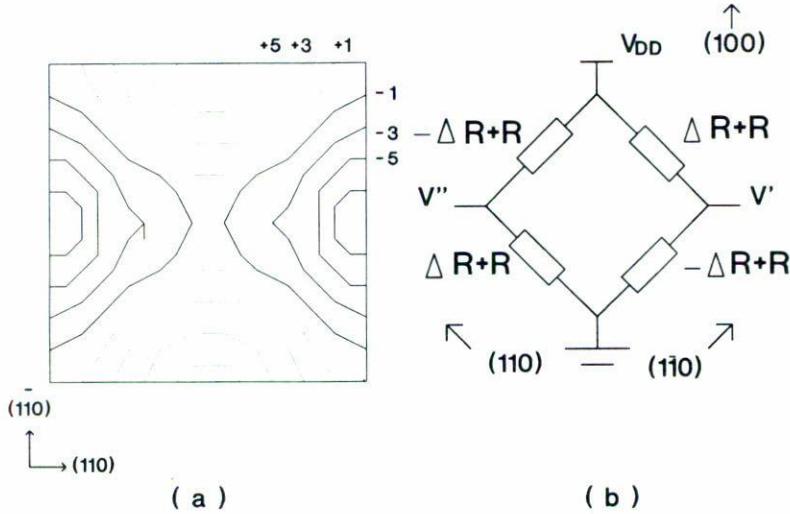


FIGURA 4. (a) Distribución de esfuerzo (dinas/cm<sup>2</sup>) en un diafragma cuadrado. (b) Puente resistivo.

Para sensores que tienen un diafragma rectangular, la forma de la esquina en el borde externo del diafragma dentro de la cavidad, es una zona de sensibilidad limitada cuando el diafragma es sometido a presión por el lado de la cavidad [25]. Cuando la presión es aplicada por el lado de la cavidad, el sensor puede soportar hasta tres veces la presión de trabajo, mientras que si la presión es aplicada por la cara del sensor, entonces se le puede forzar a trabajar hasta diez veces más la presión de trabajo.

#### 4. CONSIDERACIONES DE DISEÑO

##### 4.1 Sensores piezorresistivos

Para la fabricación de un sensor de presión se usa Si tipo n con orientación (100) y con diafragma circular o cuadrado. Si el diafragma es cuadrado, sus bordes deben estar orientados en la dirección (110). La razón por la cual debe ser así se da en la Fig. 4a, donde se muestra la distribución de esfuerzo mediante curvas de nivel que experimenta el diafragma cuando se aplica una presión. Se puede ver como en lados paralelos a (110) se tiene un máximo esfuerzo (línea punteada), mientras que en lados paralelos a (110) se tiene un mínimo esfuerzo (línea continua). Y debido a que el mayor esfuerzo ocurre en la orilla del diafragma, los resistores tipo p deben estar fabricados en esas regiones. Hacerlo así, da lugar a que los resistores orientados en la dirección (110) aumenten su resistencia, mientras que los que están orientados a lo largo de la dirección (110) la disminuyan (véase la Fig. 4b). Por otro lado, la tensión mecánica en la parte media del borde del diafragma

es [26]

$$\begin{aligned}\sigma_{\perp} &= 0.294 \left[ \frac{L}{h} \right]^2 P, \\ \sigma_{\parallel} &= 0.115 \left[ \frac{L}{h} \right]^2 P,\end{aligned}\tag{13}$$

donde  $L$  es la longitud de un lado del diafragma,  $\parallel$  y  $\perp$  representan, respectivamente, la tensión a la cual están sometidos los resistores paralela y perpendicularmente a la orilla del diafragma. Usando las Ecs. (6) y (7) se encuentra que en la dirección [110] los coeficientes piezorresistivos están dados por

$$\begin{aligned}\pi'_{11} &= \pi_{\parallel} = \pi_{11} - (\pi_{11} - \pi_{12} - \pi_{44})\frac{1}{2}, \\ \pi'_{12} &= \pi_{\perp} = \pi_{12} + (\pi_{11} - \pi_{12} - \pi_{44})\frac{1}{2}.\end{aligned}\tag{14}$$

De manera que cuando se aplica una presión, el cambio en la resistencia que experimentan los piezorresistores está dado por

$$\begin{aligned}\left[ \frac{\Delta R}{R} \right]_{\parallel} &= \pi_{\parallel} \sigma_{\parallel} + \pi_{\perp} \sigma_{\perp}, \\ \left[ \frac{\Delta R}{R} \right]_{\perp} &= \pi_{\parallel} \sigma_{\perp} + \pi_{\perp} \sigma_{\parallel}.\end{aligned}\tag{15}$$

Estas ecuaciones corresponden a variaciones en los resistores paralelos y perpendiculares al borde del diafragma, respectivamente. Tomando los valores de los coeficientes a temperatura ambiente [13], y con una concentración de  $1.5$  a  $4 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ,

$$\begin{aligned}\pi_{44} &= 79.0 \times 10^{-12} \text{ cm}^2/\text{dina}, \\ \pi_{11} &= 3.0 \times 10^{-12} \text{ cm}^2/\text{dina}, \\ \pi_{12} &= -1.0 \times 10^{-12} \text{ cm}^2/\text{dina},\end{aligned}$$

y sustituyendo en la Ec. (14) se obtienen los siguientes valores:

$$\begin{aligned}\pi_{\parallel} &= 40.0 \times 10^{-12} \text{ cm}^2/\text{dina}, \\ \pi_{\perp} &= -38.0 \times 10^{-12} \text{ cm}^2/\text{dina},\end{aligned}$$

que permiten determinar la respuesta del puente resistivo, la cual está dada por

$$V_{\text{out}} = \frac{\left[ \frac{\Delta R}{R} \right]_{\perp} + \left[ \frac{\Delta R}{R} \right]_{\parallel}}{2 + \left[ \frac{\Delta R}{R} \right]_{\perp} + \left[ \frac{\Delta R}{R} \right]_{\parallel}} V_{DD}\tag{16}$$

y, de acuerdo con (15),

$$\left[ \frac{\Delta R}{R} \right]_{\parallel} = -6.68 \times 10^{-12} \left[ \frac{L}{h} \right]^2 P, \quad (17)$$

$$\left[ \frac{\Delta R}{R} \right]_{\perp} = 7.47 \times 10^{-12} \left[ \frac{l}{h} \right]^2 P.$$

La diferencia que se obtiene entre los resultados experimentales y los calculados con la Ec. (16), es menor que la que se obtiene utilizando la relación (18), que es preferida por algunos autores [16,17]:

$$\pi_{\parallel} = -\pi_{\perp} \frac{\pi_{44}}{2}. \quad (18)$$

Una propiedad básica para obtener una respuesta significativa a la presión aplicada, es el tamaño de los resistores  $R$  colocados en el diafragma del sensor. Las dimensiones de  $R$  representa un compromiso entre la reproducibilidad (la cual aumenta al aumentar el tamaño del resistor) y la sensibilidad a la presión (la cual disminuye al aumentar el tamaño de los resistores). Para resistores perpendiculares cerca de la orilla del diafragma, el esfuerzo promedio al que están sometidos se puede obtener de la Fig. 5, a manera de ejemplo en un resistor que tiene una longitud de  $50 \mu\text{m}$ , medido a partir de la orilla del diafragma de  $1 \text{ mm}$  de largo por lado, el esfuerzo promedio es 80% del valor máximo del esfuerzo en la orilla. Sin embargo, no es posible diseñar los resistores exactamente en la orilla del diafragma. Esta limitación tecnológica obliga a situarlos a una distancia de la orilla del diafragma que permita evitar errores de alineación y garantizar que el resistor está en el diafragma. Además, cuando no se tiene control del grabado del sustrato, el ataque lateral provoca que los resistores están más alejados de la orilla del diafragma, teniendo aún menor sensibilidad a la presión. Este problema se agrava para los resistores paralelos.

Por otro lado, el diafragma presenta un límite natural a la presión que se aplica, el cual está en función del esfuerzo de rompimiento [27], para Si tiene un valor  $\sigma_R = 6.24 \times 10^8 \text{ dina/cm}^2$ , de manera que el mínimo grosor del diafragma se obtiene de

$$h = \frac{L}{2} \left[ \frac{5P_{\max}}{\sigma_{\max}} \right]^{1/2}. \quad (19)$$

donde  $\sigma_{\max}$  es el máximo esfuerzo presente en el diafragma, y  $P_{\max}$  es la máxima diferencia de presión entre la presión aplicada al sensor y la presión de la cavidad del mismo. La Ec. (19) supone que el diafragma debe ser uniforme aunque en la práctica esto no se observa. Para diafragmas que tienen un grosor de diseño de  $10 \mu\text{m}$  y su fabricación presenta una variación de  $\pm 10\%$ , su principal efecto se ve reflejado en la respuesta del puente resistivo, el cual tendrá una variación de  $\pm 5\%$ . Para diafragmas con  $h > 10 \mu\text{m}$  la no uniformidad no presenta un mayor efecto en la sensibilidad del sensor.

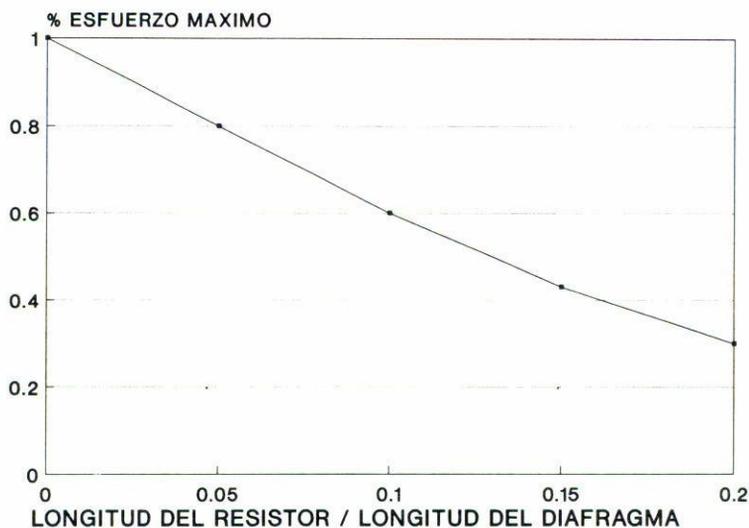


FIGURA 5. Gráfica que muestra el esfuerzo al que está sometido un resistor, en función de su tamaño respecto a la longitud del borde del diafragma [26].

Nosotros hemos desarrollado diafragmas de 20 micras de grueso. Sin embargo, un factor de variación en la respuesta del sensor es el  $\text{SiO}_2$  que se crece a alta temperatura para proteger la superficie y evitar que las uniones de los resistores se activen. El  $\text{SiO}_2$  tiene un coeficiente de expansión térmico menor respecto al que presenta el Si. De esta manera, a temperatura ambiente el Si está en tensión y el  $\text{SiO}_2$  en compresión. Cuando el diafragma experimenta una flexión, la presencia de  $\text{SiO}_2$  tiene una influencia en la respuesta del sensor, que puede ser interpretada como un corrimiento en la sensibilidad. Para el caso extremo de un diafragma cóncavo, supongamos de  $10 \mu\text{m}$  de grosor en el centro y  $11 \mu\text{m}$  de grosor en las orillas, cubierto con una capa de  $\text{SiO}_2$  cuyo grosor es de  $1 \mu\text{m}$ , Lee [28] determinó que para  $P = 0$ , el corrimiento de voltaje (offset) es equivalente a la respuesta debida a una presión de 4.2 mm Hg, con un corrimiento de  $0.01 \text{ mm Hg}/^\circ\text{C}$ .

Todas estas consideraciones pueden ser analizadas y estimar su efecto en la respuesta con el diseño asistido por computadora. Con ayuda de programas como SIPSES [38] desarrollado por nuestros colaboradores, se puede predecir la respuesta del sensor en Si tipo n, con diafragma no uniforme,  $\text{SiO}_2$  sobre el diafragma y con resistores obtenidos por difusión de boro. En la Fig. 6 se muestra la respuesta de un sensor cuadrado ( $1500 \times 1500 \mu\text{m}^2$ ) con resistores a  $5 \mu\text{m}$  de la orilla del diafragma y polarización de 5 volts. Como es de esperar, la respuesta del sensor con diafragma de  $15 \mu\text{m}$  es mayor respecto a la respuesta del sensor con grueso de  $30 \mu\text{m}$ , sin embargo el primero presenta una característica no lineal. Por otro lado, en la región de 0 a 40 kPa se observa que en los sensores con  $h = 15 \mu\text{m}$  de grosor la respuesta es mayor para sensores con  $1 \mu\text{m}$  de  $\text{SiO}_2$  que con  $0.2 \mu\text{m}$  de  $\text{SiO}_2$ . Esto es un ejemplo típico de una respuesta del sensor afectada por el  $\text{SiO}_2$  [37].

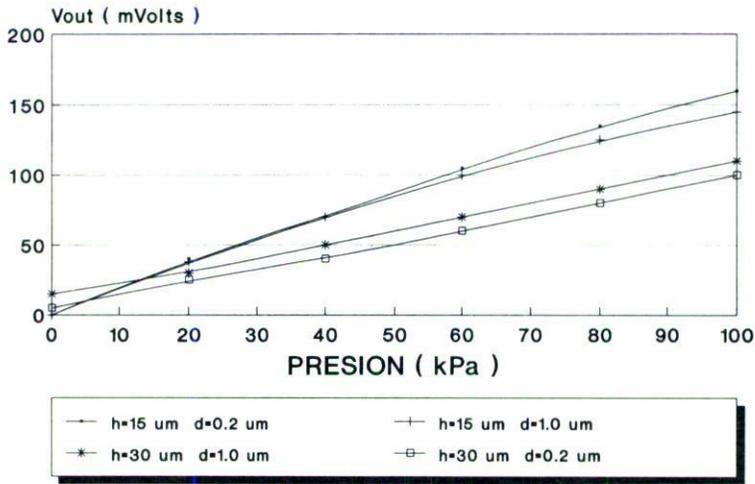


FIGURA 6. Voltaje de salida como función de la presión para diferentes grosores de diafragma y de SiO<sub>2</sub> [34].

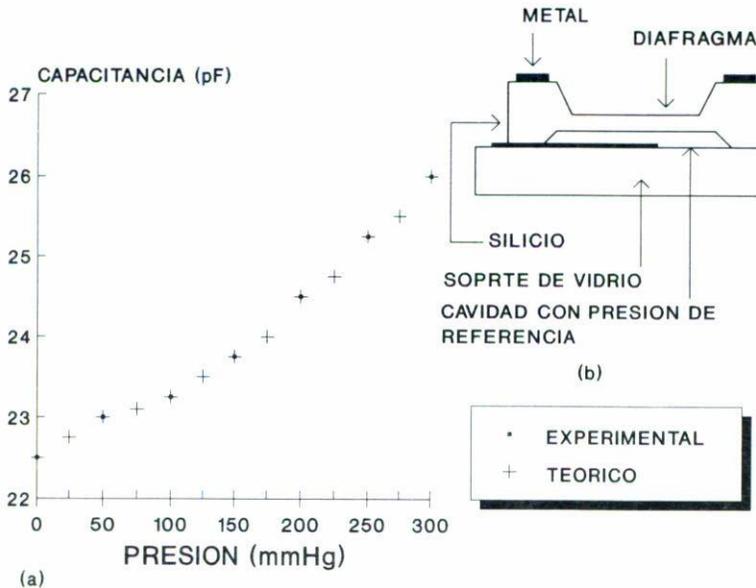


FIGURA 7. (a) Respuesta experimental y teórica para un sensor de presión capacitivo [31]. (b) Estructura típica de un sensor con diafragma de silicio.

4.2 Sensores capacitivos

Los dispositivos con un capacitor como elemento sensor, usan un diafragma de Si, donde éste se comporta como una placa móvil de un capacitor de placas paralelas [29]. La estructura típica de un sensor de presión capacitivo se muestra en la Fig. 7b. Estos presentan dos características importantes: 1) son muy sensibles a variaciones de presión y 2) respecto a su contraparte piezorresistiva, es poco sensible a variaciones de temperatura.

En la práctica, el diafragma está sometido a una presión de referencia. La otra placa del capacitor se forma mediante un proceso de metalización sobre un sustrato de vidrio. Las placas están separadas por una cavidad de pocas micras. La variación capacitiva  $\Delta C$  con  $P$  es función de la flexión  $\omega$  del diafragma [27,31], y está dada por

$$\Delta C = C - C_0 = \iint_A \frac{\epsilon dx dy}{S - \omega(x, y)} - \frac{\epsilon A}{S}, \quad (20)$$

donde  $C$  es la capacitancia cuando una presión es aplicada;  $C_0$  es la capacitancia a presión cero;  $\epsilon$  es la permitividad dieléctrica (aire o vacío) presente en la cavidad;  $S$  es la separación de las placas a presión cero;  $A$  es el área de la placa metálica y  $\omega$  puede ser representada por la Ec. (21), donde  $\ell = L/2$  [27]:

$$\omega(x, y) = \frac{P(\ell^2 - x^2)(\ell^2 - y^2)}{49.6 \ell^4}. \quad (21)$$

En los sensores capacitivos la flexión del diafragma varía su capacitancia. Para sensar la variación capacitiva, el sensor se conecta a un circuito oscilador para determinar variaciones en la frecuencia debidas a cambios en la presión. En algunos diseños se usan dos capacitores (para medir presión mayor y menor a una referencia), cada uno de ellos conectado a un oscilador. Un cambio en la presión provoca un aumento en la frecuencia, mientras que en el otro hay una disminución, ambas respuestas se combinan en un comparador y se obtiene una diferencia de señales que presenta una alta linealidad [30]. Algunos otros sistemas comparan el voltaje del capacitor variable con una referencia.

Los sensores de presión capacitivos pueden usarse aprovechando ciertas características, por ejemplo, Craig S. Sander *et al.* [31] desarrollaron un dispositivo con la propiedad de tener pulsos periódicos como salida. La característica importante radica en la respuesta casi lineal que se obtiene para un intervalo amplio de presión aplicada (véase la Fig. 7). Wen H. Ko *et al.* diseñaron un sensor de presión de diafragma circular con una alta sensibilidad a la presión [27]. El dispositivo presenta una sensibilidad de 50 a 150  $\mu\text{V}/\text{V mm Hg}$ , representando un orden de magnitud más que su contraparte piezorresistiva. Yong S. Lee y K.D. Wise fabricaron un sensor capacitivo sensible a las bajas temperaturas [32], y Jin Ji *et al.* [33] implementaron un sensor de presión con tecnología CMOS para ser usado como catéter cardiovascular.

### 4.3 Estructuras alternativas

Existen diversas opciones que permiten fabricar esta clase de sensores a través de técnicas de fabricación de CI. Algunas de estas alternativas son: 1) Usar un micropuente de Si policristalino como elemento sensor. La operación de este sensor está basado en la dependencia que presenta la presión con la transferencia de calor de un filamento caliente que está inmerso en un volumen de gas [34]. 2) Fabricar una membrana flotante como elemento sensor. La membrana es Si epitaxial y contiene dos resistores obtenidos mediante implantación de iones, fuera de la membrana se tienen otros dos resistores, los cuales con los anteriores forman un puente de Wheatstone [35]. 3) Construir un capacitor, cuya

placa superior es de polisilicio LPCVD del orden de  $1 \mu\text{m}$  de grosor y a diferencia del ya conocido sensor capacitivo, éste contiene una cavidad por la cual se introduce gas y sensa su correspondiente presión [36].

## 5. CONCLUSIONES

En este trabajo se presenta la revisión de los sensores de silicio, especialmente los de diafragma delgado que utilizan la propiedad de piezorresistividad. Esta revisión incluye desde los modelos físicos hasta las consideraciones prácticas de diseño así como consideraciones tecnológicas para su fabricación. Desde el punto de vista de la física de los dispositivos se presentan modelos que explican los efectos de la concentración de impurezas, la temperatura, la orientación cristalina del sustrato y la dirección de la corriente de prueba con respecto a la orientación cristalográfica.

Desde el punto de vista del diseño, se muestra el efecto de parámetros como longitud de los resistores y posición de los mismos en el diafragma. Desde el punto de vista tecnológico se mencionan parámetros como el efecto del  $\text{SiO}_2$  en la superficie del diafragma y el desplazamiento de los resistores debido al ataque lateral del diafragma. Se dan también algunos ejemplos numéricos obtenidos de nuestras experiencias en el diseño y fabricación de sensores de diafragma delgado en silicio.

Por último se muestran algunas alternativas para sensores de silicio que utilizan el micromaquinado en silicio, aunque no usen la piezorresistencia del silicio.

Con esta revisión se puede entonces, tener una referencia que resulta útil para aquellos lectores interesados en iniciarse en la física, en los detalles prácticos de diseño y en la tecnología de fabricación de sensores de presión de silicio.

## AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la señorita María Eugenia Machado por la mecanografía del manuscrito.

## REFERENCIAS

1. C.S. Smith, *Phys. Rev.* **94** (1954) 42.
2. F.J. Blatt, *Physics of Electronic Conduction in Solids*, McGraw-Hill, New York (1968).
3. O.N. Tufté and E.L. Stelzer, *J. Appl. Phys.* **34** (1963) 313; *Phys. Rev.* **133** (1964) A1705.
4. D.R. Kerr and A.G. Milnes, *J. Appl. Phys.* **34** (1963) 727.
5. W.G. Pfann and R.N. Thurston, *J. Appl. Phys.* **32** (1961) 2008.
6. M.L. Boas, *Mathematical Methods in the Physical Sciences*, John Wiley and Sons, New York (1966).
7. O.N. Tufté, P.W. Chapman and D. Long, *J. Appl. Phys.* **33** (1962) 3322.
8. F.J. Morin, T.H. Geballe and C. Herring, *Phys. Rev.* **105** (1957) 525.
9. C. Herring, *Bell System Tech. J.* **34** (1955) 237.
10. O.N. Tufté, *J. Electrochem. Soc.* **109** (1962) 235.
11. C. Herring and E. Vogt, *Phys. Rev.* **101** (1956) 944.
12. J.S. Blakemore, *Semiconductor Statistics*, Pergamon Press, Great Britain (1962).

13. D.E. Fulkerson, *IEEE Trans. Electron Devices*, (1969) 867.
14. J. Bretsch, *IEEE Trans. Electron Devices*, (1976) 59.
15. E.R. Peake, A. R. Zias and J. Egan, *IEEE Trans. Electron Devices*, (1969) 870.
16. W.H. Ko, J. Hyncek and S.F. Boettcher, *IEEE Trans. Electron Devices* **ED-26** (1979) 1896.
17. H. Tanigawa and T. Ishihara, *IEEE Trans. Electron Devices* **ED-32** (1985) 1191.
18. M. Esashi, H. Komatsu, T. Matsuo, M. Takahashi, T. Takisima, K. Imabayashi and H. Ozawa, *IEEE Trans. Electron Devices* **ED-29** (1982) 57.
19. K.E. Bean, *IEEE Trans. Electron Devices* **ED-25** (1978) 1185.
20. E. Bassous, *IEEE Trans. Electron Devices* **ED-25** (1978) 1178.
21. J.J. Pak, G.W. Neudeck, A.E. Kabir, D.W. DeRoo, S.E. Staller, and J.H. Logsdon, *IEEE Electron Devices Letters* **12** (1991) 614.
22. E. Stemme and G. Stemme, *IEEE Trans. Electron Devices* **37** (1990) 648.
23. Y. Wang, X. Zheng, L. Liu and Z. Li, *IEEE Trans Electron Devices* **38** (1991) 1797.
24. T.J. Cotler and M.E. Elta, *IEEE Circuits and Devices*, (1990) 38.
25. A. Schaff, comunicación personal (1987).
26. S.K. Clark and K.D. Wise, *IEEE Trans. Electron Devices* **ED-26** (1979) 1887.
27. W.H. Ko, M.H. Bao and Y.D. Hong, *IEEE Trans. Electron Devices* **ED-29** (1982) 48.
28. S.C. Kim and K.D. Wise, *IEEE Trans. Electron Devices* **ED-30** (1983) 802.
29. K.W. Leen and K.D. Wise, *IEEE Trans. Electron Devices*, **ED-29** (1982) 34.
30. McDermott, *EDN* (20 de marzo de 1980) 123.
31. C.S. Sander, J.W. Knutti and J.D. Meindl, *IEEE Trans. Electron Devices* **ED-27** (1980) 927.
32. Y.S. Lee and K.D. Wise, *IEEE Trans. Electron Devices*, **ED-29** (1982) 42.
33. J. Ji, S. Cho, Y. Zhang, K. Najafi, K.D. Wise, *IEEE Trans. Electron Devices* **39** (1992) 2260.
34. C.H. Mastrangelo and R. Muller, *IEEE Journal of Solid State Circuits* **26** (1991) 1998.
35. J. Shajii, K.Y. Nh, and M.A. Evans, *IEEE Journal of Microelectromechanical Systems* **1** (1992) 89.
36. J.T. Kung and H.S. Lee, *IEEE Journal of Microelectromechanical Systems* **1** (1992) 121.
37. P. Peykov, M. Aceves, T. León, *Memoria Técnica Electro 92*, Chihuahua, Chih. MÚxico, (1992) 461.
38. P. Peykov y R. Lazarov, *Bulg. J. Phys.* **14** (1987) 529.