

MEMS - Aplicaciones en Metrología

Horacio Estrada Vázquez

Coordinador Científico

Centro Nacional de Metrología (CENAM)

hestrada@cenam.mx

NOTA 1. Este trabajo ha sido desarrollado con recursos del gobierno federal de México. Sólo se permite su reproducción sin fines de lucro y haciendo referencia a la fuente.

NOTA 2. En este documento pueden aparecer marcas comerciales únicamente con fines didácticos y a fin de lograr un entendimiento claro de las técnicas y procesos descritos. En ningún caso esta identificación implica recomendación o aval del CENAM o de alguna otra institución del gobierno federal de México, ni tampoco implica que los equipos o materiales identificados sean necesariamente los mejores para el propósito para el que son usados. El CENAM y las demás instituciones no tienen compromisos con ninguna marca comercial en particular.



Encuentro Nacional de
Metrología Eléctrica 2009
18-20 de noviembre

→ Electromagnetismo
→ Temperatura y
Propiedades Termofísicas
→ Tiempo y Frecuencia

CENTRO NACIONAL DE METROLOGÍA - CENAM
DERECHOS RESERVADOS 2009



MEMS - Aplicaciones en Metrología

Horacio Estrada Vázquez
Coordinador Científico
Centro Nacional de Metrología (CENAM)
hestrada@cenam.mx



**Encuentro Nacional de
Metrología Eléctrica 2009**
18-20 de noviembre

→ Electromagnetismo
→ Temperatura y
Propiedades Termofísicas
→ Tiempo y Frecuencia

CENTRO NACIONAL DE METROLOGÍA - CENAM
DERECHOS RESERVADOS 2009



Agenda:

- **Introducción – Qué es MEMS? Cómo se Fabrican? Qué aplicaciones tienen?**
- **Sensores MEMS en la industria – estructuras básicas para la implementación de:**
 - Sensores de presión,
 - Comparadores patrón de transferencia CA-CC,
 - Sensores de flujo,
 - Acelerómetros,
 - Termoconvertidores,
 - Biosensores
- **Actuadores electrostáticos**
 - Dispositivos MEMS para tensión eléctrica de referencia,
 - Micromáquinas
- **Programa Nacional para el Diseño y Fabricación de Prototipos MEMS en México**
- **Corolario**

MEMS

Qué es?

Qué Hacen?

Micro-Electro-Mechanical Systems



MEMS

En Europa: Micro-System Technology (MST)

MEMS es una tecnología con la cual se logra:

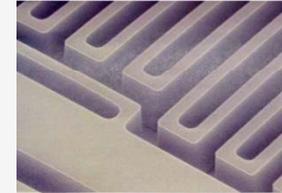
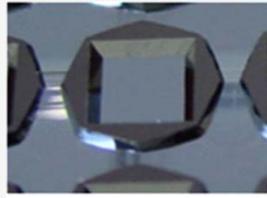
- La definición e integración de micro-componentes con funciones **mecánicas, eléctricas, térmicas, ópticas y otras, en un mismo chip**, principalmente de silicio, para la realización de micro-sistemas (microsensores y microactuadores) aplicables a diversas disciplinas en ciencia y tecnología.
 - **Microsensores** - para medir diversas variables con gran exactitud;
 - **Microactuadores** - componentes que responden a la acción de señales eléctricas, térmicas y magnéticas (aplicadas a las estructuras mecánicas).
- Se puede decir que MEMS son micro-máquinas con partes móviles (dispositivos eléctricos con partes móviles)

La tecnología MEMS permite:

- **Alta precisión dimensional, tanto en los elementos mecánicos como en los eléctricos, que junto con las casi ideales características mecánicas de silicio, permiten el desarrollo de microsistemas de alta confiabilidad, gran funcionalidad y portabilidad, extremadamente pequeños, costos reducidos.**

Materiales, Técnicas y Procesos Requeridos

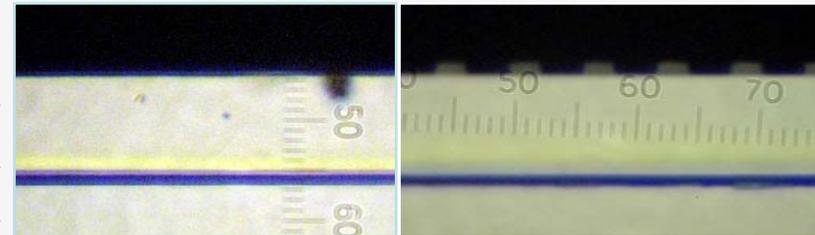
- **Materiales en MEMS:** Obleas de silicio, obleas SOI, poli-silicio, óxidos y nitratos de silicio, metales (Al, Ni, Pt, Cr, Au, Ti, ...), fotoresinas, vidrios, cerámicas, polímeros y poly-imidas,
- **Métodos para el Micromaquinado:** Ataque húmedo (químico) y seco (plasma) de silicio, dieléctricos y metales (usando materiales inertes a las atmósferas atacantes) para realizar micromaquinado de volumen o superficie, electroplateado, LIGA, micro-moldeado.



- **Otros Procesos MEMS:** Limpieza de obleas, fotolitografía, oxidación, CVD, difusión e implantación de impurezas, evaporación térmica, sputtering, plateado anódico, adhesión temporal o permanente con otras obleas o substratos de Si, vidrio, cerámicas y/o polímeros.

SOI Wafers
Anodic-bonded (oxide)

Active layer
(2 – 10mm) →
Buried oxide - BOX →
Handle wafer →



Algunas de sus aplicaciones

A través de la tecnología MEMS, **sensores de silicio** han evolucionado de simples elementos de transducción, a microistemas de medición (o micro-instrumentos) de alta precisión, a un costo relativamente bajo.

Dispositivos y productos MEMS se aplican y exploran en muchos campos:

- Industria Automotriz
- Industria Aeronáutica
- Energía y Exploración
- Biotecnología
- Medicina
- Electrodomésticos
- Telefonía Celular
- Monitoreo de Estructuras
- Entretenimiento
- Productos Industriales
- Impresoras
- Computadoras
- Instrumentación y Metrología

MEMS tienen un potencial enorme en Mediciones e Instrumentación. Entre estas cabe mencionar:

- Convertidores térmicos RMS-DC
- Microsistemas usados como referencia de tensión eléctrica alterna, llenando el hueco entre que existe entre el patrón de tensión Josephson y los diodos Zener

En el área de metrología eléctrica, MEMS ha permitido el desarrollo de dispositivos de medición, tales como el MJTC (*multijunction thermo-converter*), para el establecimiento de patrones de tensión y corriente eléctrica alterna.

Agenda:

- **Introducción – Qué es MEMS? Cómo se Fabrican?
Qué aplicaciones tienen?**
- **Sensores MEMS en la industria – estructuras básicas para la implementación de:**
 - **Sensores de presión,**
 - **Sensores de flujo,**
 - **Comparadores patrón de transferencia CA-CD,**
 - **Sensores de flujo,**
 - **Acelerómetros,**
 - **Termoconvertidores,**
 - **Biosensores**
- **Actuadores electrostáticos**
 - **Dispositivos MEMS para tensión eléctrica de referencia,**
 - **Micromáquinas**
- **Programa Nacional para el Diseño y Fabricación de Prototipos MEMS en México**
- **Corolario**

MEMS -

Micro-componentes para Sensores

Micromaquinado para movimiento vertical

Silicon

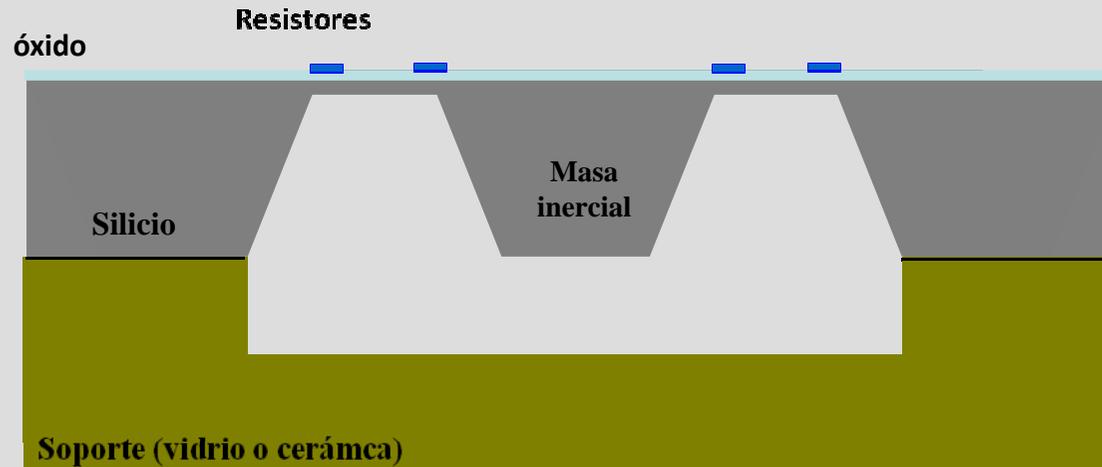
Vista de lado

Silicon

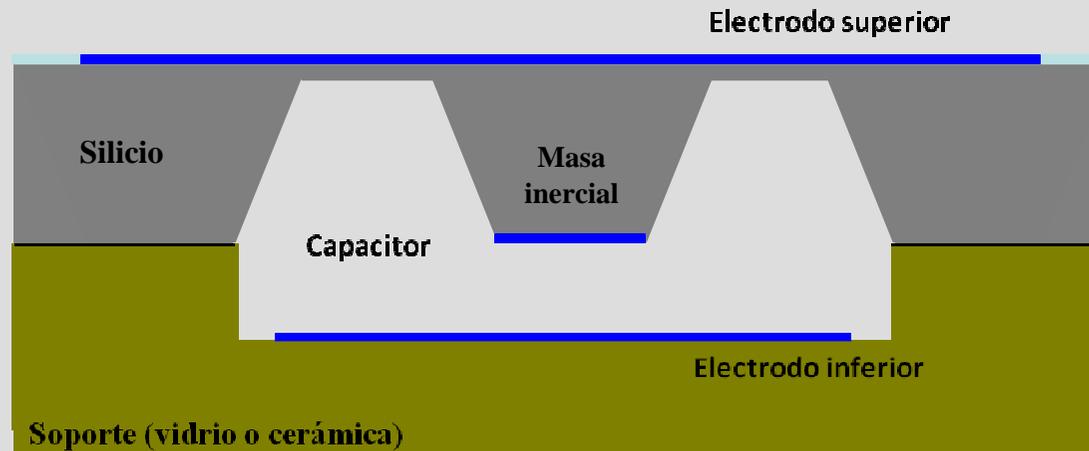
Estructuras Básicas:

Acelerómetros unidireccionales

a) Sensado piezoresistivo



b) Sensado capacitivo



Montaje y encapsulado

Micromaquinado de volumen

**-
Para movimiento vertical**

Vista de lado

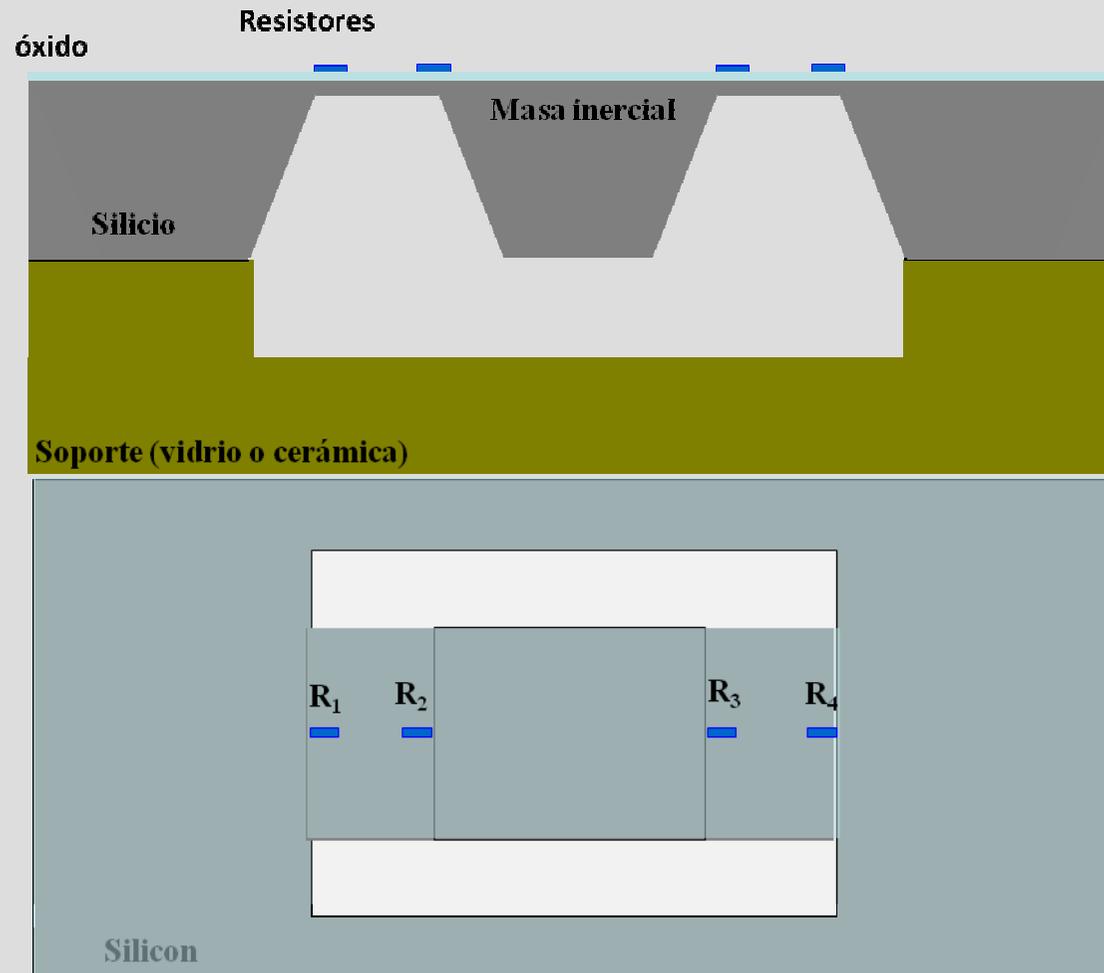
MEMS -

Micro-componentes para Sensores

Estructuras Básicas:

Acelerómetros unidireccionales

Sensado piezoresistivo



Micromaquinado de volumen

**-
Para movimiento vertical**

Vista de lado

Vista de arriba

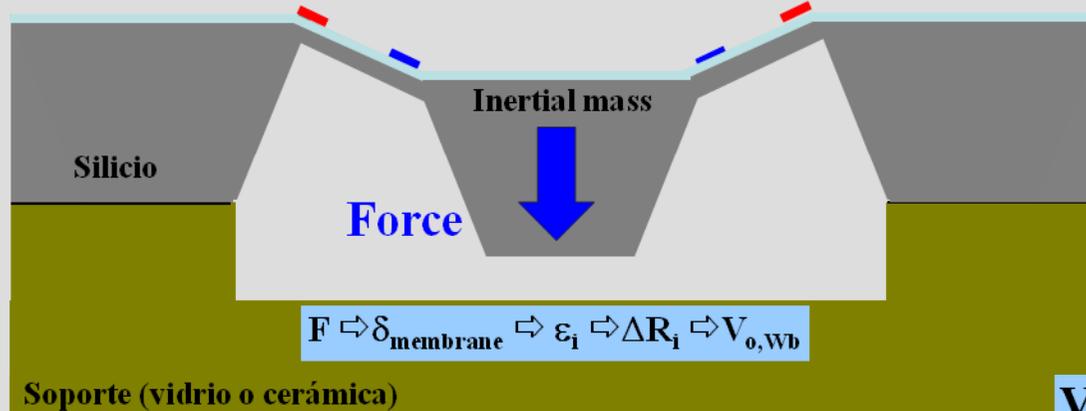
Estructuras Básicas:

Acelerómetros unidireccionales

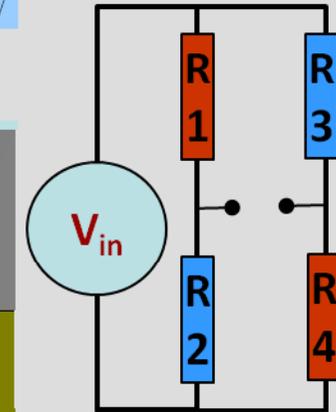
$$\Delta R_i \sim \epsilon_i \sim \text{Fuerza} \sim \text{Aceleración}$$

Al puente de W

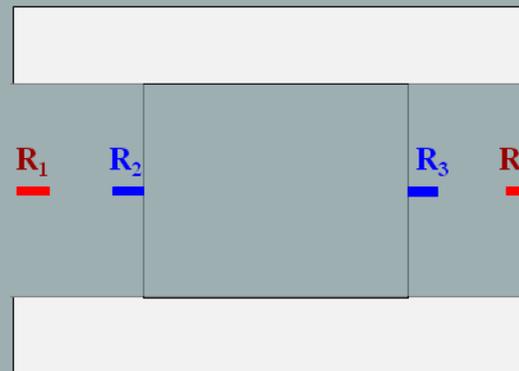
Aceleración



$$F \Leftrightarrow \delta_{\text{membrane}} \Leftrightarrow \epsilon_i \Leftrightarrow \Delta R_i \Leftrightarrow V_{o,Wb}$$



$$V_{o,Wb} \sim +\text{Aceleración}$$

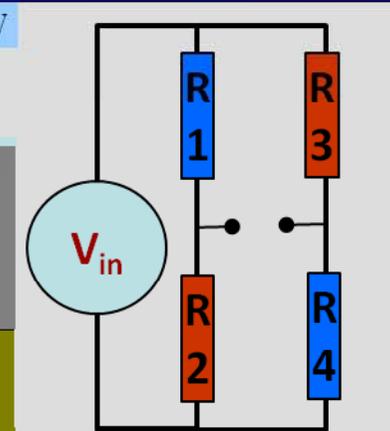
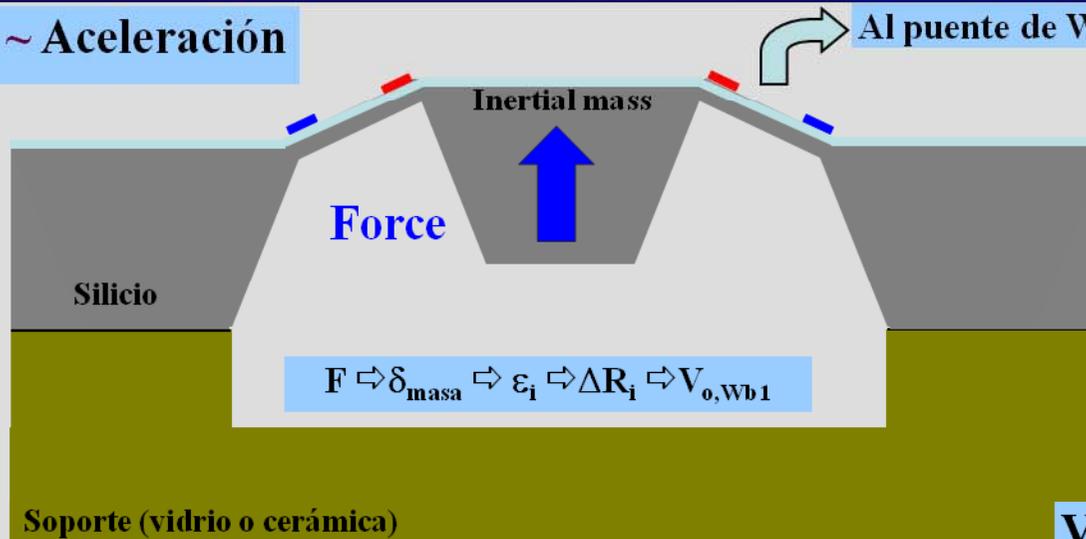


Estructuras Básicas:

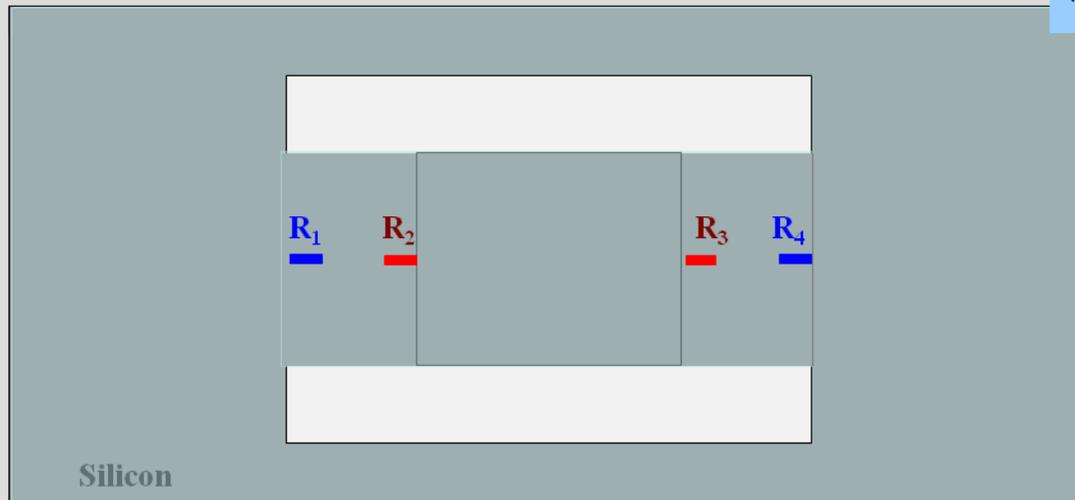
Acelerómetros unidireccionales

$$\Delta R_i \sim \epsilon_i \sim \text{Fuerza} \sim \text{Aceleración}$$

Aceleración



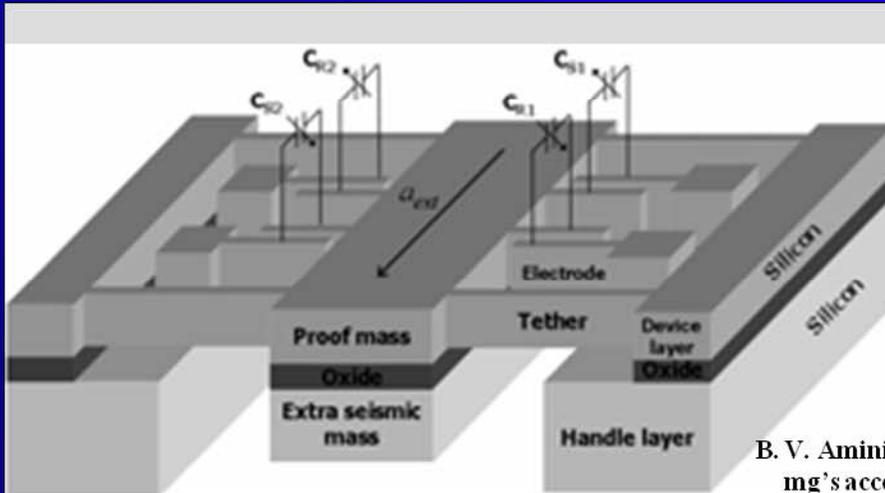
$$V_{o,Wb} \sim - \text{Aceleración}$$



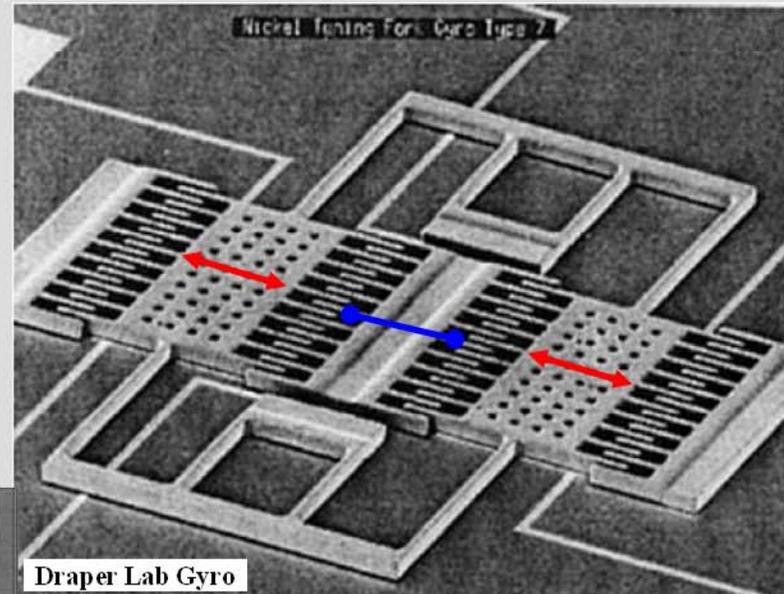
MEMS -

Micro-componentes para Sensores

Micromaquinado para movimiento horizontal

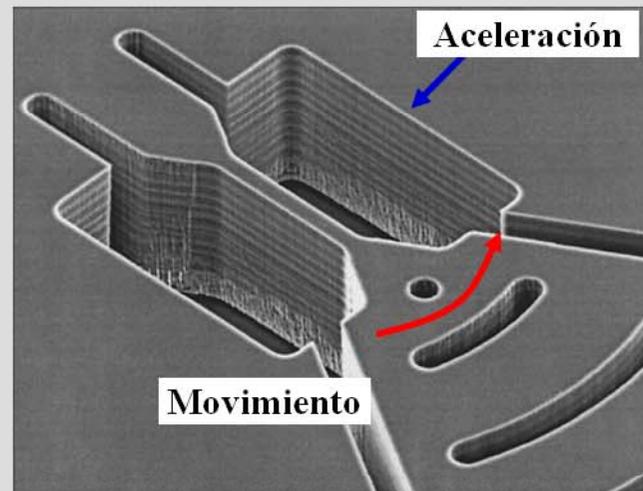


B. V. Amini - Ga Tech -
mg's accelerometer



Draper Lab Gyro

Micromaquinado de volumen para movimiento horizontal - inercia mecánica



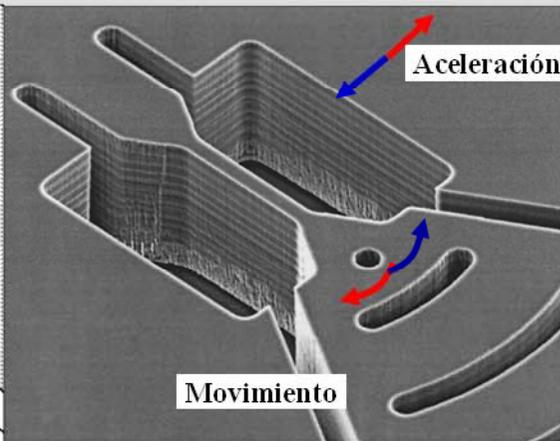
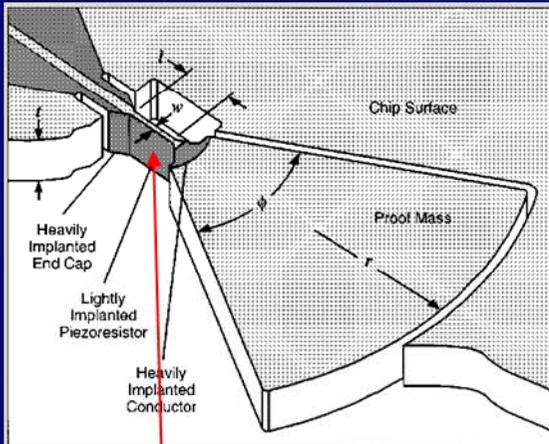
Micromaquinado de Superficie para movimiento horizontal - interacción electrostática

A. Partridge et al., J. of Microelectromech. Syst. Vol. 9, 1, 2000

MEMS -

Acelerómetro Piezoresistivo

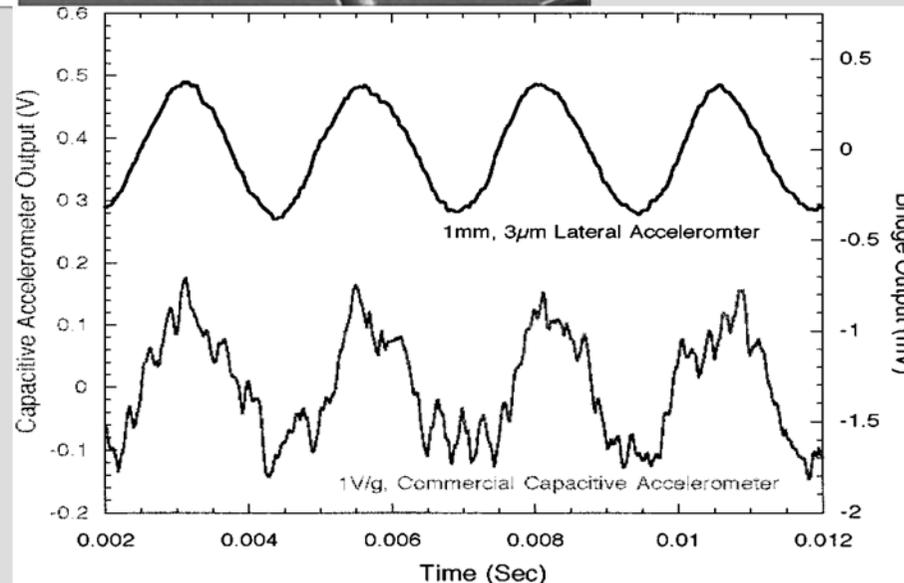
Acelerómetros unidireccionales



Micromaquinado de Volumen
-
para movimiento horizontal

Sensado piezoresistivo

$$\epsilon_{lat} = [4\rho r^3 \sin(\phi/2) / Ew^2] A$$



Piezoresistencia vs. Capacitancia

Accel = 0.2g at 400Hz

SNR is 10 veces mejor que la de aceleradores capacitivos ADXL05

A. Partridge et al., J. of Microelectromech. Syst. Vol. 9, 1, 2000

Estructuras Básicas:

Sensores de Presión



Estructuras Básicas:

Sensores de Presión

**Micromaquinado
de obleas SOI -
movimiento
vertical**

Si - capa activa
SiO₂ (buried oxide - BOX)

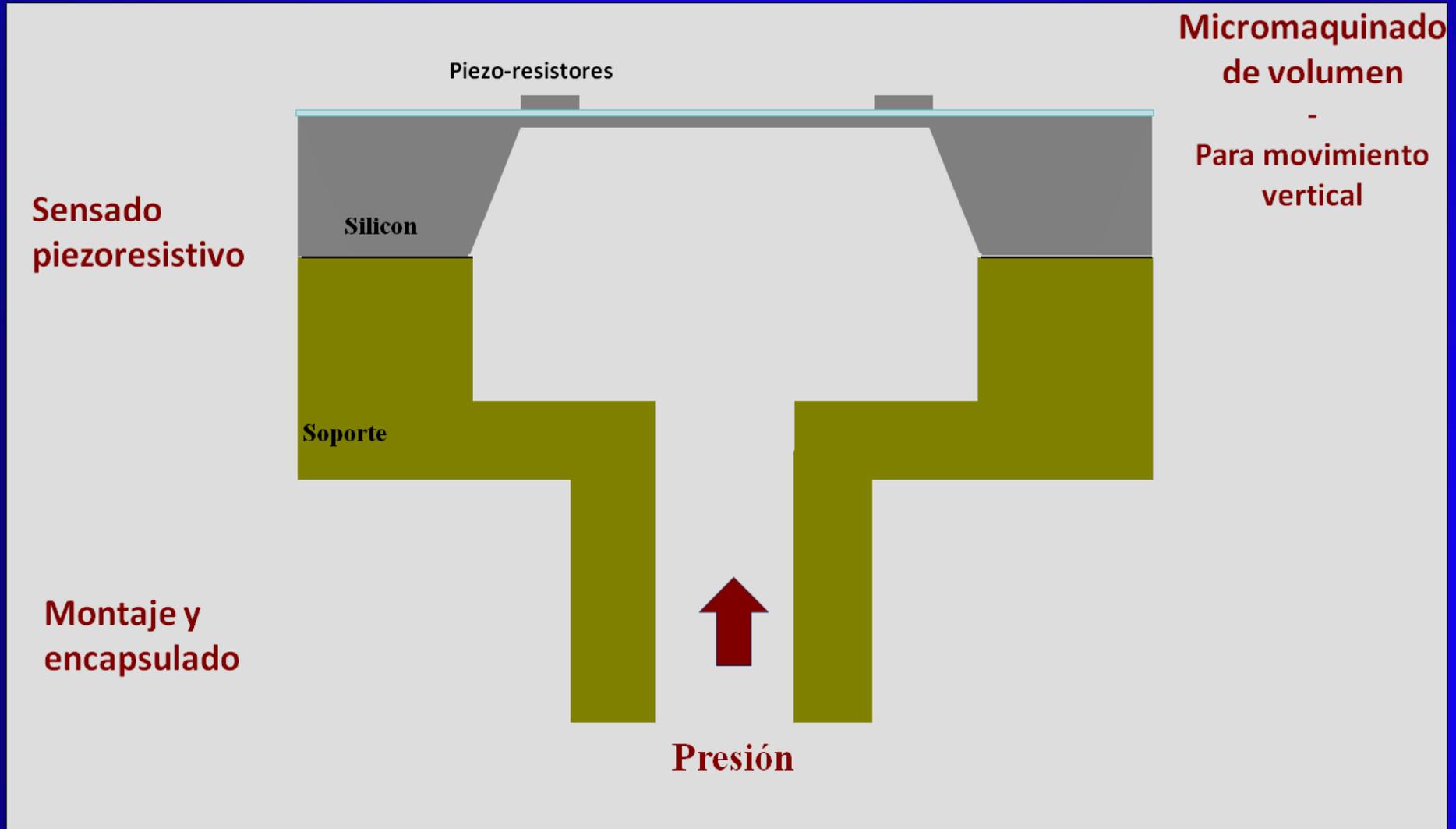
Si - oblea de soporte

Silicio



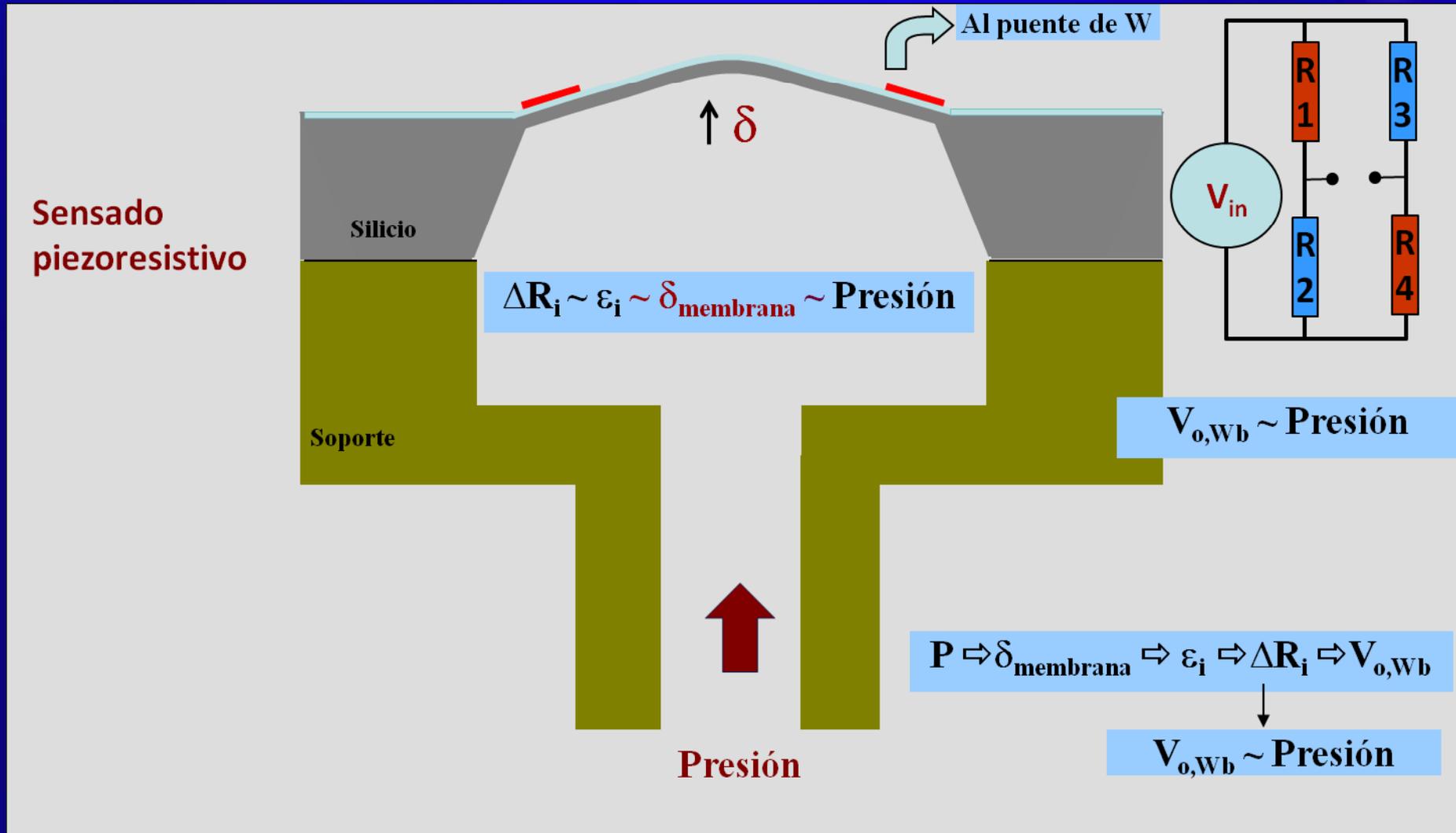
Estructuras Básicas:

Sensores de Presión



Estructuras Básicas:

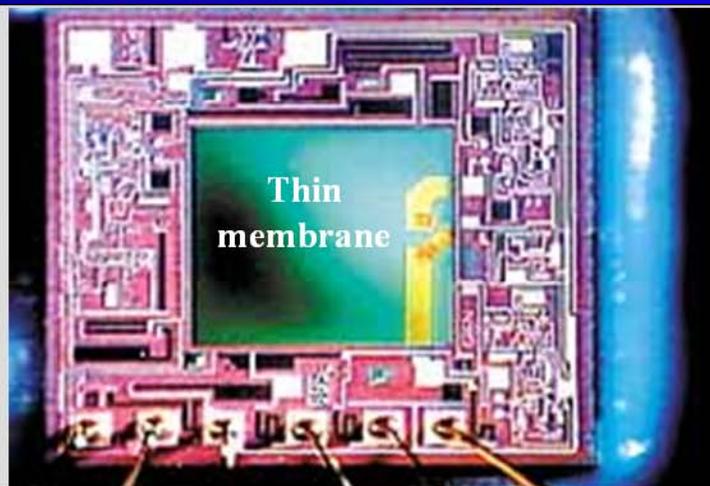
Sensores de Presión



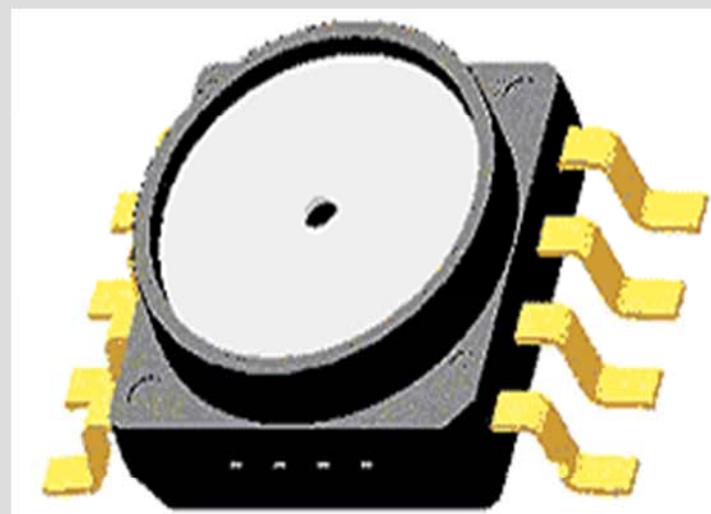
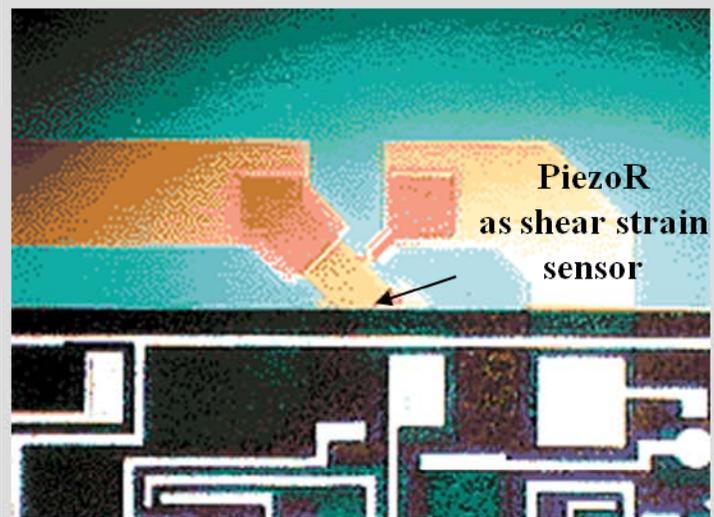
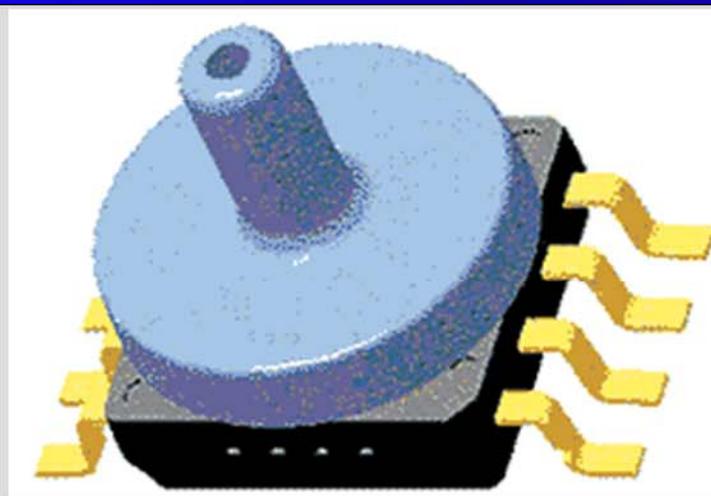
MEMS -

Sensores de Presión Comerciales

Sensores de presión

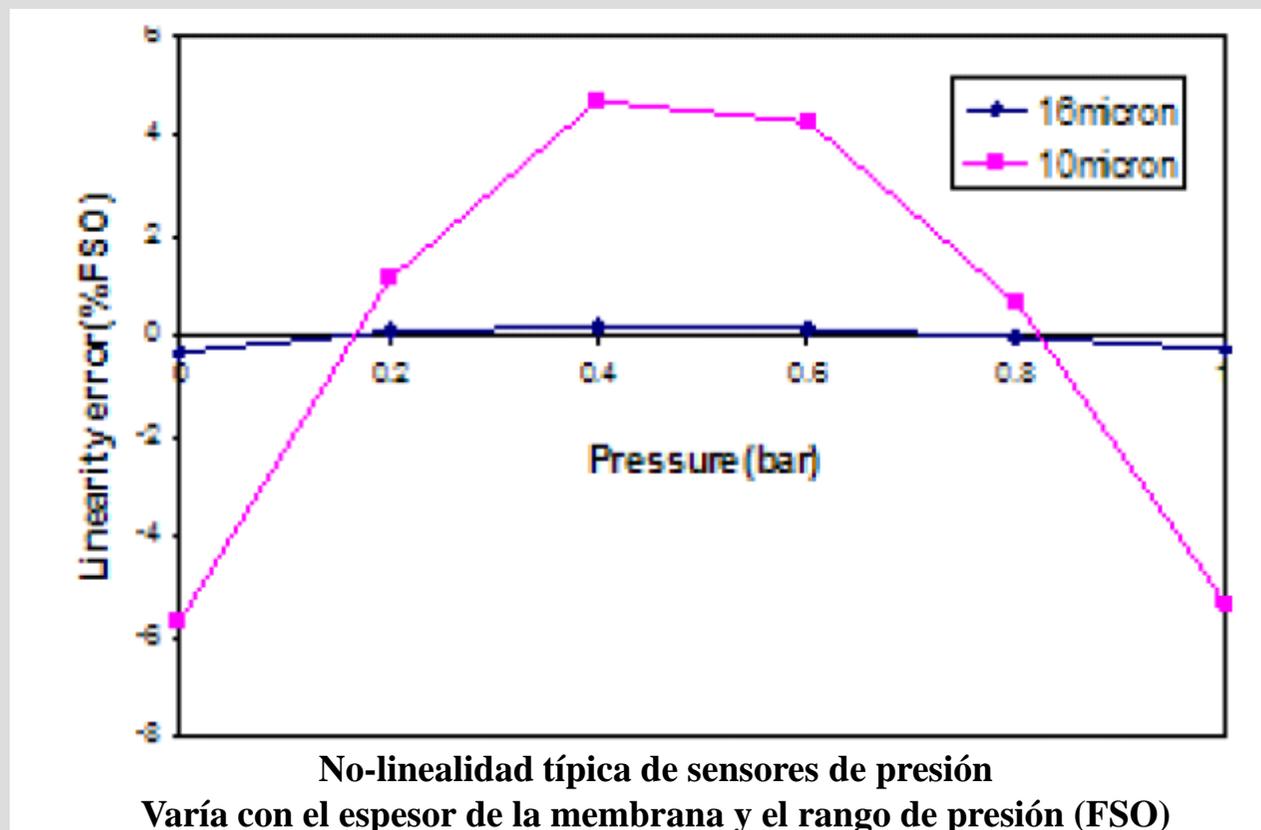


C-MOS MEMS
-
Sensor de presión
- membrana con
elementos
piezoresistivos
+
módulo de
procesamiento de
señales
-
en el mismo chip



Motorola

Sensores de presión



MEMS -

Micro-componentes para Sensores

Estructuras Básicas: Convertidores Termo-Eléctricos & Microcalorímetros

$\text{Si}_3\text{N}_4\text{-SiO}_2\text{-Si}_3\text{N}_4$

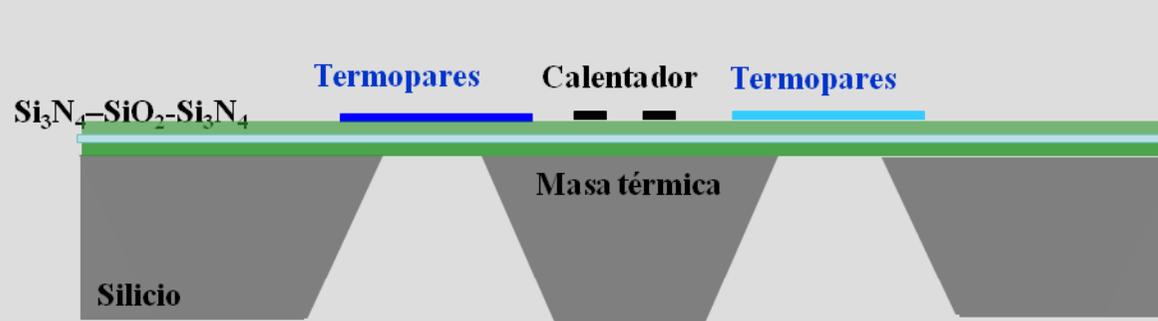
Silicon

Vista de lado

MEMS -

Micro-componentes para Sensores

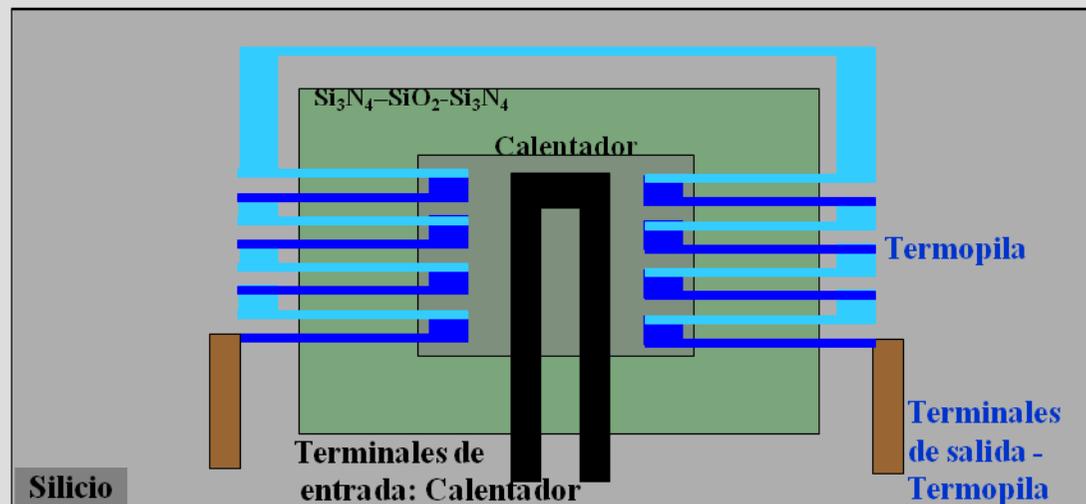
Estructuras Básicas: Convertidores Termo-Eléctricos & Microcalorímetros



Micromaquinado
de volumen

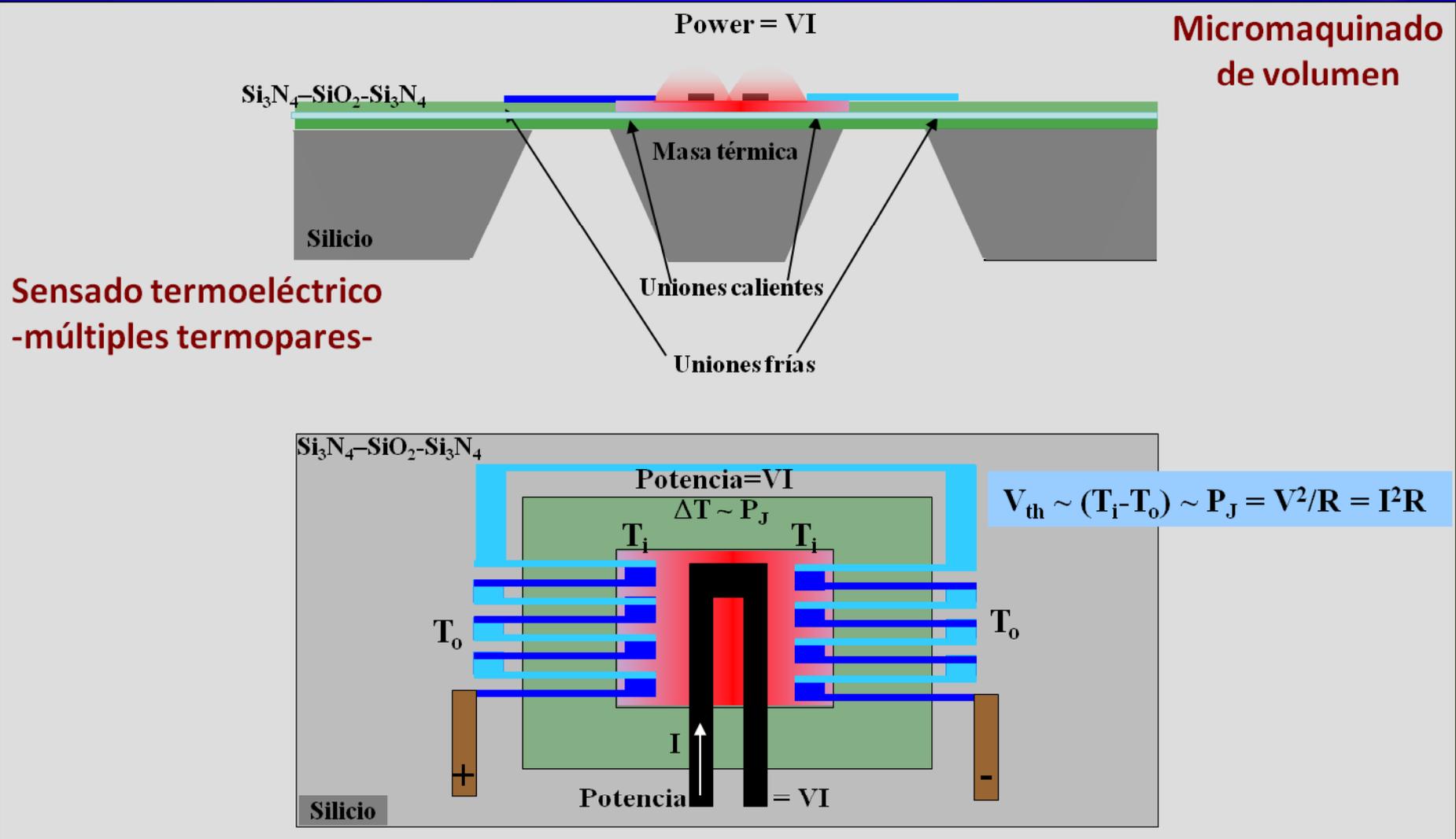
Vista de lado

Sensado termoeléctrico
-múltiples termopares-



Vista de arriba

Estructuras Básicas: Convertidores Termo-Eléctricos & Microcalorímetros

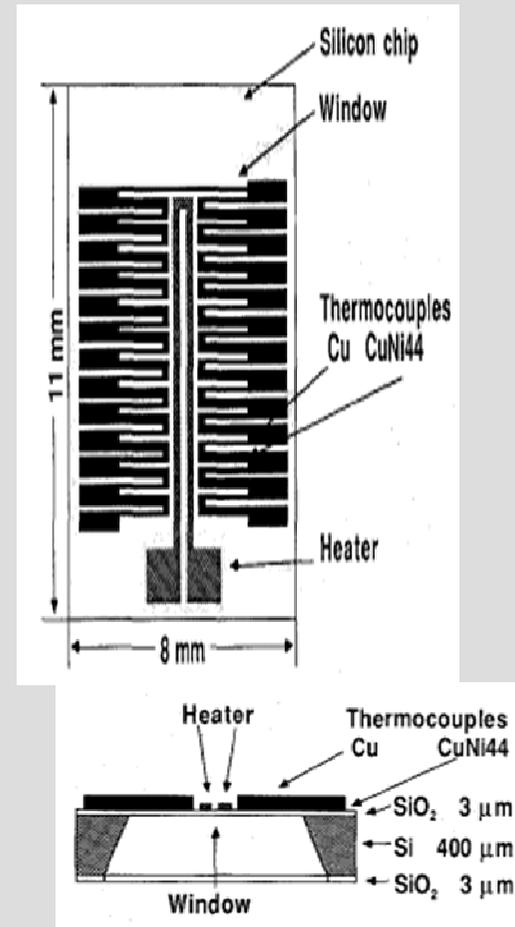
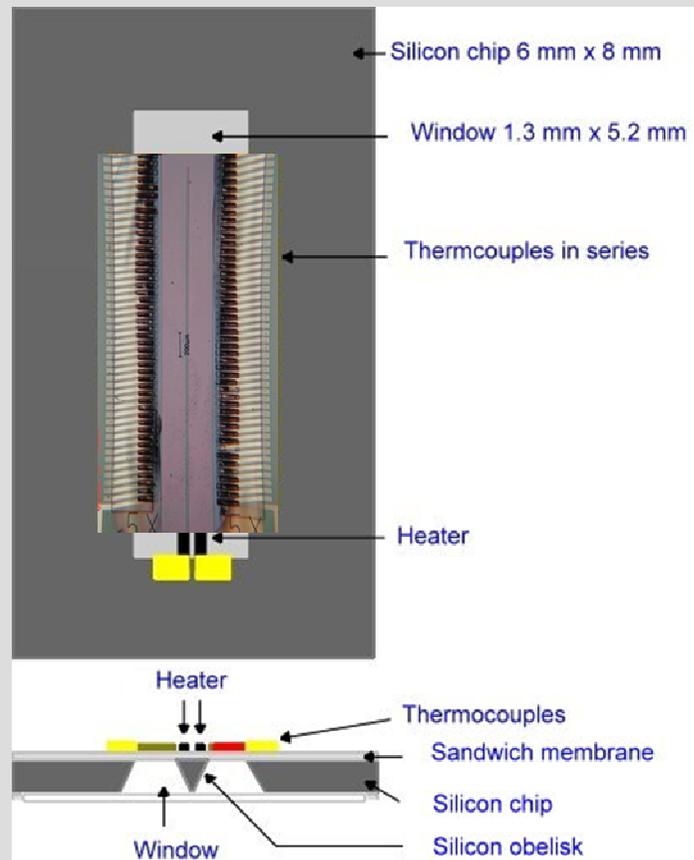


MEMS - Patrón de Transferencia CA-CD: MJTC

Sensores Termo-Eléctricos en Metrología:

Patrones de Medición de tensión y corrientes alterna

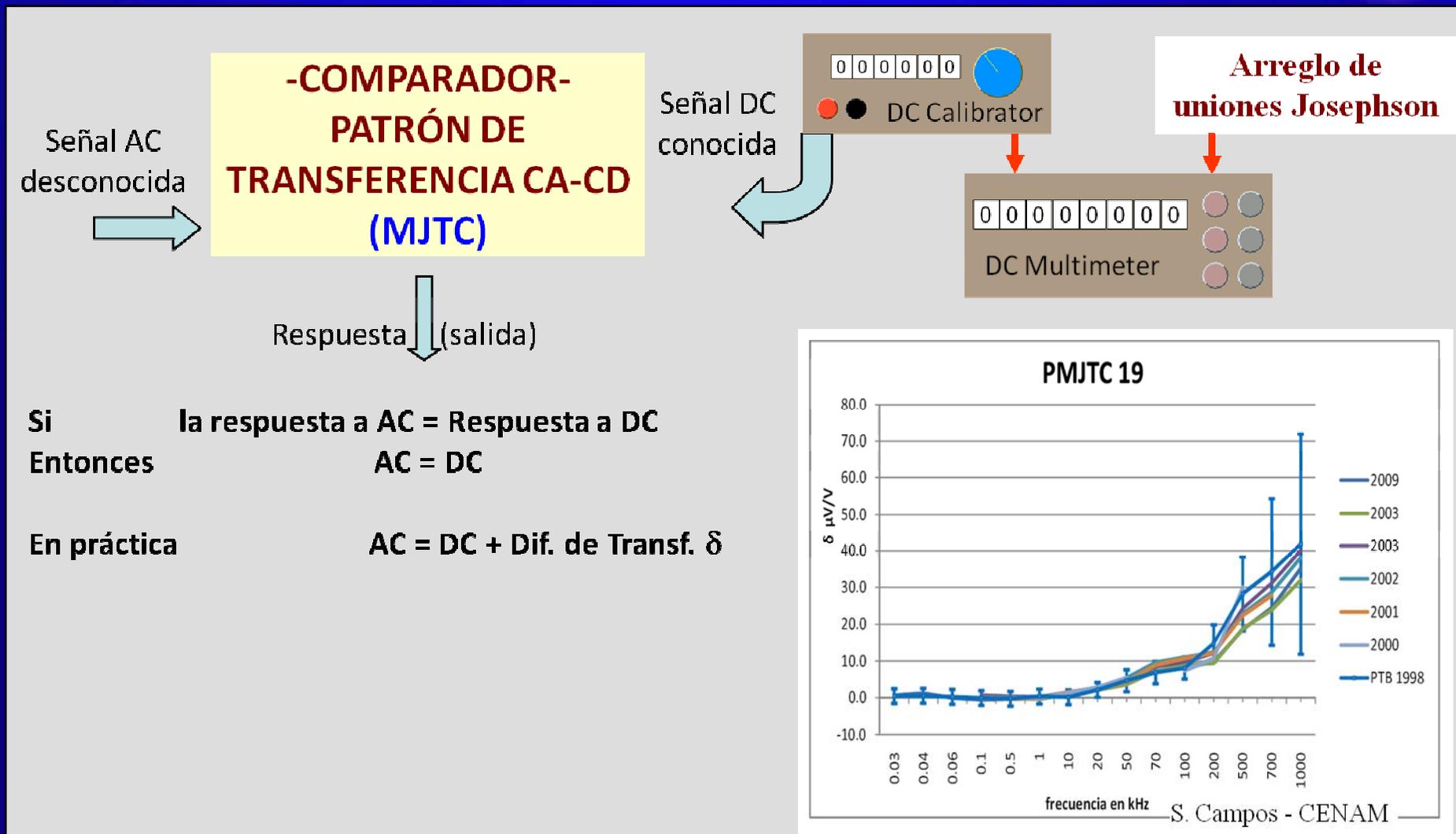
PTB's Planar-MJTC



Physica Scripta. Vol. 41, 718-721, 1990. <http://www.ptb.de/en/org/2/21/212/pmjtc.htm>

MEMS - Patrón de Transferencia CA-CD: MJTC

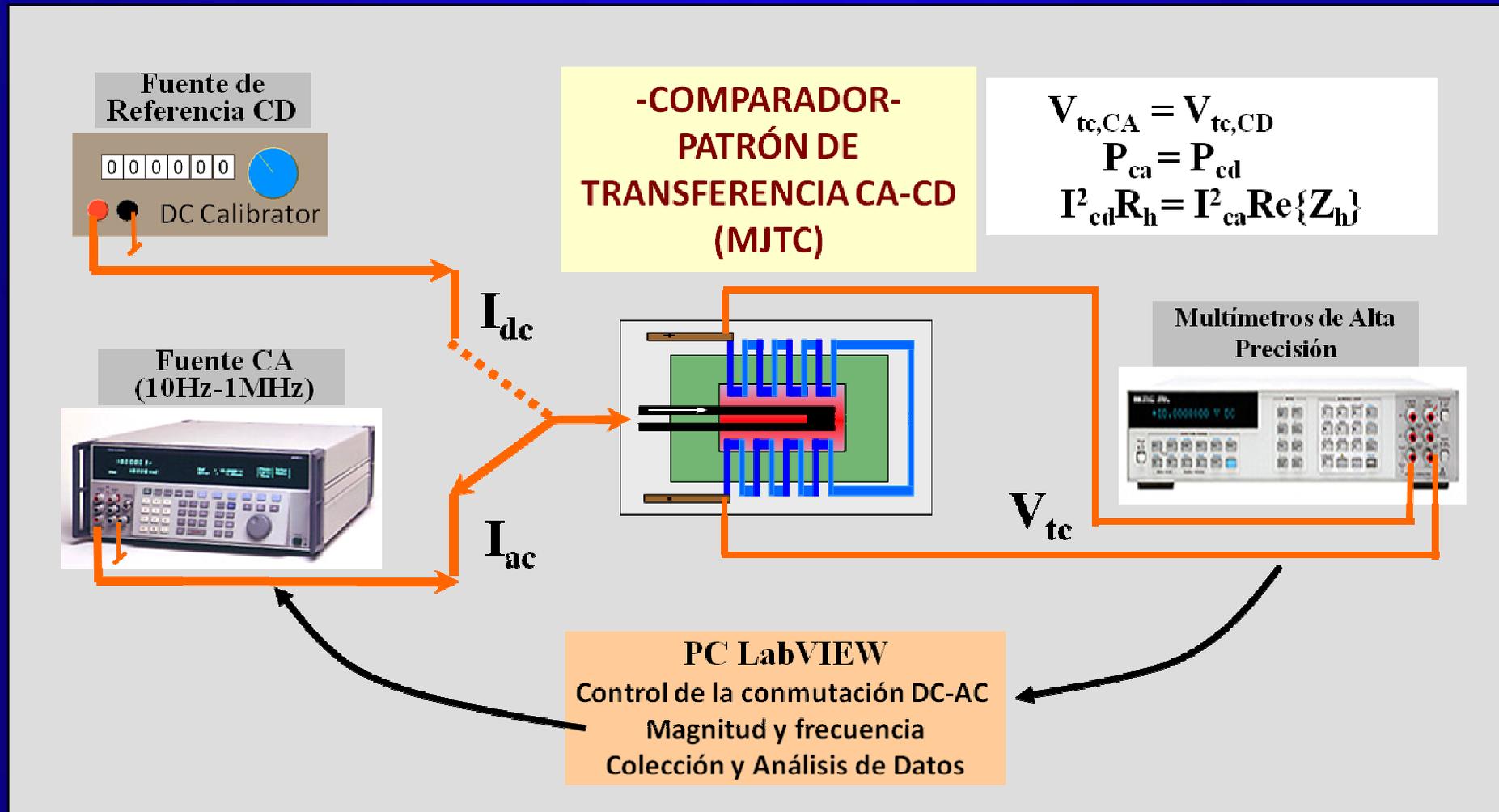
Patrón de transferencia - Calibración de Señales CA y Generadores



MEMS - Patrón de Transferencia CA-CD: MJTC

“MJTC (RMS-DC) Thermo-Converters”

para la medición del valor efectivo (RMS) de señales alternas

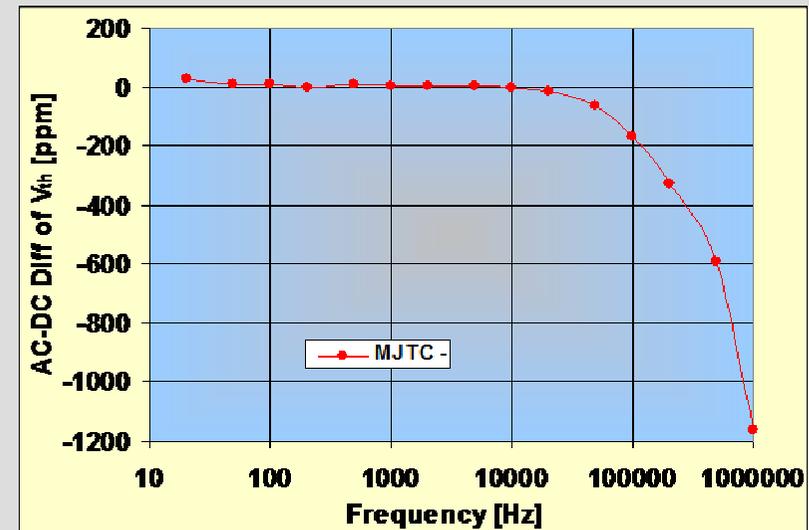
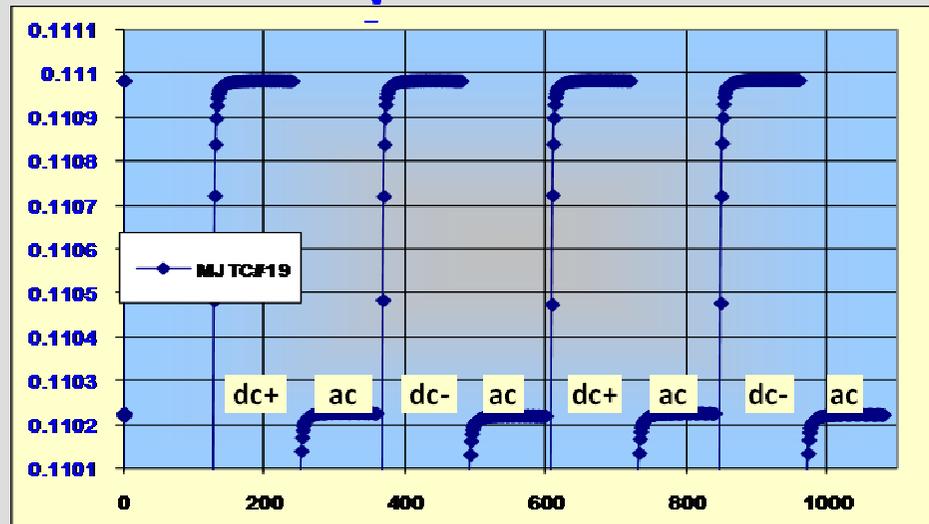
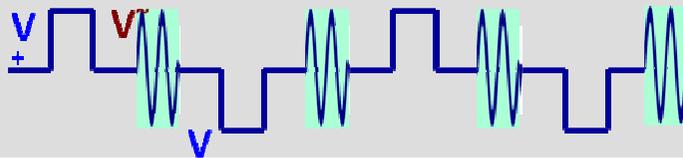


MEMS - Patrón de Transferencia CA-DC: MJTC

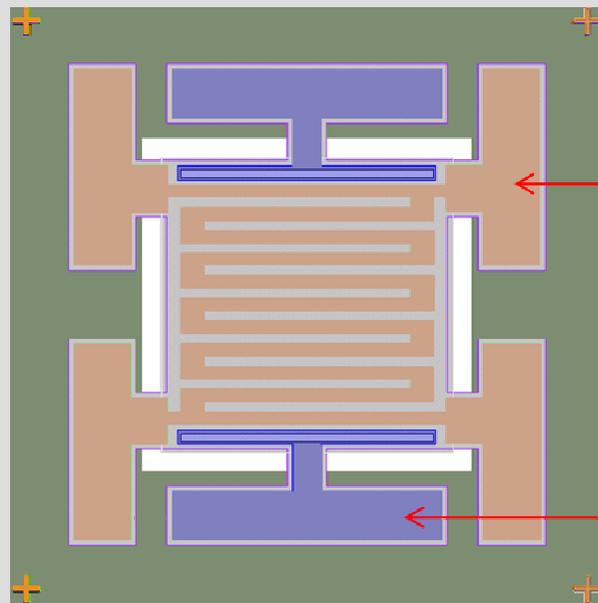
“MJTC (RMS-DC) Thermo-Converters”

para la medición del valor efectivo (RMS) de señales alternas

$$\delta = \frac{Q_{ac} - Q_{dc}}{Q_{dc}} \quad \longrightarrow \quad \delta = \frac{E_{ac} - E_{dc}}{nE_{dc}} \Big|_{V_{ac}=V_{dc}}$$



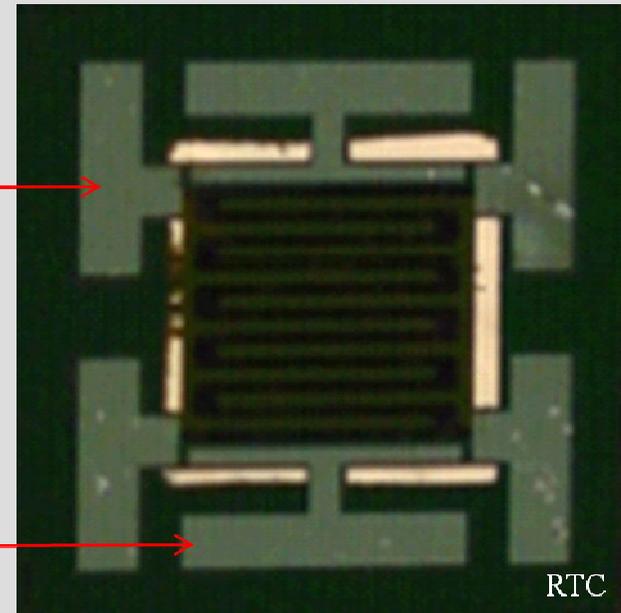
Estructura en Desarrollo (CENAM): Convertidor Termo-Eléctrico Resistivo



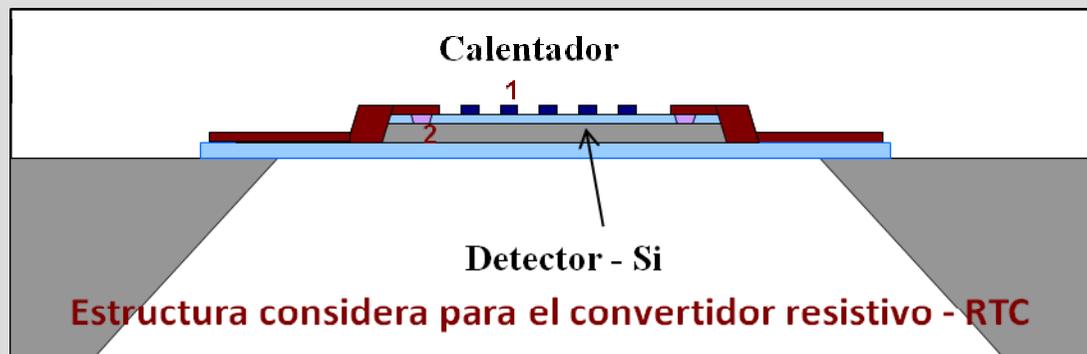
Concepto

Calentador

detector - Si



RTC



Micromaquinado de obleas SOI

MEMS - Micro-componentes para Sensores Flexibles

Sensores en poli-ímidos para la implementación de microcalorímetros, sensores de flujo, deformación, campos magnéticos, ..

Si – capa activa
SiO₂ (buried oxide- BOX)

Si – oblea de soporte

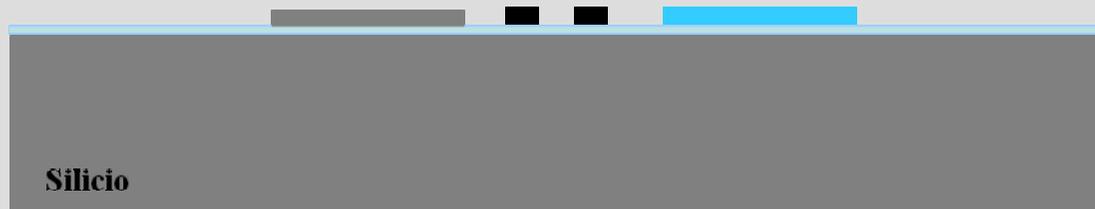


MEMS - Micro-componentes para Sensores Flexibles

Sensores en poli-ímidos para la implementación de microcalorímetros, sensores de flujo, deformación, campos magnéticos, ..

Si - capa activa
SiO₂ (buried oxide- BOX)

Si - oblea de soporte



Micromaquinado de obleas SOI y depósito de películas poliméricas

Micromaquinado de la capa activa y posible depósito de películas metálicas

MEMS - Micro-componentes para Sensores Flexibles

Sensores en poli-ímidos para la implementación de microcalorímetros, sensores de flujo, deformación, campos magnéticos, ..

Capa de poli-imido

Si - capa activa

SiO₂ (buried oxide- BOX)

Si - oblea de soporte



Micromaquinado de obleas SOI y depósito de películas poliméricas

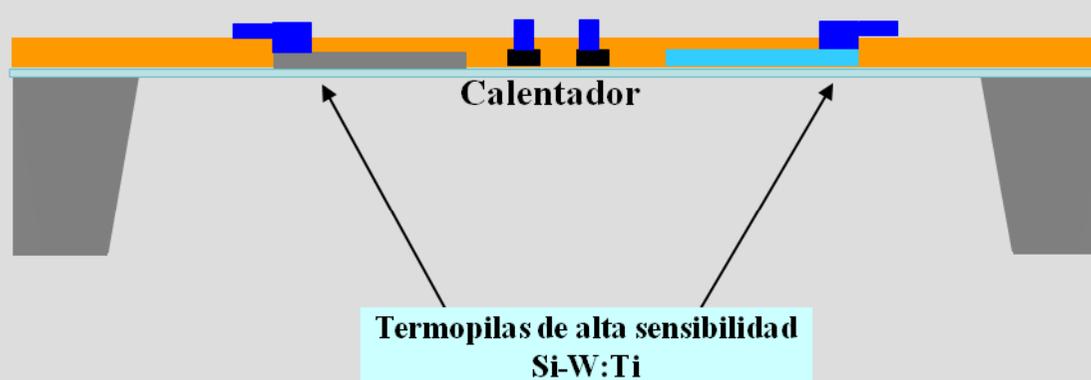
Poly-ímidos ofrecen:

- Excelente resistencia a tensiones mecánicas
- Estabilidad estructural,
- Baja conductividad térmica
- Alta resistencia eléctrica
- Resistencia química

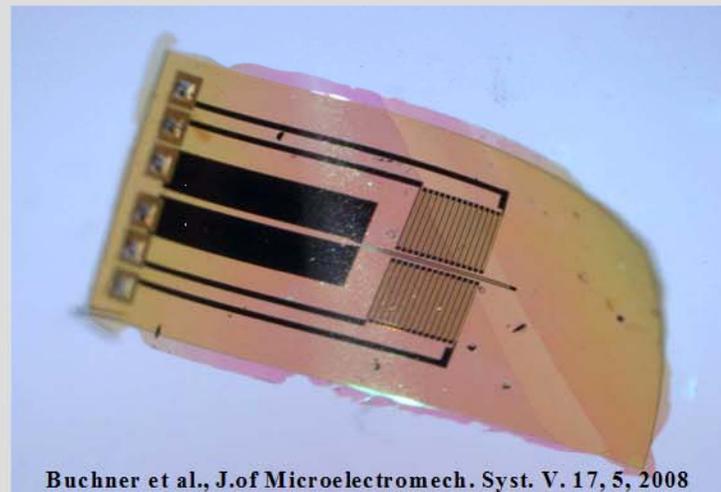
MEMS - Micro-componentes para Sensores Flexibles

Sensores de flujo (hot wire anemometers) con detección termoelectrica

Lineas metálicas
Capa de poli-imido



Micromaquinado
de obleas SOI
y
depósito de
películas
poliméricas

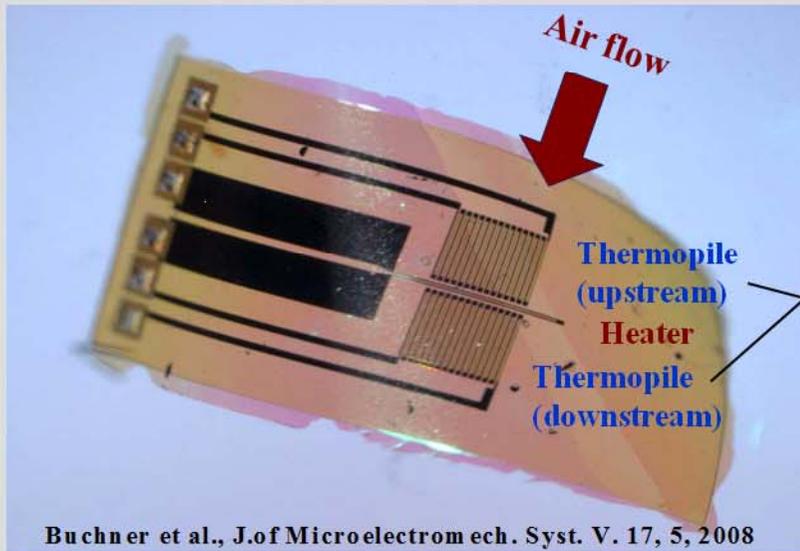


Buchner et al., J.of Microelectromech. Syst. V. 17, 5, 2008

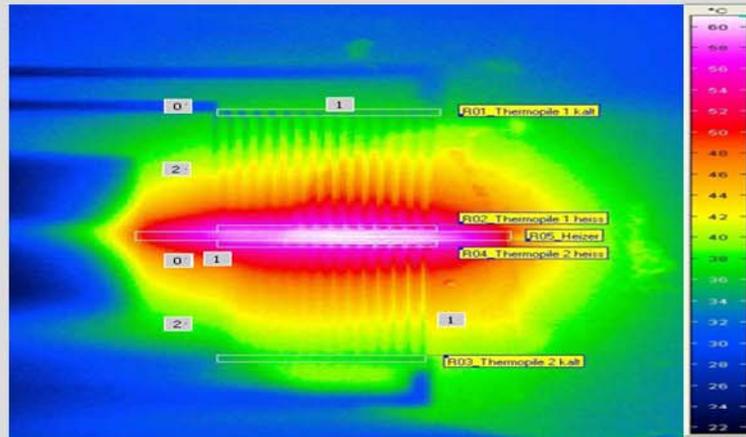
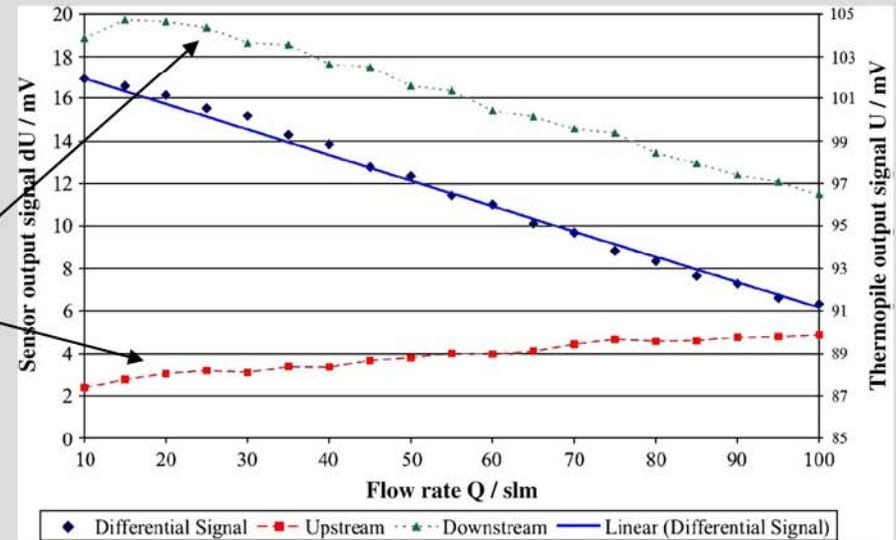
MEMS - Anemómetros de Alambre Caliente en Poli-ímidos

Sensores de flujo de aire – magnitud y dirección

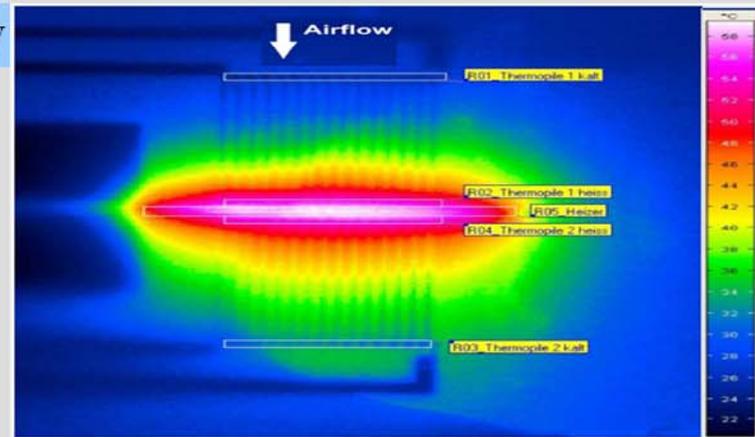
➤ convección forzada



Buchner et al., J.of Microelectromech. Syst. V. 17, 5, 2008



$$V_{tp} \sim \text{Flow}$$



MEMS -

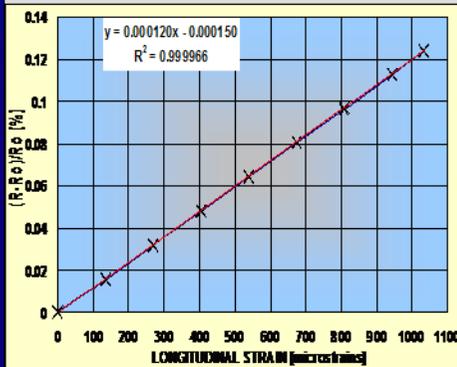
Sensores Flexibles y Adherentes

Sensores de deformación (strain gages) de alta sensibilidad, y sensores de campo magnético (Hall-Probes)

Capa de poli-imido
Lineas metálicas



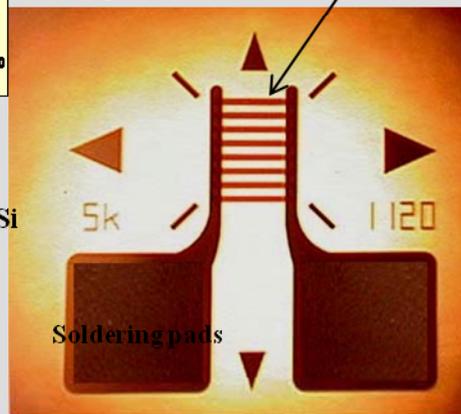
Micromaquinado de obleas SOI y depósito de películas poliméricas



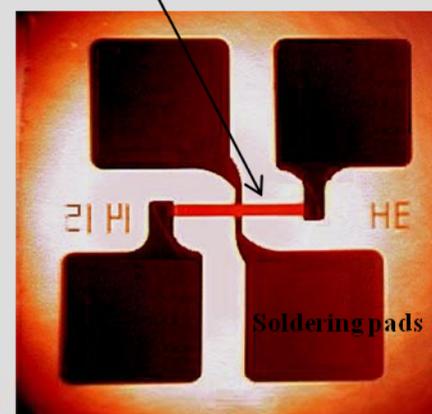
GF = 120-160

Sensor de deformación de Si de alta sensibilidad (Strain Gage)

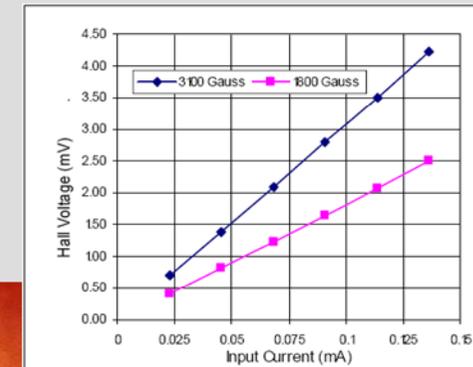
$R_g \sim \epsilon$



$V_H \sim B$



Dispositivo Hall de alta sensibilidad



S = 10μV/mA-Gauss

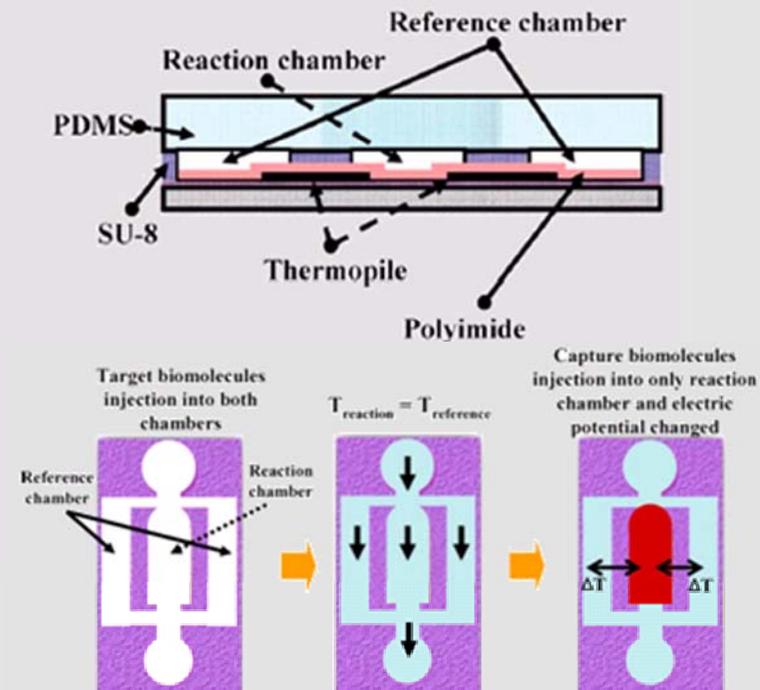
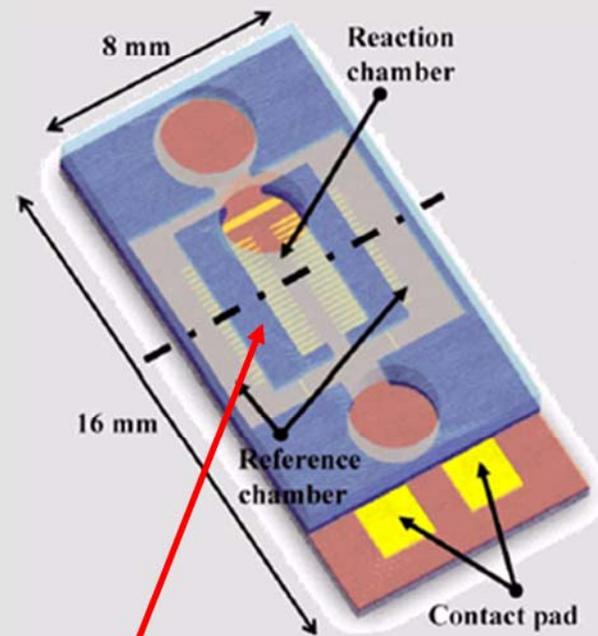
J. Siekkinen, M. Nagy, C. Apanius and H. Estrada, Sensors Mag. 2001

N. Singh and H. Estrada, Proceed. SPIE Conf., v.7204 - 2008

MEMS - Micro-componentes para Bio-Sensores

Sensores Térmicos – Microcalorímetros - Reacciones Químico-Biológicas
(fabricación incluye capas de silicio, metales, poli-ímidos y polímeros)

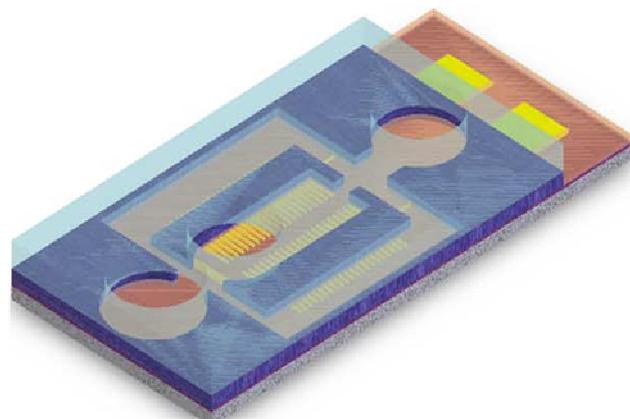
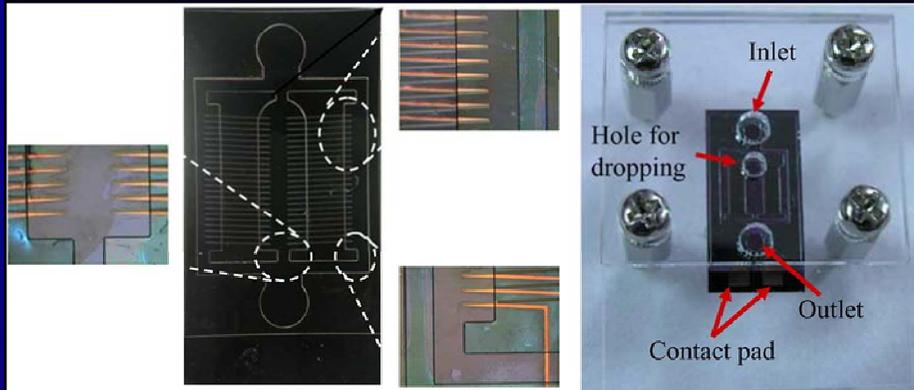
Neisseria Meningitidis Group B (NMGB) - Detección usando un Biosensor Micro-calorimetrico con microcanal para Flujo Dividido



42 termopares en serie (termopilas) son definidos para la detección de una reacción química

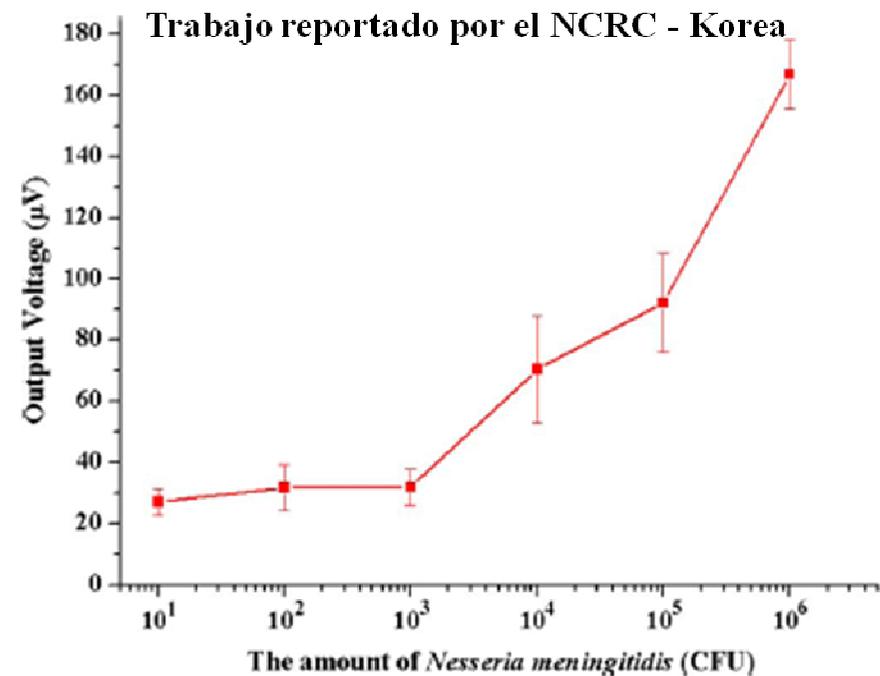
JOURNAL OF MICROELECTROMECHANICAL SYSTEMS, VOL. 17, NO. 3, JUNE 2008

Sensores Térmicos – Microcalorímetros - Reacciones Químico-Biológicas (fabricación incluye capas de silicio, metales, poli-ímidos y polímeros)



PDMS channel integration with the thermal components

Detección de Neisseria Meningitidis



JOURNAL OF MICROELECTROMECHANICAL SYSTEMS, VOL. 17, NO. 3, JUNE 2008

Sensores Térmicos de Inclinación (Tilt-Sensors)

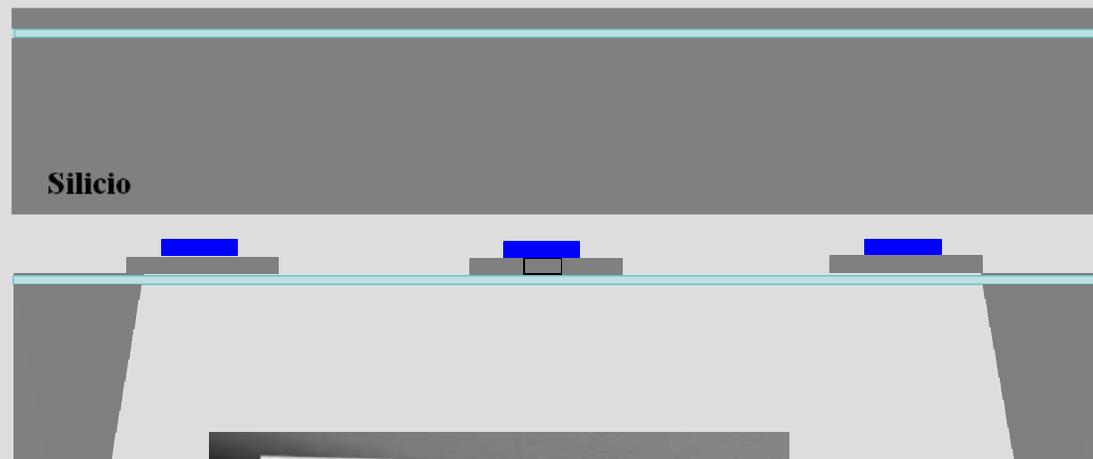
➤ Convección natural

Micromaquinado de obleas SOI

Si – capa activa
SiO₂ (buried oxide- BOX)

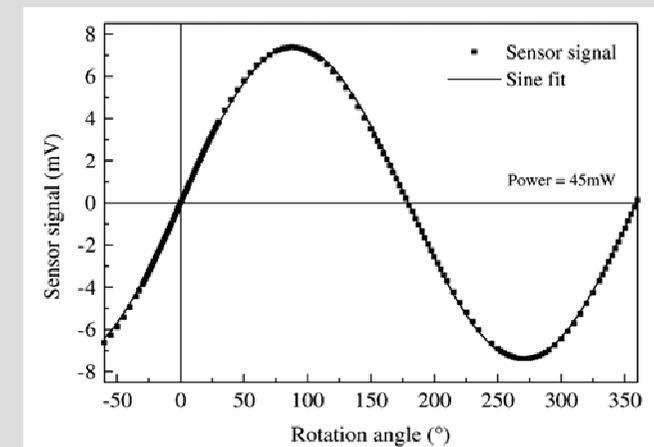
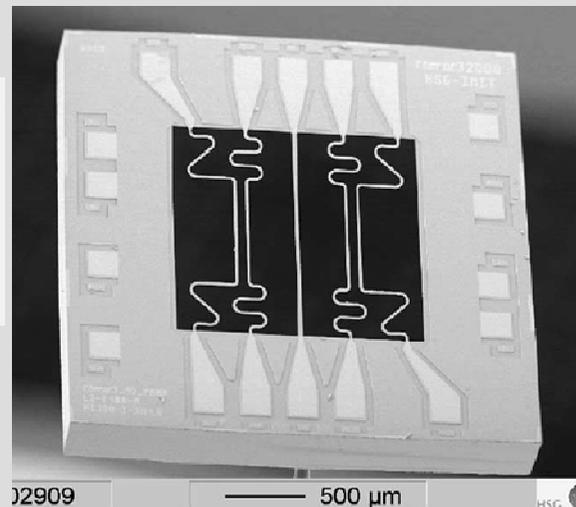
Si – oblea de soporte

Líneas metálicas
Si – capa activa



Sensor de inclinación térmico

- Trabaja en el principio de convección libre
- Su sensibilidad depende del volumen del encapsulado



S. Billat et al., Sensors and Actuators A, v. 97, p.125, 2002

Agenda:

- **Introducción – Qué es MEMS? Cómo se Fabrican? Qué aplicaciones tienen?**
- **Sensores MEMS en la industria – estructuras básicas para la implementación de:**
 - **Sensores de presión,**
 - **Sensores de flujo,**
 - **Comparadores patrón de transferencia CA-CD**
 - **Acelerómetros,**
 - **Termoconvertidores,**
 - **Biosensores,**
- **Actuadores electrostáticos**
 - **Dispositivos MEMS para tensión eléctrica de referencia,**
 - **Micromáquinas**
- **Programa Nacional para el Diseño y Fabricación de Prototipos MEMS en México**
- **Corolario**

MEMS - Micro-componentes para Actuadores

Actuadores electrostáticos

➤ Referencia de tensión eléctrica directa

Tensiones eléctricas aplicadas

- fuerzas electrostáticas entre electrodos
- disminución de la distancia d_0 (x)

$$F = V_a^2 \epsilon A / 2(d-x)^2$$

se equilibra con la fuerza mecánica $F = k x$

k depende de las propiedades mecánicas de Si y sus dimensiones.

$$V_a = [2(d-x)^2 kx / \epsilon A]^{1/2} \quad (1)$$

La máxima tensión eléctrica ocurre cuando $x = d/3$

$$V_{\max} = V_{\text{pull-in}} = (8kd^2 / 27C_0)^{1/2} \quad C_0 = \epsilon A / d_0 \quad (2)$$

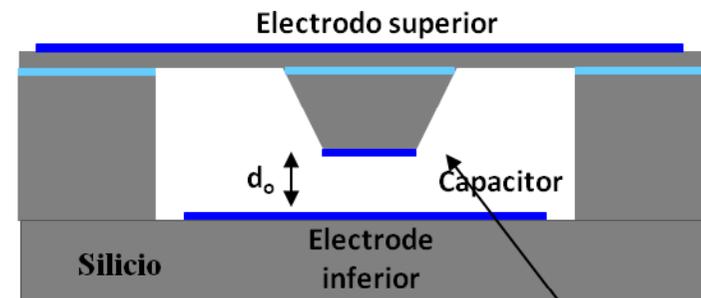
Esta tensión eléctrica ("pull-in voltage") puede ser usada como *referencia de tensión*.

La incertidumbre de este valor es proporcional a la incertidumbre relativa del desplazamiento $(\Delta x/d)^2$, i.e.,

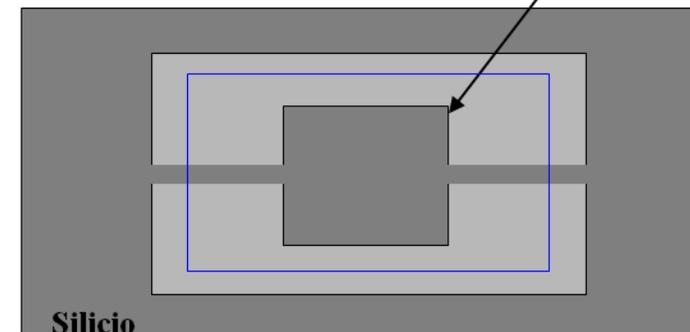
De (1) y (2): $(\Delta V/V)_{\text{pull-in}} \approx -27(\Delta x/d)^2/8$

Puesto que Δx puede fácilmente controlarse a un nivel de 10^{-3} , la incertidumbre es del orden de 10^{-6} o mejor.

Micromaquinado y Ensamble de obleas para movimiento vertical



Actuación electrostática Placa móvil



MEMS - Micro-componentes para Actuadores

Actuadores electrostáticos

➤ Referencia de tensión eléctrica directa

Si esta interacción se produce con señales de corriente alterna $I = I_0 \sin(\omega t)$ las fuerzas que se establecen son

$$F = -d(\text{Energía})/dx = -d(Q^2/2C)/dx = I_0^2 \cos^2(\omega t)/2\epsilon A \omega^2$$

De tal forma que $\langle F \rangle = I_{\text{rms}}^2 / 2\epsilon A \omega^2 = V_a^2 \epsilon A / 2(d-x)^2 = k x$

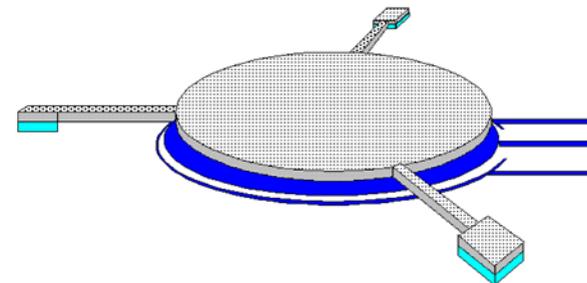
Resultando en un **tensión eléctrica alterna (RMS)**, V_{AC} , igual a

$$V_{AC} = V_{a,\text{RMS}} = (I_{\text{RMS}} / \omega C_0) [1 - 3(2I_{\text{RMS}} / 3\omega C_0 V_{\text{pull-in}})^2] \quad V_{AC,\text{max}} = V_{\text{pull-in}} = (8kd^2 / 27C_0)^{1/2} \quad (1)$$

a una corriente $I_{\text{RMS}} = (3\omega C_0 V_{\text{pull-in}}) / 2$. Este valor puede ser usado como *referencia de tensión eléctrica alterna*. La incertidumbre de este valor es proporcional a la incertidumbre relativa de la corriente al cuadrado,

$$(\Delta V_{AC} / V_{AC,\text{max}}) \approx -3(\Delta I / I_{\text{RMS,max}})^2 / 2$$

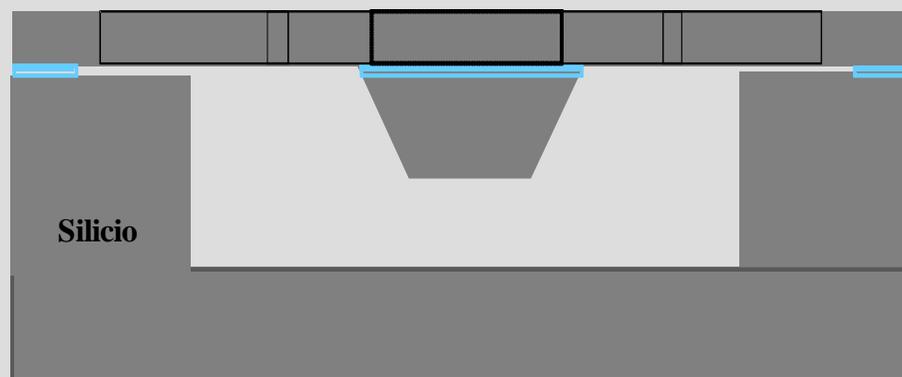
- Capacitor diseñado para frecuencias $> f_{\text{resonancia}}$ de la placa flotante del capacitor, de 60KHz ($V_{\text{pull-in}} = 10\text{V}$)
- Se puede usar como referencia de tensión eléctrica alterna, ya que cambios pequeños de la corriente I_{RMS} tienen un efecto mínimo en el valor de $V_{ac,\text{max}}$.
- Se reportan estabilidades de 10ppm en tres días



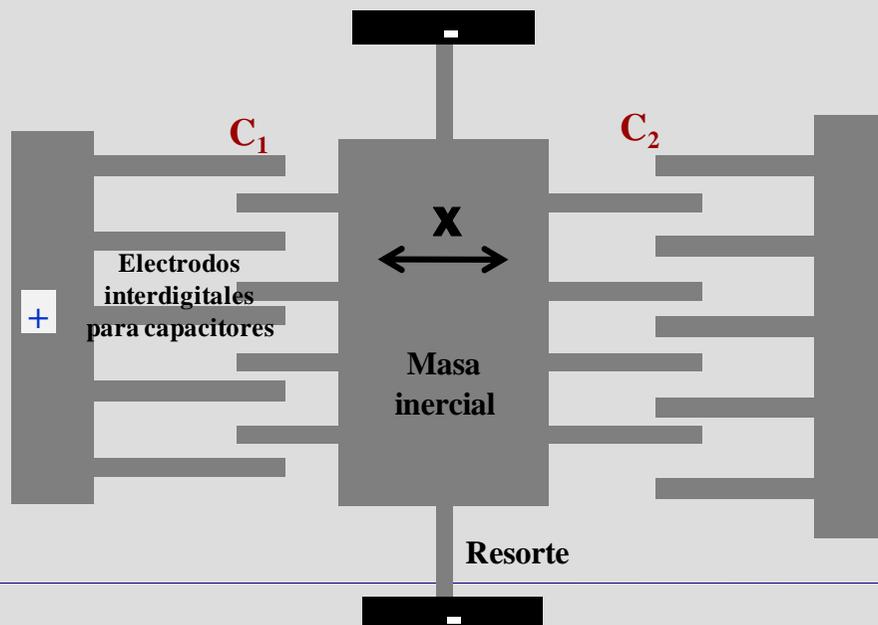
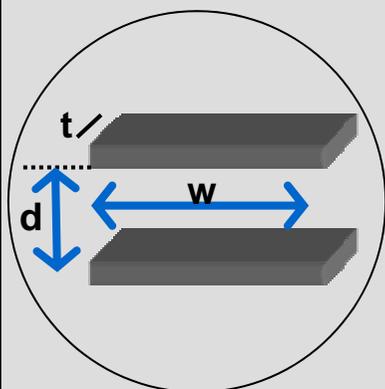
Estructuras Básicas:

Actuadores Electrostáticos

Actuación
Capacitiva



Micromaquinado
y ensamble de
obleas
Para movimiento
horizontal

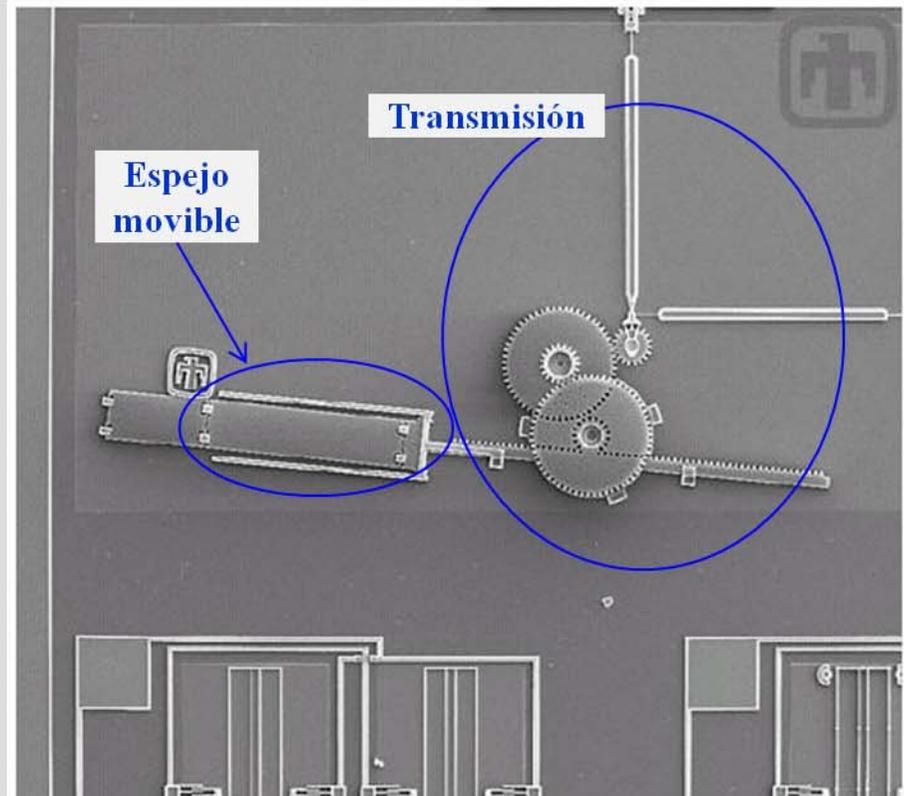
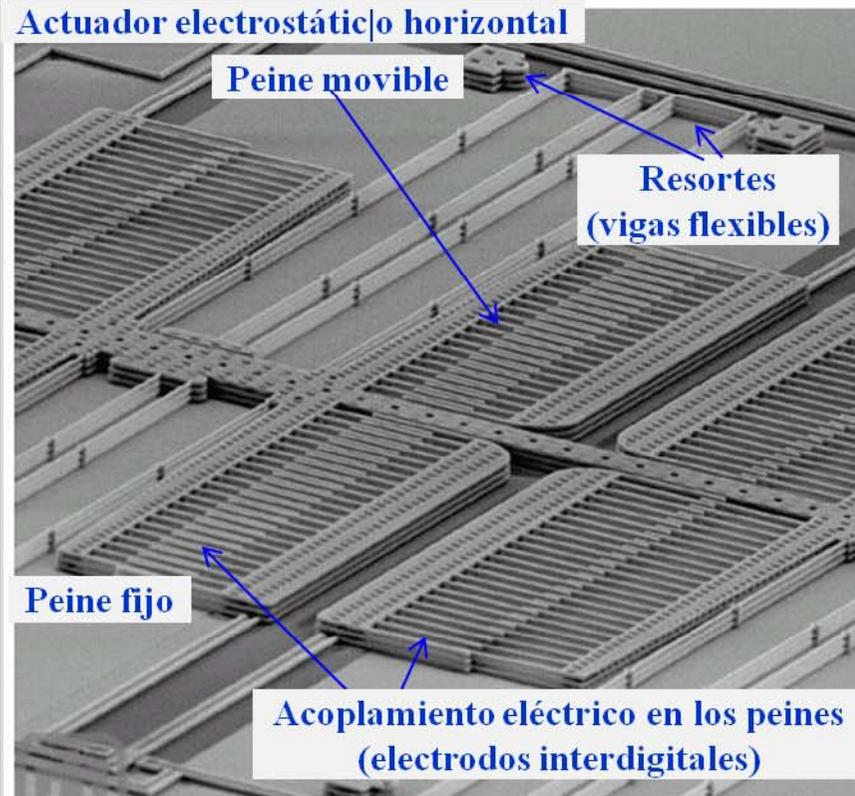


Estructura base del acelerómetro
desarrollado por UC-Berkeley
y comercializado por ADI (ADXL 50)

$$F = -\epsilon_0 \frac{wt}{d^2} V^2$$

$$C = \epsilon_0 \frac{A}{d} = \epsilon_0 \frac{wt}{d}$$

Micro-máquinas para el manejo de micro-espejos (silicio poli-cristalino)



Transmisión:

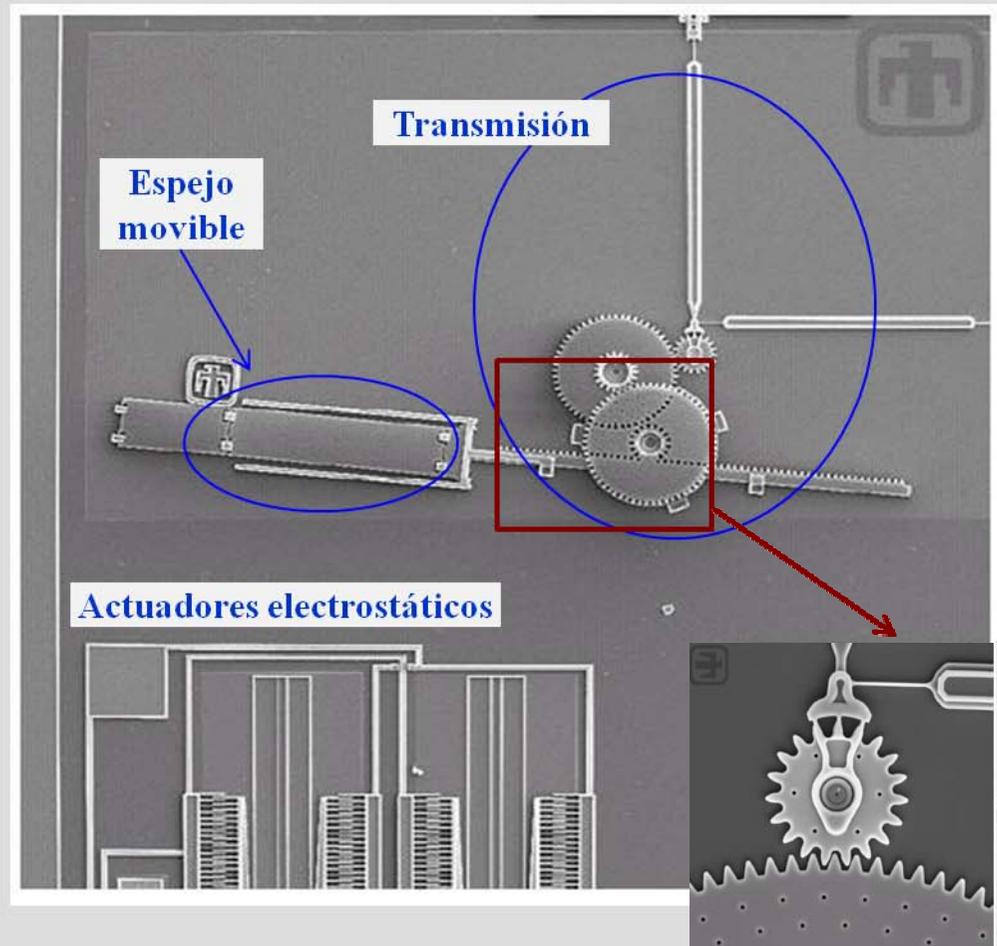
- **Movimiento oscilatorio del actuadores y barras de conexión**
 - **Movimiento angular de los engranes (con reducción de velocidad)**
 - **Desplazamiento lineal de la cremallera**
- **Desdoblamiento vertical del espejo con respecto a un punto fijo**

From Sandia National Labs – Albuquerque, NM

MEMS -

Actuadores y Micro-componentes

Micro-máquinas para el manejo de micro-espejos (silicio poli-cristalino)



Micromaquinado de superficie

-
Capas alternadas de silicio policristalino y de óxido son depositadas y geoméricamente definidas por medios selectivos (químicos y de plasma)

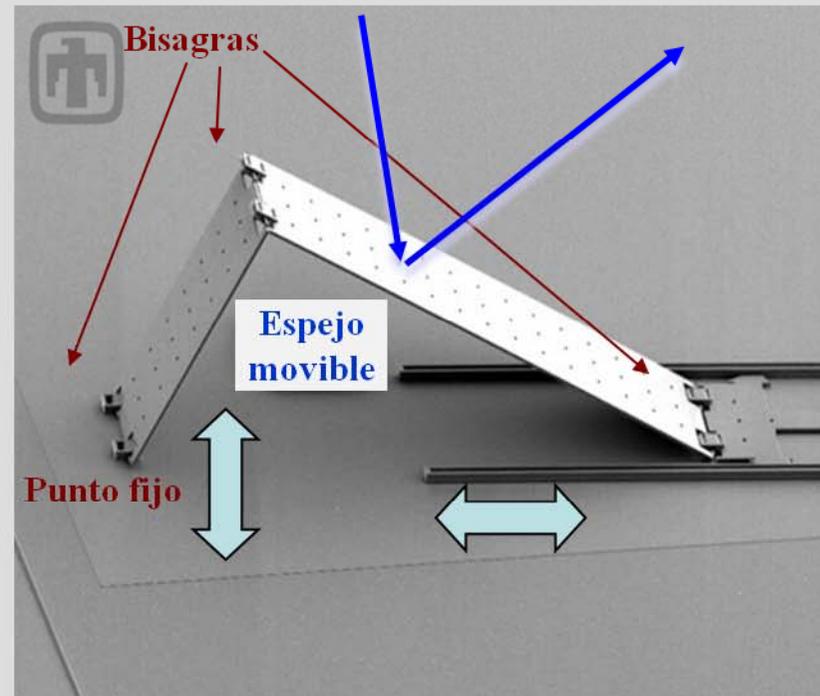
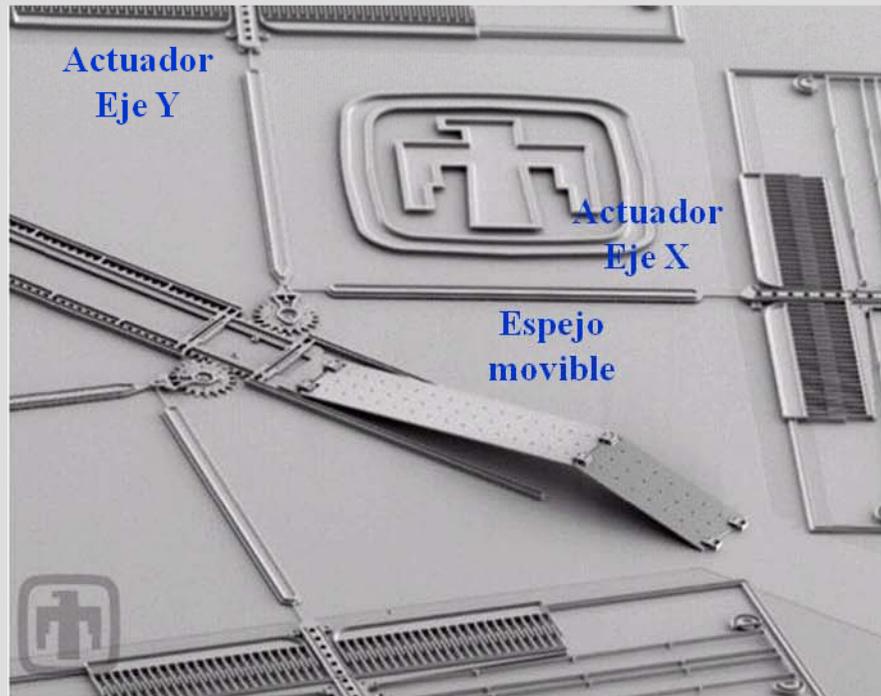
-
El espesor de estas capas es aproximadamente $2\mu\text{m}$

From Sandia National Labs – Albuquerque, NM

MEMS -

Actuadores y Micro-componentes

Micro-máquinas para el manejo de micro-espejos (silicio poli-cristalino)



From Sandia National Labs – Albuquerque, NM

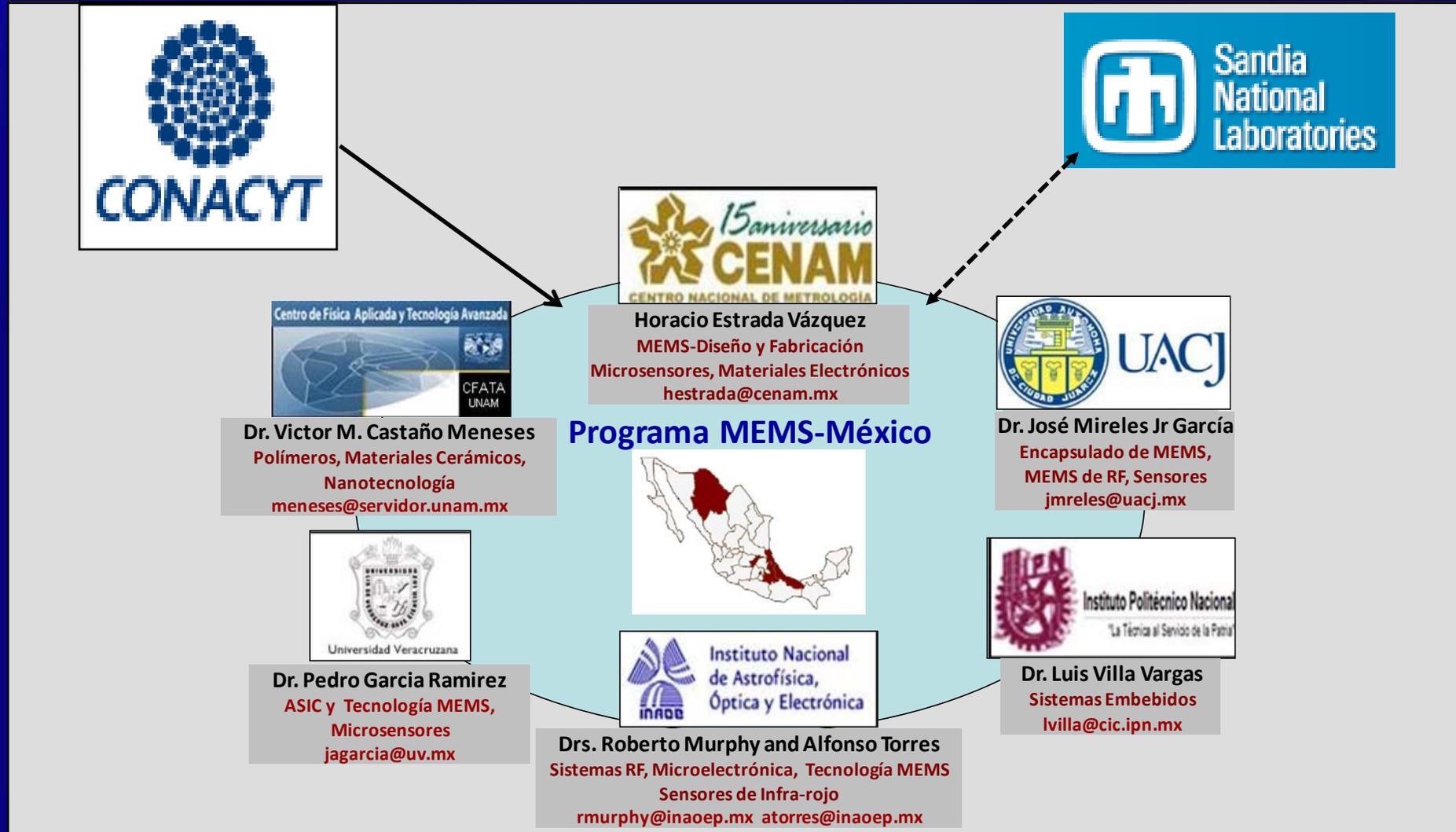
Agenda:

- **Introducción – Qué es MEMS? Cómo se Fabrican? Qué aplicaciones tienen?**
- **Sensores MEMS en la industria – estructuras básicas para la implementación de:**
 - **Sensores de presión,**
 - **Sensores de flujo,**
 - **Comparadores patrón de transferencia CA-CD,**
 - **Sensores de flujo,**
 - **Acelerómetros,**
 - **Termoconvertidores,**
 - **Biosensores**
- **Actuadores electrostáticos**
 - **Dispositivos MEMS para tensión eléctrica de referencia,**
 - **Micromáquinas**
- **Programa Nacional para el Diseño y Fabricación de Prototipos MEMS en México**
- **Corolario**

Programa Nacional para el

Diseño y Fabricación de Prototipos MEMS

Estructura Inicial/Grupo de Trabajo



Programa Nacional para el

Diseño y Fabricación de Prototipos MEMS

Objetivos y Metas del Programa

Motivación y Objetivos

- Coadyuvar y contribuir a un proceso que logre disminuir el rezago que existe en México en lo que se refiere al desarrollo de MEMS, tecnología y aplicaciones.
- Lograr un nivel de autosuficiencia en México en la fabricación y desarrollo de MEMS.

Metas del Programa

1. Formación de Recursos Humanos en el diseño y análisis de MEMS.
2. Transmisión del Conocimiento - en las instituciones integradas al Programa MEMS-México. El objetivo es lograr una masa crítica de expertos en MEMS
3. Organización de Concursos Nacionales de Diseño para estudiantes de las instituciones participantes, quienes con el apoyo de sus asesores académicos, estén en posición de diseñar con pensamiento innovador, trabajando en ideas y proyectos de relevancia científica e industrial.
4. El diseño y fabricación de prototipos MEMS totalmente en México.
5. Identificar y promover Grupos de Colaboración Industria-Academia para el desarrollo de prototipos MEMS enfocados a necesidades científicas e industriales, y así fomentar la participación activa de la industria mexicana en aspectos de investigación y desarrollo.
6. Promover cooperación científica, bajo un mecanismo de colaboración para compartir la infraestructura para la fabricación de MEMS, que permita la optimización de recursos económicos, ya que es claro que:
 - México no dispone de recursos económicos ilimitados!
 - La industria mexicana, por tradición, no dedica grandes fondos para investigación y desarrollo.

Agenda:

- **Introducción – Qué es MEMS? Cómo se Fabrican? Qué aplicaciones tienen?**
- **Sensores MEMS en la industria – estructuras básicas para la implementación de:**
 - Sensores de presión,
 - Comparadores patrón de transferencia CA-CD,
 - Sensores de flujo,
 - Acelerómetros,
 - Termoconvertidores,
 - Biosensores
- **Actuadores electrostáticos**
 - Dispositivos MEMS para tensión eléctrica de referencia,
 - Micromáquinas
- **Programa Nacional para el Diseño y Fabricación de Prototipos MEMS en México**
- **Corolario**

Comentarios Finales

MEMS – Aplicaciones en Metrología

- En forma breve se intentó demostrar el potencial que MEMS tienen en la industria en general, así como algunas aplicaciones en el área de Metrología.
- Es claro que MEMS tiene una gama amplia de aplicaciones en diferentes campos científicos e industriales.
- En CENAM se dedican esfuerzos para el desarrollo de patrones de medición basados en MEMS, y que estos sean fabricados aquí en México.
- El CENAM en colaboración con la UNAM, IPN, INAOE, UACJ y la UV, lideran un programa nacional para la formación de recursos humanos en el diseño y fabricación de MEMS, en colaboración con Sandia Labs en EEUU, y con apoyo del CONACYT. Uno de los objetivos del programa es promover la interacción y colaboración entre científicos mexicanos y la industria mexicana, para lograr mas independencia económica y competitividad internacional.
- Se exhorta a la industria mexicana que pueda beneficiarse o interesada en el desarrollo de MEMS, a realizar sinergias con las instituciones incorporadas al programa MEMS.

MEMS - Aplicaciones en Metrología

Horacio Estrada Vázquez
Coordinador Científico
Centro Nacional de Metrología (CENAM)

Gracias por su Atención!



**Encuentro Nacional de
Metrología Eléctrica 2009**
18-20 de noviembre

→ Electromagnetismo
→ Temperatura y
Propiedades Termofísicas
→ Tiempo y Frecuencia

CENTRO NACIONAL DE METROLOGÍA - CENAM
DERECHOS RESERVADOS 2009

