

SENSORES DE FUERZA BASADOS EN SEMICONDUCTORES

S. ALCANTARA I., F. REYES C., P. AGUILAR G.

INSTITUTO DE CIENCIAS DE LA U.A.P.

Entre los transductores electromecánicos, un tipo de ellos es el llamado "Sensor de Deformación (Strain Gauge)". Consisten de un metal depositado sobre un sustrato elástico, cuya acción se basa en el principio de variación de resistencia por efecto de la deformación. En Microelectrónica, con Tecnología Planar se obtienen sensores con resistencias difundidas en sustrato de Silicio Monocristalino, esto permite conseguir características eléctricas, físicas y dimensiones muy adecuadas para la detección de parámetros fisiológicos. Con estos dispositivos se pueden medir desplazamientos pequeños, presión y deformación con excelentes características lineales.

INTRODUCCION:

Si bien es cierto que en la actualidad los avances científicos y tecnológicos permiten que mediante sistemas electrónicos se puedan detectar, almacenar, procesar, analizar, registrar y hasta controlar señales de fenómenos físicos de cualquier índole; estos precisan irremediablemente, de un dispositivo transductor, sensor o reproductor, inmerso en el medio donde se desarrolla el evento físico a detectar o controlar.

Para manipular las señales físicas, es absolutamente necesario extraer la información del medio físico convirtiendo la forma de energía manifiesta, en energía eléctrica. Un transductor traduce una información física en eléctrica.

La sensibilidad y fidelidad de este elemento transductor, pone en riesgo toda una gama de posibilidades en el manejo de señales a través de sistemas electrónicos poderosísimos. Por eso en el mundo desarrollado se ha creado una amplia variedad de transductores con diferentes principios de traducción según la aplicación dada.

En este artículo exponemos las posibilidades y características que presenta en su manufactura y aplicación un Sensor de Deformación con semiconductor, basado en el principio del efecto piezorresistivo.

PIEZORRESISTENCIA.

Los dispositivos transductores se clasifican de acuerdo al principio físico empleado para la traducción de energías.

Entre los transductores electromecánicos; que traducen desplazamientos, fuerza, presión o torque en señales eléctricas, existen los llamados "Sensores de Deformación" (Strain Gauge). Se les llama sensores porque sólo detectan o sensan señales físicas para convertirlas en eléctricas, pero no a la inversa, es decir no se usan como reproductores de señales físicas.

Estos sensores de deformación utilizan el principio de piezorresistencia, cambio de resistencia eléctrica al aplicarles un esfuerzo que los deforme.⁽¹⁾

Generalmente se construyen depositando metal en un sustrato elástico que al deformarse provoque cambios dimensionales en el metal y consecuentemente en la resistencia eléctrica que presenta (ver figura 1).

En metales, estos cambios de resistencia, son de igual proporción por efectos en la resistividad específica y cambios dimensionales (ver figura 2).

De otra forma

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta A}{A} \quad (1)$$

Donde ρ es la resistividad específica del metal, l la longitud y A el área seccional de la muestra.

En semiconductores los cambios de resistencia predominantemente son debidos a los cambios en su resistividad que depende fundamentalmente de la concentración de portadores (N_i) y la movilidad de ellos.

$$\rho = \frac{1}{e N_i \mu_p} \quad (2)$$

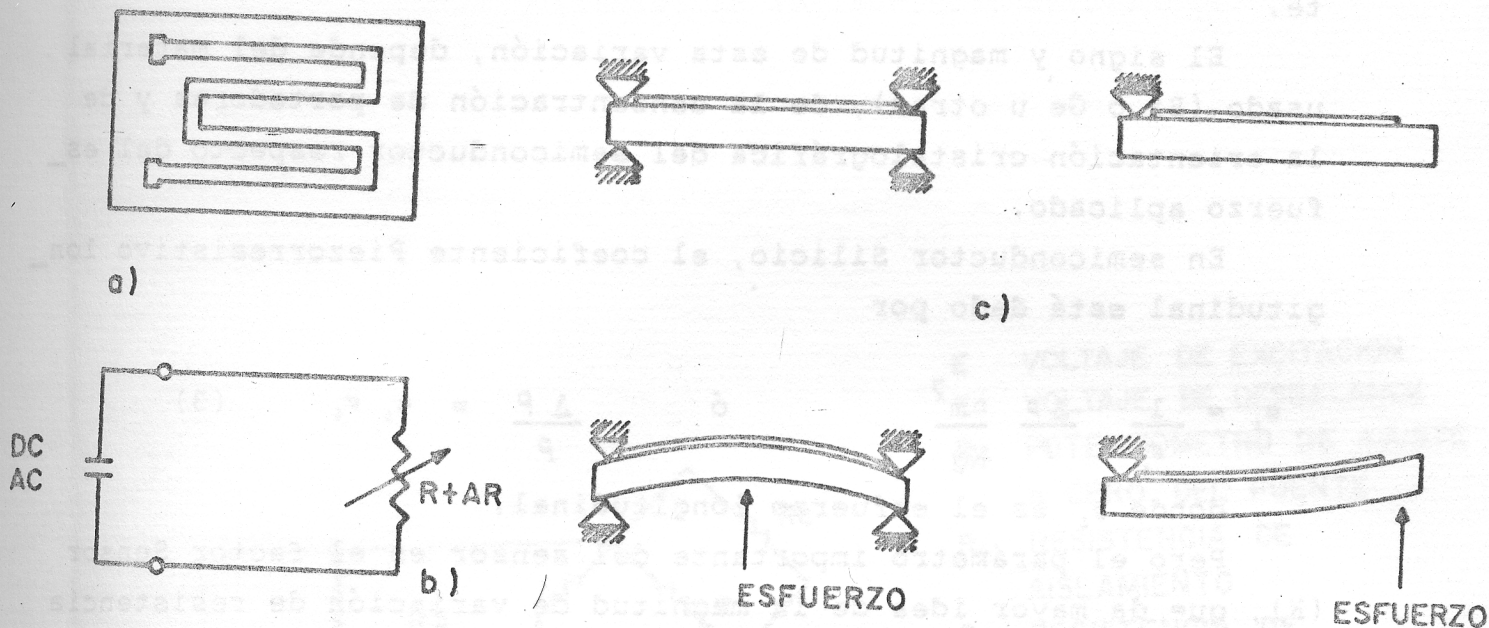
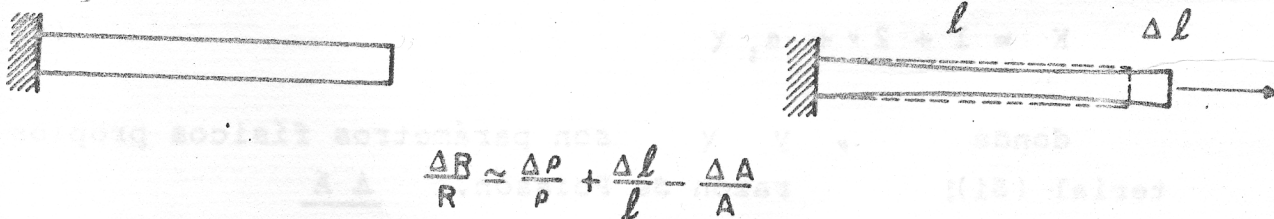


Fig. 1 . a). SENSOR DE DEFORMACION VISTO POR ARRIBA
 b). CIRCUITO ELECTRICO SIMPLE DEL SENSOR
 c). ESQUEMA DEL SENSOR SUJETO A ESFUERZO



$$\frac{\Delta R}{R} \approx \frac{\Delta P}{P} + \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta A}{A}$$

Fig. 2 . UN METAL SOMETIDO A ESFUERZO DE TENSION

la cual se ve afectada directamente por la deformación resultante.

El signo y magnitud de esta variación, depende del material usado (Si o Ge u otras), de la concentración de portadores y de la orientación cristalográfica del semiconductor respecto del esfuerzo aplicado.

En semiconductor Silicio, el coeficiente Piezorresistivo longitudinal está dado por

$$a_l = \frac{1}{\sigma_l} \frac{\Delta \rho}{\rho} \frac{\text{m}^2}{\text{Kg}} \quad \text{ó} \quad \frac{\Delta \rho}{\rho} = a_l \sigma_l \quad (3)$$

donde σ_l es el esfuerzo longitudinal.

Pero el parámetro importante del sensor es el factor Sensor (K), que da mayor idea de la magnitud de variación de resistencia en función de la deformación ejercida.

$$K = \frac{\Delta R/R}{\xi} \quad (4)$$

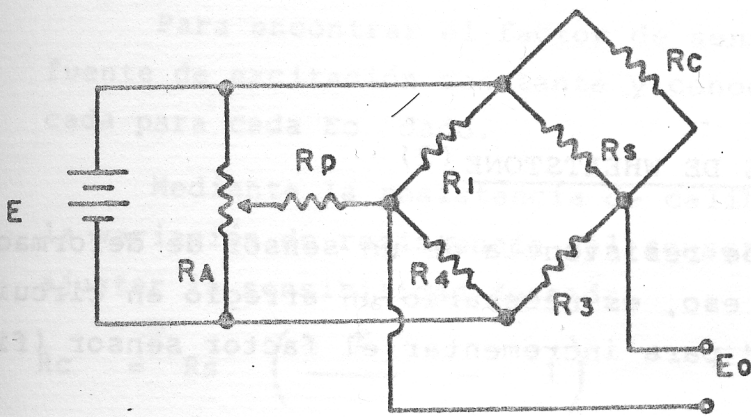
donde ξ es la deformación axial $\xi = \frac{\Delta l}{l} \text{ cm}$ (5)

Entonces K puede expresarse como

$$K = 1 + 2\nu + a_l \nu \quad (6)$$

donde ν y ν son parámetros físicos propios del material (Si); razón de Poisson. $\frac{\Delta A}{A}$ (7)

$$\nu = \frac{\frac{\Delta A}{A}}{\frac{\Delta l}{l}}$$



- E VOLTAJE DE EXCITACION
- E₀ VOLTAJE DE DESBALANCE
- R_A POTENCIOMETRO DE AJUSTE A CERO DEL PUENTE
- R_p RESISTENCIA DE AISLAMIENTO
- R_c RESISTENCIA DE CALIBRACION
- R_s RESISTENCIA DE SENSOR

Fig. 3. CIRCUITO PUENTE DE WHEATSTONE

$$\nu = \frac{\text{Deformación perpendicular al esfuerzo}}{\text{Deformación longitudinal al esfuerzo}}$$

γ es el módulo de Young

$$\gamma = \frac{\sigma}{\xi} = \frac{\text{Esfuerzo}}{\text{Deformación}} = \frac{\text{Kg}}{\text{m}^2} \quad (8)$$

En sensores de deformación con metal el factor sensor (K) no revaza valores de 20, en cambio con semiconductores alcanza valores de hasta 200.

CIRCUITO SENSOR PUENTE DE WHEATSTONE (2)

Las variaciones de resistencia de un sensor de deformación son muy pequeñas; por eso, es necesario un arreglo en circuito "Puente de Wheatstone" para incrementar el factor sensor (figura 3).

En este circuito, inicialmente se busca balancear el puente para que $E_o = 0$ voltios, con el propósito de que las pequeñas variaciones de R_s se manifiesten en un voltaje de desbalance (E_o) significativo. Se puede hacer un ajuste a cero con el potenciómetro R_A , que deberá ser del orden de 50 K cuando las resistencias $R_1 \approx R_2 \approx R_3 \approx R_4 \approx 10$ K y la resistencia de aislamiento $R_p \approx 100 R_1$.

El factor sensor se expresa por

$$K = \frac{\Delta R_s}{R_s} \bigg/ \frac{\Delta l}{l}$$

donde $\frac{\Delta l}{l}$ en μ/cm

Sin embargo, en este circuito el parámetro más significativo, es el "Factor sensibilidad" (F) expresado por:

$$F = \frac{E_o}{EP}$$

(9)

donde P es el parámetro físico (presión o fuerza) aplicado. Se observa que el voltaje de salida o desbalance es proporcional al parámetro físico a medir.

$$E_o = FEP$$

$$E_o \propto P$$

∴ F y E constantes

Para encontrar el factor de sensibilidad, es necesario una fuente de excitación constante y conocer la magnitud física aplicada para cada E_o dado.

Mediante la resistencia de calibración R_c es posible simular la variación de resistencia del sensor, con el fin de calibrar y ajustar la sensibilidad deseada.

$$R_c = R_s \left(\frac{E}{4 E_o} - 1 \right) \quad (10)$$

De otra forma, conociendo el factor de sensibilidad del sistema, puede calcularse el voltaje de excitación (E) necesario para obtener una respuesta a escala para tomar la lectura (por ejemplo 1 mV/mmHg)

$$E_o = FEP$$

$$E = \frac{E_o}{FP}$$

(11)

DISEÑO Y FABRICACION

En microelectrónica, la tecnología planar, posibilita la reproducción de dispositivos semiconductores de pequeñas dimensiones sobre un sustrato de Silicio Monocristalino. Mediante técnicas de fotograbado sobre óxido de Silicio y difusión en Estado Sólido, se logra introducir, de manera controlada, un material de un tipo de

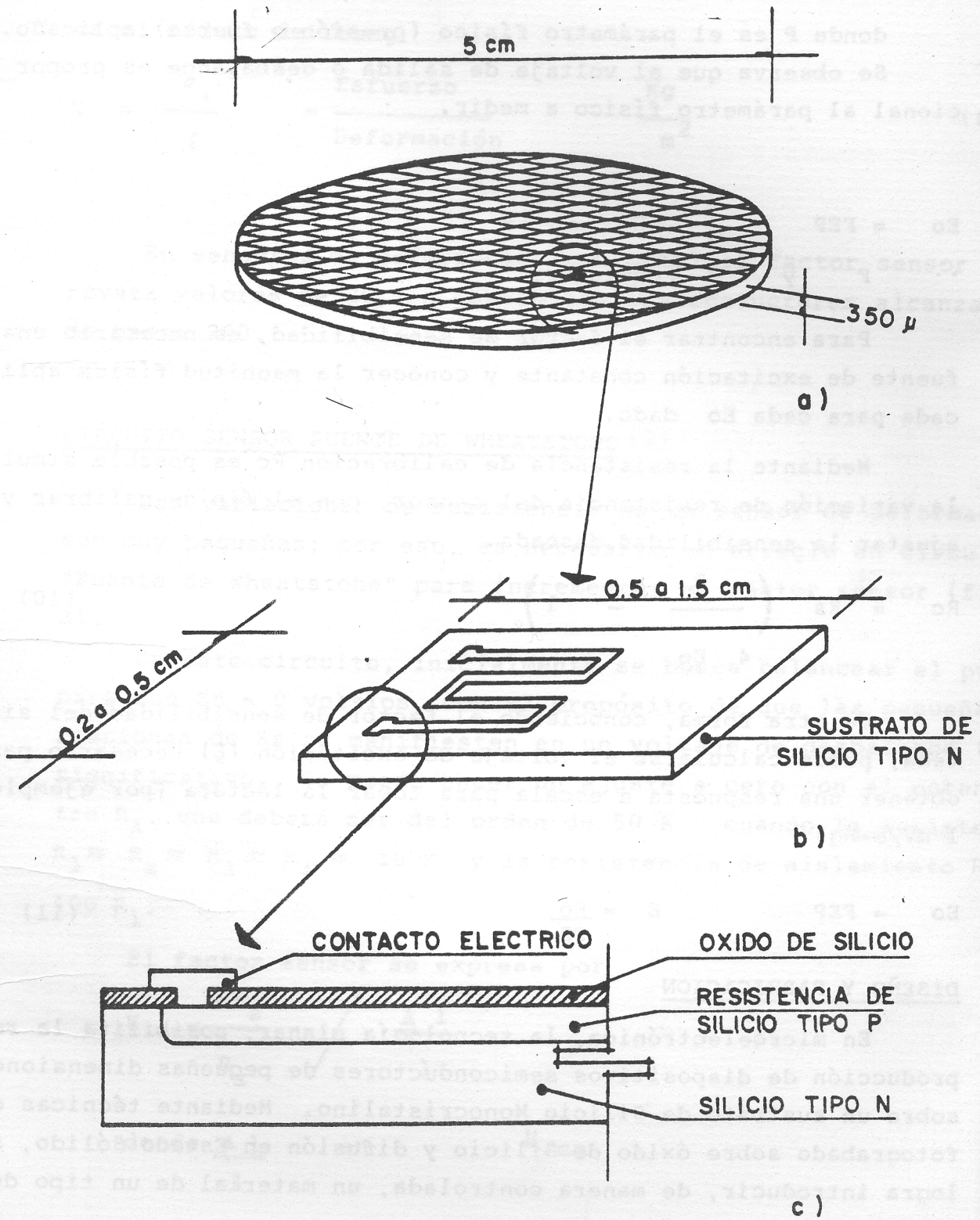


Fig. 4 . a) ESQUEMA DE UNA OBLEA CON DISPOSITIVOS IMPRESOS
b) UN DADO DE UN DISPOSITIVO SENSOR

DETALLE SECCIONAL DE LA PARTE DEL CONTACTO ELECTRICO

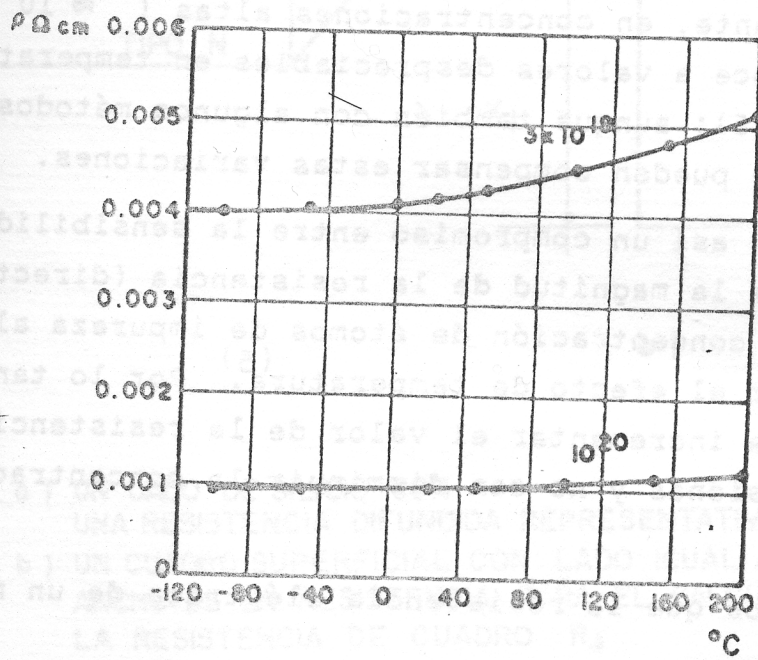


Fig. 5. GRAFICA DE VARIACION DE ρ CON LA TEMPERATURA

En semiconductores la resistencia total, se considera como la suma de resistencias de contactos que la forman (R_A), (R_B), (R_C)...

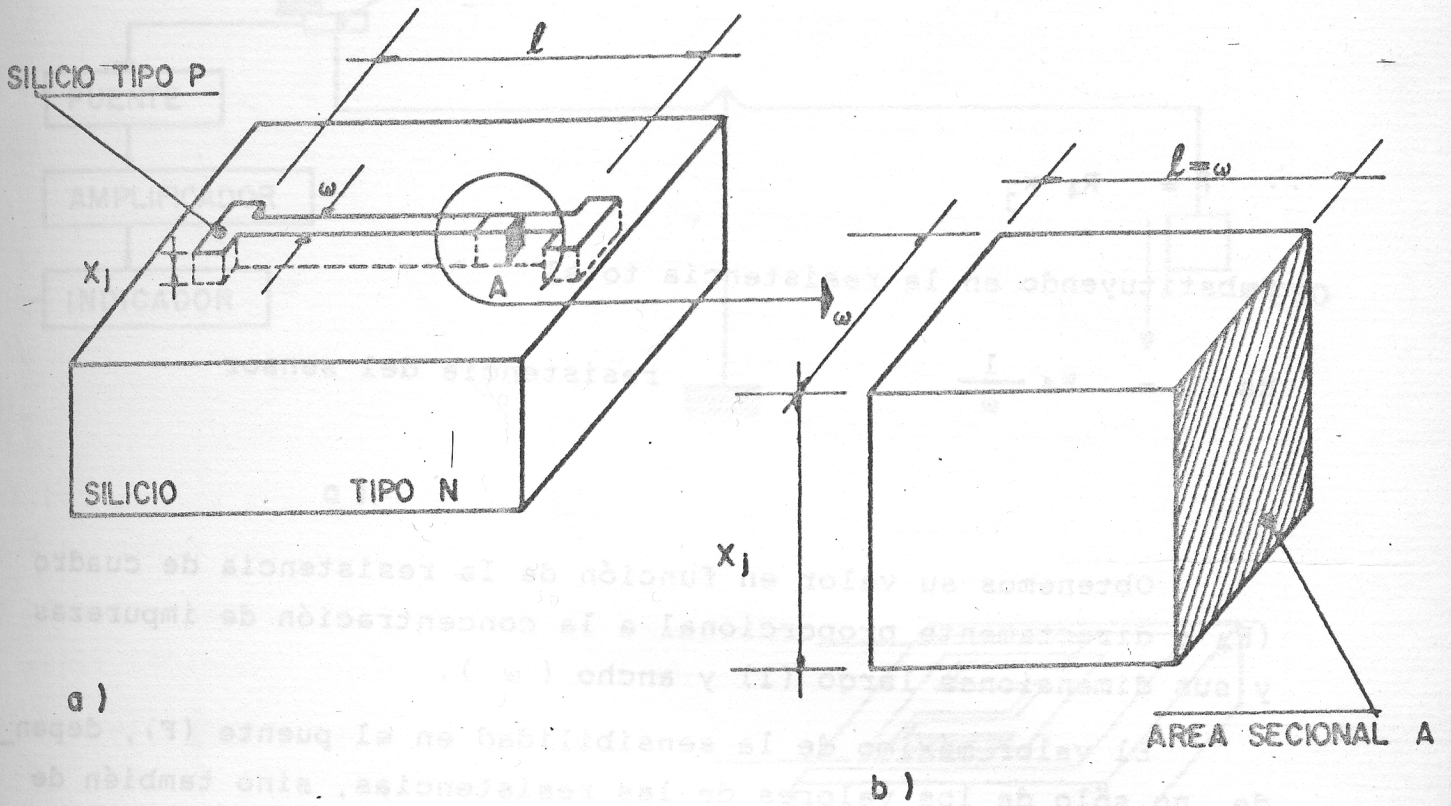


Fig. 6 . a) UN DADO DE SILICIO CON UNA RESISTENCIA DIFUNDA REPRESENTATIVA
 b) UN CUADRO SUPERFICIAL CON LADO IGUAL AL ANCHO DE LA RESISTENCIA PARA EL CALCULO DE LA RESISTENCIA DE CUADRO R_d

$$R_j = \rho \frac{l}{x_j} \quad \text{resistencia de cuadro (} \Omega / \square \text{)}$$

$$\therefore P = R_4 x_j$$

Substituyendo en la resistencia total

$$R_s = R_4 \frac{l}{\omega} \quad \text{resistencia del sensor}$$

Obtenemos su valor en función de la resistencia de cuadro (R_4), directamente proporcional a la concentración de impurezas y sus dimensiones largo (l) y ancho (ω).

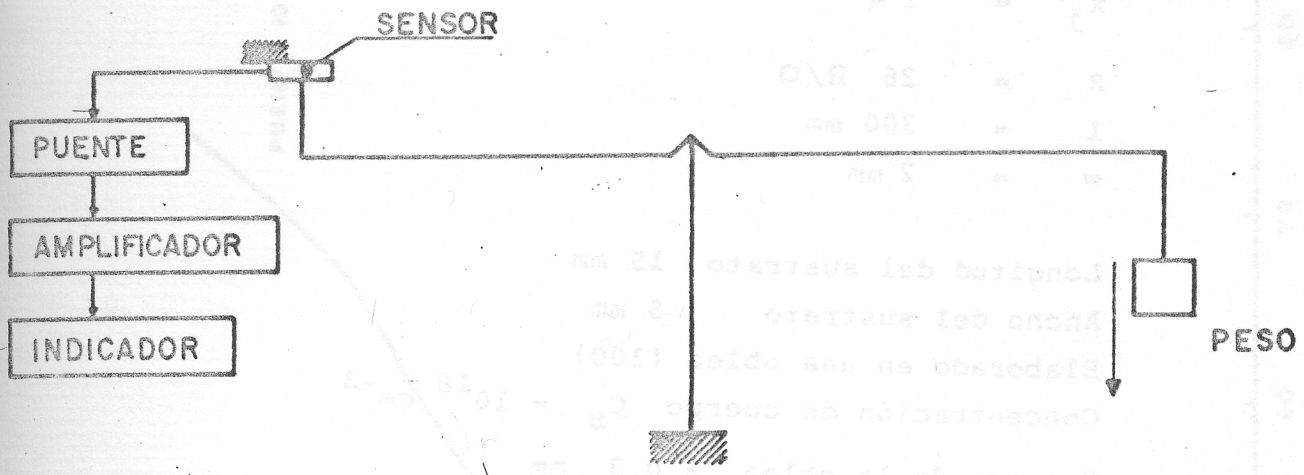
El valor máximo de la sensibilidad en el puente (F), depende, no sólo de los valores de las resistencias, sino también de condiciones secundarias como la fuente de alimentación (E). Si esta es de voltaje o corriente constante.

En nuestro caso utilizamos $E = \text{constante}$, para lo cual es necesario, según la figura 3 que

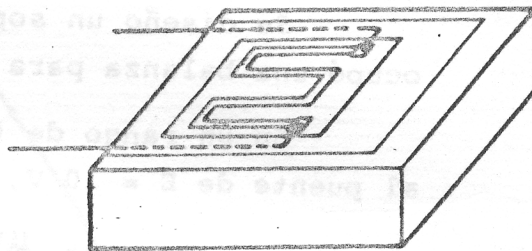
$$\frac{R_3}{R_s} \approx 1 \quad \text{y} \quad R_3 \approx R_s$$

y el valor seleccionado es de $R_3 \approx R_4 \approx R_1 \approx R_s \approx 4 \text{ K}\Omega$

Una relación óptima entre longitud y espesor del sustrato es de 100; en el sensor que construimos en el laboratorio, se utilizó una relación aproximada de 50 y dió excelentes resultados.



a)



b)

Fig. 7. a) BALANZA DE PRUEBA DEL SENSOR
 b) CAPSULA DE SOPORTE DEL SENSOR

Las características del sensor son:

$$\begin{aligned} R_s &= 4 \text{ K}\Omega \\ x_j &= 1 \text{ }\mu\text{m} \\ R &= 26 \text{ }\Omega/\square \\ l &= 300 \text{ mm} \\ \omega &= 2 \text{ mm} \end{aligned}$$

Longitud del sustrato 15 mm
 Ancho del sustrato 5 mm
 Elaborado en una oblea (100)
 Concentración de cuerpo $C_B = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$
 Espesor de la oblea = 0.3 mm

Se usó el circuito puente de la figura 3 y como medidor se acopló un amplificador de instrumentación con ganancia 100.

Se diseñó un soporte de acrílico para caracterizarlo y se ocupó una balanza para aplicarle una fuerza conocida. (fig. 7)

En un rango de 0 a 280 gramos de peso, con alimentación al puente de $E = 10 \text{ V}$, la sensibilidad obtenida fue de:

$$F = 25 \frac{\mu\text{V/V}}{\text{gramo}}$$

La respuesta del sensor (figura 8), peso contra voltaje en el circuito puente presenta ciertas desviaciones que son consecuencia del sistema de caracterización. Por tanto, para lograr una caracterización más exhaustiva, es necesario mejorar el sistema de medición y fuerza aplicada.

CONCLUSIONES:

Es indudable la posibilidad de mejorar la sensibilidad de sensor si aumentamos la relación longitud-espesor de 50 a 100 ; por tratarse de un material cristalino, la elasticidad del silicio es casi perfecta, y su linealidad está limitada por el circuito

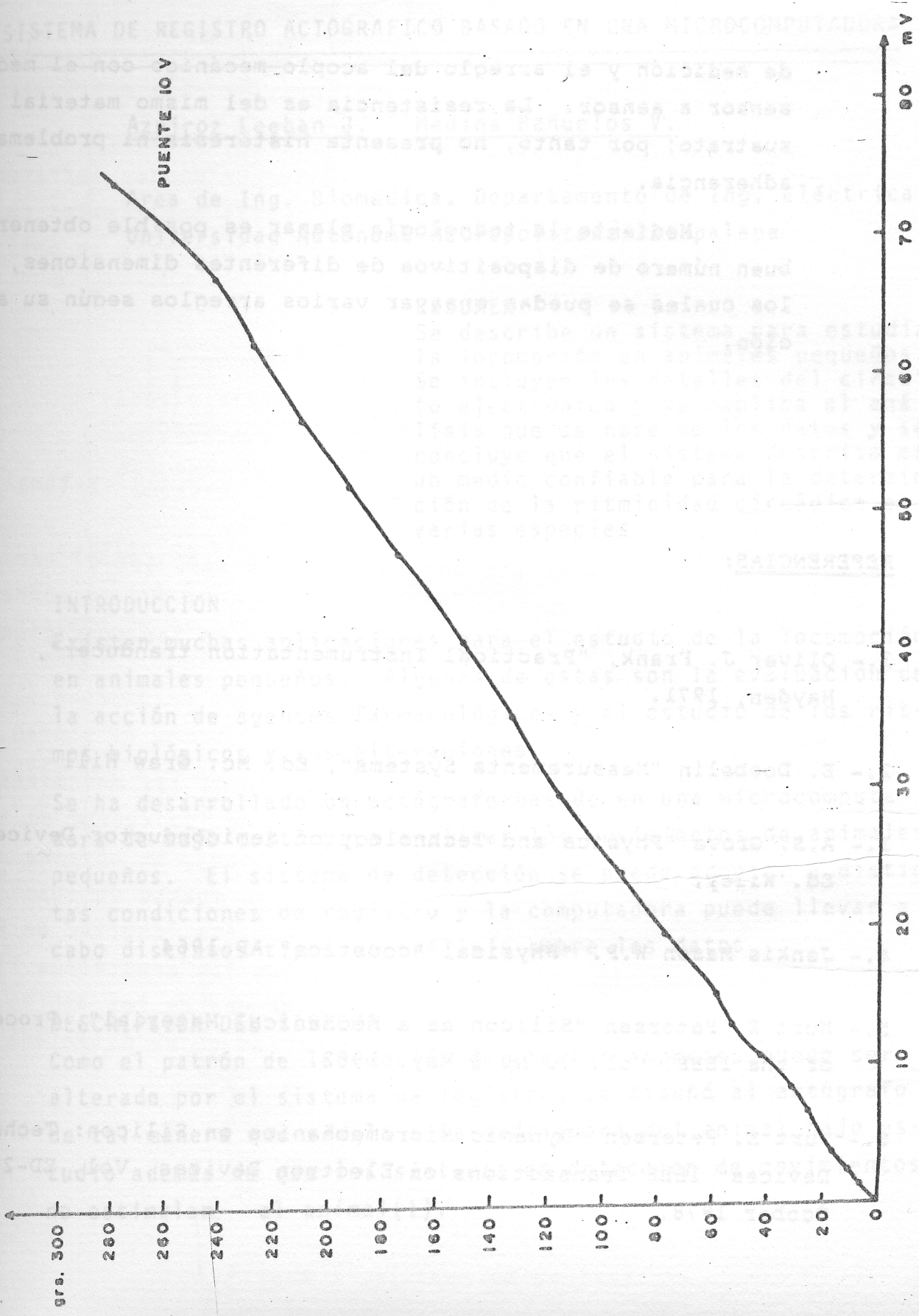


Fig. 8. RESPUESTA SENSOR DE SI, $R_s = 4 K\Omega$, $E = 10V$ EN EL PUENTE

de medición y el arreglo del acoplo mecánico con el medio sensor a sensor. La resistencia es del mismo material del sustrato; por tanto, no presenta histeresis ni problemas de adherencia.

Mediante la tecnología planar es posible obtener un buen número de dispositivos de diferentes dimensiones, con los cuales se puedan ensayar varios arreglos según su aplicación.

REFERENCIAS:

- 1.- Oliver J. Frank, "Practical Instrumentation transducer", Hayden, 1971.
- 2.- E. Doebelin "Measurements Systems", Ed. Mc. Graw Hill
- 3.- A.S. Grove "Physics and Technology of Semiconductor Devices" Ed. Wiley.
- 4.- Jenkis Mason W.P. "Physical Acoustics" AP 1964
- 5.- Kurt E. Petersen "Silicon as a Mechanical Material", Proceedings of the IEEE, Vol. 70 N° 5 May. 1982.
- 6.- Kurt E. Petersen "Dynamic Micromechanics on Silicon: Techniques at Devices" IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. ED-25, N° 10 October 1978.