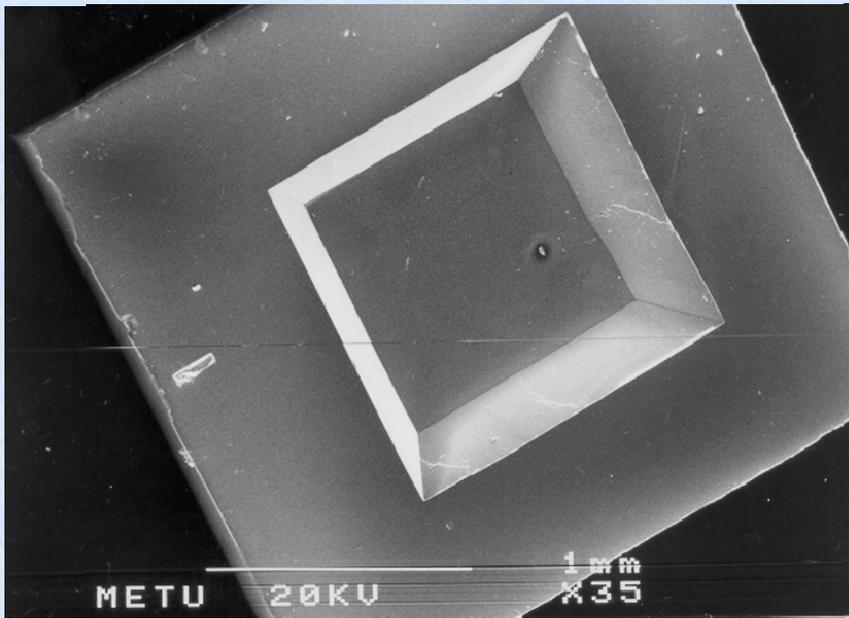


Ejemplos de dispositivos



Antonio Luque Estepa
Dpto. Ingeniería Electrónica



Índice

- Introducción
- Conceptos y principio físico
- Diseño del dispositivo
- Fabricación del dispositivo





Proceso de creación

- Necesidad
- Idea
- Diseño y modelado del dispositivo
- Simulación
- Diseño de la fabricación
- Fabricación
- Pruebas y medidas



-
-
-

Sensor de presión. Aplicaciones

- Automoción: presión de aceite, de aire, de gases de escape,...
- Médicas: respiración artificial, bombas de aire, diálisis,...
- Laboratorio: cromatografía de gases, acondicionamiento de aire,...
- Control de procesos
- Robótica
- etc.

-
-
-
-
-
-
-
-



Índice

- Introducción
- Conceptos y principio físico
- Diseño del dispositivo
- Fabricación del dispositivo



-
-
-

Efectos físicos posibles

- Variación de capacidad
- Frecuencia de resonancia
- Piezoresistencia
- Deformación y reflexión luminosa
- etc.

- 
- -
 -
 -
 -
 -
 -
 -

-
-
-

Piezorresistencia

- La resistencia varía con la deformación
- Muy alta en el silicio monocristalino
- La variación en las bandas de energía debida a la tensión mecánica aplicada hace que la resistividad del cristal se modifique
- Es una propiedad anisotrópica
- Se puede medir con un puente de Wheatstone

- 
- -
 -
 -
 -
 -
 -
 -

-
-
-

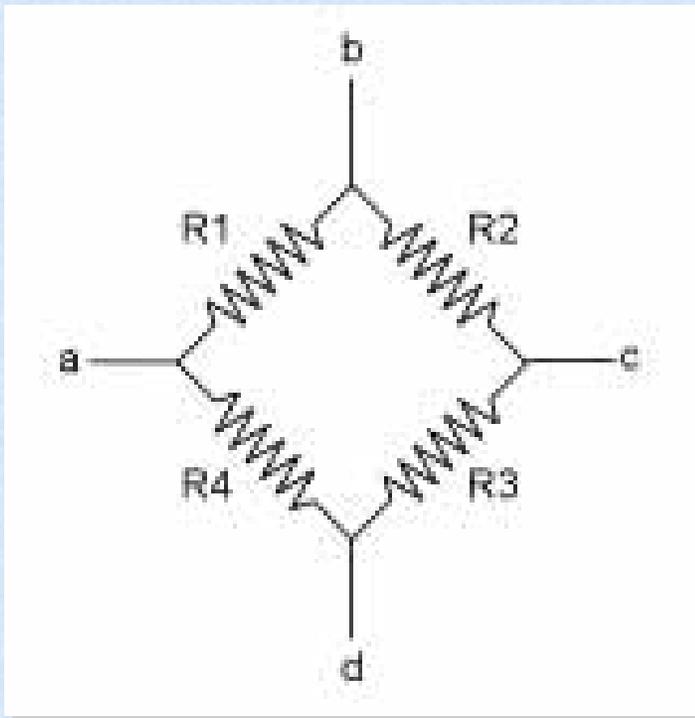
Creación de piezorresistencia

- Crecimiento epitaxial de una fina capa n en un sustrato p
- Difusión de la resistencia tipo p en la capa n



-
-
-
-
-
-
-
-

Puente de Wheatstone



- Se aplica tensión entre a y c y se mide entre b y d
- Tensiones habituales entre 5 y 10 V
- Sensibilidad del montaje del orden de 1 mV/kPa



Índice

- Introducción
- Conceptos y principio físico
- Diseño del dispositivo
- Fabricación del dispositivo



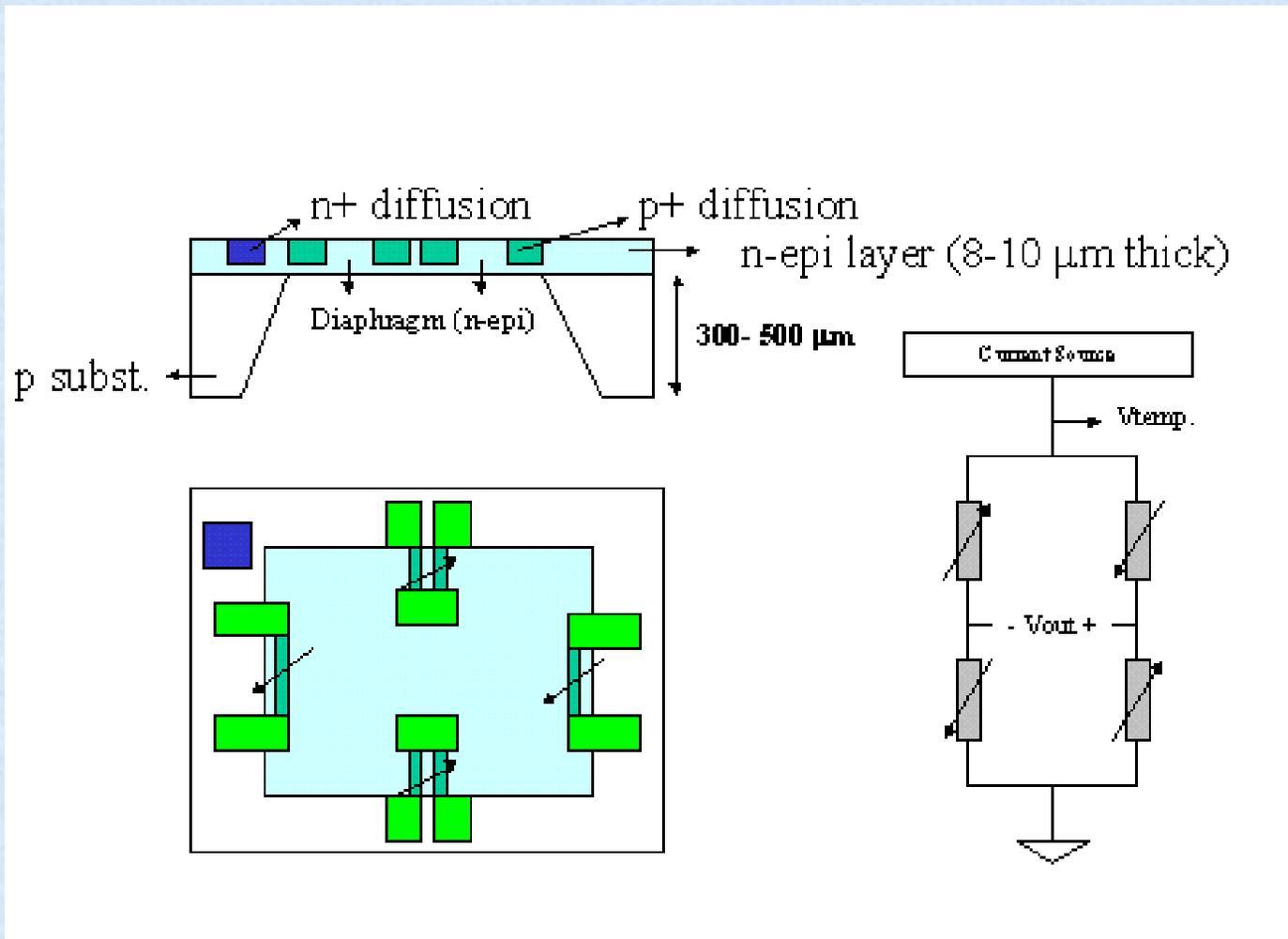
-
-
-

Diseño del dispositivo

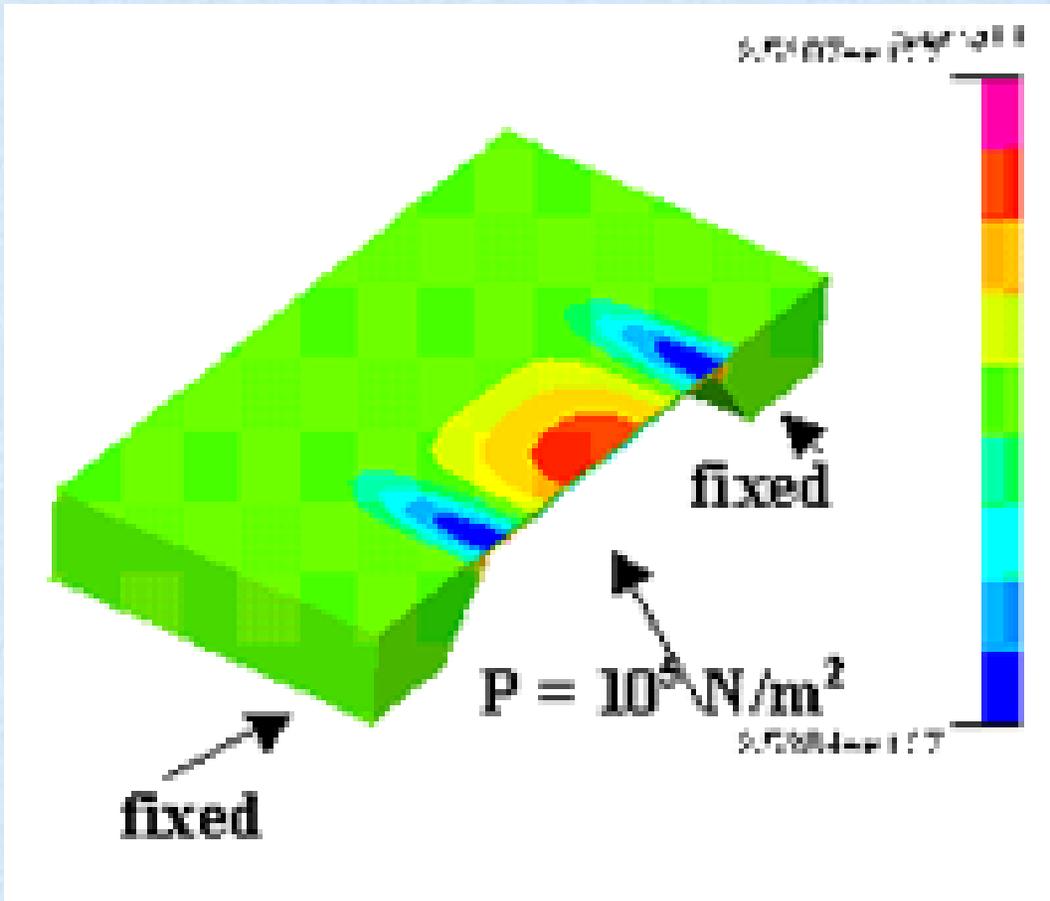
- 4 piezorresistencias variables sobre una membrana
- La membrana se deforma bajo la acción de la presión
- Las variaciones de resistencia se miden como variaciones de tensión en el puente de Wheatstone
- Se puede añadir una fuente de intensidad

- 
- -
 -
 -
 -
 -
 -
 -

Diseño básico



Simulación del comportamiento

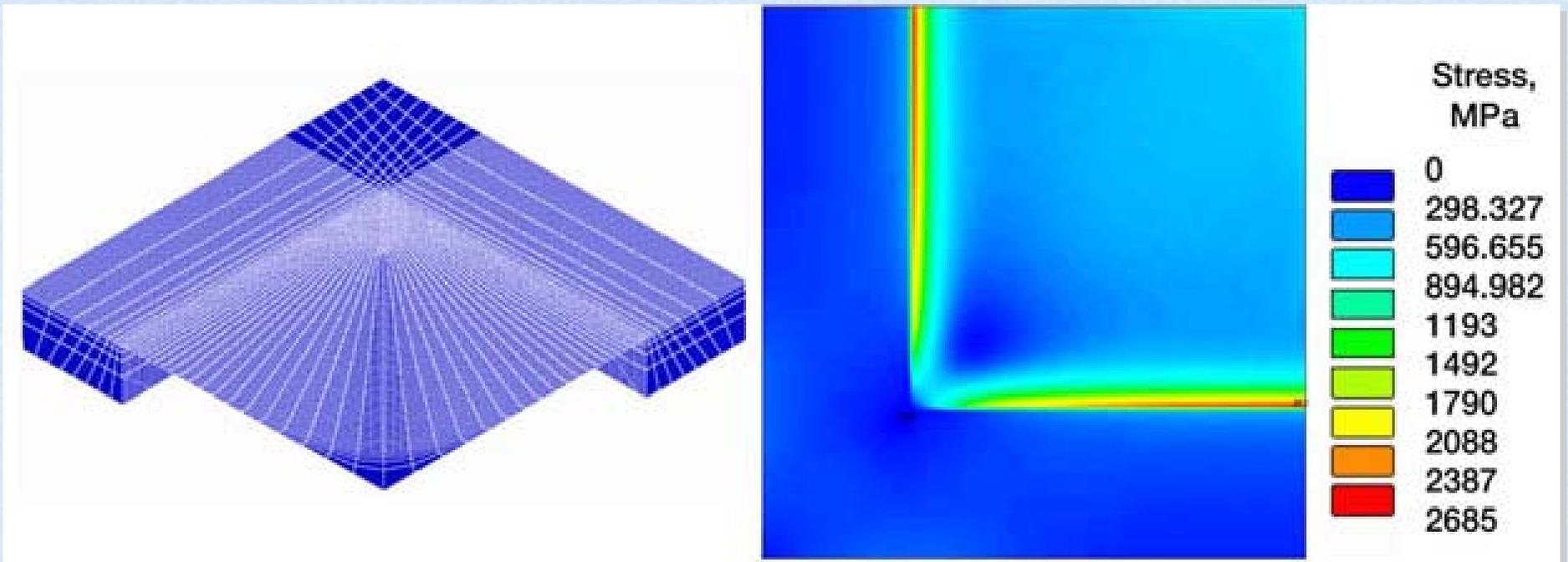


Software de CAD
orientado a MEMS

Simulación de
esfuerzos y
deformaciones

Diferentes efectos
físicos acoplados

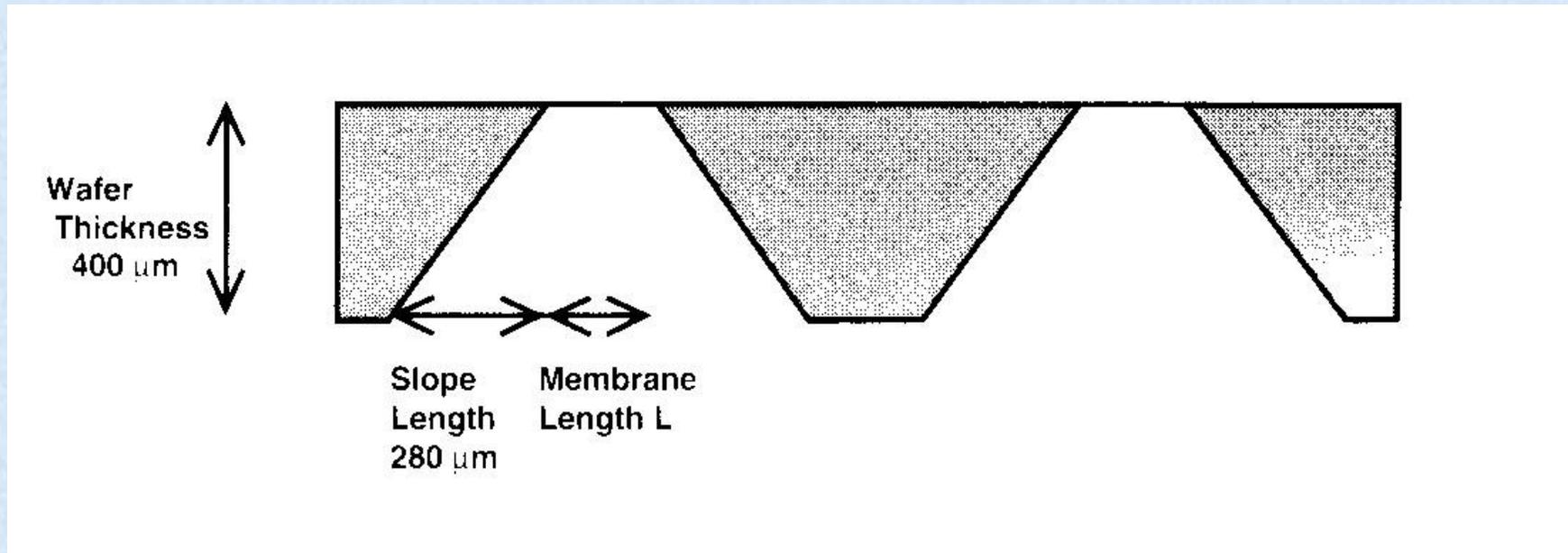
Simulación



Comprobación de que la tensión máxima es asumible por el material que formará la membrana (en este caso, silicio)



Construcción de la membrana





Índice

- Introducción
- Conceptos y principio físico
- Diseño del dispositivo
- Fabricación del dispositivo



-
-
-

Sustrato inicial



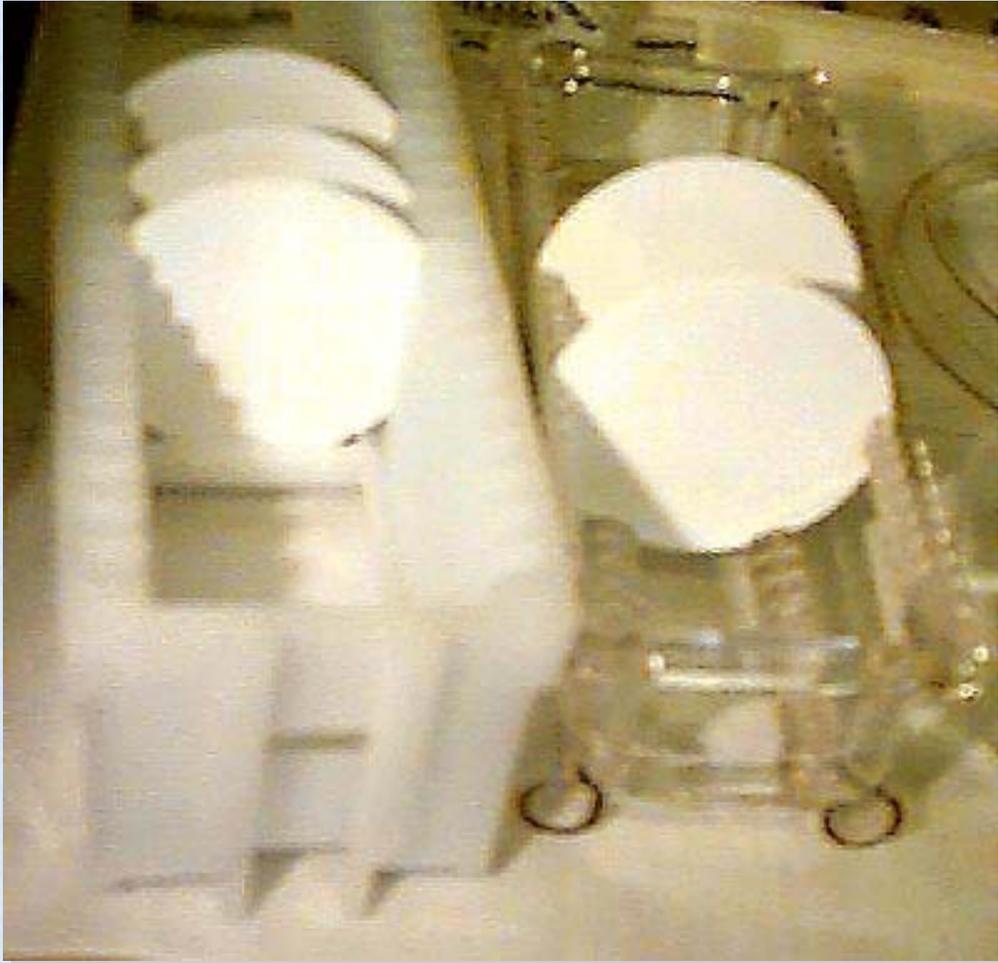
Oblea de silicio $\langle 100 \rangle$
Dopado p
Double Side Polished
400 um de espesor



-
-
-
-
-
-
-
-

-
-
-

Sustrato inicial



-
-
-
-
-
-
-
-

-
-
-

Capa n

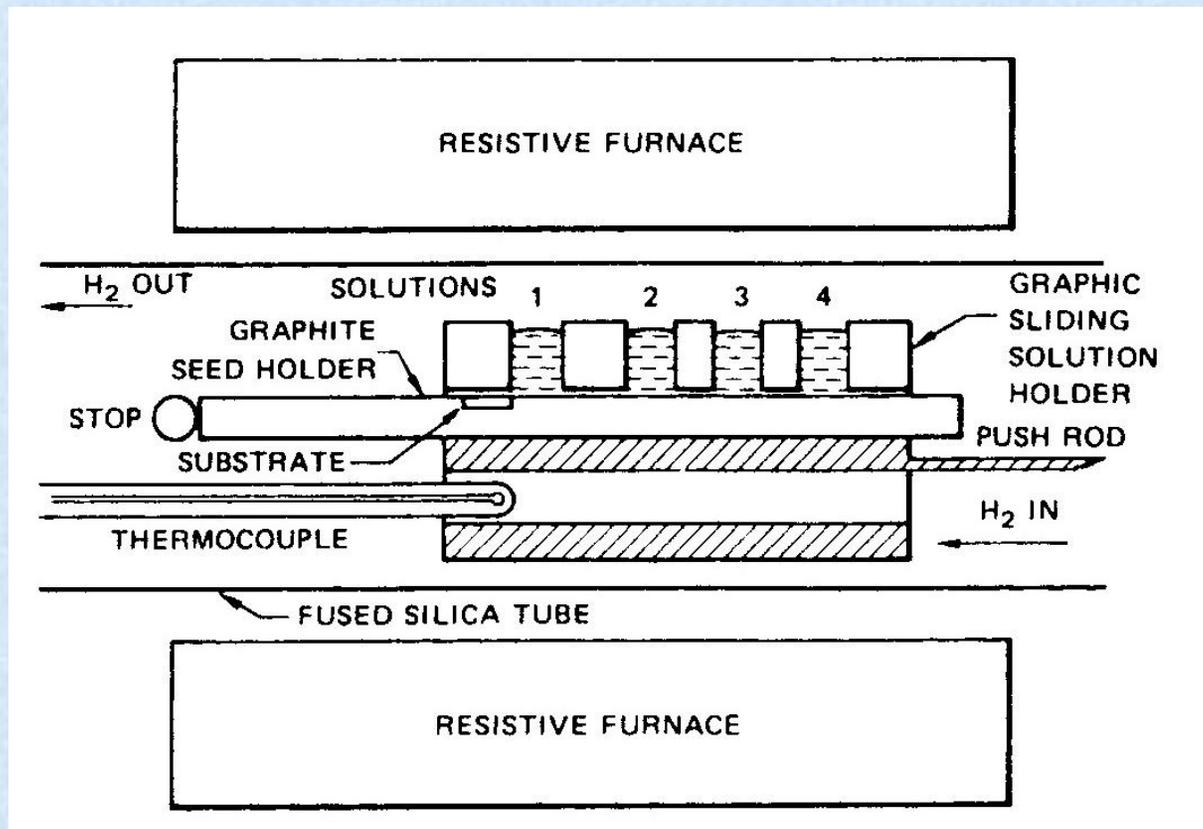


Crecimiento
epitaxial de una
capa tipo n entre
8 y 10 μm



-
-
-
-
-
-
-
-

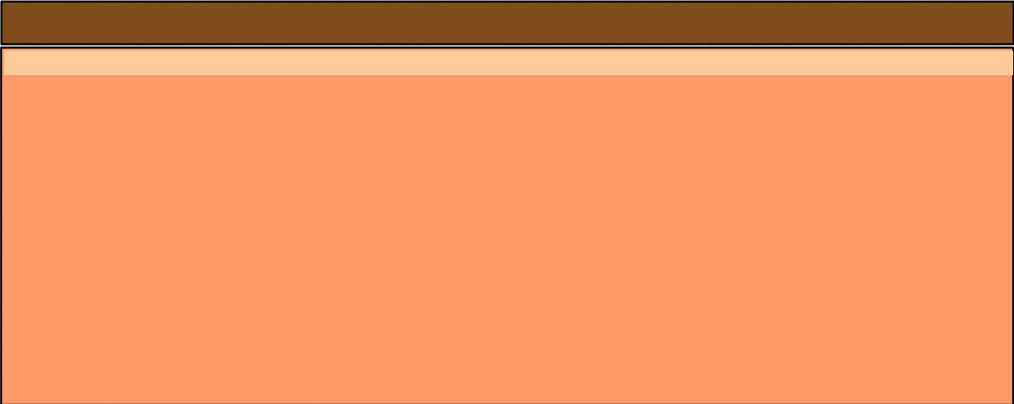
Capa n



Crecimiento epitaxial

-
-
-

Fotolitografía



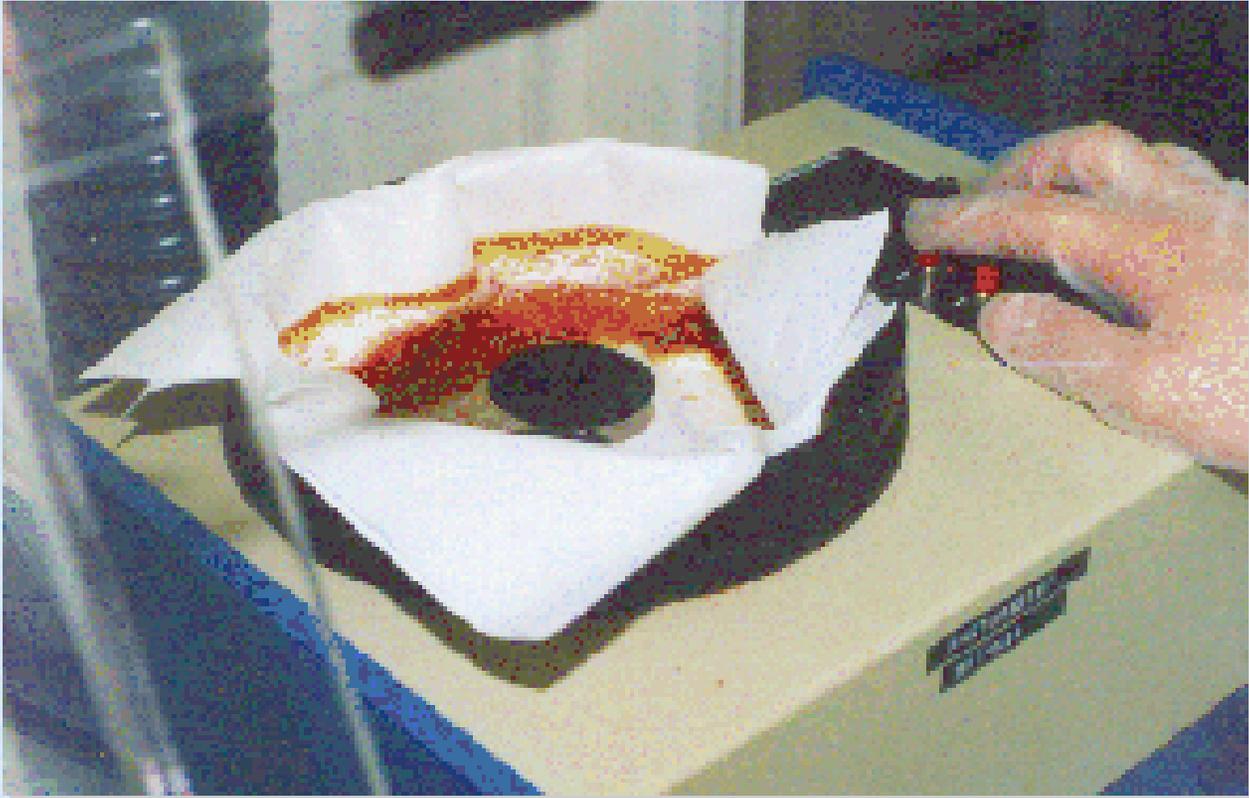
Deposición de
resina
fotosensible
positiva
1.8 um



-
-
-
-
-
-
-
-

-
-
-

Fotolitografía



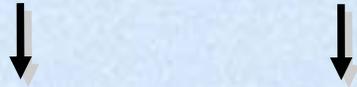
Deposición de fotorresina



-
-
-
-
-
-
-
-

-
-
-

Fotolitografía



Exposición a UV



-
-
-
-
-
-
-
-

-
-
-

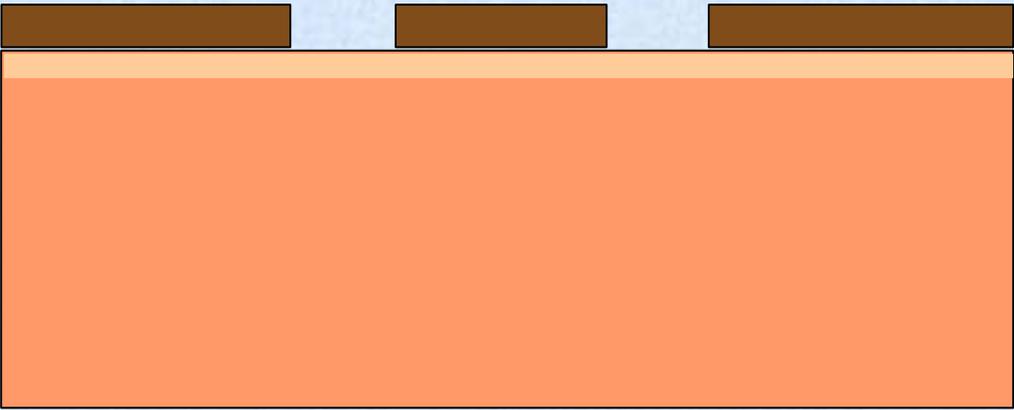
Fotolitografía



Alineador de máscaras e insoladora

-
-
-

Fotolitografía



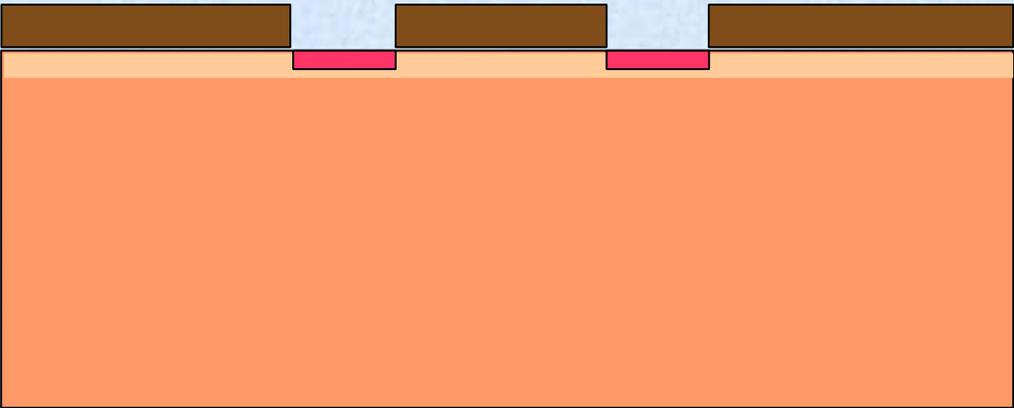
Revelado



-
-
-
-
-
-
-
-

-
-
-

Resistencias



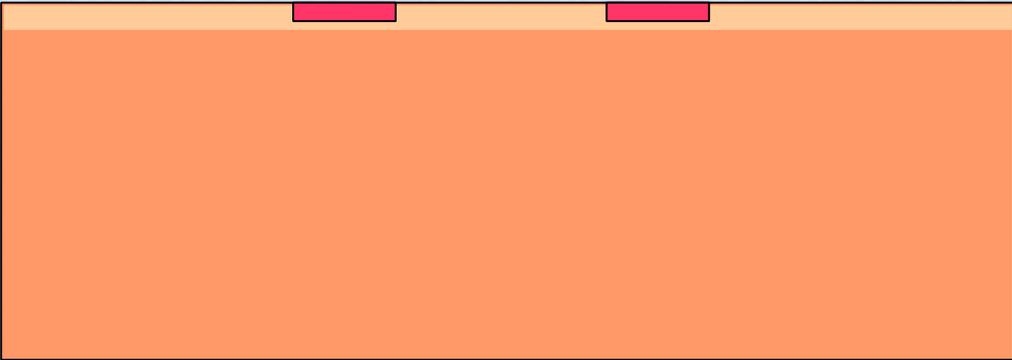
Difusión de resistencias tipo p



-
-
-
-
-
-
-
-

-
-
-

Fotolitografía



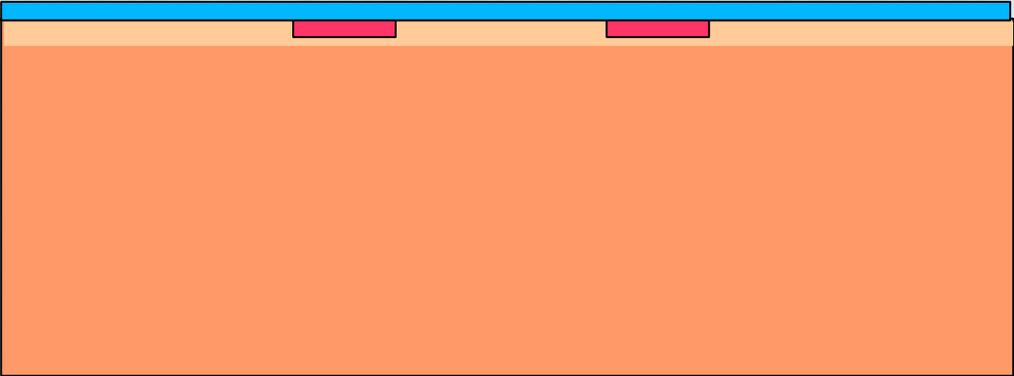
Eliminación de fotorresina



-
-
-
-
-
-
-
-

-
-
-

Metalizado



Deposición de Al



-
-
-
-
-
-
-
-

Metalizado



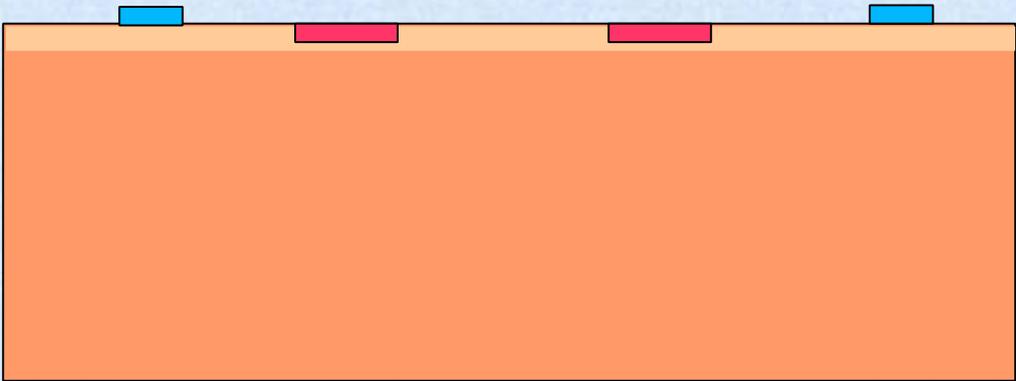
Deposición LPCVD
de aluminio

Temperatura de 400
a 500 °C

Tiempo entre 10 y
30 minutos

-
-
-

Metalizado



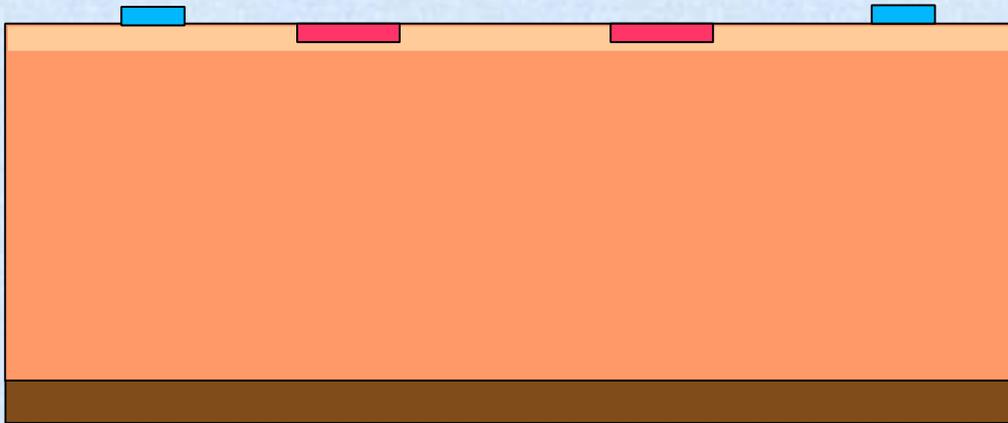
Fotolitografía y grabado húmedo del Al



-
-
-
-
-
-
-
-

-
-
-

Creación de la membrana

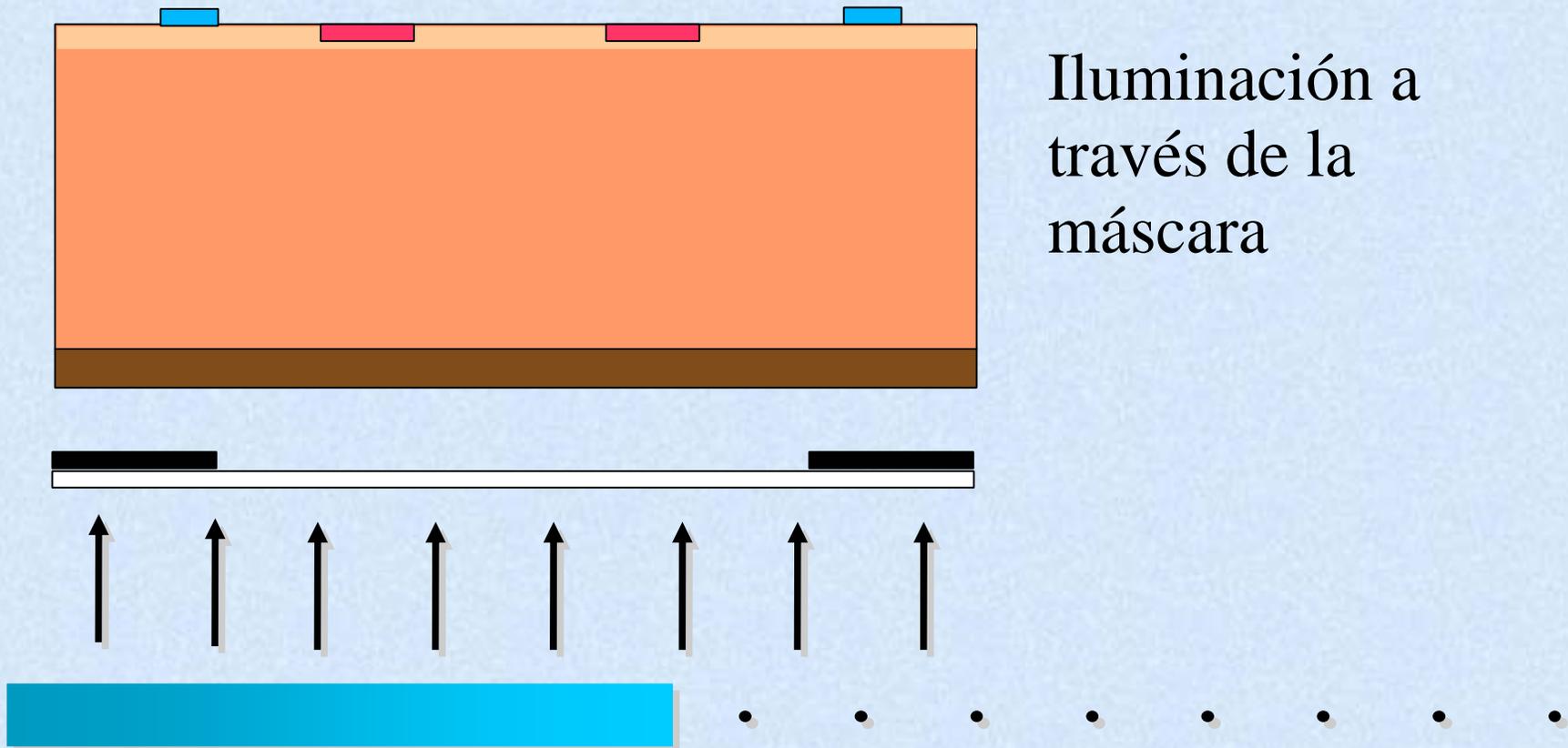


Fotolitografía en
la cara inferior

Aplicación de
fotorresina
positiva

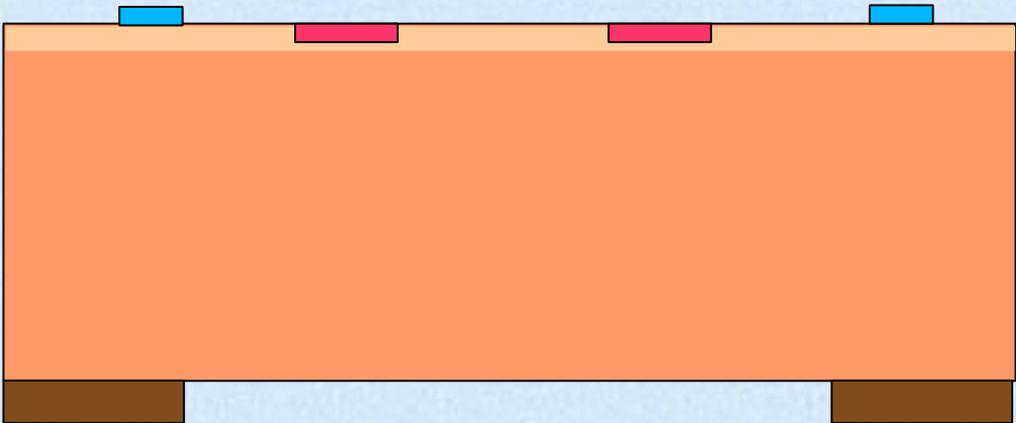


Creación de la membrana



-
-
-

Creación de la membrana



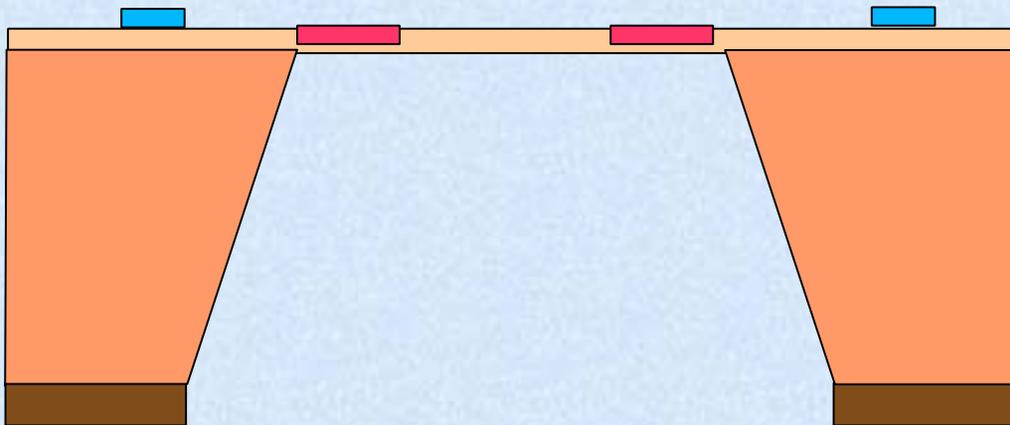
Revelado



-
-
-
-
-
-
-
-

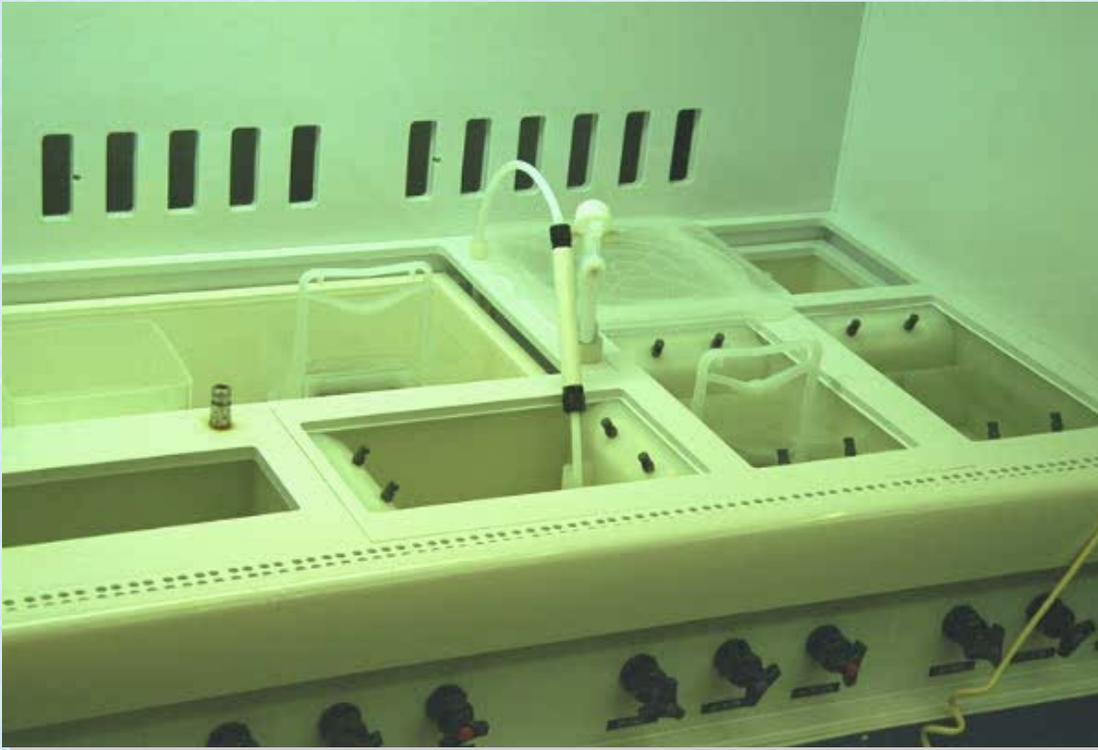
-
-
-

Creación de la membrana



Ataque húmedo
anisotrópico

Creación de la membrana

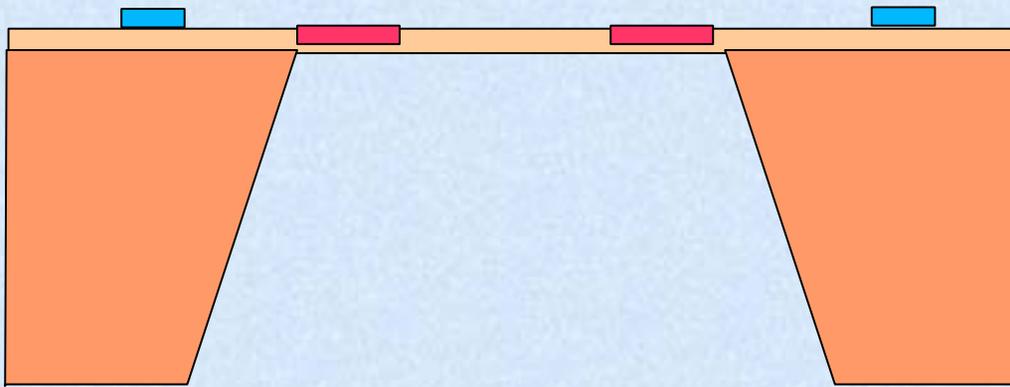


Ataque húmedo

Atacante: KOH

-
-
-

Creación de la membrana



Eliminación de
fotorresina

-
-
-

Cavidad resultante

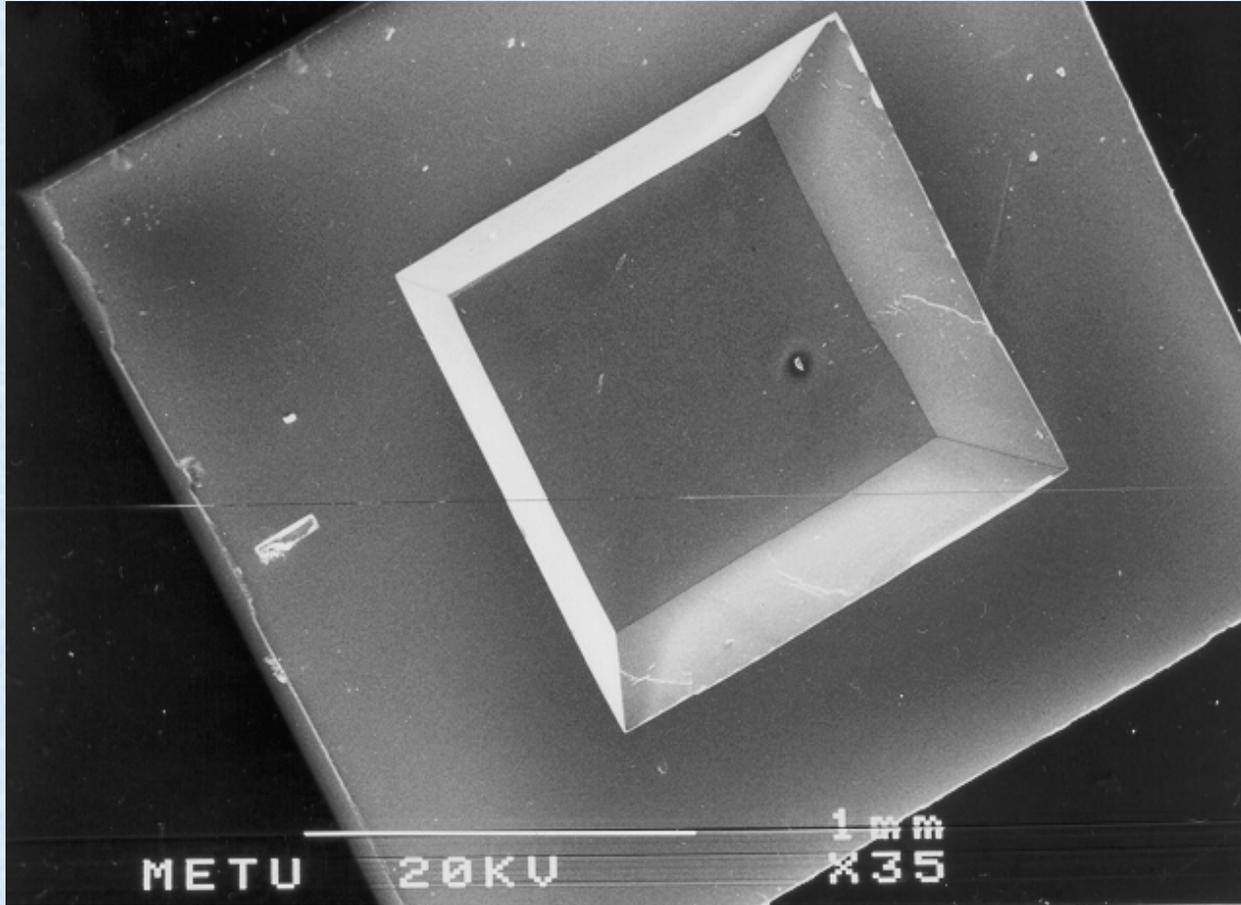
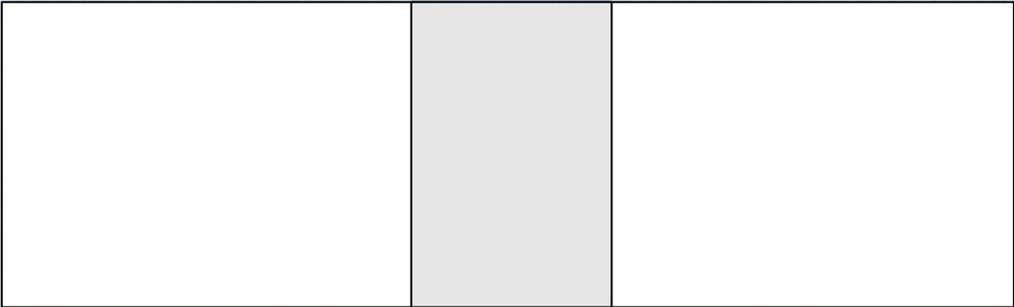


Imagen de la cavidad creada

-
-
-

Sustrato de vidrio



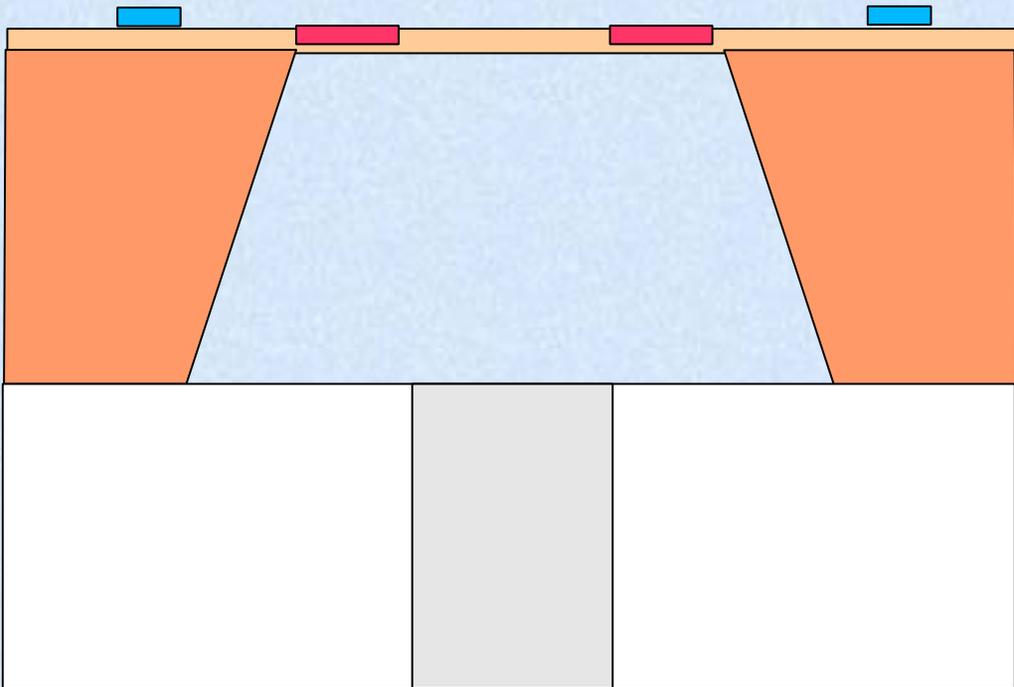
Microperforación
del orificio de
entrada de presión
mediante láser



-
-
-
-
-
-
-
-

-
-
-

Pegado al sustrato



Unión anódica con sustrato de vidrio



-
-
-
-
-
-
-
-

-
-
-

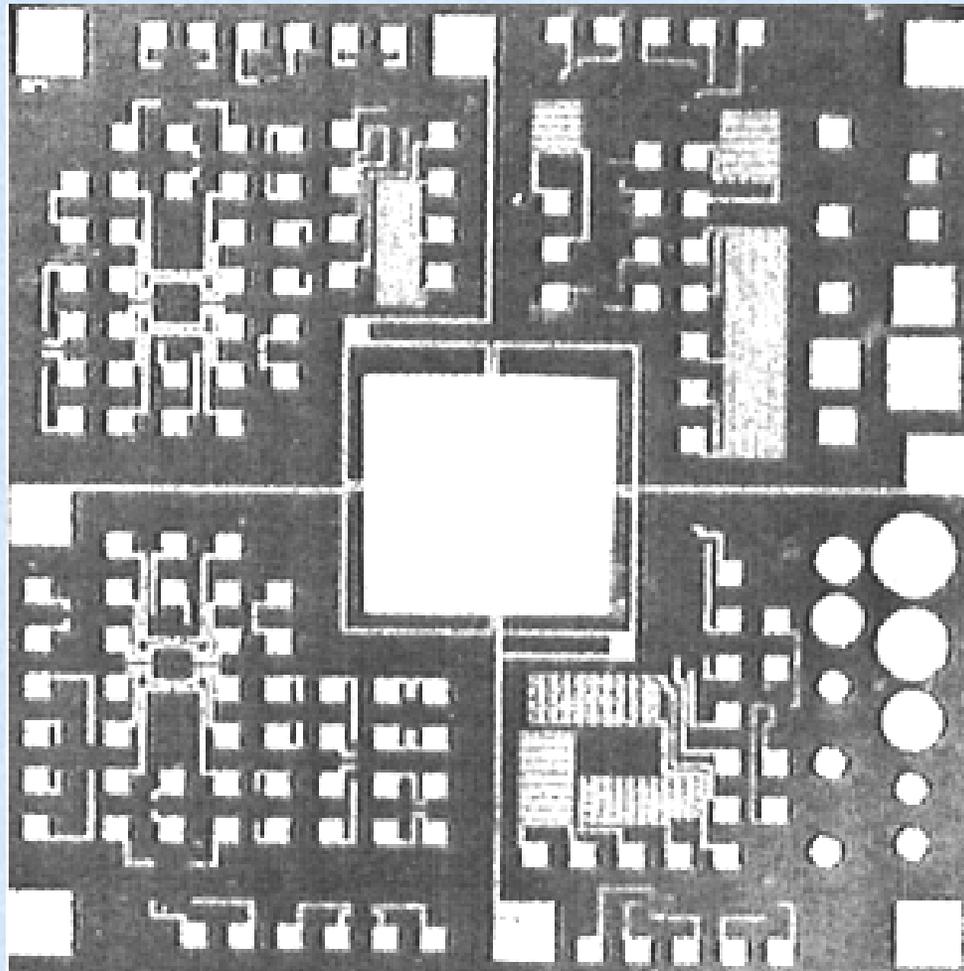
Producto final



-
-
-
-
-
-
-
-

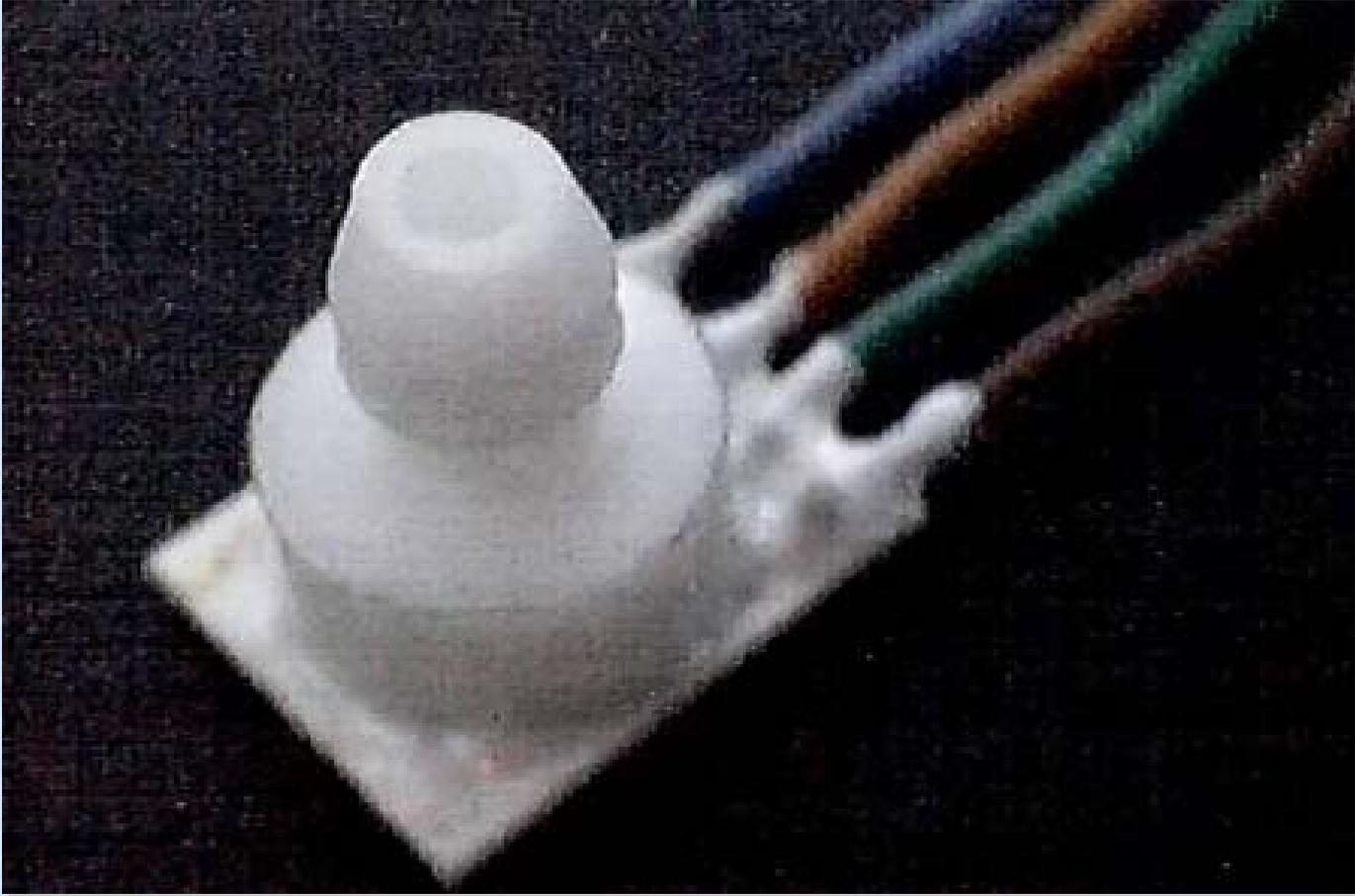
-
-
-

Electrónica integrada



-
-
-

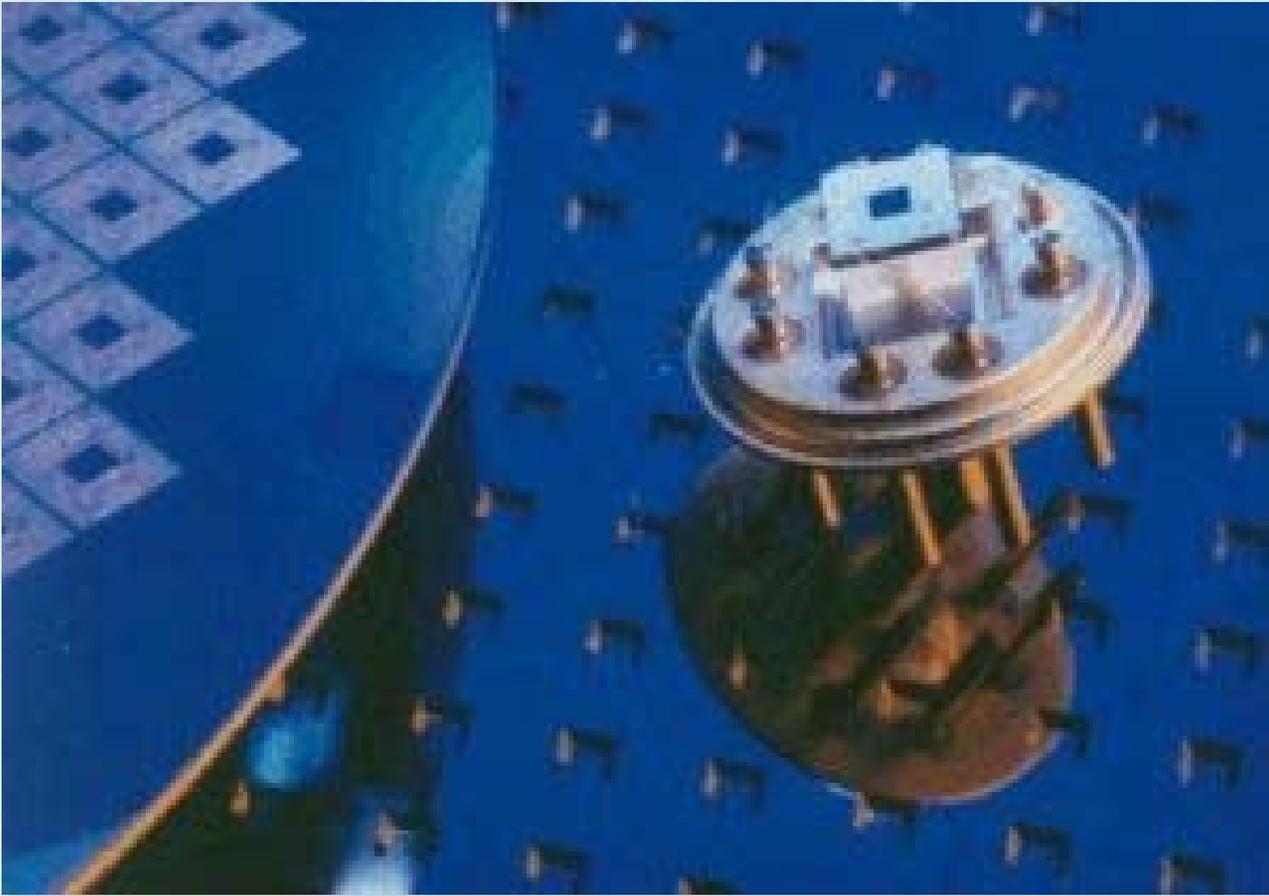
Encapsulado



-
-
-
-
-
-
-
-

-
-
-

Encapsulado



-
-
-
-
-
-
-
-



Capacidad variable

- Introducción
- Soluciones existentes
- Solución MEMS
- Actuador térmico
- Proceso de fabricación
- Encapsulado flip-chip





Capacidad variable

- Objetivo: conseguir un condensador de capacidad variable de alta Q

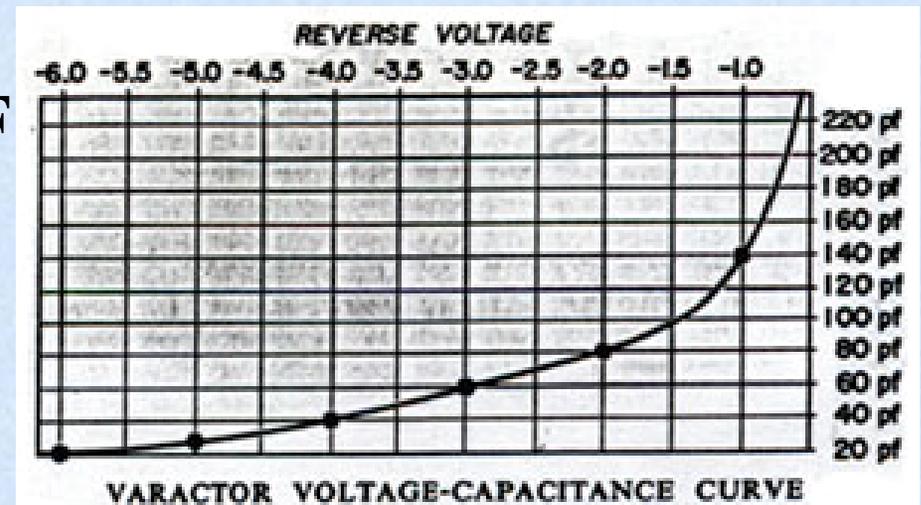
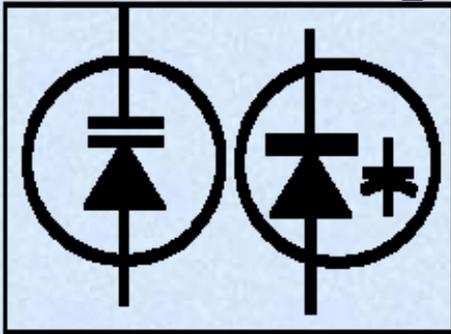
$$Q = \frac{X_C}{R}$$

- Muy útil en aplicaciones RF, filtros, sintonizadores, etc.



Soluciones existentes

- Varactores: diodos polarizados en inversa, la capacidad parásita varía con la tensión inversa
- La capacidad se determina por el dopado en la capa de deplexión
- Valores típicos < 300 pF



-
-
-

Soluciones existentes

- Un mejor factor de calidad (Q) se consigue mejorando el material dieléctrico del condensador
- Los varactores tienen muy mal Q a altas frecuencias

-
-
-
-
-
-
-
-

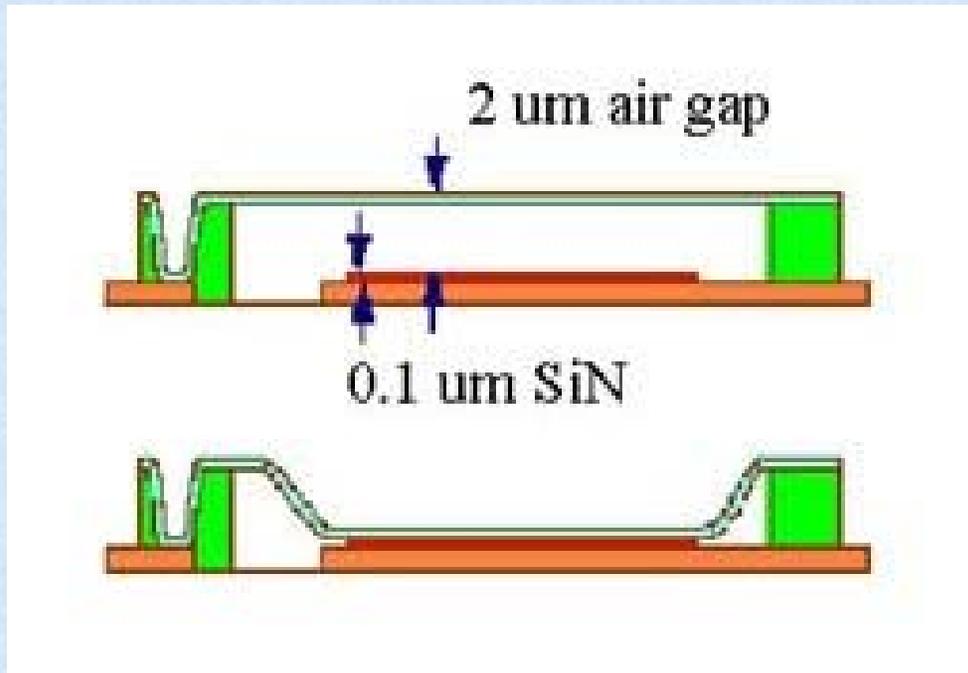
-
-
-

La aproximación MEMS

- Control de la separación (*gap*) entre los electrodos
- Por ejemplo, para un condensador de placas planas:

$$C = \frac{\epsilon_0 A}{g}$$

Actuación electrostática

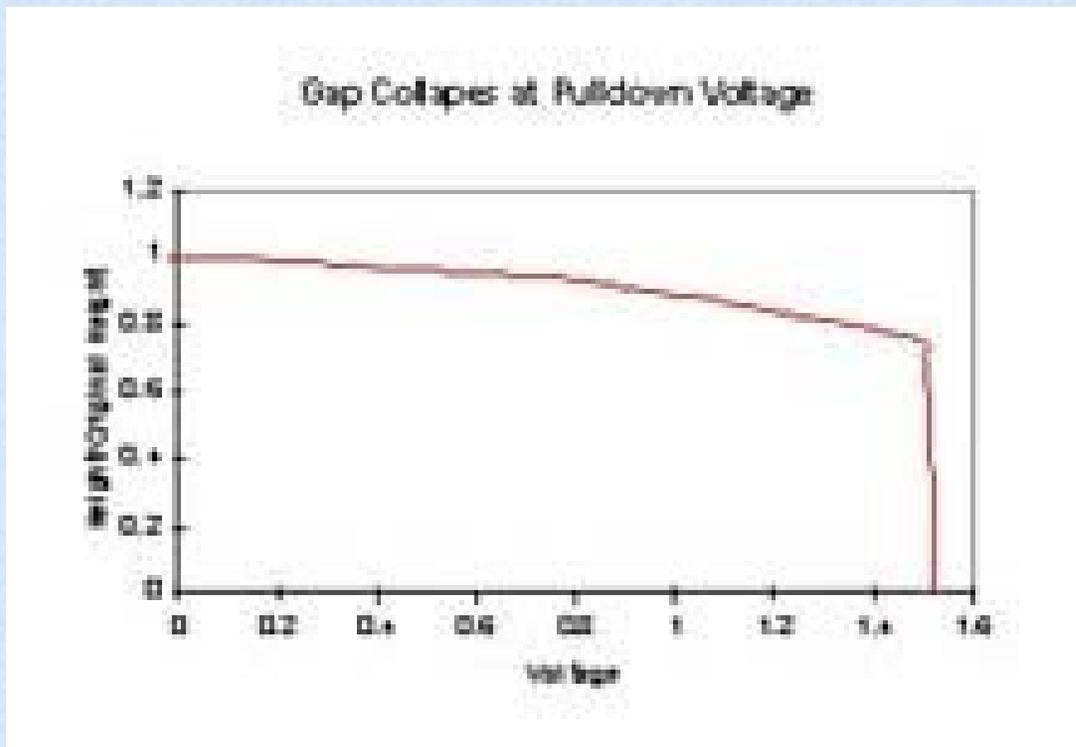


Microsistema con membrana.

La diferencia de potencial entre la membrana y el sustrato hace que se atraigan

Aislante para evitar el cortocircuito

Actuación electrostática

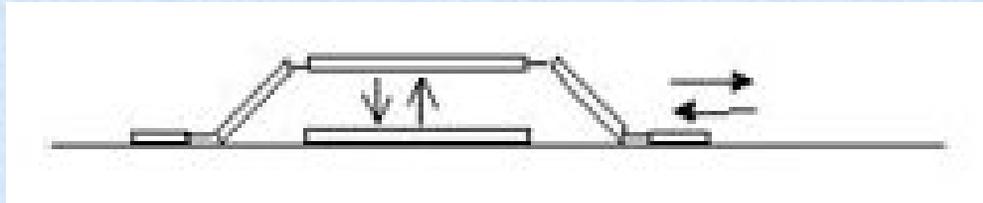


Tensión de pull-in:
tensión a la cual el
actuador colapsa

Hace difícil usar el
actuador como
condensador
variable

-
-
-

Actuación indirecta



Fuerza no relacionada con la distancia

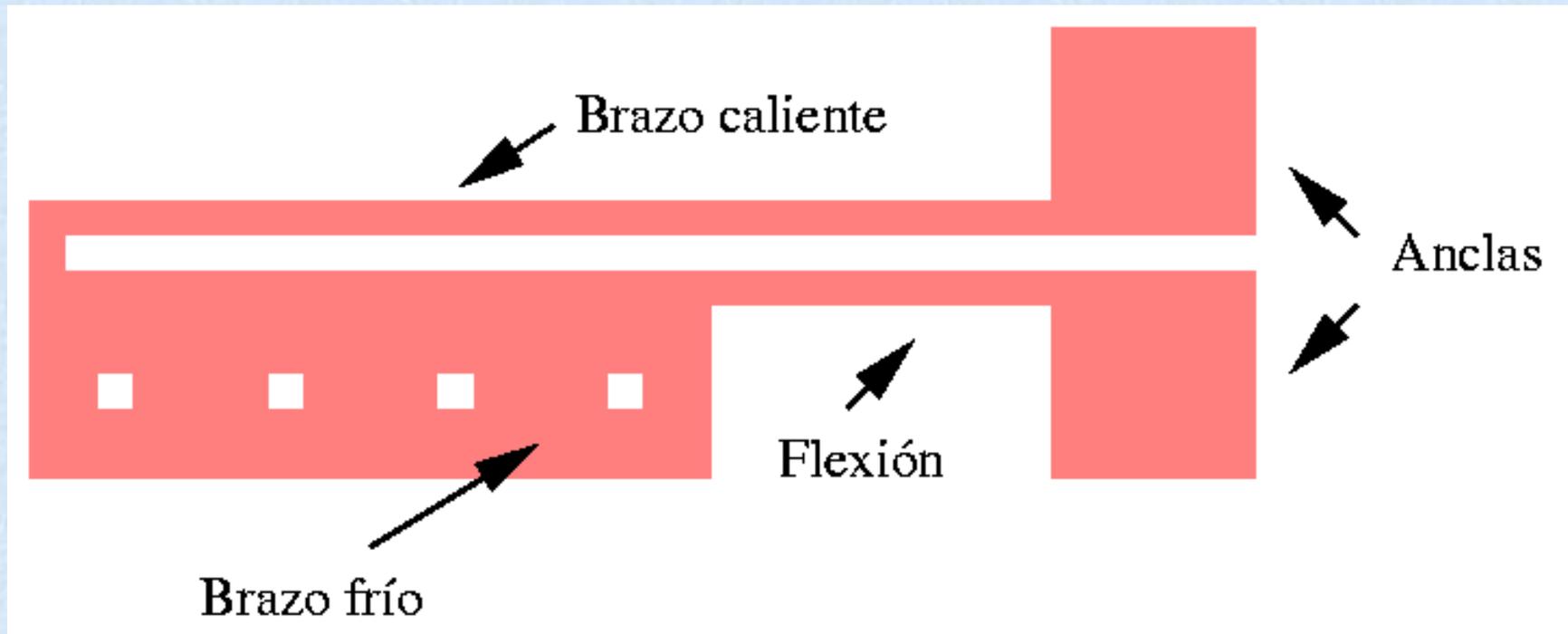
Linealización del comportamiento electromecánico

¿Cómo conseguir el movimiento?



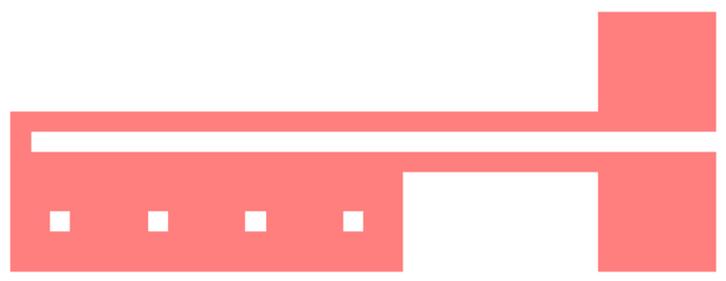
-
-
-
-
-
-
-
-

Actuador térmico





Actuador térmico



- Cada brazo presenta diferente resistencia a la corriente
- El brazo de arriba se calienta más que el de abajo
- El brazo caliente se dilata más que el frío
- Movimiento del conjunto hacia abajo



Actuador térmico

- Algunos valores típicos:

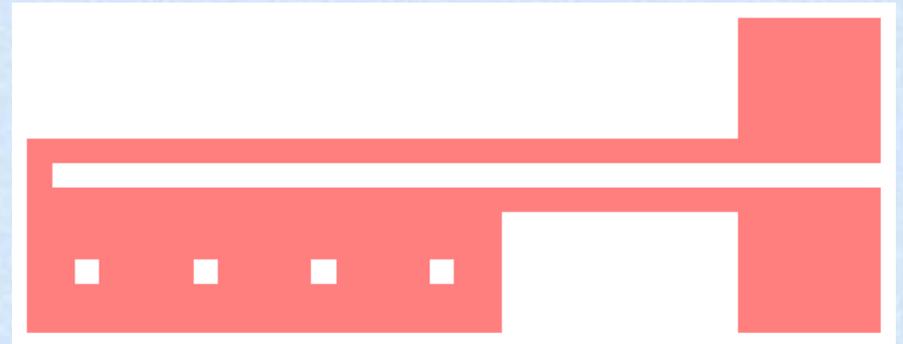
- Caliente: 2.5 x 240 μm

- Frío: 16 x 200 μm

- Flexor: 2,5 x 40 μm

- Separación: 2 μm

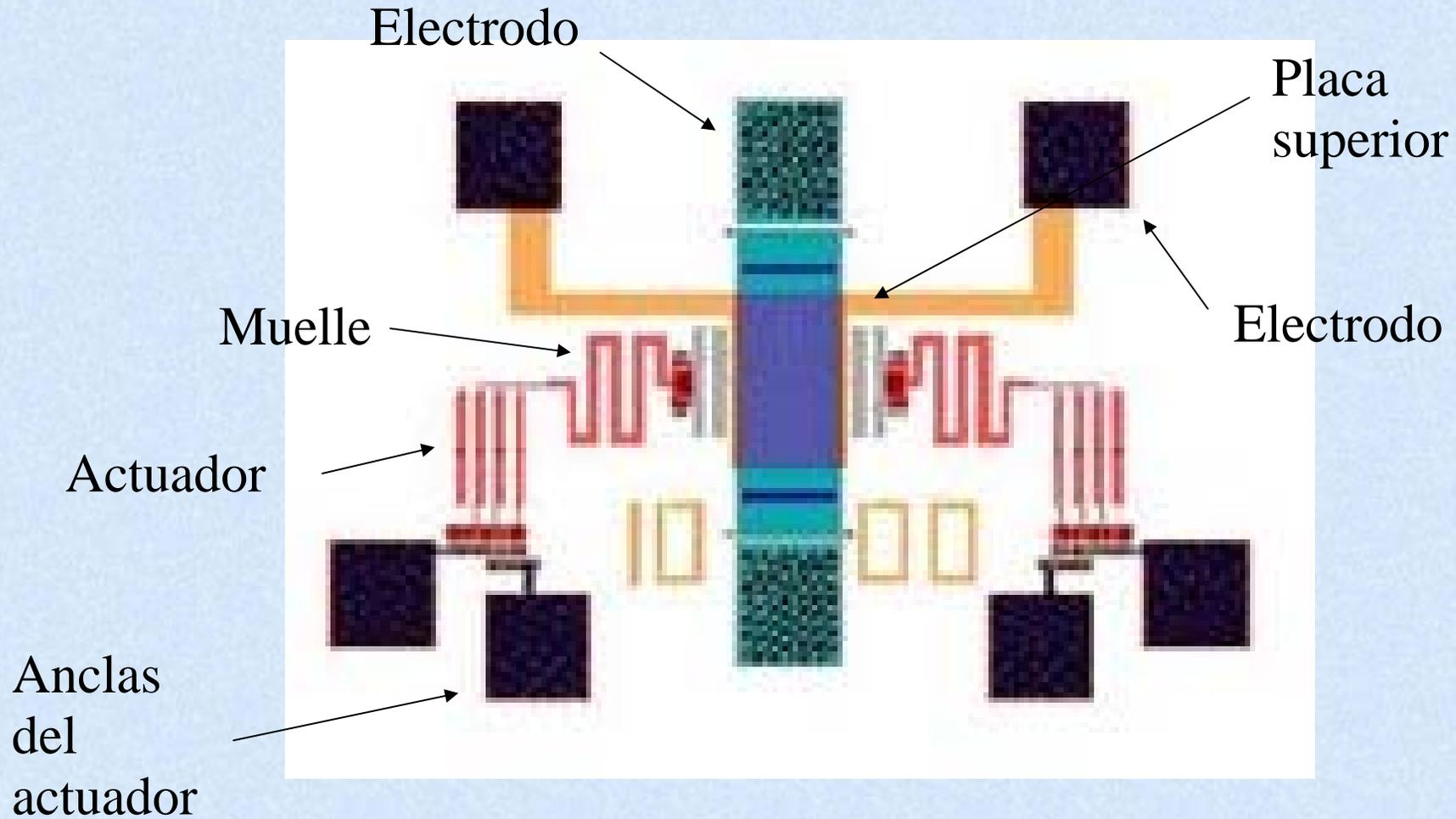
- Agujeros de 4 μm para prevenir el pegado en el secado



- Con esto se consigue:

- Movimiento de 16 μm para actuación de 3V y 3.5 mA

Layout del sistema



-
-
-

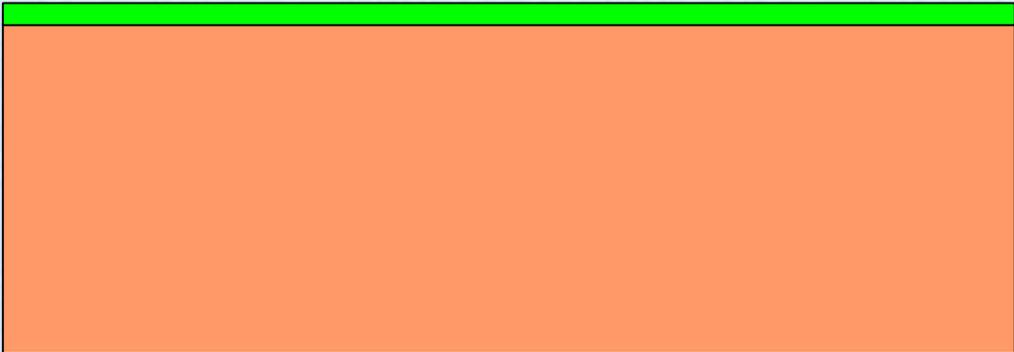
Proceso de fabricación

- Deposición de aislante
- Deposición de capa de sacrificio
- Mecanizado capa de sacrificio
- Deposición del electrodo
- Mecanizado del electrodo y actuadores
- Liberación de la estructura

- 
- -
 -
 -
 -
 -
 -
 -

-
-
-

Deposición de aislante



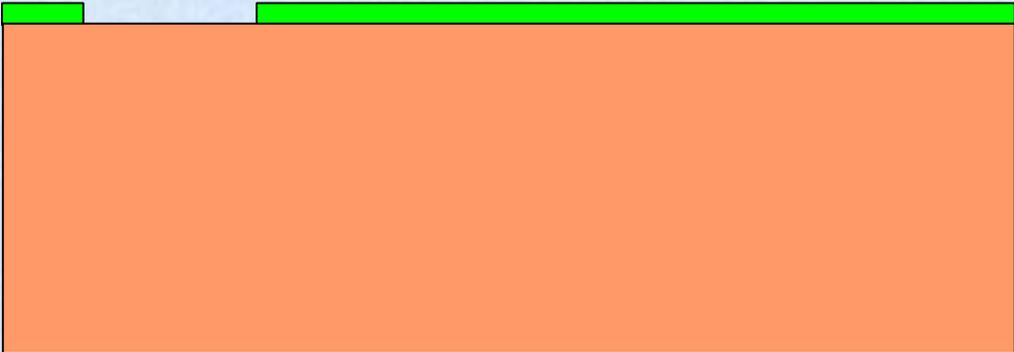
Capa de SiN, 0.5 um



-
-
-
-
-
-
-
-

-
-
-

Mecanizado de aislante



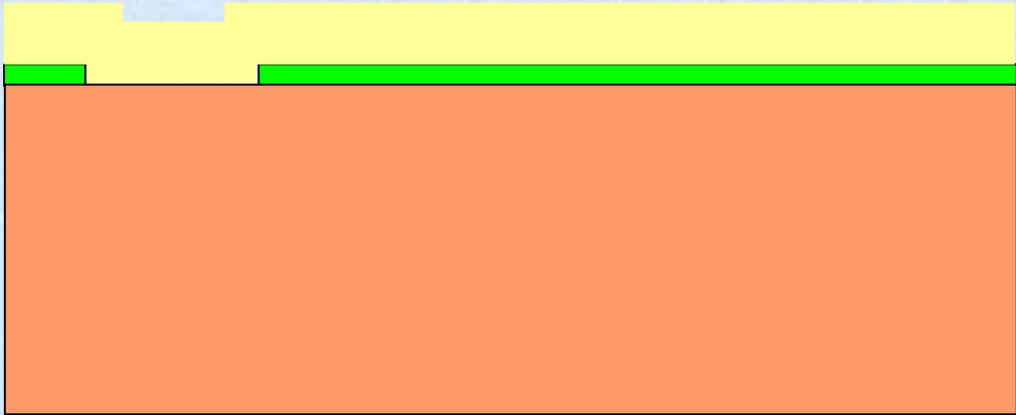
Apertura de los contactos eléctricos con el electrodo inferior



-
-
-
-
-
-
-
-

-
-
-

Deposición de capa de sacrificio



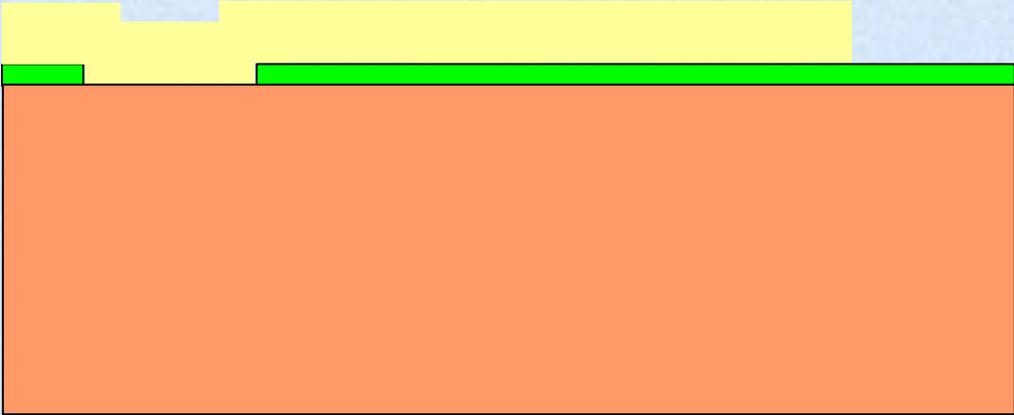
BPSG, 0.2 μm . Define la separación mínima entre los electrodos del condensador



-
-
-
-
-
-
-
-

-
-
-

Mecanizado de la capa de sacrificio



Apertura de anclas del actuador y contactos eléctricos del electrodo superior



-
-
-
-
-
-
-
-

-
-
-

Deposición del electrodo



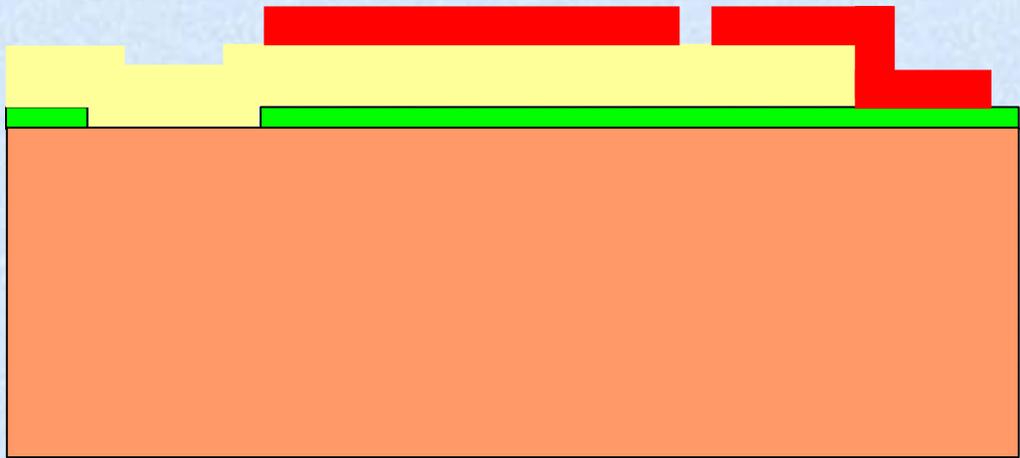
Poly, 2.5 μm , que sirve de electrodo superior y de actuador térmico



-
-
-
-
-
-
-
-

-
-
-

Mecanizado del poly



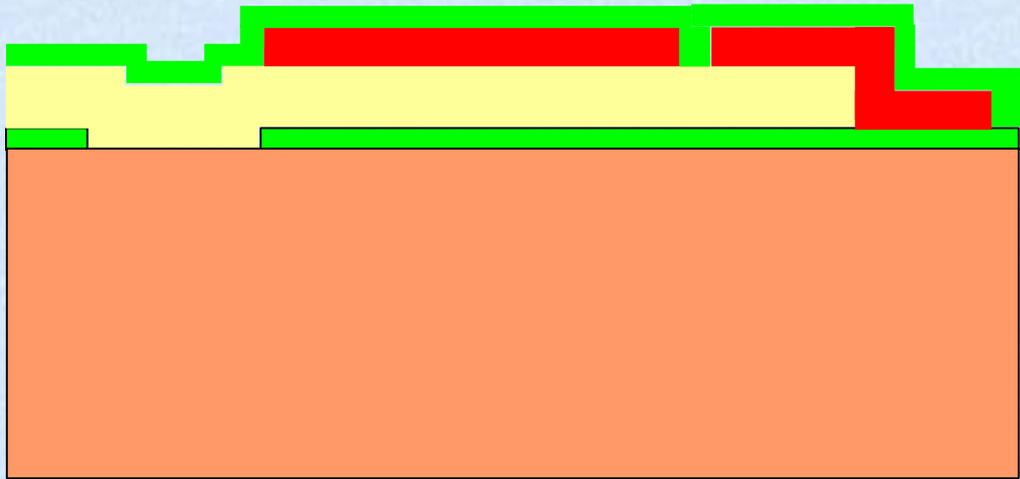
Máscara que da forma a los actuadores térmicos y al electrodo superior



-
-
-
-
-
-
-
-

-
-
-

Deposición de aislante



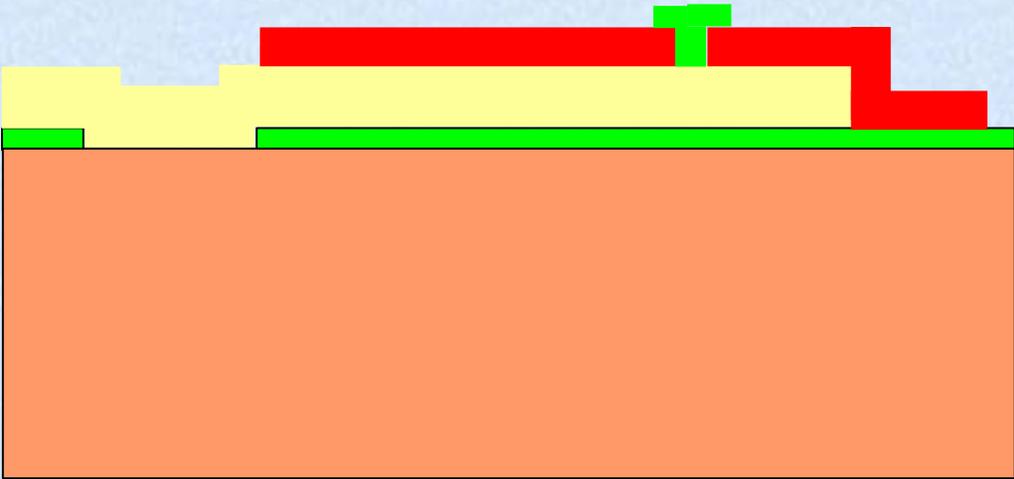
Aislante que evita que el electrodo superior haga contacto con los actuadores



-
-
-
-
-
-
-
-

-
-
-

Mecanizado de aislante



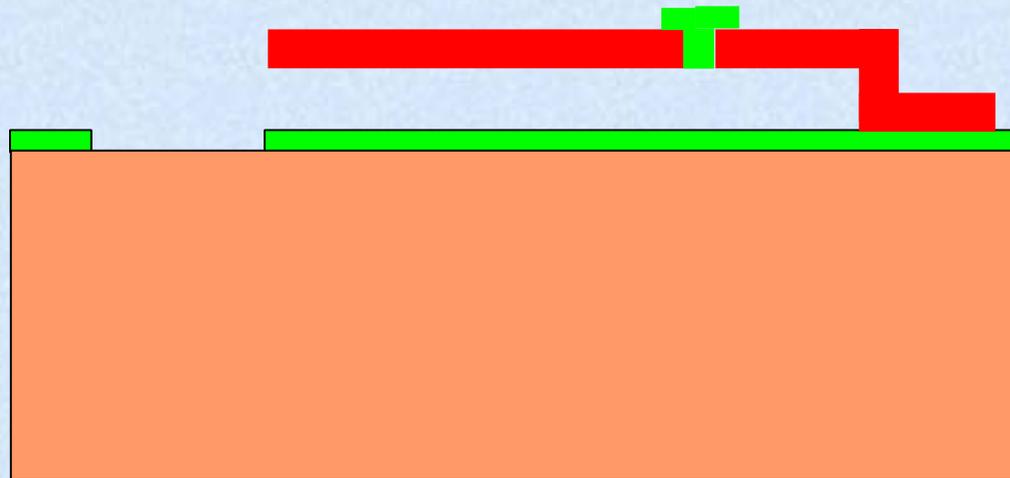
Sólo queda lo necesario para dar consistencia al conjunto



-
-
-
-
-
-
-
-

-
-
-

Liberación del electrodo



El electrodo se puede mover mediante los actuadores térmicos

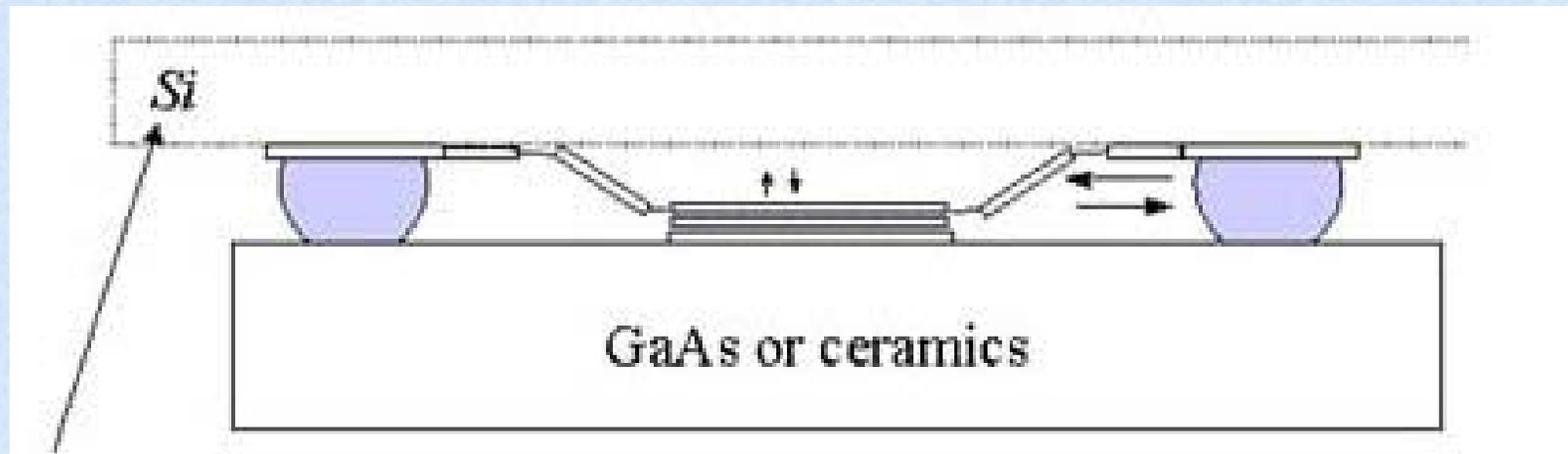
Funcionamiento del dispositivo

- Actuación indirecta para conseguir un condensador de separación variable
- Variación de capacidad de 2.6 pF cuando la separación varía entre 0.2 y 2 μm
- Factor de calidad muy alto para frecuencias altas ($\sim 30 \text{ GHz}$)
- Pero: Si es semiconductor y no se comporta bien como electrodo de un condensador 😞



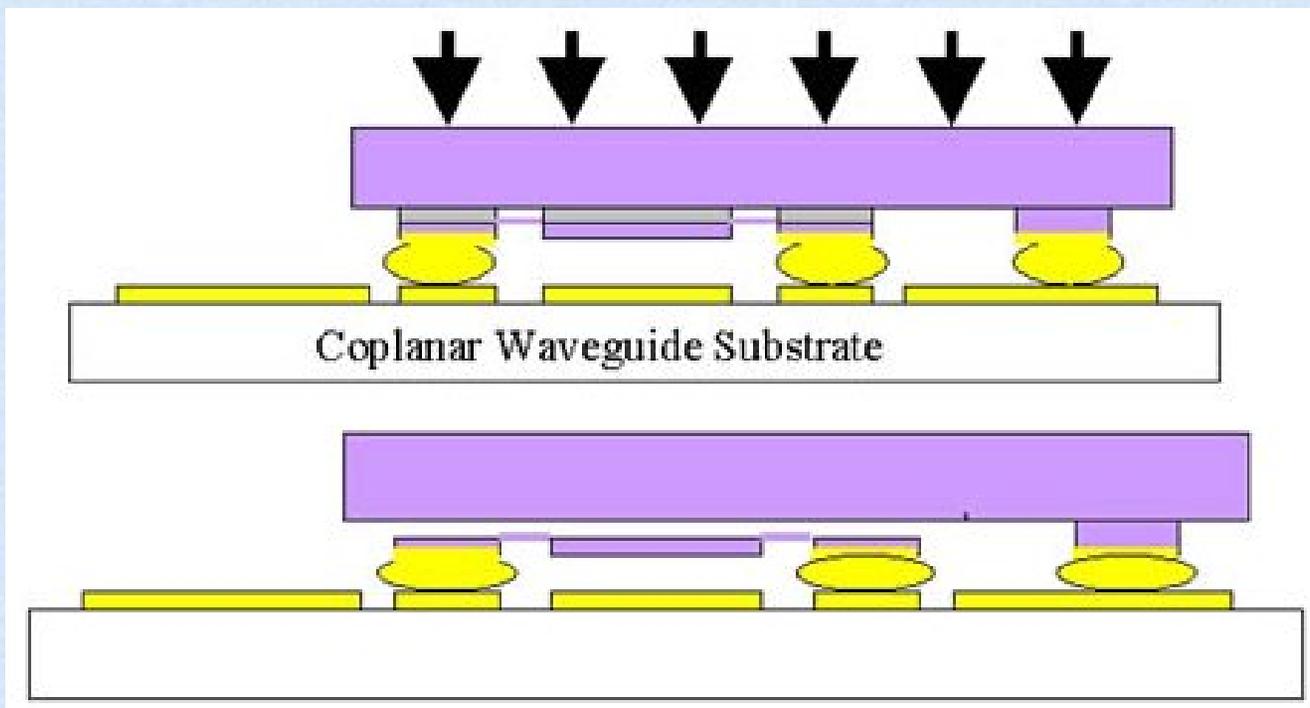
Encapsulado flip-chip

- Se le da la vuelta al chip y se pega a otro sustrato
- Así podemos conseguir que el otro electrodo no sea de silicio



Encapsulado flip-chip

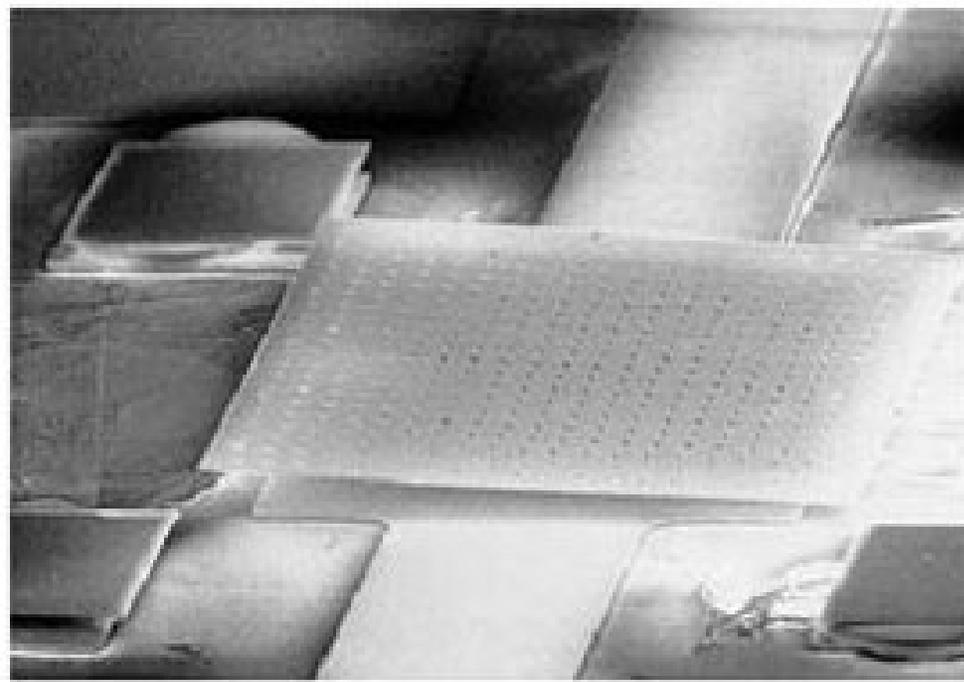
- Incluso se puede eliminar completamente la necesidad del silicio en el producto terminado



Eliminación de la capa de sacrificio después del pegado

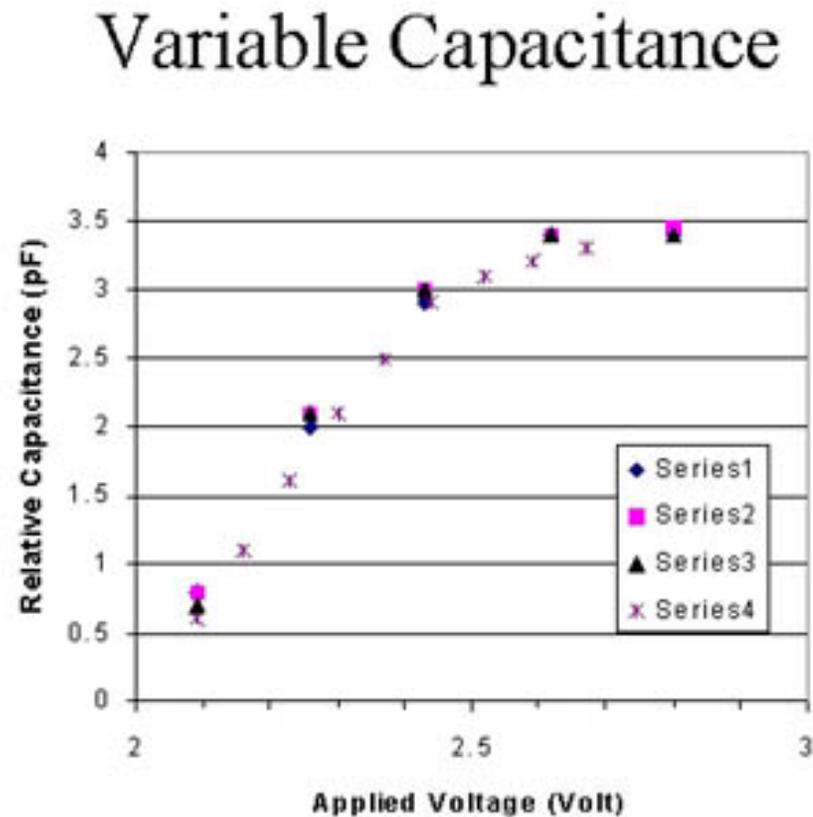
-
-
-

Ejemplo de flip-chip



Estructura liberada después del
pegado

Comportamiento del condensador



-
-
-

Conclusiones

- Sistema para conseguir una capacidad variable
- Diferentes formas de actuación para conseguir el movimiento
- El tipo de pegado y encapsulado afectan al funcionamiento

-
-
-
-
-
-
-
-