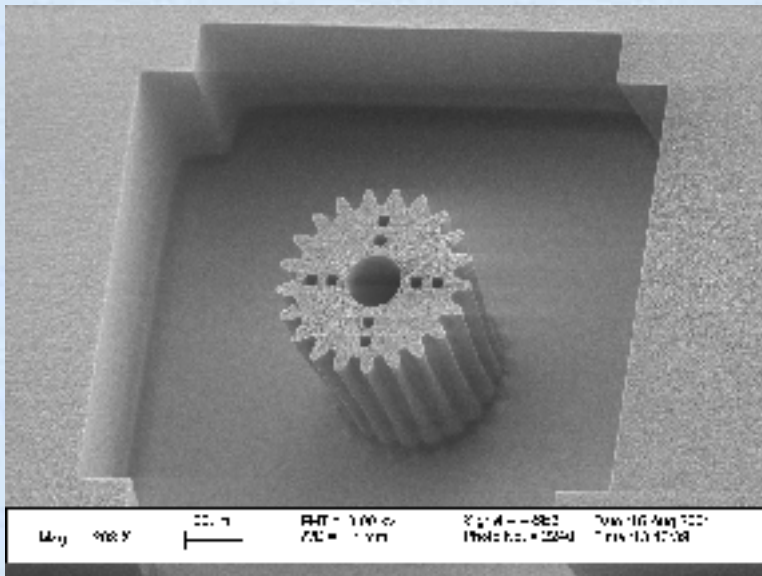


-
-
-
-
-
-
-
-
-
-

Procesos de fabricación



Antonio Luque Estepa
Dpto. Ingeniería Electrónica

-
-
-

Índice

- † Introducción
- † Preparación
- † Deposición
- † Fotolitografía
- † Grabado húmedo
- † Grabado seco
- † LIGA
- † Unión anódica y por fusión
- † Pruebas y mediciones

-
-
-
-
-
-
-
-

-
-
-

Introducción

† Procesos de fabricación

Adición de material (deposición)

Sustracción de material (grabado)

Moldeado

Fotolitografía

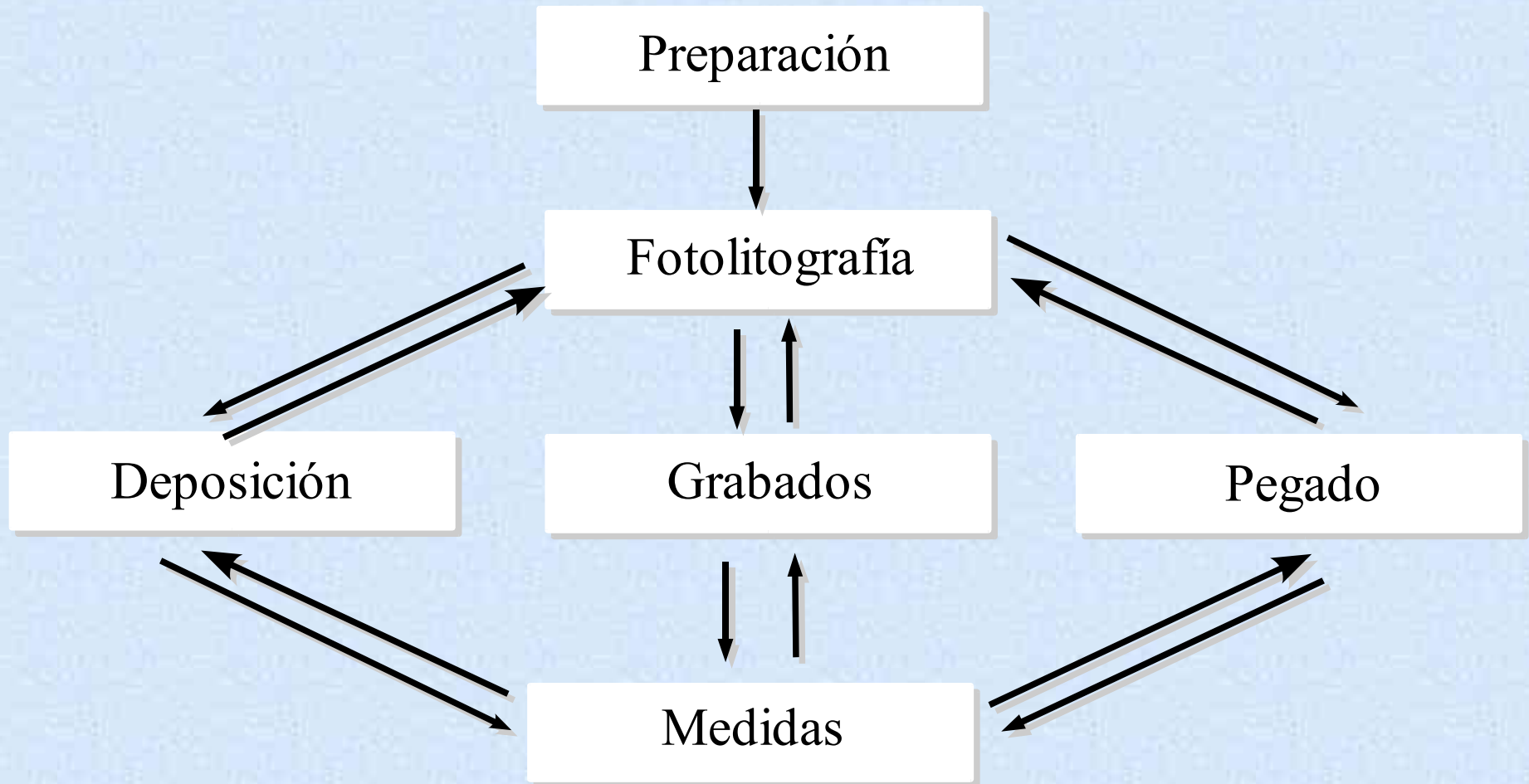
Pegado de material

† Encapsulado

† Medida y test

- 
- -
 -
 -
 -
 -
 -
 -

Proceso general



-
-
-

Sala blanca

- † Baja concentración de contaminantes. Ambiente controlado
- † Clasificación (U.S. Federal Standard 209b)
 - Clase 1: 1 partícula por pie cúbico
 - Clase 10: 10 partículas por pie cúbico
 - Clase 100: 100 partículas por pie cúbico
 - etc.
 - Referidas a partículas mayores de $0.5 \mu\text{m}$

-
-
-
-
-
-
-
-

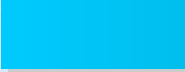
-
-
-

Sala blanca



-
-
-

Comportamiento en sala blanca



-
-
-

Comportamiento en sala blanca

- † Vestimenta adecuada: traje, guantes, gafas (para proteger a la sala, no a la persona)
- † Vestimenta de seguridad: guantes químicos, careta, protector corporal
- † Plan de trabajo preparado con antelación
- † Seguimiento de los procedimientos normalizados y las normas de seguridad



-
-
-

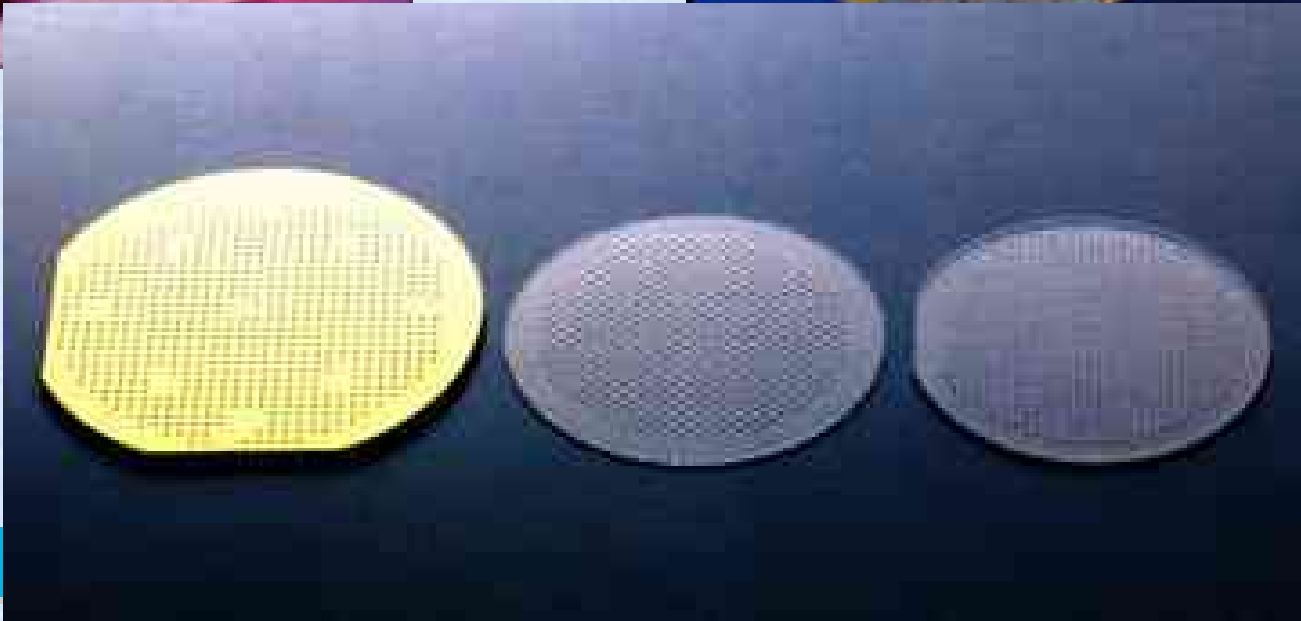
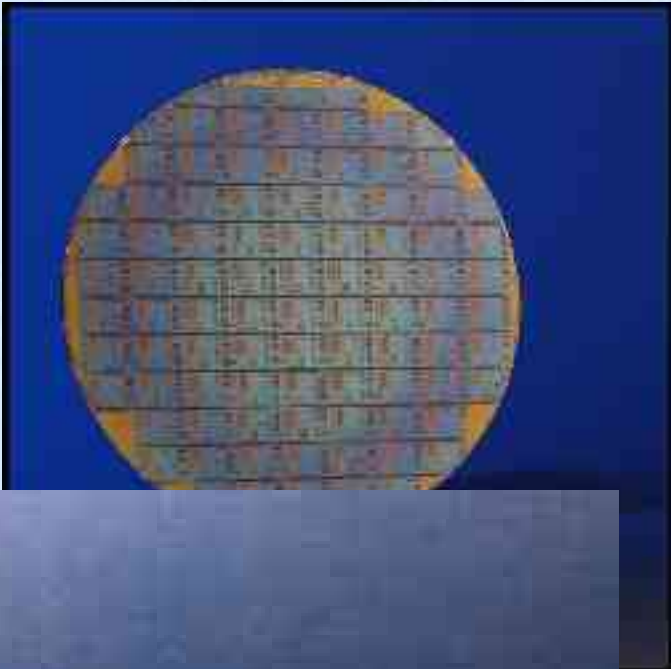
Materiales disponibles

- † Obleas
- † Disoluciones químicas
- † Máscaras (cromo, vidrio, oro,...)
- † Material auxiliar

- 
- -
 -
 -
 -
 -
 -
 -

-
-
-

Obleas de silicio y de vidrio



-
-
-

Disoluciones más comunes

- † Ácido fluorhídrico (HF)
- † Hidróxido de potasio (KOH)
- † $\text{HNO}_3 + \text{HF}$ (poly etch)
- † $\text{H}_3\text{PO}_4 + \text{HNO}_3$ (Al etch)



-
-
-

Índice

† Introducción

† Pasos preparatorios

† Deposición

† Fotolitografía

† Grabado húmedo

† Grabado seco

† LIGA

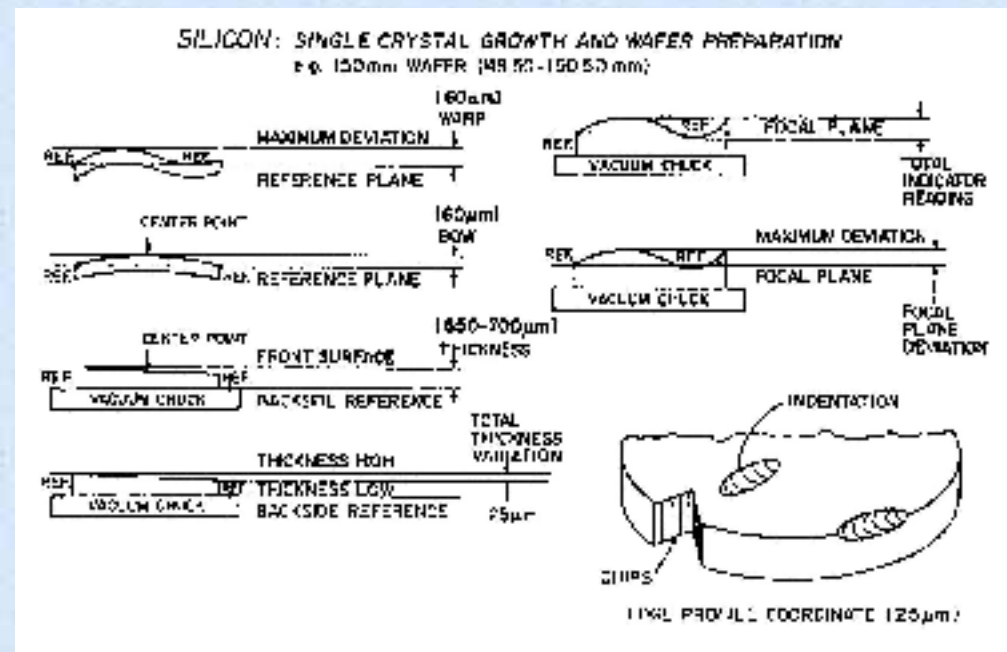
† Unión anódica y por fusión

† Pruebas y mediciones



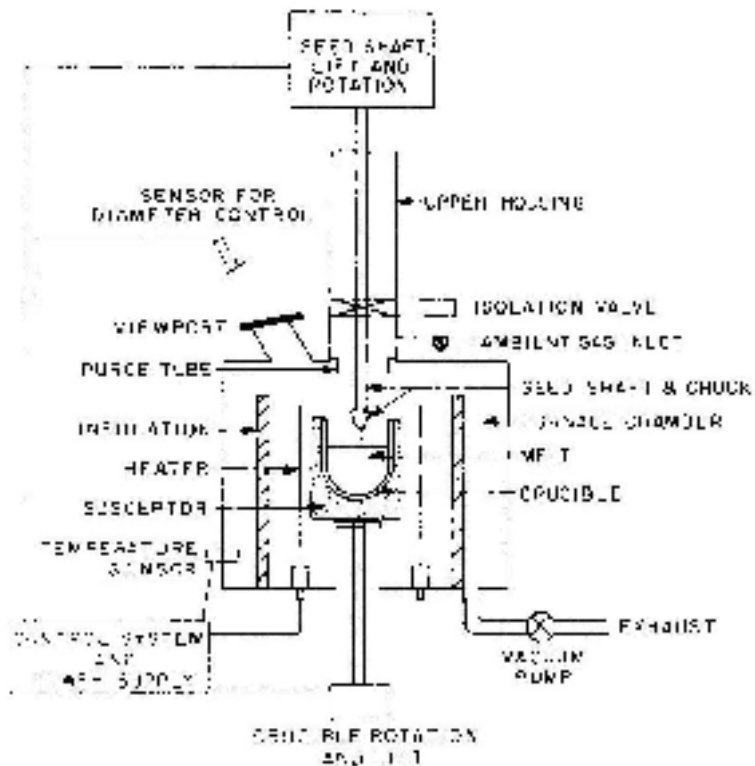
Pasos preparatorios

- † Obleas de silicio, vidrio, pyrex, SOI (Silicon on insulator),...
- † Silicio: dopado p/n, SSP/DSP, diámetro 100mm, espesor 380/525 μm , orientación $\langle 100 \rangle / \langle 110 \rangle / \langle 111 \rangle$

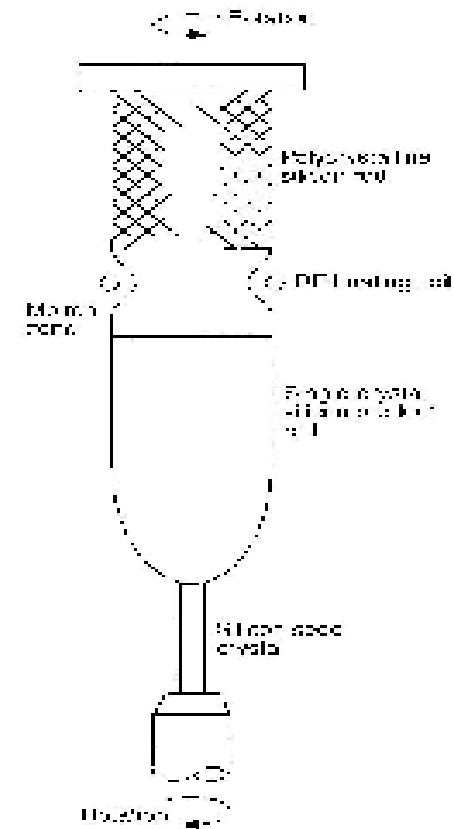


Obleas de silicio: fabricación

Czochralski



Float-zone crystal growth



-
-
-

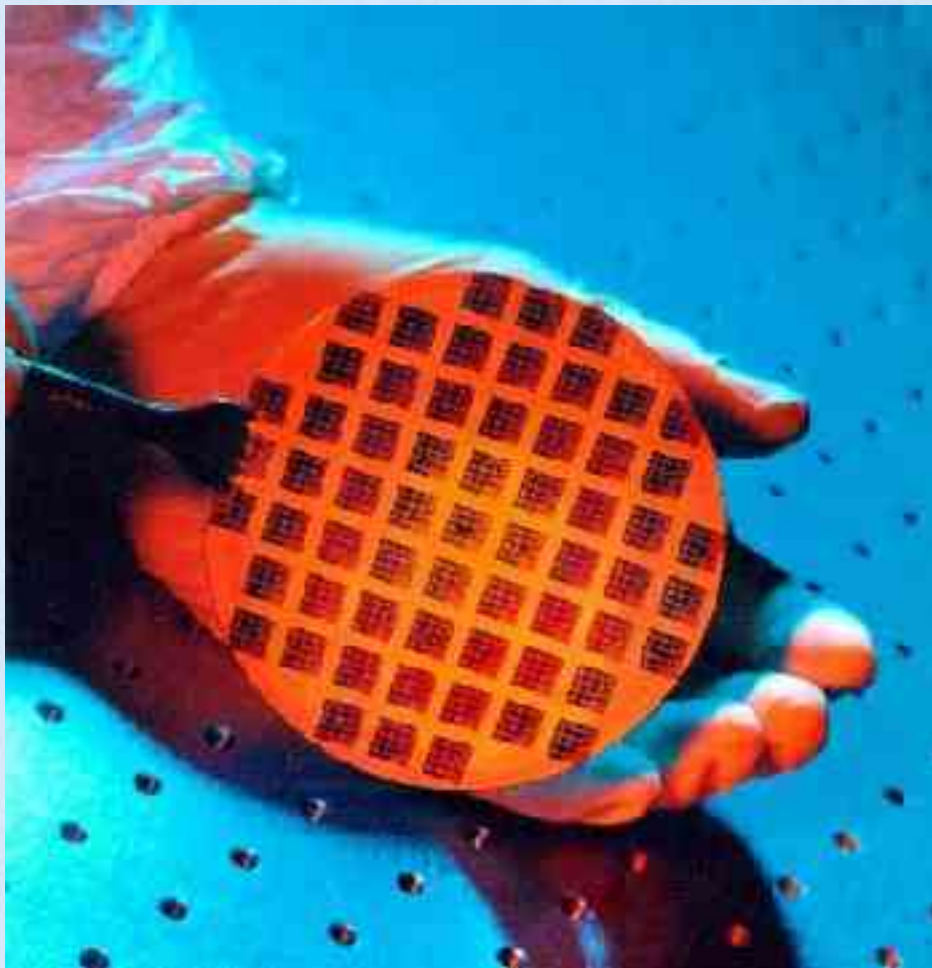
Obleas de silicio: manejo



Automático • • • • •

-
-
-

Obleas de silicio: manejo



Manual • • • • •

-
-
-

Limpieza de las obleas

- † Proceso RCA: limpieza antes de comenzar el procesamiento
- † Paso 1: residuos orgánicos con NH_4OH
- † Paso 2: óxido con HF
- † Paso 3: residuos metálicos con HCl

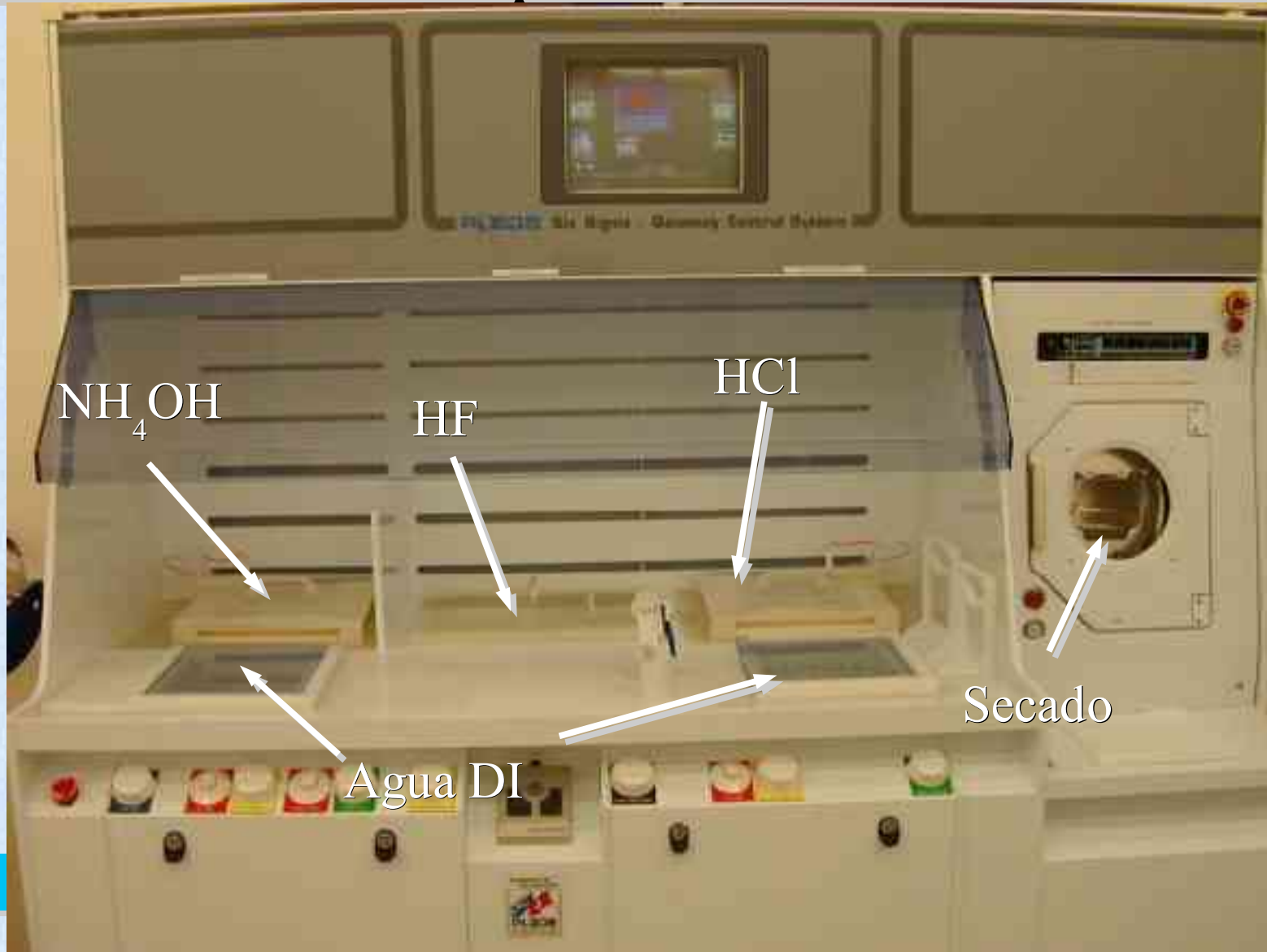


-
-
-

Limpieza RCA



Limpieza RCA



-
-
-

Índice

† Introducción

† Preparación

† Deposición

† Fotolitografía

† Grabado húmedo

† Grabado seco

† LIGA

† Unión anódica y por fusión

† Pruebas y mediciones



-
-
-

Deposición de material

† Se pueden depositar materiales sobre un sustrato desde

Líquido

Gas

Plasma

Sólido

† Proceso térmico para variar sus propiedades

- 
- -
 -
 -
 -
 -
 -
 -

-
-
-

Tipos de deposición

† Física

PVD (por ejemplo, sputtering o epitaxial)

† Química

Baja presión LPCVD

Con plasma PECVD

Presión atmosférica APCVD

† Por láser

† etc.

- 
- -
 -
 -
 -
 -
 -
 -

-
-
-

Dopado del silicio

† Difusión térmica, entre 950 y 1280 °C

Ley de Fick de la difusión


Poco usado hoy en día en fábricas comerciales

† Implantación iónica

Se pueden implantar más tipos de iones que por difusión

Buen control de la concentración

Menor coste por oblea

- 
- -
 -
 -
 -
 -
 -
 -

-
-
-

Ley de Fick

- † Gobierna la difusión de los dopantes en el Si

$$D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} = \frac{\partial C}{\partial t}$$

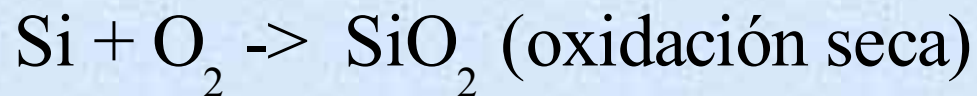
- † D coeficiente de difusión
- † C concentración de dopante



-
-
-

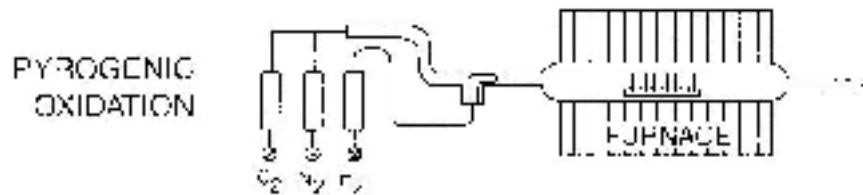
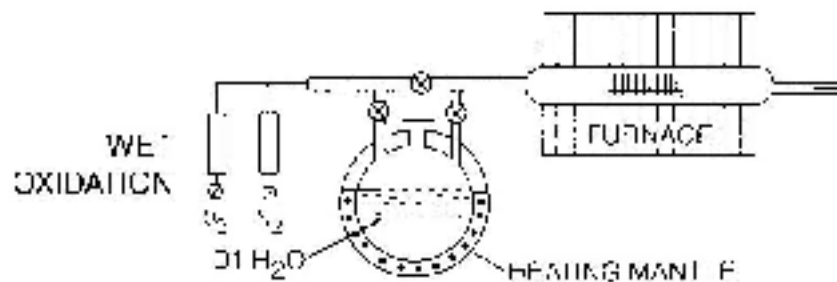
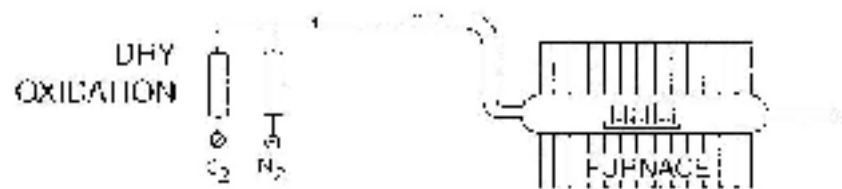
Oxidación

- † Crecimiento de óxido por calentamiento del Si
- † Se forma una capa de 20 Å, que se difunde rápidamente a alta temperatura

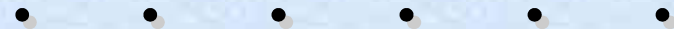


Tipos de oxidación

Oxidation setups

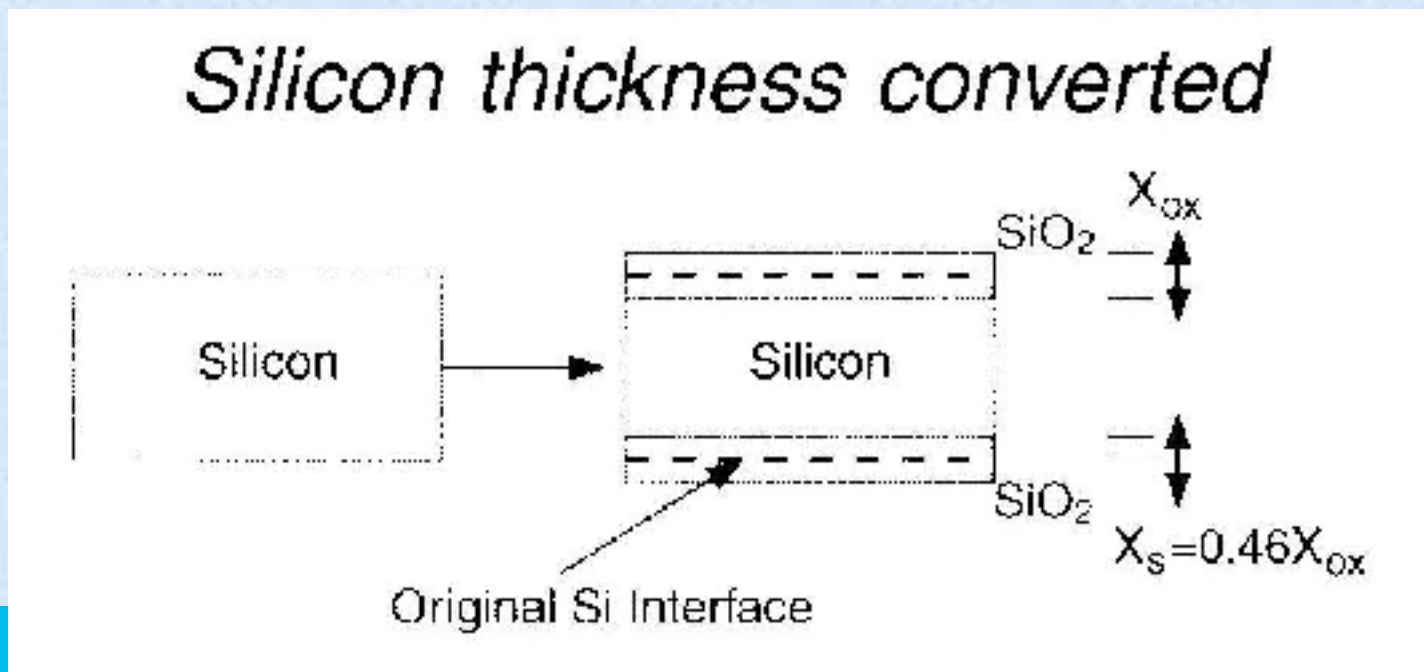


- † Seca: sin vapor de agua
- † Húmeda: con vapor de agua
- † Pirogénica: con hidrógeno gaseoso



Crecimiento del óxido

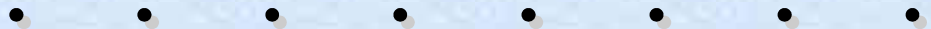
- † Al oxidar el Si, se pierde parte del mismo
- † El espesor perdido es el 46% del espesor total de óxido



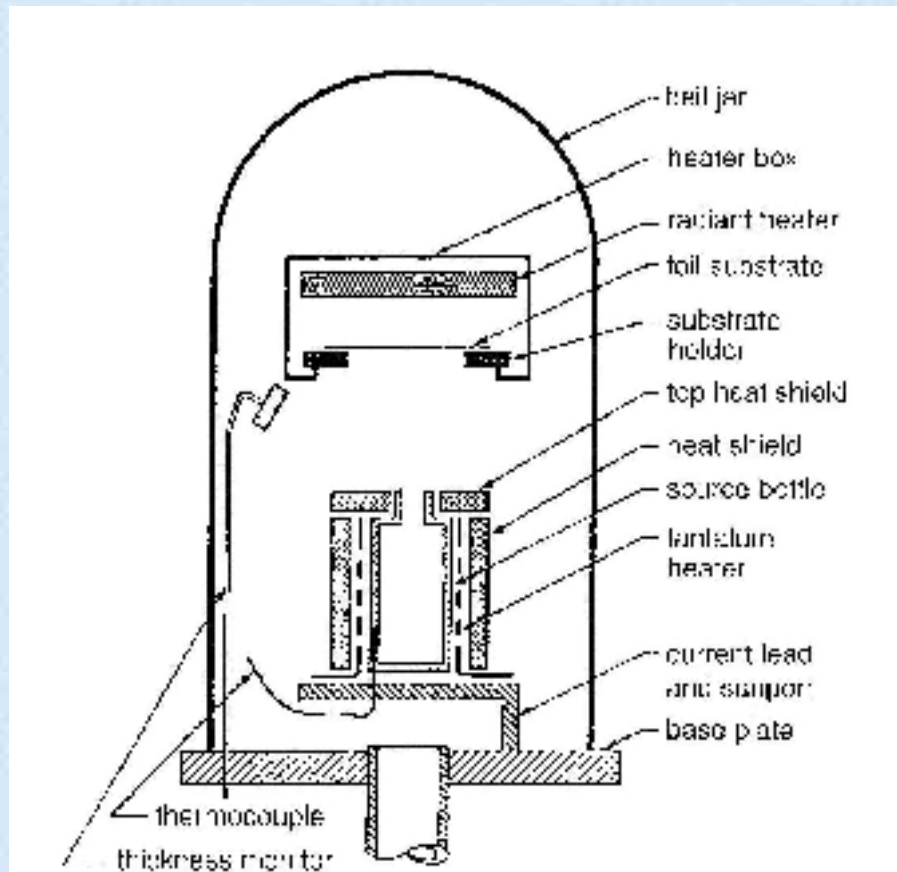
-
-
-

Deposición física

- † PVD: Physical Vapor Deposition
- † Los reactores funcionan a baja presión
- † El origen del material a depositar puede ser sólido, líquido o gaseoso
- † Evaporación térmica, epitaxia molecular, deposición por láser, etc.



Evaporación térmica

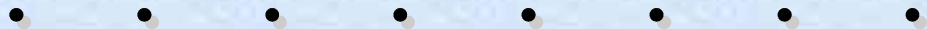


- † Configuración típica de un reactor de evaporación
- † Es importante tener un buen vacío
- † Fuentes de calor: corriente eléctrica, electrones, RF, láser

-
-
-

Sputtering

- † “Escupir” material encima del sustrato
- † El material a depositar se arranca cargándolo negativamente y bombardeándolo con iones positivos de Ar.
- † Ventajas sobre la evaporación
 - Más materiales para depositar
 - Más uniformidad
 - Mejor control del espesor



-
-
-

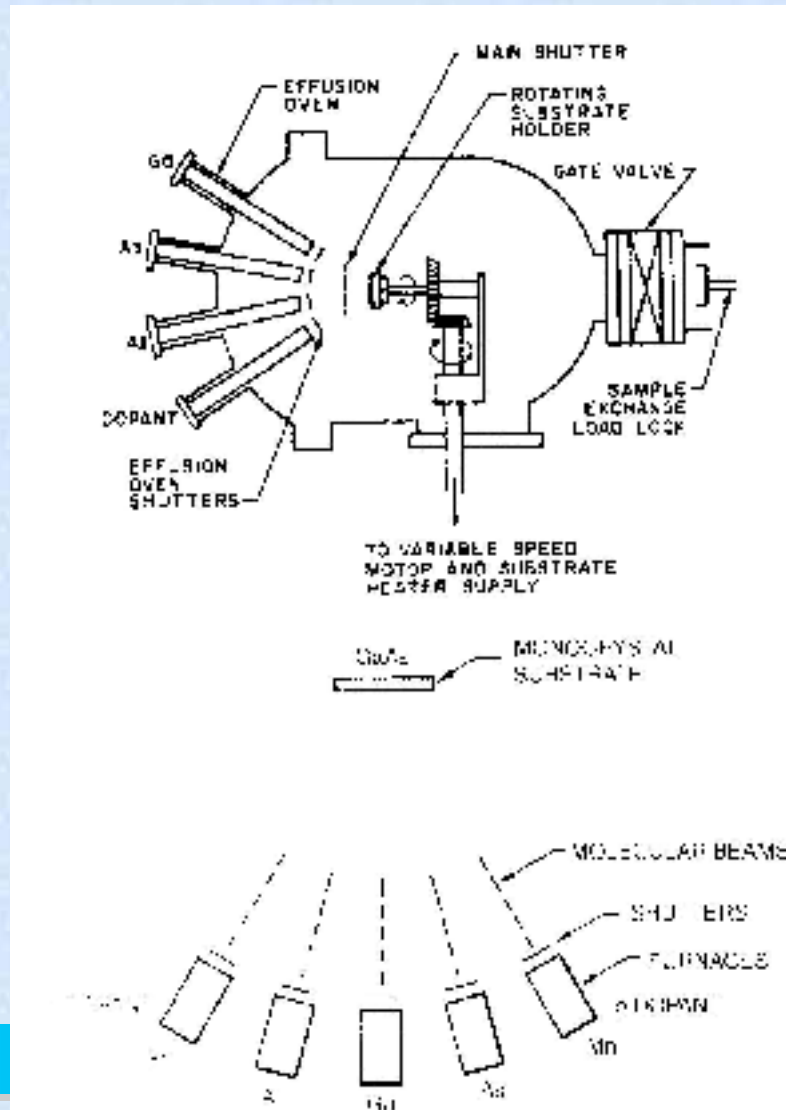
Sputtering



- † Metales
Al, Ti, Ta, Pt, ...
- † Aleaciones
Al+Si, W+Ti, ...
- † Dieléctricos
SiO₂, TiO₂, ...

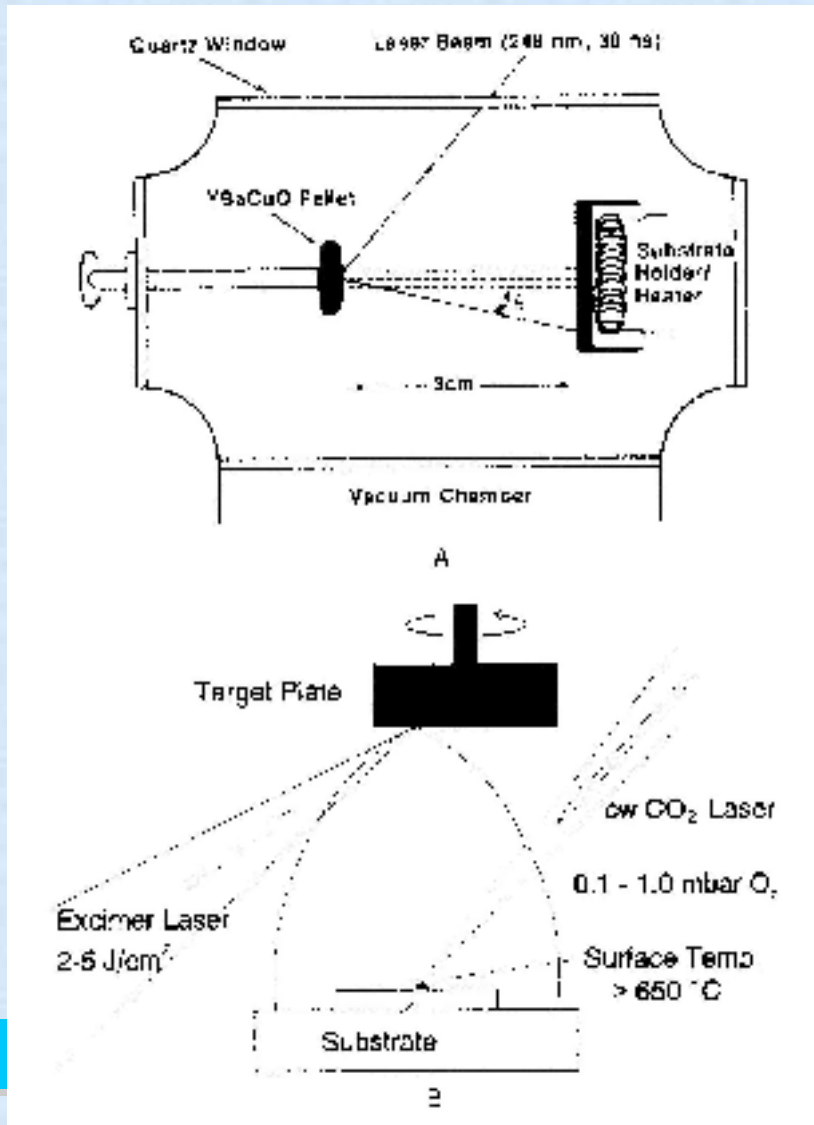
-
-
-
-
-
-
-
-

Epitaxia molecular



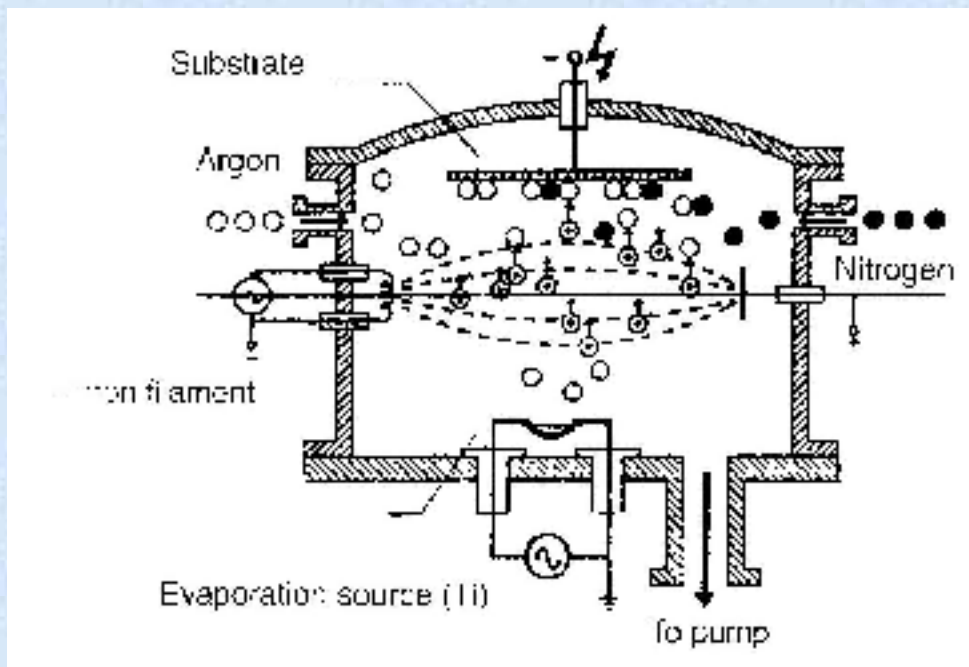
- † MBE: Molecular Beam Epitaxy
- † Un cristal calentado se coloca en un flujo de átomos del material a crecer
- † Proceso muy lento
- † Apropriada para pequeños espesores y precisión muy alta

Deposición por láser



- † El láser se usa para arrancar material que se deposita en el sustrato
- † Apropriado para depositar materiales complejos (p.e. Superconductores)
- † Proceso lento (1 micra en 6 h)

Ion plating



† Evaporación de un material, e ionización del flujo de átomos para acelerarlos

† Posibilidad de crear nuevos materiales “al vuelo” añadiendo un gas a la cámara que reacciona con los iones

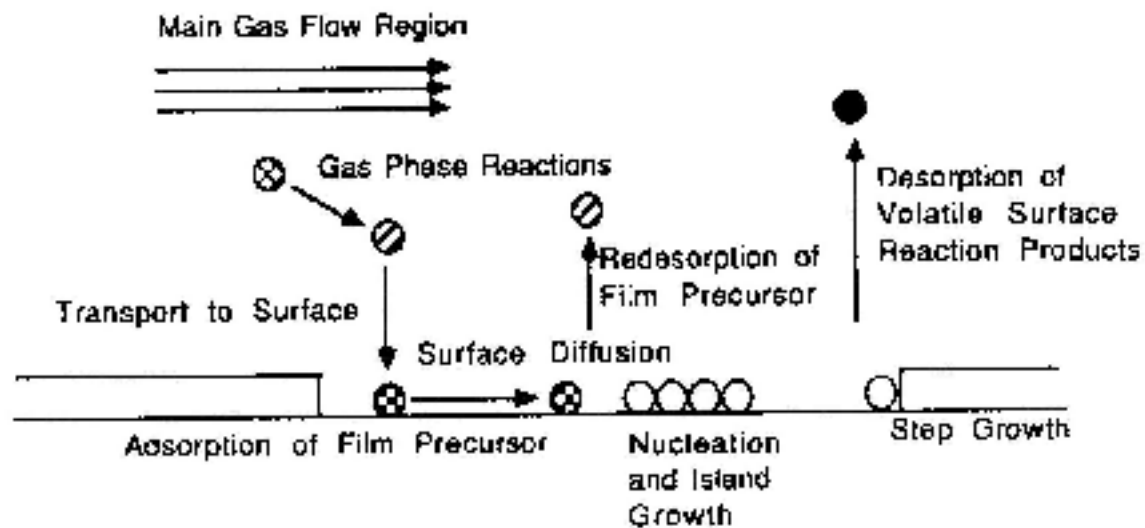
-
-
-

Deposición química

- † CVD: Chemical Vapor Deposition
- † Los elementos presentes en fase vapor reaccionan al contacto con una superficie caliente (el sustrato) para formar una película sólida
- † A menudo se usa un gas inerte para facilitar el transporte del material

Deposición química

† Mecanismo de la deposición química:



-
-
-

Mecanismos en CVD

- † Transporte de los reactantes en el gas
- † Reacciones en fase gaseosa
- † Adsorción de los reactantes en el sustrato
- † Reacciones en el sustrato
- † Transporte de compuestos sobre el sustrato
- † Nucleación de los compuestos depositados
- † Desorción de los productos no deseados
- † Transporte de los productos no deseados. • • •

-
-
-

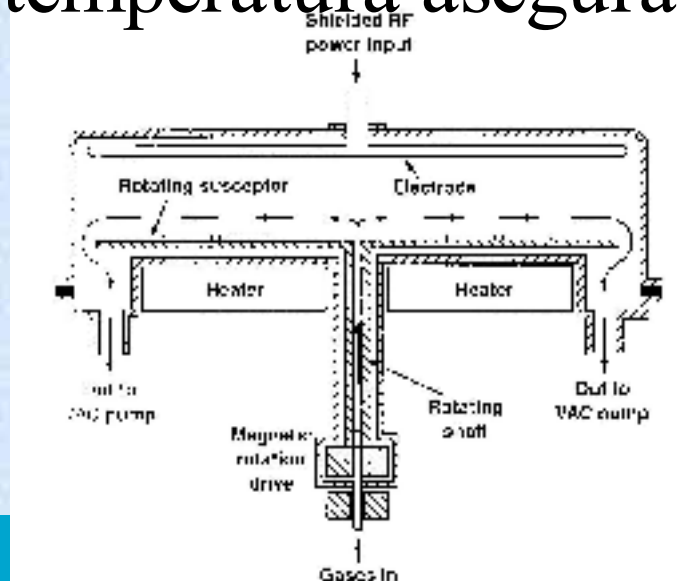
CVD: tipos

- † PECVD: Plasma Enhanced CVD
- † APCVD: Atmospheric Pressure CVD
- † LPCVD: Low Pressure CVD
- † VLPCVD: Very Low Pressure CVD
- † ECRCVD: Electron Synchrotron Resonance CVD
- † MOCVD: Metallorganic CVD

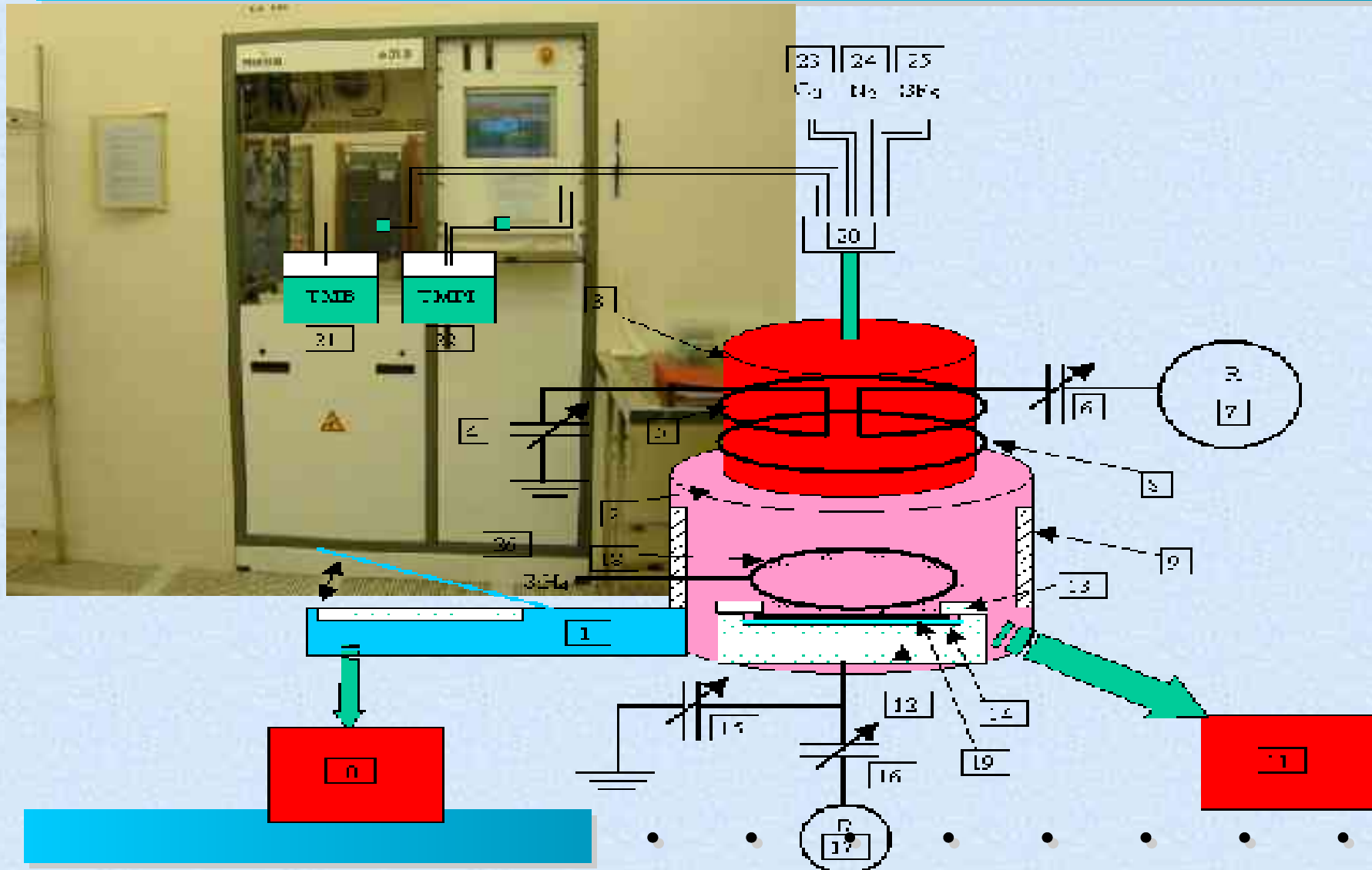


PECVD

- † Un plasma inducido por RF transfiere la energía a los gases
- † Sustrato horizontal o vertical
- † Control de la temperatura asegura la uniformidad

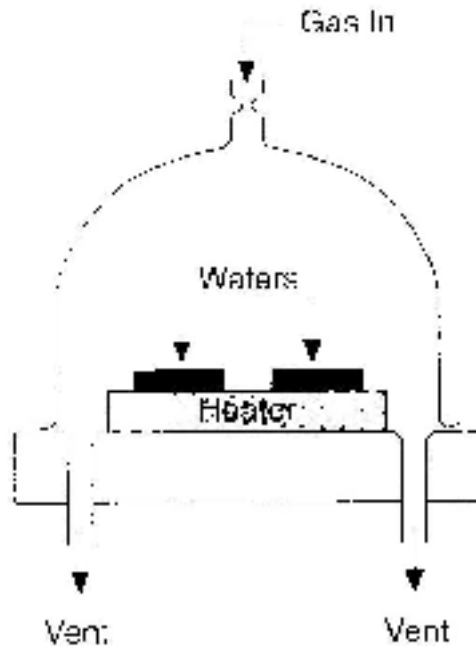


PECVD



APCVD

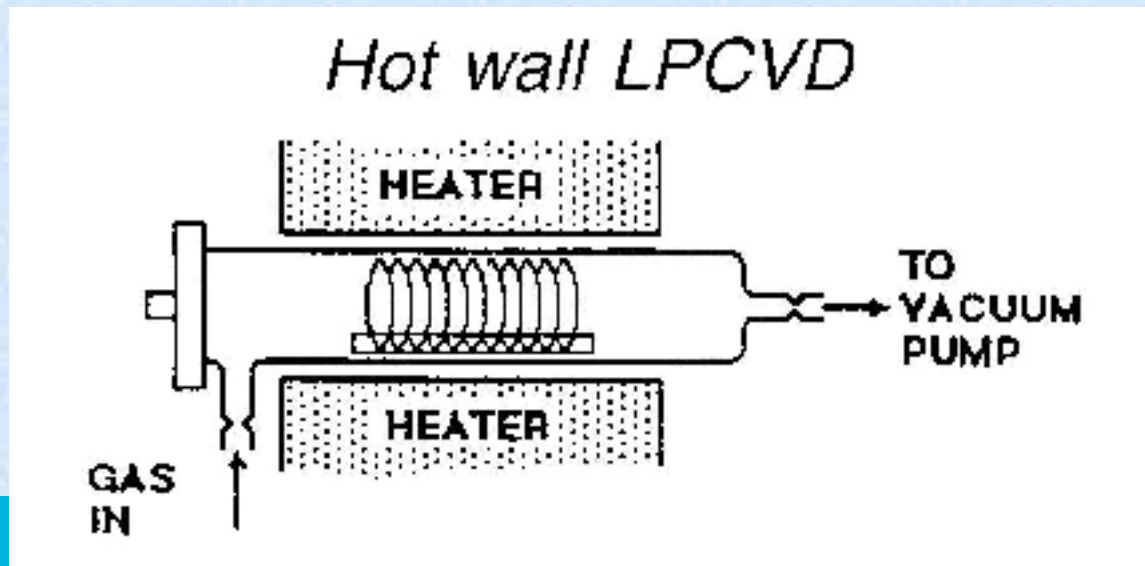
Cold wall APCVD



- † De 100 Pa a 10 kPa en torno a la presión atmosférica
- † Usos principales: Si epitaxial, GaAs, InP, HgCdTe
- † Deposición de SiO_2 a baja temperatura (LTO: Low Temperature Oxide)

LPCVD

- † Menos de 10 Pa
- † Espesor controlado por la reacción, no por el transporte másico
- † Por tanto, se pueden procesar muchas obleas a la vez



-
-
-

LPCVD

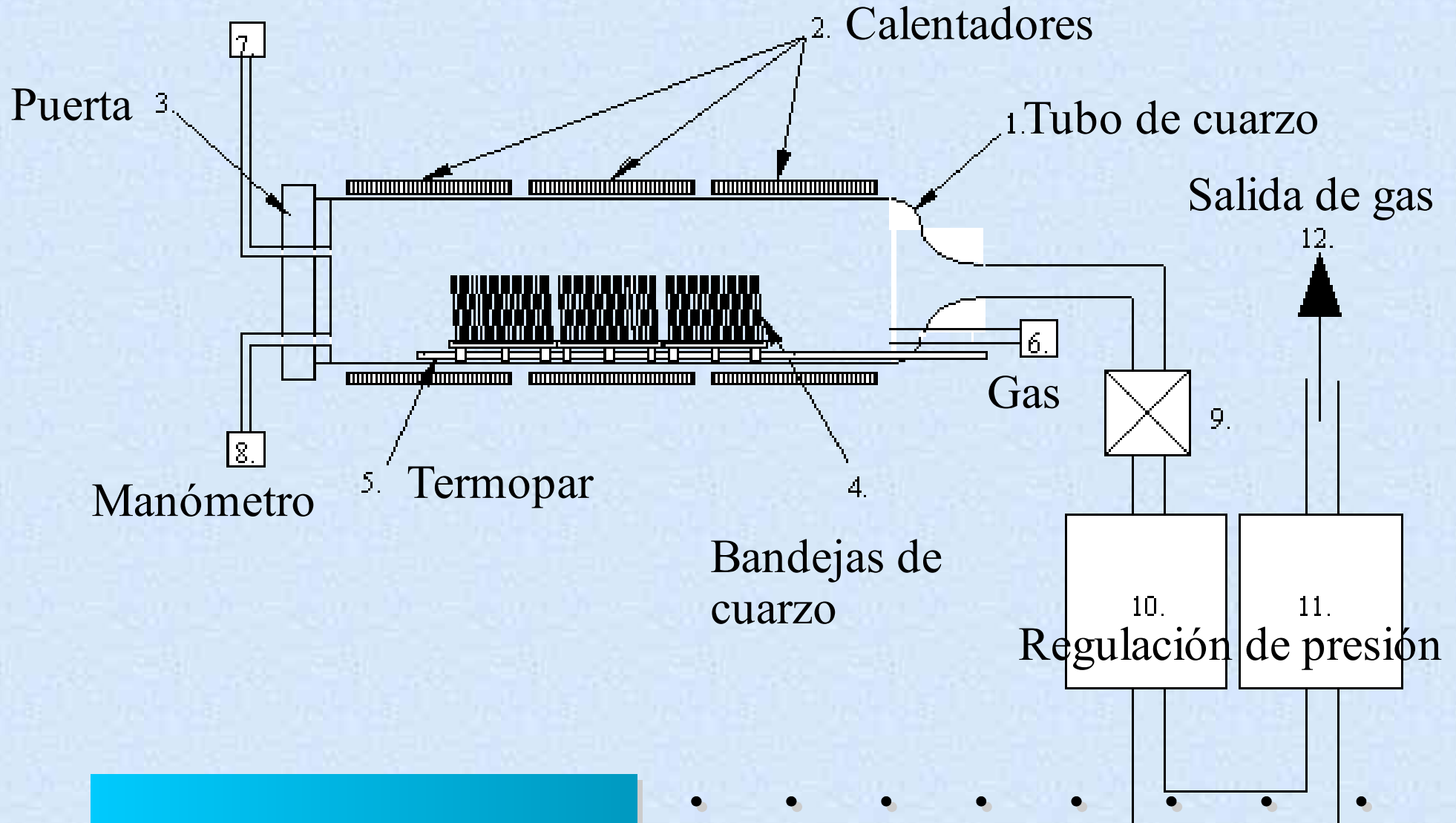
† Ejemplos de materiales:
polisilicio, nitruro
(SiN), nitruro de baja
tensión (LSN), óxido de
baja temperatura
(LTO), vidrio
fosfosilicado (PSG)



-
-
-
-
-
-
-
-

LPCVD

Gas

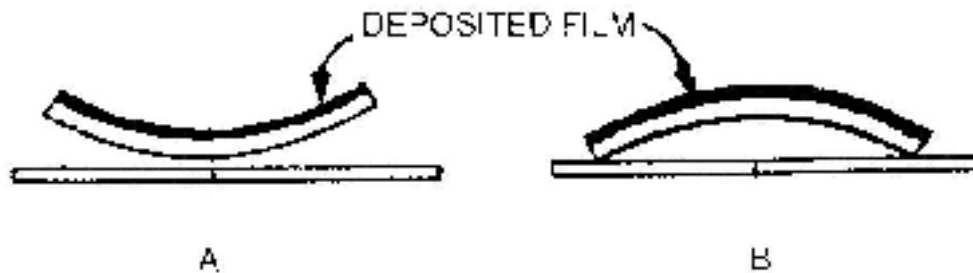


Tensión residual en la deposición

- † La deposición de materiales suele dejar tensiones residuales en la oblea
- † Hay materiales especialmente adecuados cuando la tensión es un problema

Compressive and tensile stress

Tensile stress causes concave bending (A), and compressive strength causes convex bending (B) of a thin substrate.



-
-
-

Índice

† Introducción

† Preparación

† Deposición

† Fotolitografía

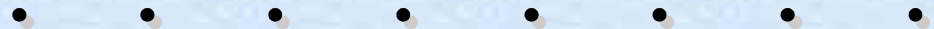
† Grabado húmedo

† Grabado seco

† LIGA

† Unión anódica y por fusión

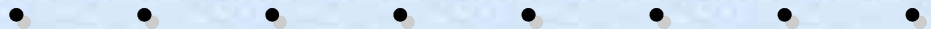
† Pruebas y mediciones



-
-
-

Fotolitografía. Pasos

- † Fabricación de la máscara
- † Precalentado
- † Deposición de fotorresina
- † Recalentado
- † Alineación y exposición
- † Revelado
- † Eliminación de fotorresina



-
-
-

Fabricación de la máscara

- † Sustrato de cuarzo y cromo
- † Escritura con láser y posterior revelado
- † También es posible la escritura directa en la oblea (sin máscara)



-
-
-

Precaentado

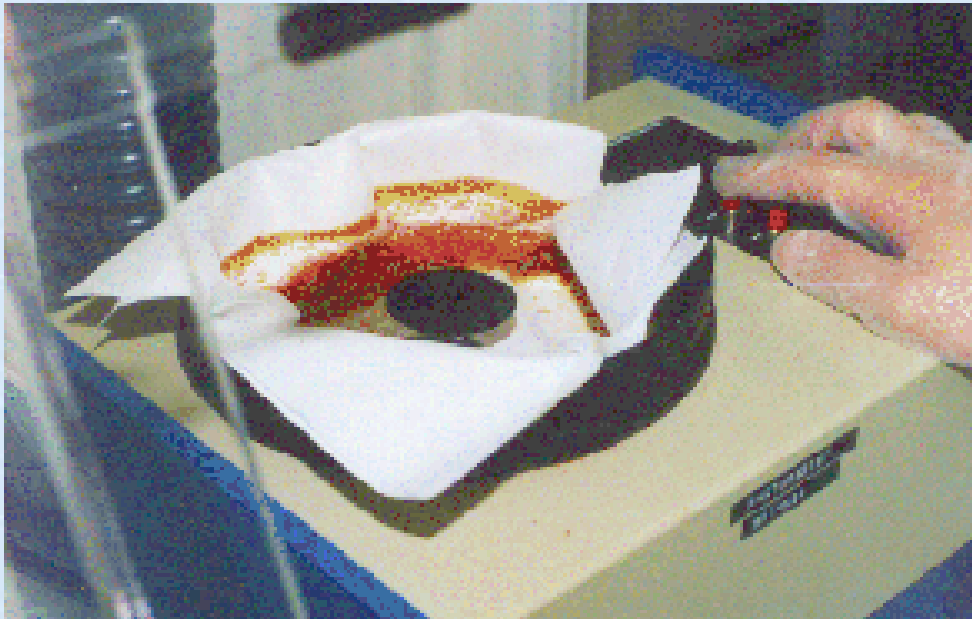


200-250 °C
20 minutos

-
-
-

-
-
-

Deposición de fotorresina



Girado a alta velocidad
(5000 rpm) durante 30
segundos



-
-
-

Recalentado



Objetivo:
endurecer la
fotorresina

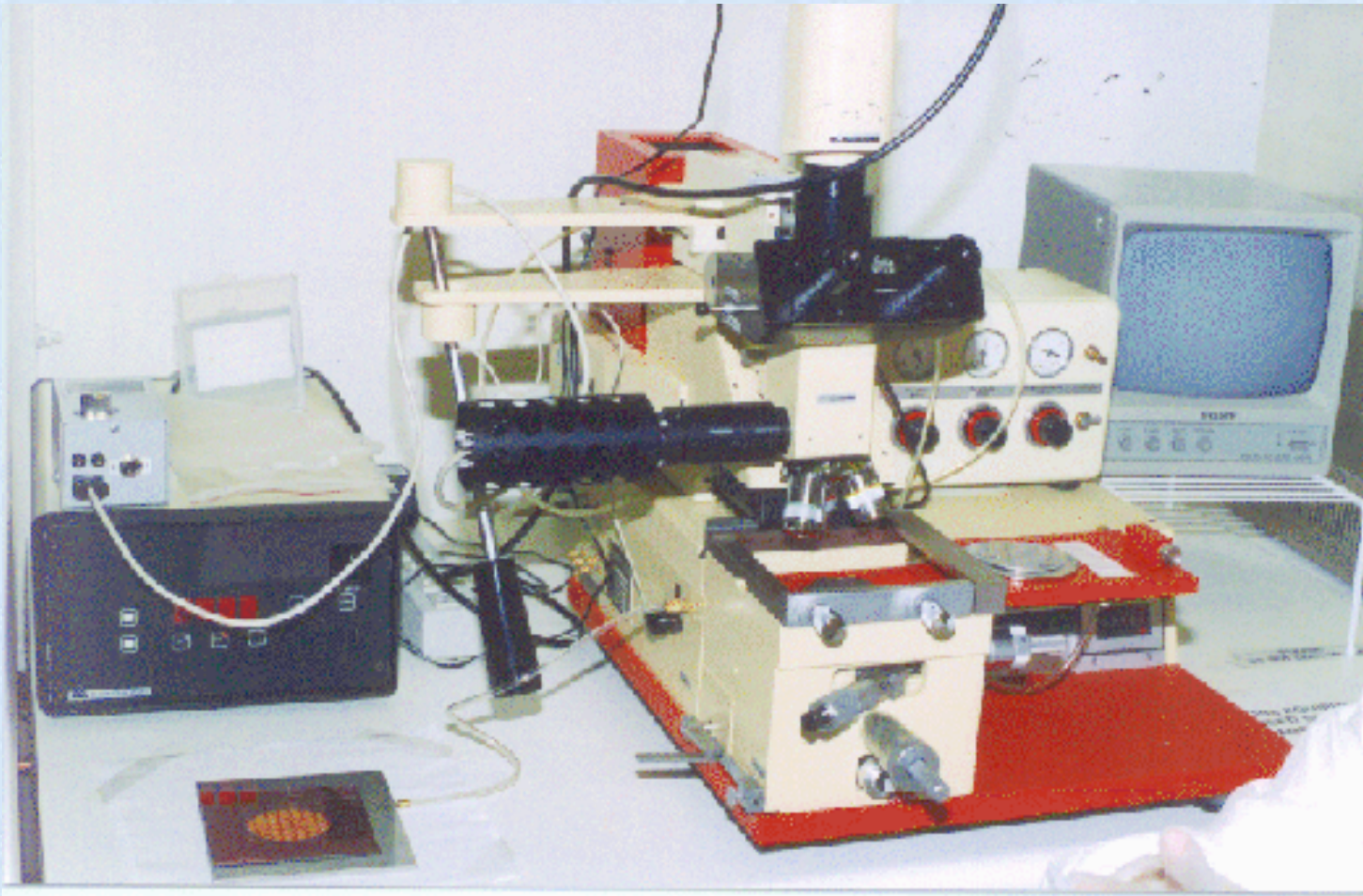
90-100 °C 25
minutos



-
-
-
-
-
-
-
-

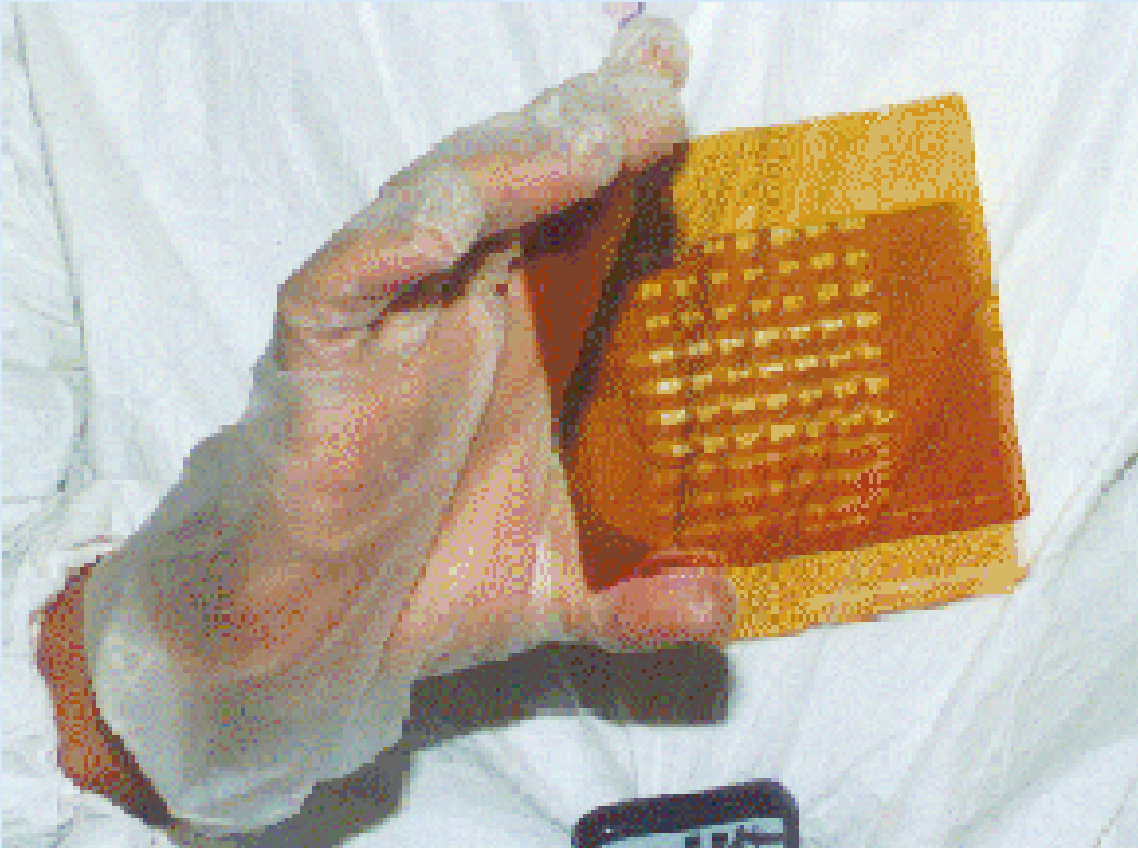
-
-
-

Alineación y exposición



-
-
-

Máscara



Fabricadas en
cromo y cuarzo

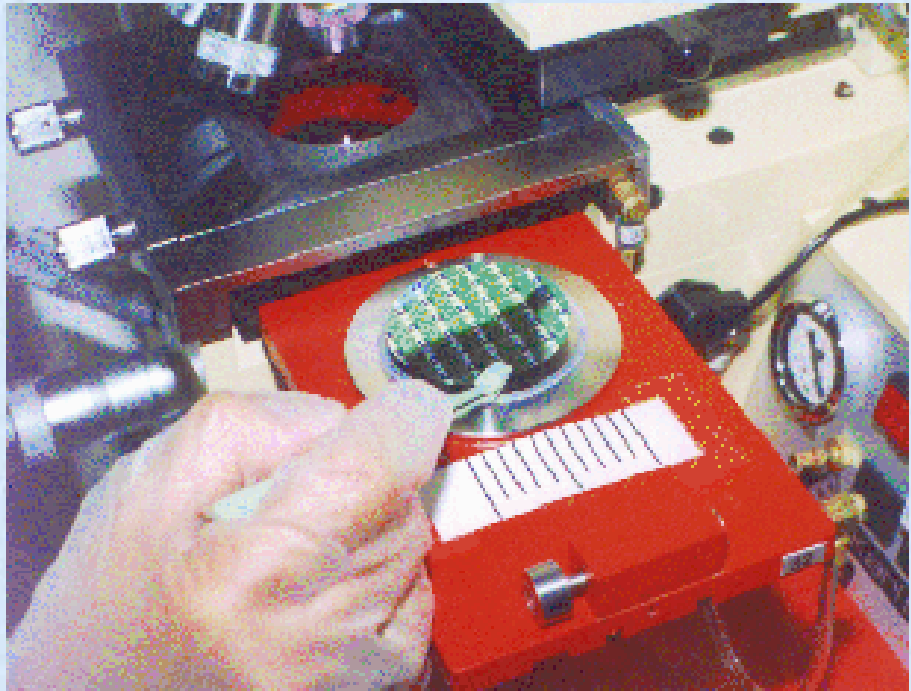
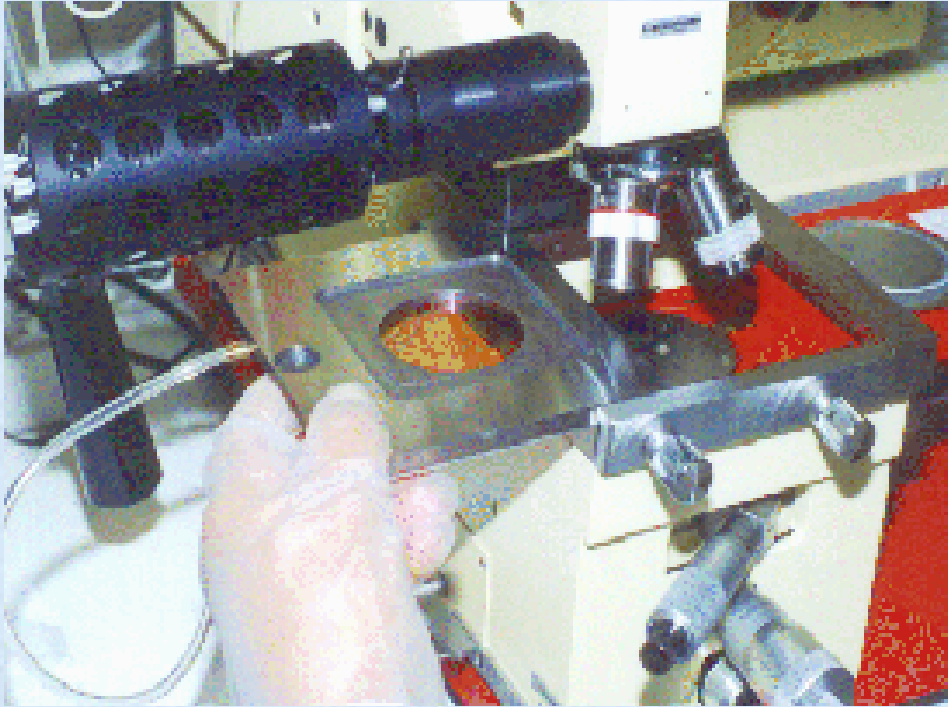
Coste aprox. 300 € /
máscara



-
-
-
-
-
-
-
-

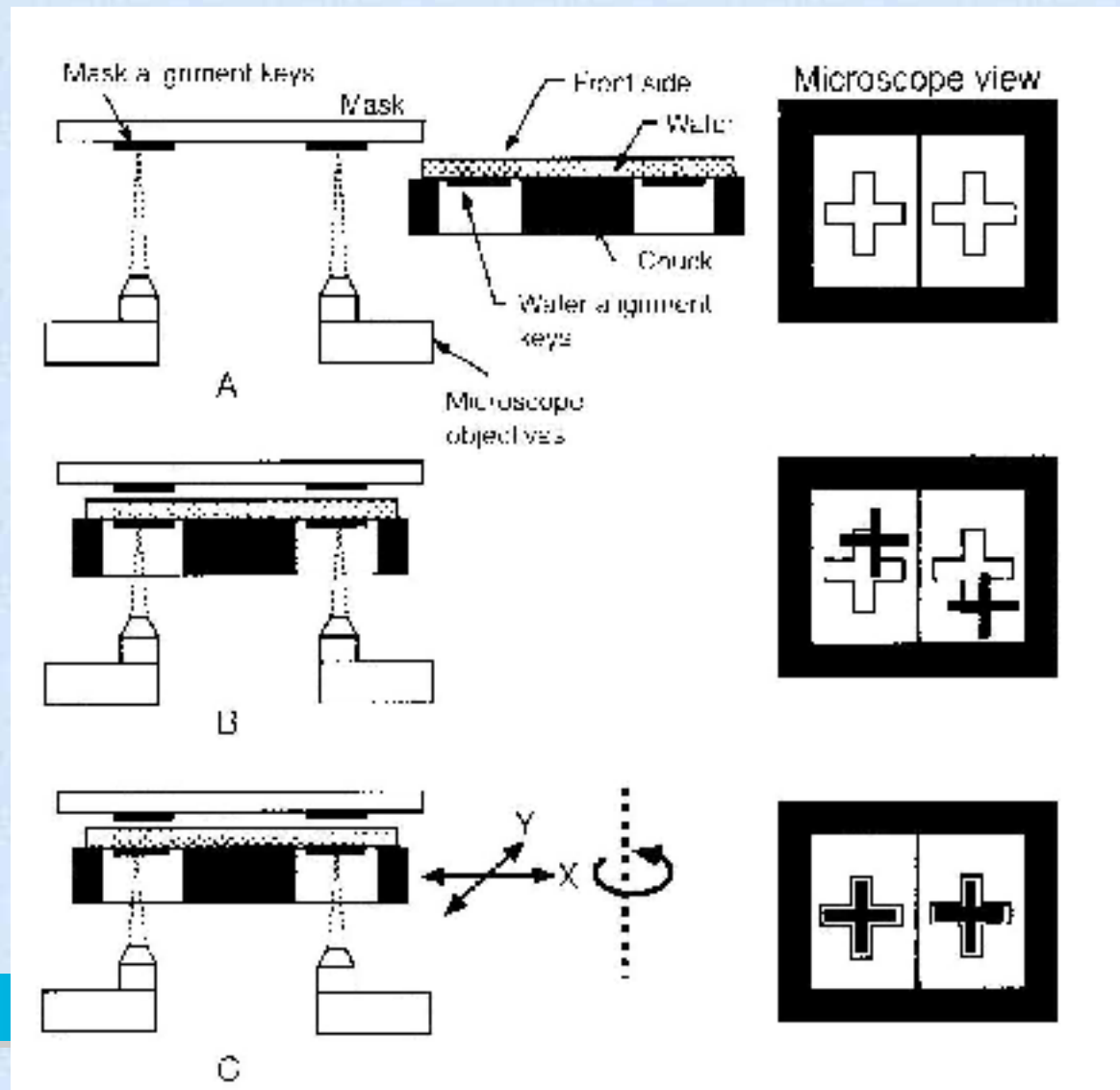
-
-
-

Alineación

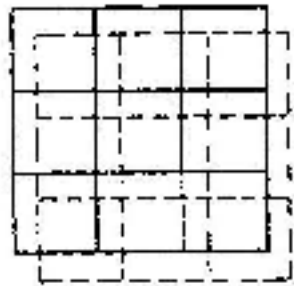


-

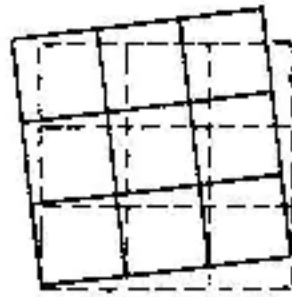
Alineación de doble cara



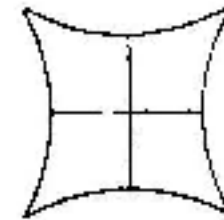
Errores en la alineación



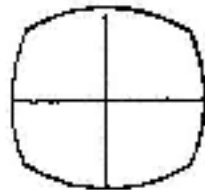
x-y



\ominus



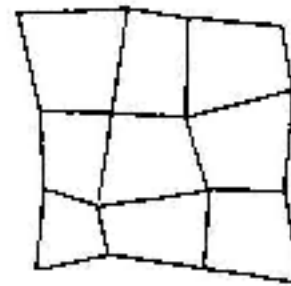
PINCUSHION



BARREL



MAGNIFICATION ERROR



RANDOM

ERRORS: • MISALIGNMENT

• MASK ERROR

• OPTICAL DISTORTION

• WAFER EXPANSION

• MASK EXPANSION

• MAGNIFICATION CHANGE

-
-
-

Revelado



-

-
-
-

Eliminación de fotorresina

- † Eliminación seca (plasma)
- † Eliminación húmeda
- † Descumming en el revelado, con plasma



-
-
-

Índice

† Introducción

† Preparación

† Deposición

† Fotolitografía

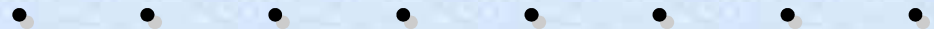
† Grabado húmedo

† Grabado seco

† LIGA

† Unión anódica y por fusión

† Pruebas y mediciones

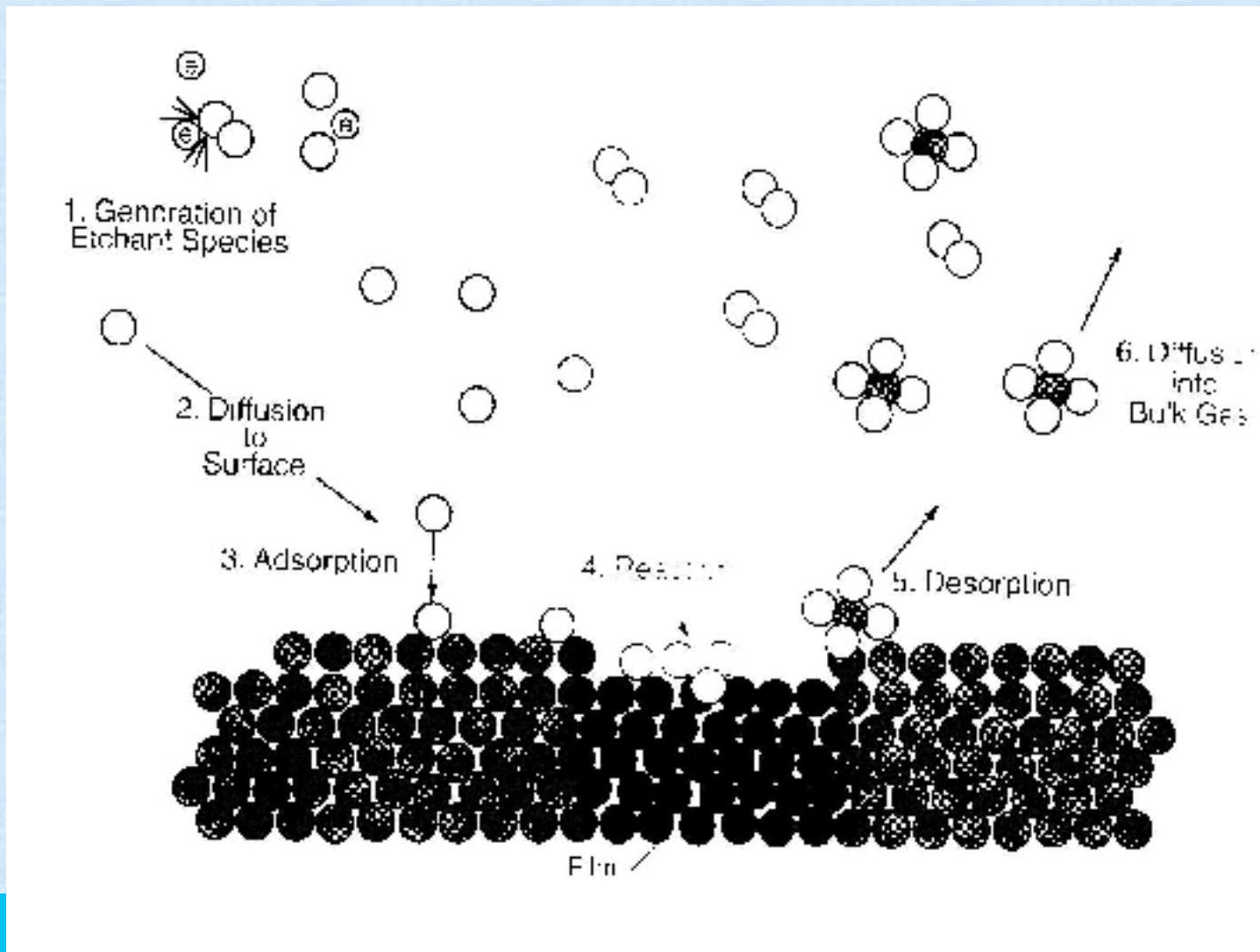


-
-
-

Grabado húmedo

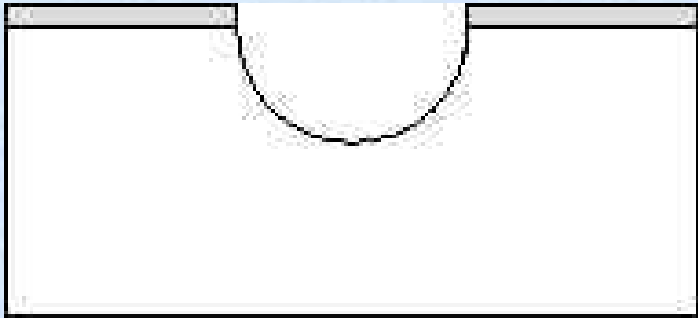
- † El ataque sobre el material se produce por la acción de un líquido
- † Puede ser:
 - Isotrópico
 - Anisotrópico
- † Grabado en superficie/volumen (surface/bulk)

Mecanismo del grabado húmedo

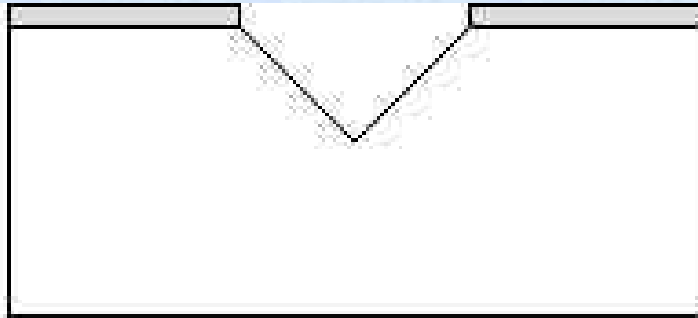


-
-
-

Isotrópico/anisotrópico



a) Isotropico



b) Anisotropico



-
-
-
-
-
-
-
-

-
-
-

Grado de anisotropía

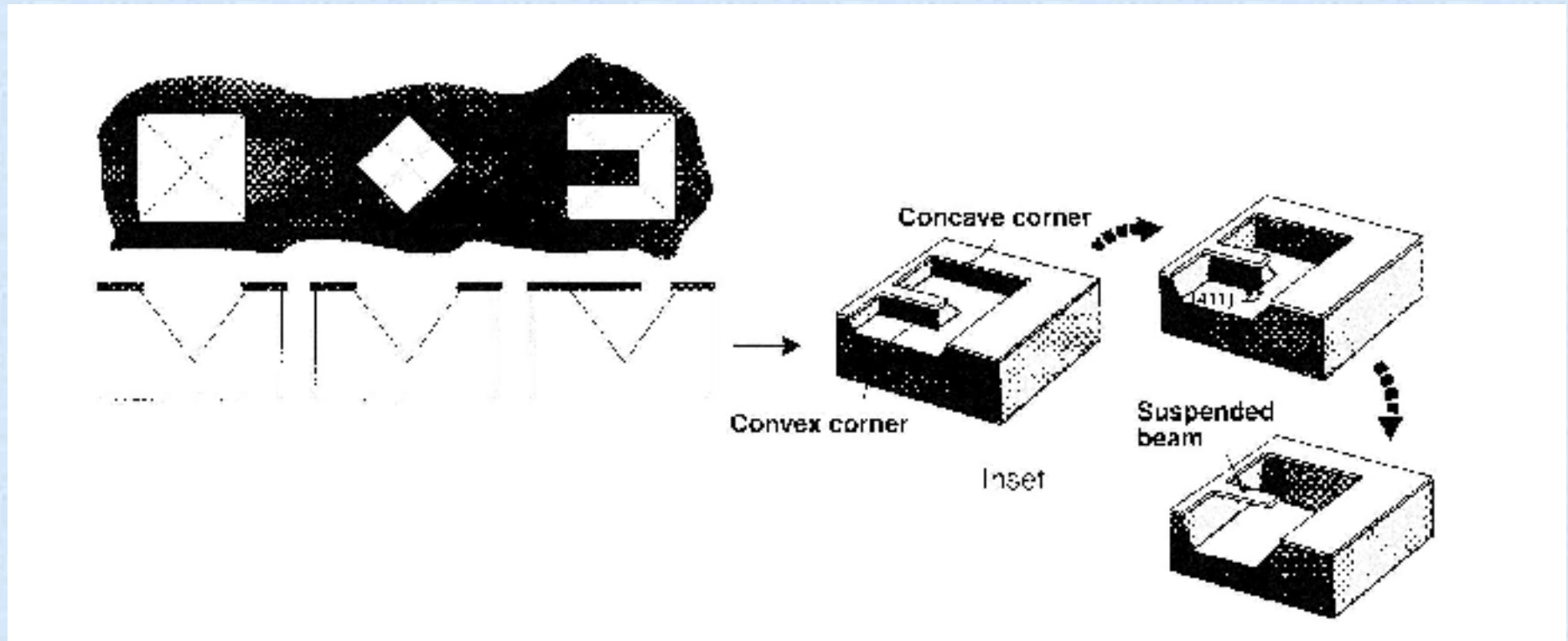
$$\gamma = 1 - \frac{v_l}{v_n}$$

- † v_l velocidad de grabado lateral
- † v_n velocidad de grabado normal
- † Se calcula el underetching como

$$l_u = (1 - \gamma) d$$



Grabado anisotrópico

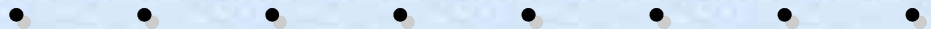


Si orientación $\langle 100 \rangle$

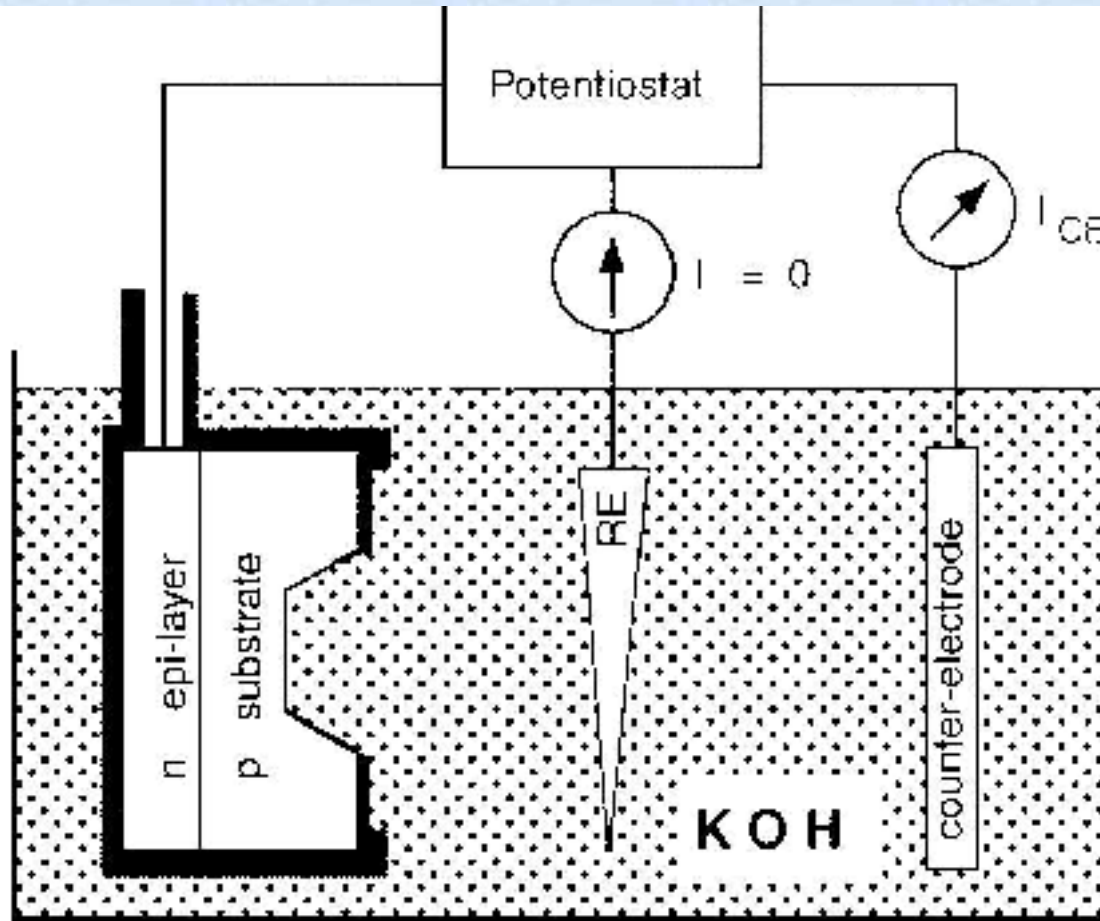
-
-
-

Detención del grabado

- † Formas de detener el ataque para no tener que controlar el tiempo
- † Detención electroquímica
- † Dopado p⁺
- † Cambio de material



Detención electroquímica



A

-
-
-

Grabado húmedo



-
-
-

Grabado húmedo



-
-
-
-
-
-
-
-

Atacantes más comunes

† Si: HNA (HNO_3 , H_2O , NH_4F), KOH

† SiO_2 : HF (10:1), HF (49%), BHF

† Si_3N_4 : H_3PO_4 (85%)

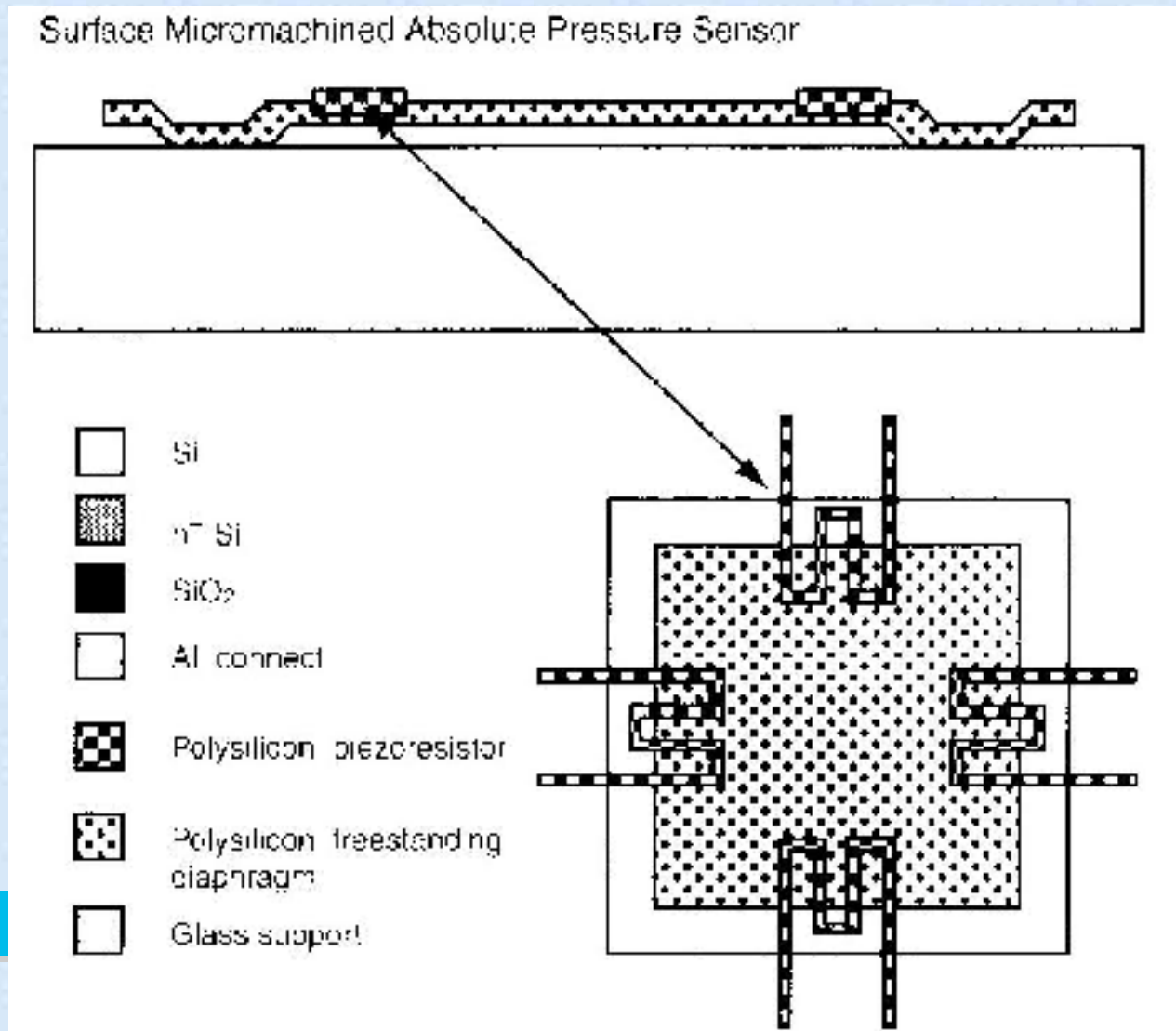
† Pyrex: HF (49%), BHF

† Metales: Piranha (H_2SO_4 , H_2O)

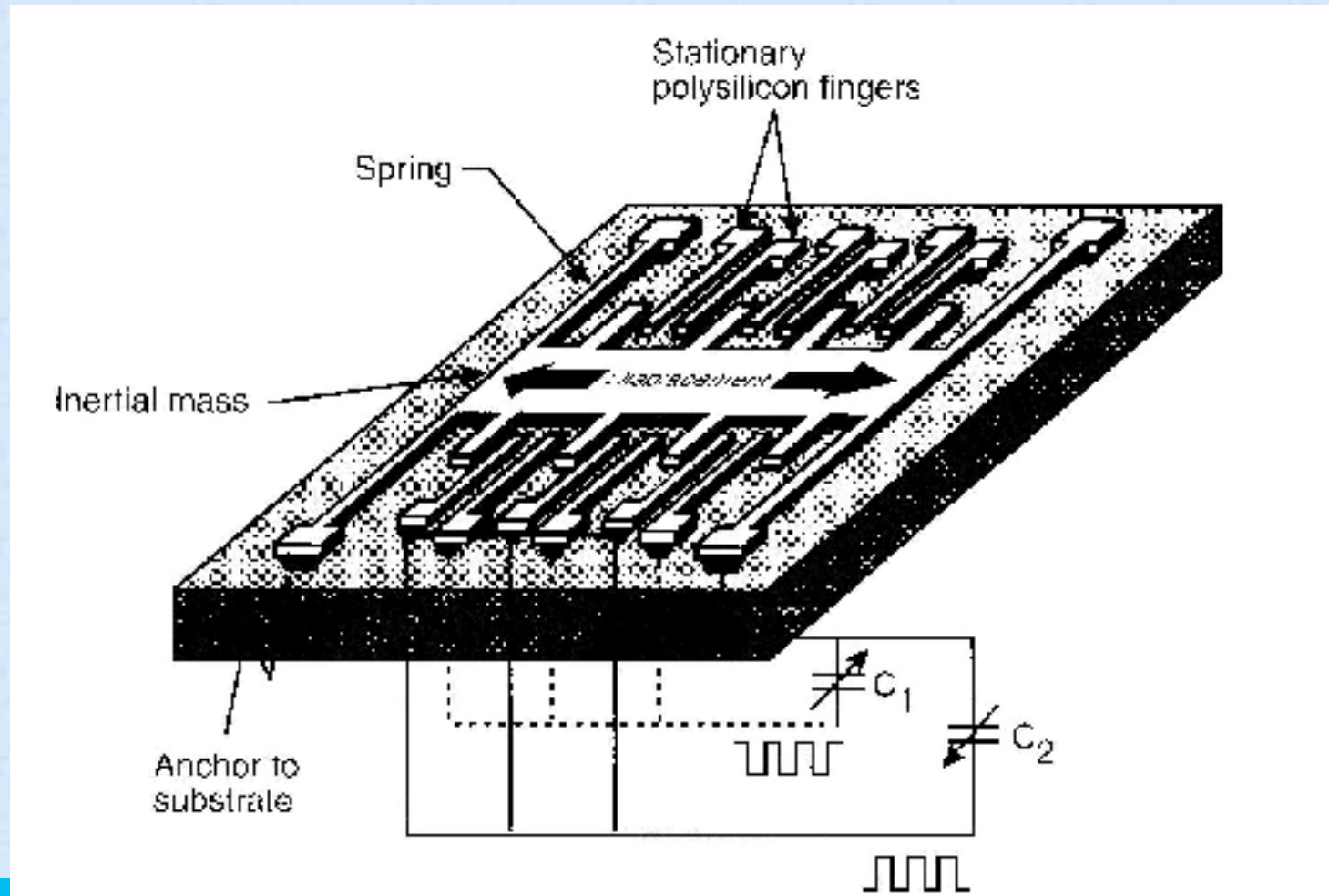
† Orgánicos: Piranha

† Fotorresina: Acetona

Ejemplo de grabado en superficie



Ejemplo de grabado en superficie



-
-
-

Índice

† Introducción

† Preparación

† Deposición

† Fotolitografía

† Grabado húmedo

† Grabado seco

† LIGA

† Unión anódica y por fusión

† Pruebas y mediciones



-
-
-

Grabado seco


† Grabado de un sólido por un plasma o gas

† Tipos:

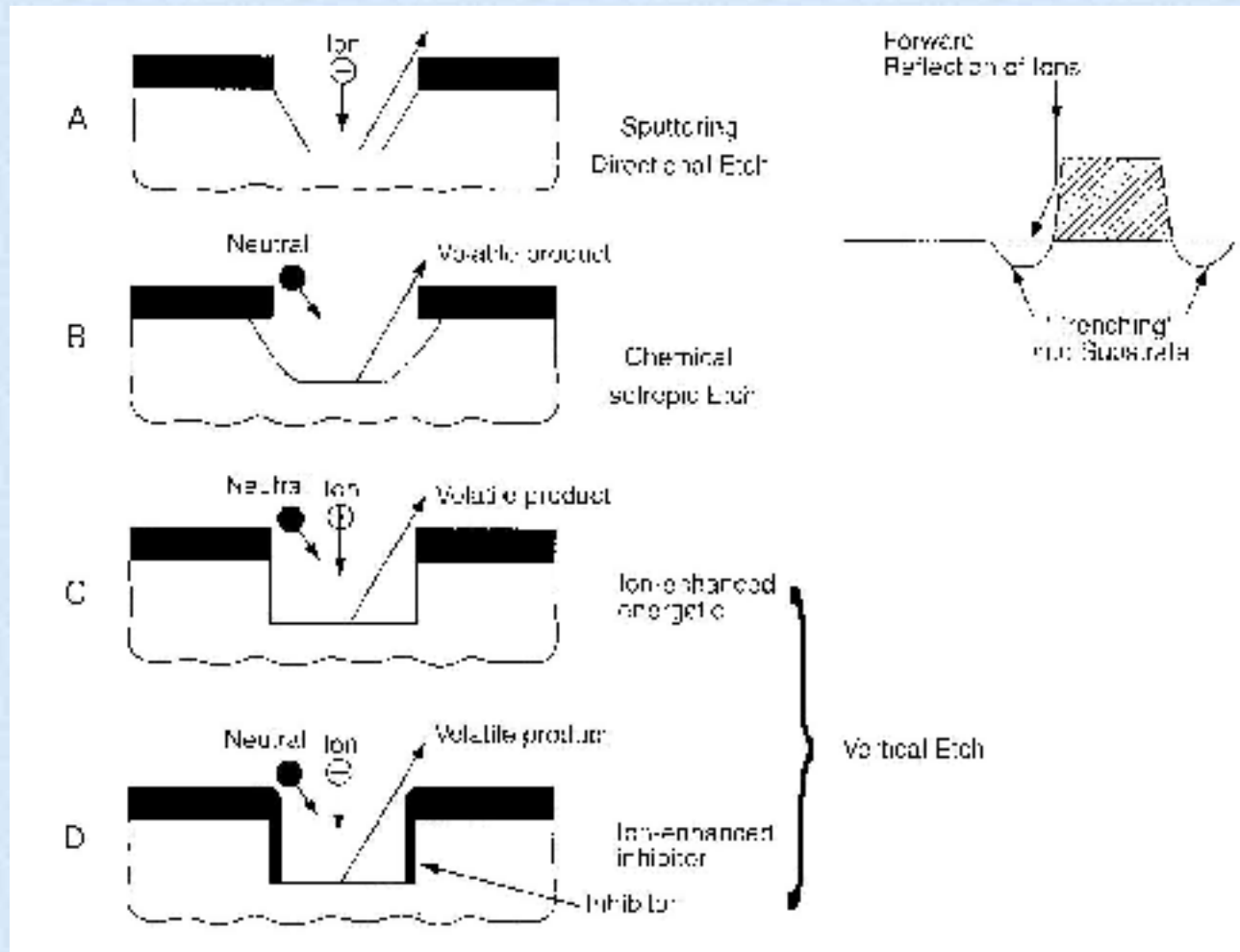
Físico: bombardeo de iones

Químico: reacción en la superficie

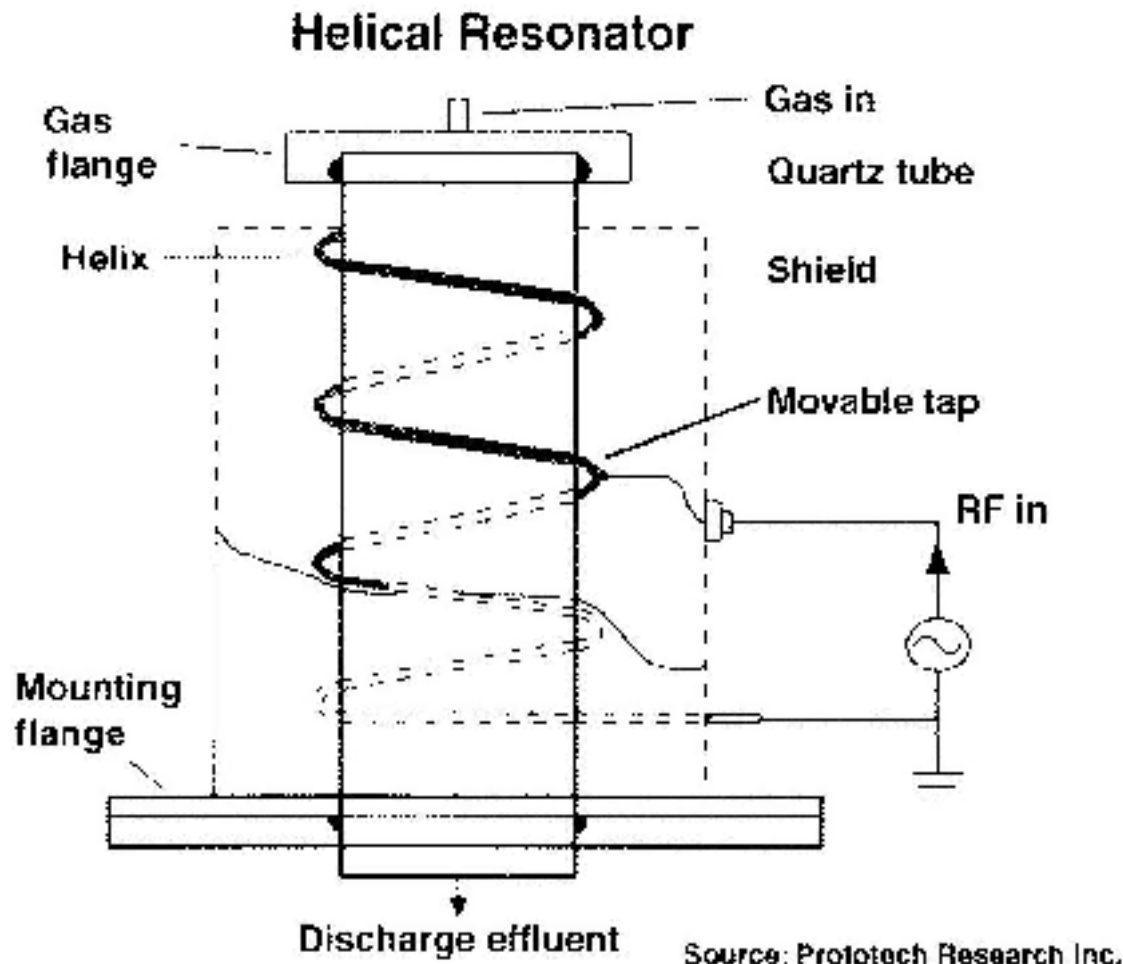
Combinación física/química

- 
- -
 -
 -
 -
 -
 -
 -

Tipos posibles de perfil

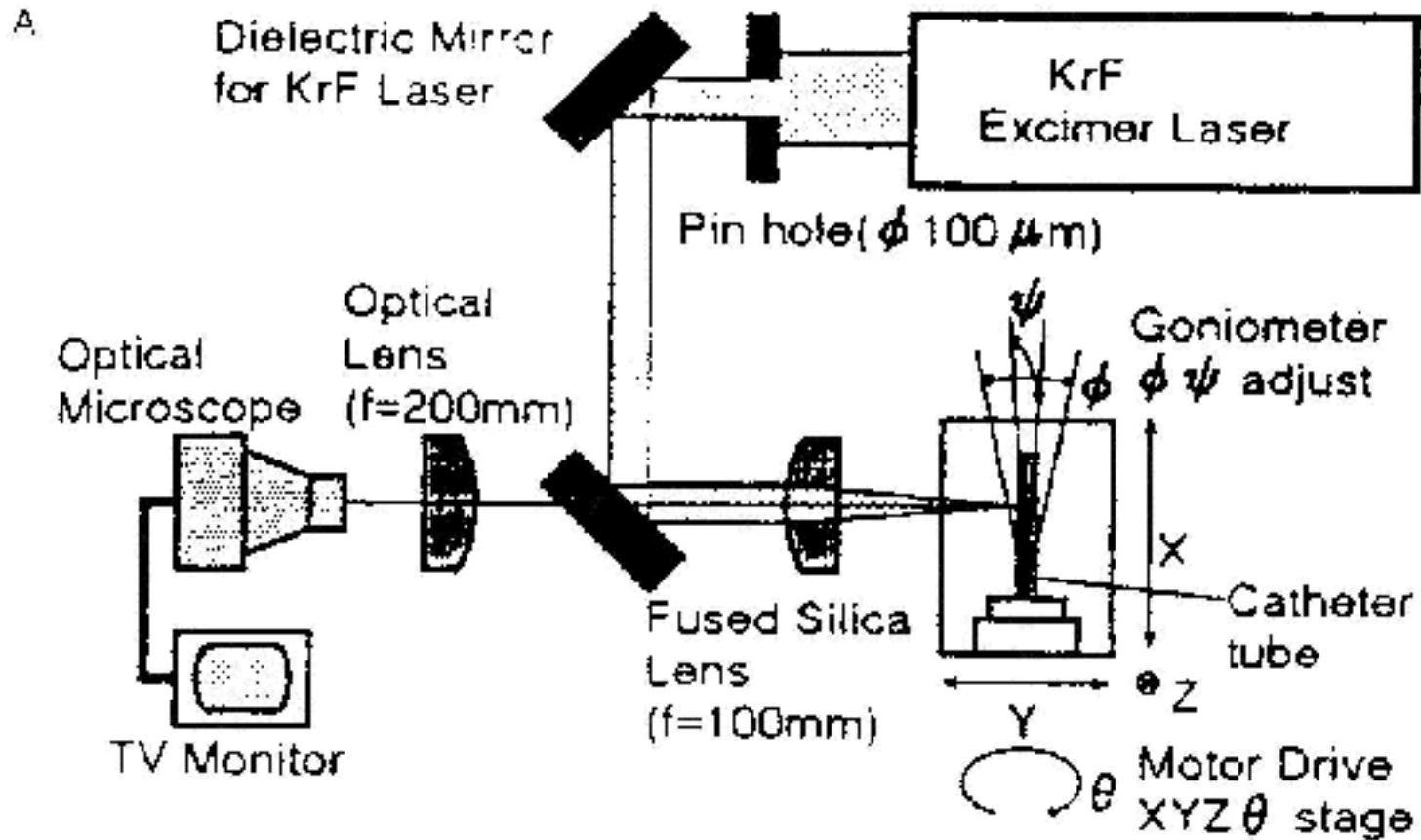


Generación de plasma

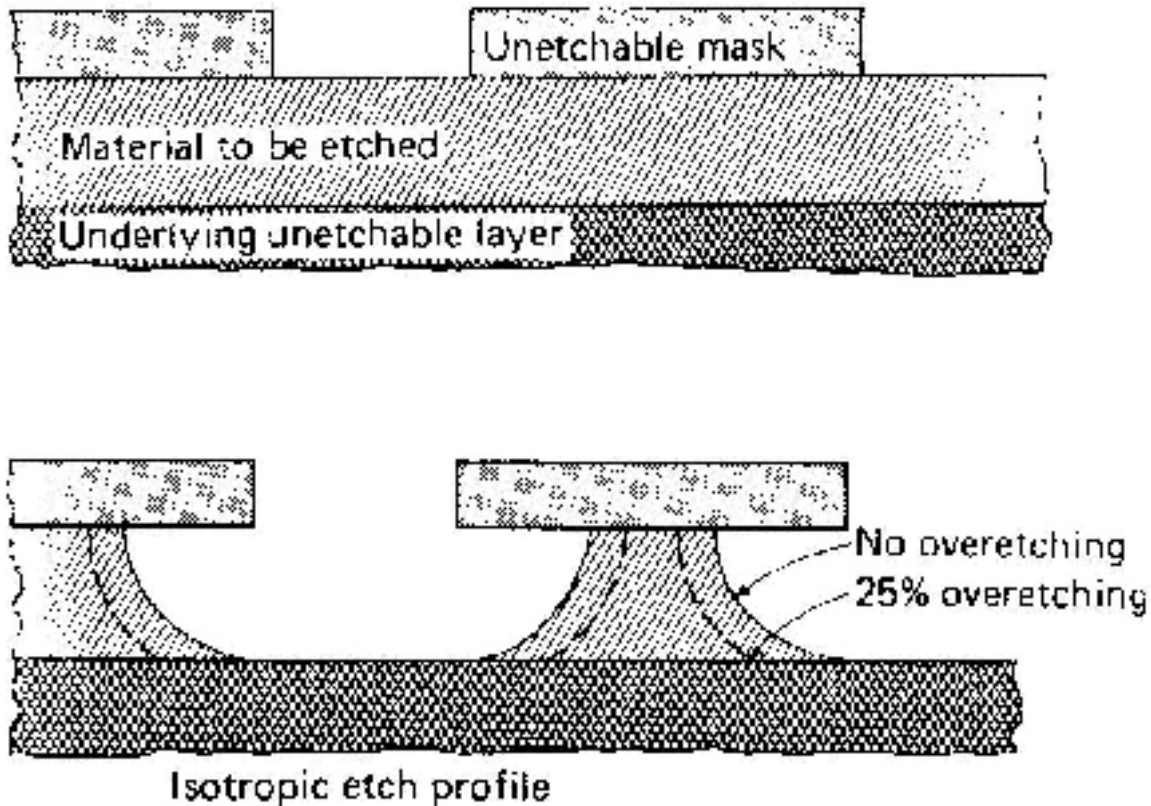


ICP (Inductively Coupled Plasma)

Grabado por láser

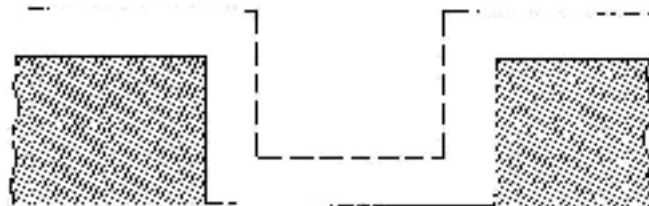


Sobregrabado (overetching)



Pérdida de proporcionalidad debida a un ataque isotrópico

Overetching



- † En este caso, es mejor el grabado isotrópico para eliminar completamente la fotorresina

-
-
-

Índice

† Introducción

† Preparación

† Deposición

† Fotolitografía

† Grabado húmedo

† Grabado seco

† LIGA

† Unión anódica y por fusión

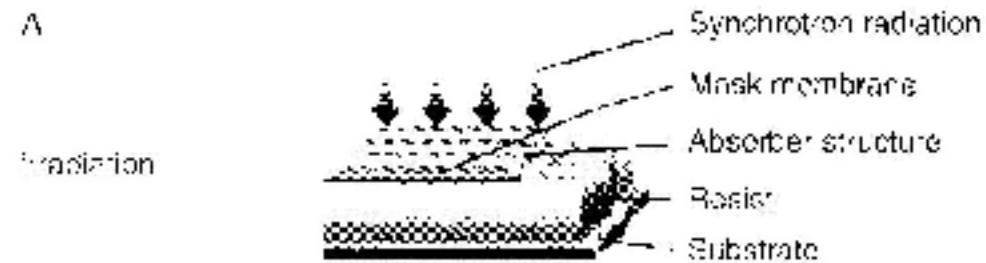
† Pruebas y mediciones



LIGA

- † Abreviatura de Lithographie, Galvanoformung, Abformtechnik (Litografía, electroformación, moldeado).
- † Se fabrica un molde grueso de fotorresina de rayos X
- † El molde se rellena con metal
- † El metal puede ser el producto final, o a su vez un molde para plástico

Proceso LIGA

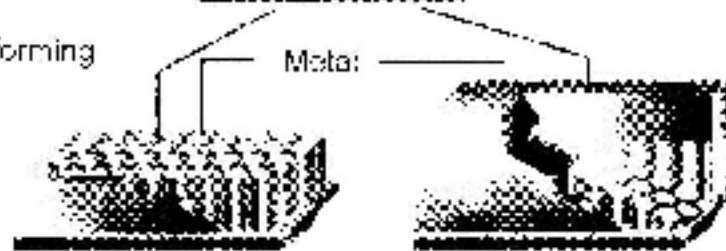


Developing



Resist structure

First electroforming



Removal of the resist structure



Final product

Mold insert



Proceso LIGA

B

Plastic molding
and 2nd. electro-
forming/casting slip

Mold insert



Mold cavity

Mold filling



Plastic

Electrically
conductive
substrate

Mold removal



Plastic structure
as lost mold
or final product

2nd. electroforming



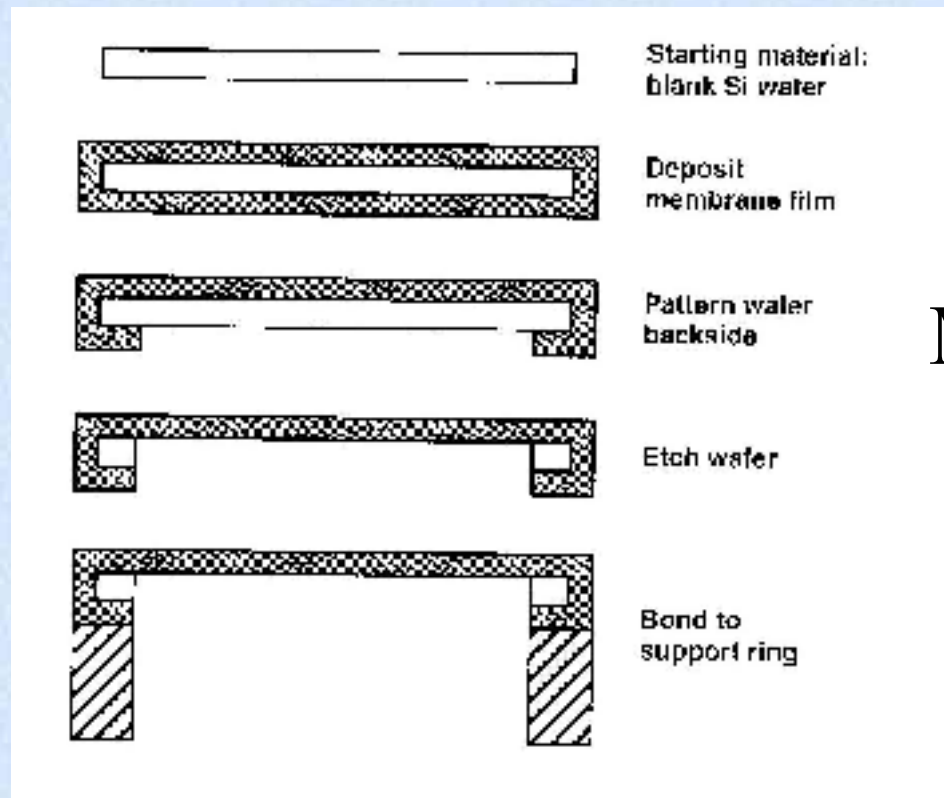
Metal/Ceramic

Final product



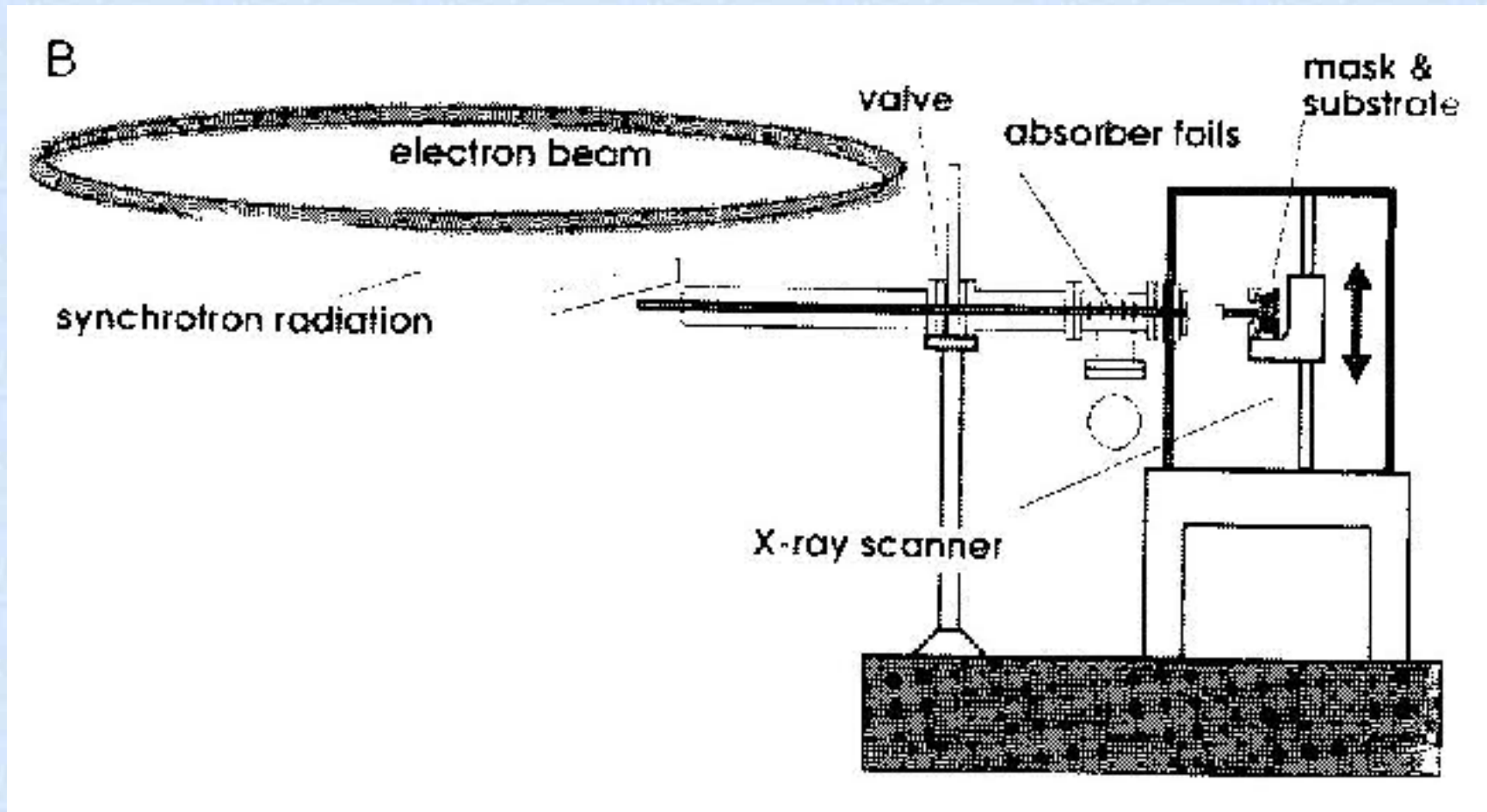
Metal or ceramic
structure

Fabricación de máscara

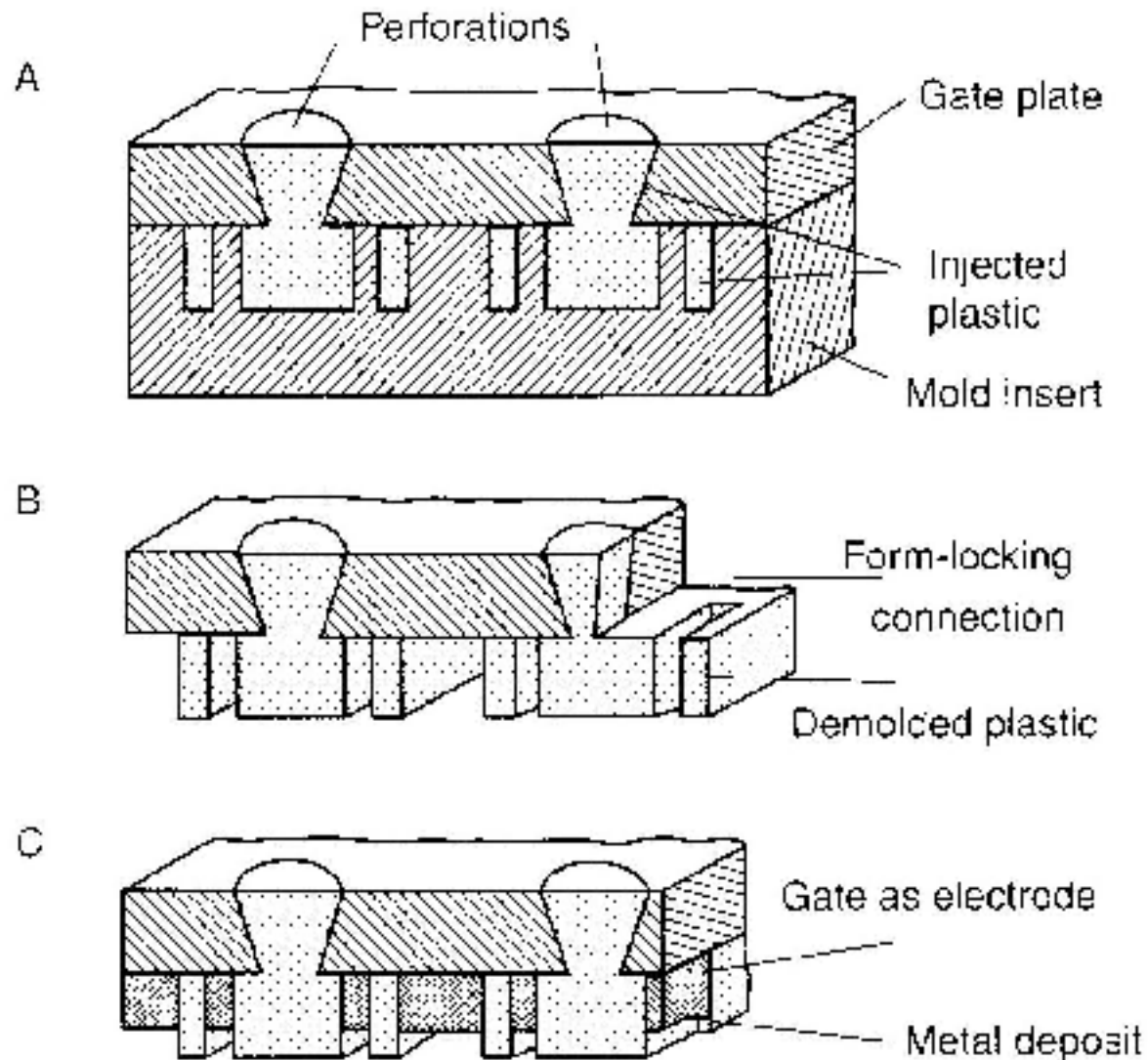


Máscara para rayos X

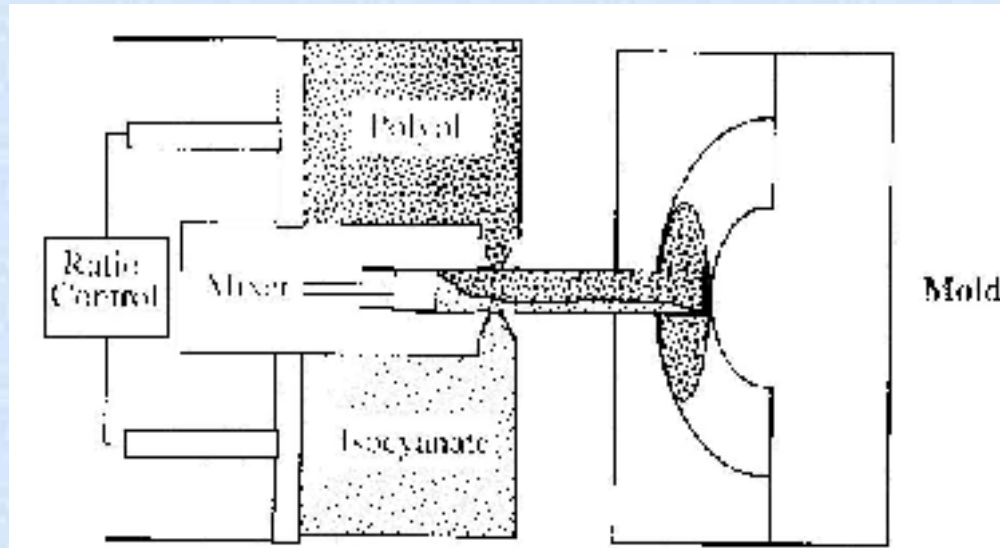
Exposición a rayos X



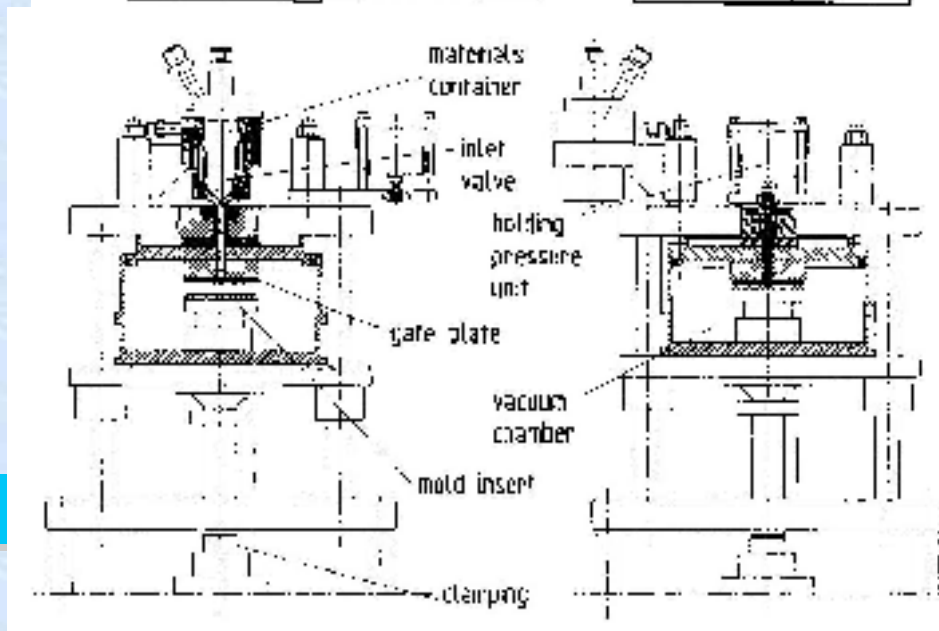
Proceso de moldeo



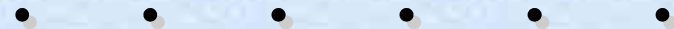
Tipos de moldeo



Moldeo a presión

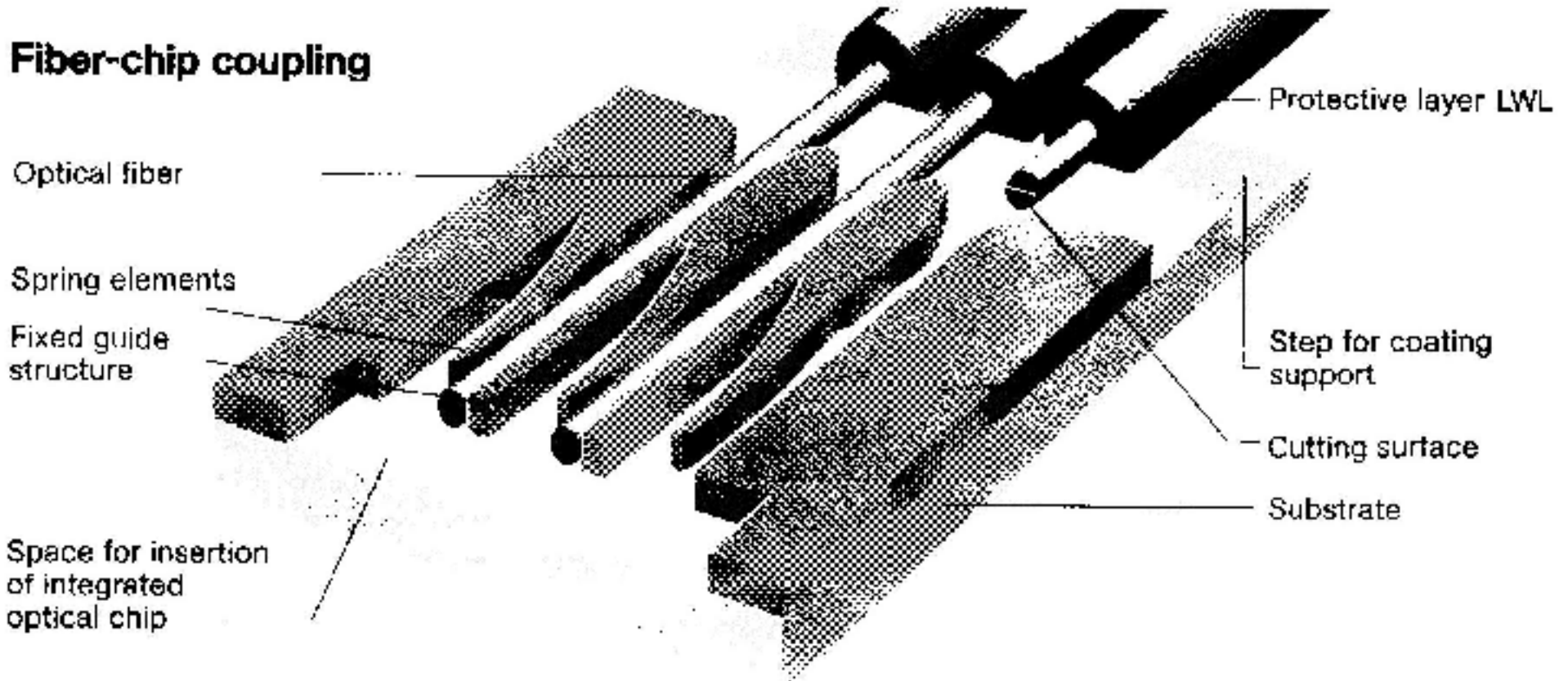


Moldeo en vacío



Ejemplo de dispositivo en LIGA

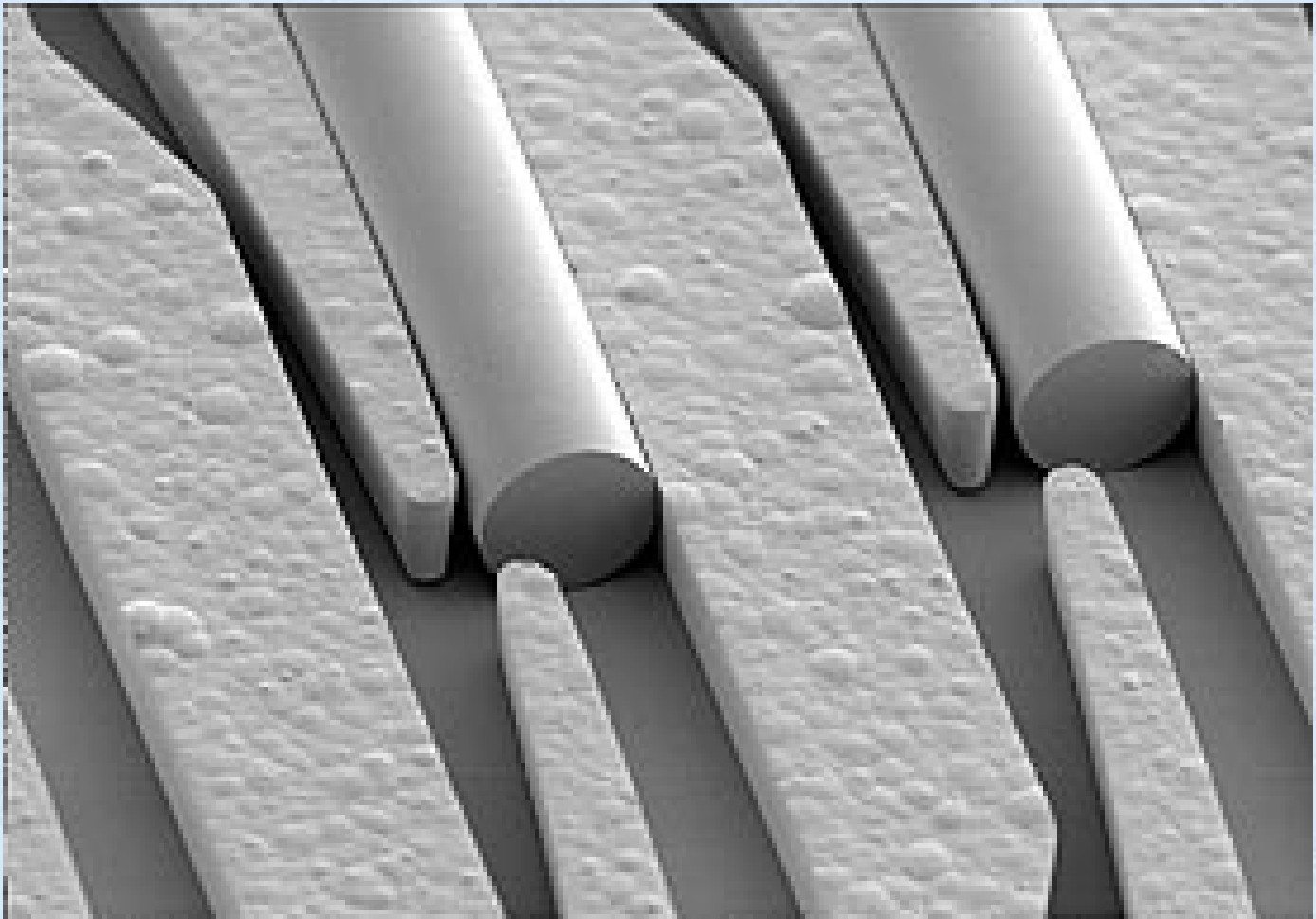
Fiber-chip coupling



Conector de fibra óptica

-
-
-

Ejemplo de dispositivo en LIGA



00005346

— 100 μm



•

-
-
-

Índice

† Introducción

† Preparación

† Deposición

† Fotolitografía

† Grabado húmedo

† Grabado seco

† LIGA

† Unión anódica y por fusión

† Pruebas y mediciones



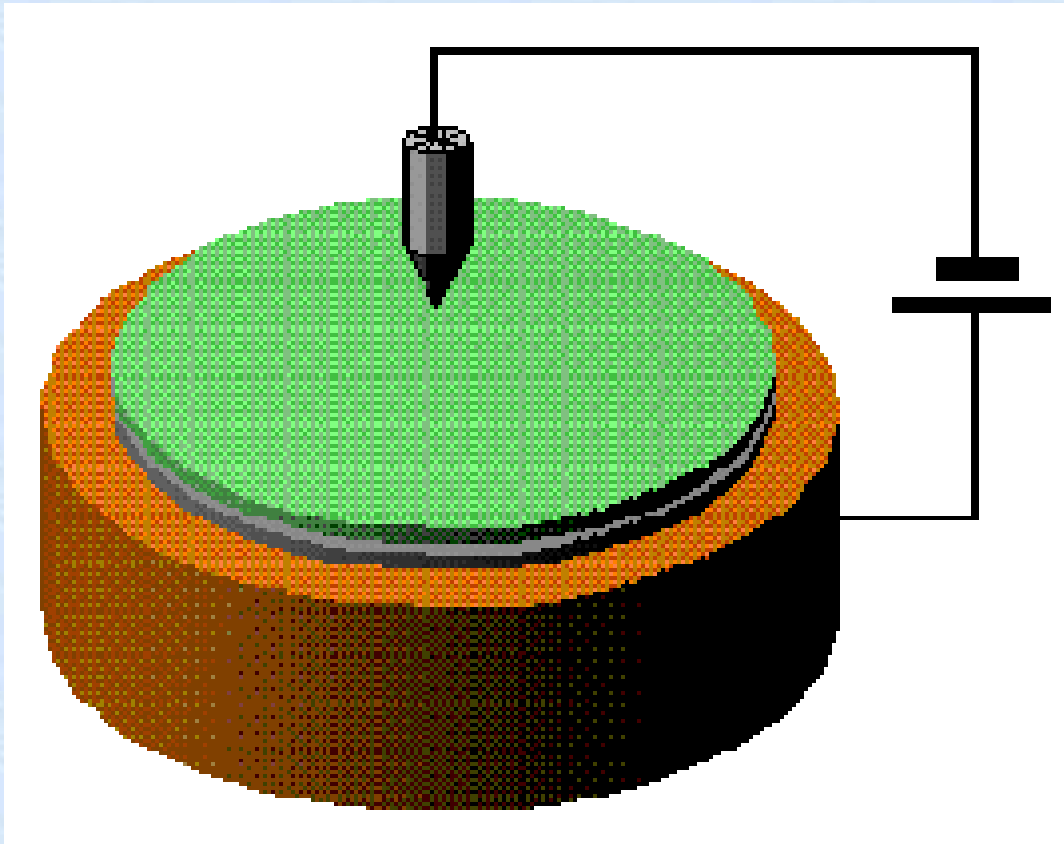
-
-
-

Unión anódica y por fusión

- † Unión física de obleas
- † Permite construir dispositivos más complejos
- † Anódica: aplicando potencial eléctrico
- † Fusión: reacción química entre los átomos de las capas externas, aplicando calor
- † Térmica: aplicando calor, con una capa intermedia de otro material



Unión anódica



Aplicación de potencial eléctrico entre las obleas

Pegado de silicio con vidrio

Unión anódica

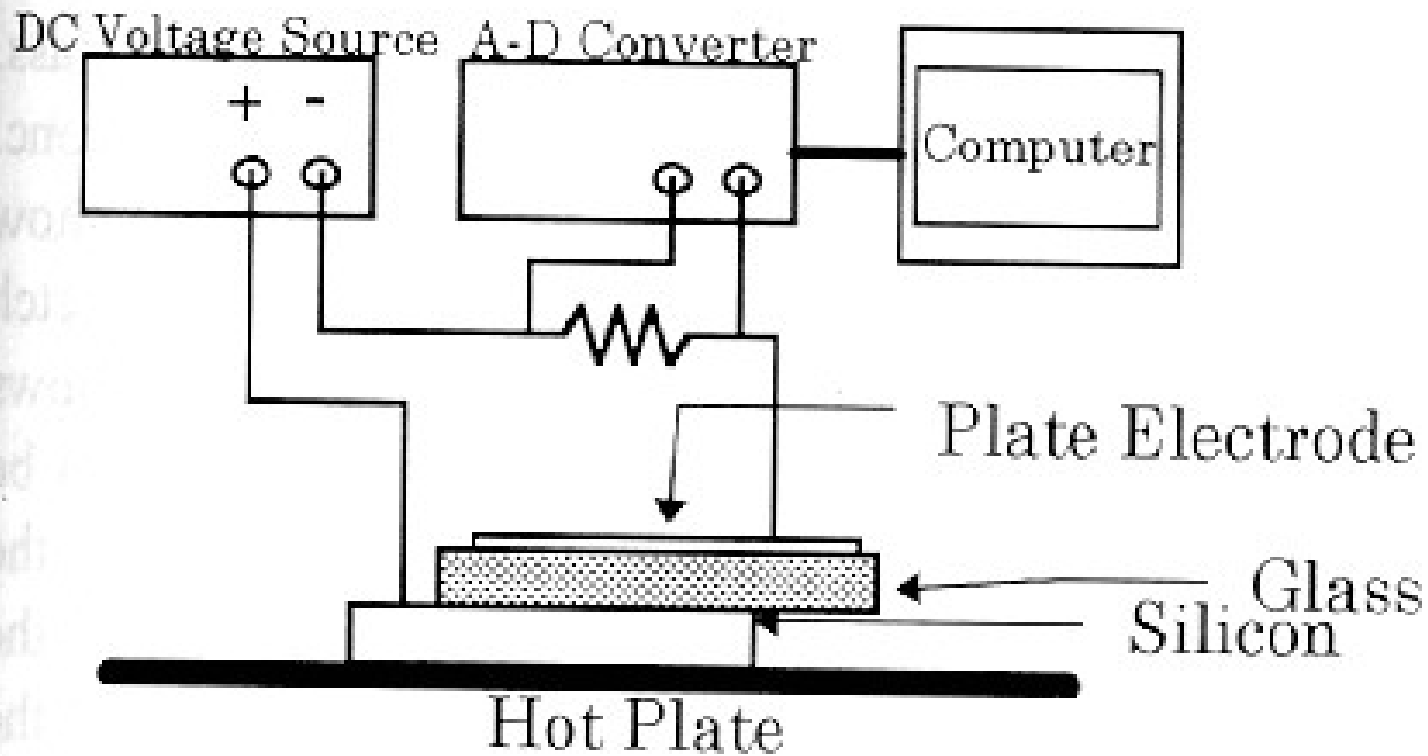


Fig 2. Anodic bonding set-up

-
-
-

Unión por fusión



Pegado de silicio
con silicio

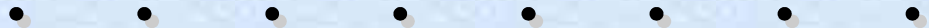
Temperatura de
800 °C, y presión

Atmósfera
oxidante

-
-
-

Unión térmica

- † Se usa cuando la aplicación de un gran potencial no es posible
- † Pegado menos uniforme que con la unión anódica
- † El material intermedio puede ser vidrio, PSG, ...



-
-
-

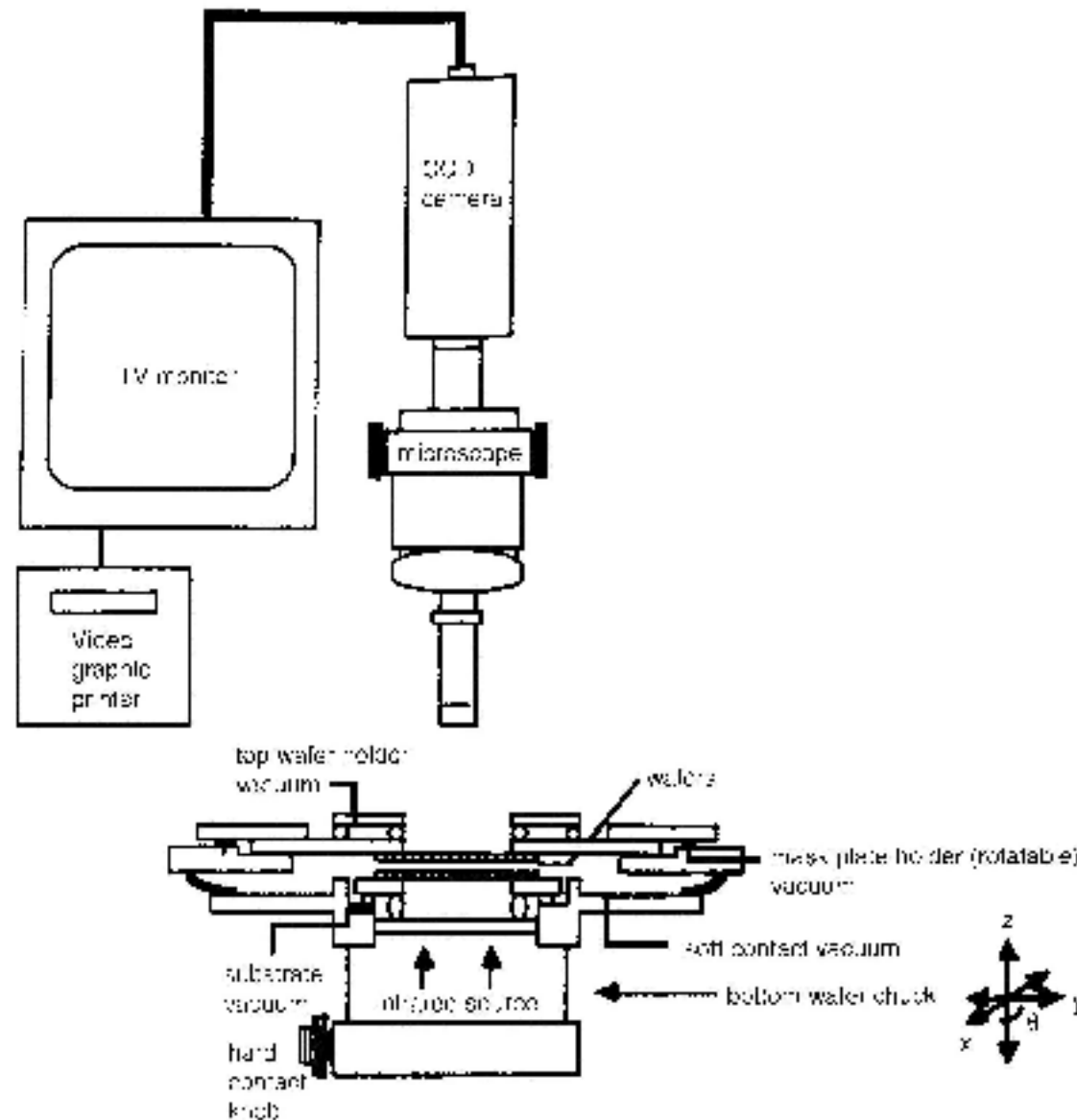
Unión. Equipo



-
-



Alineación de las obleas a unir



-
-
-

Índice

† Introducción

† Preparación

† Deposición

† Fotolitografía

† Grabado húmedo

† Grabado seco

† LIGA

† Unión anódica y por fusión

† Pruebas y mediciones



-
-
-

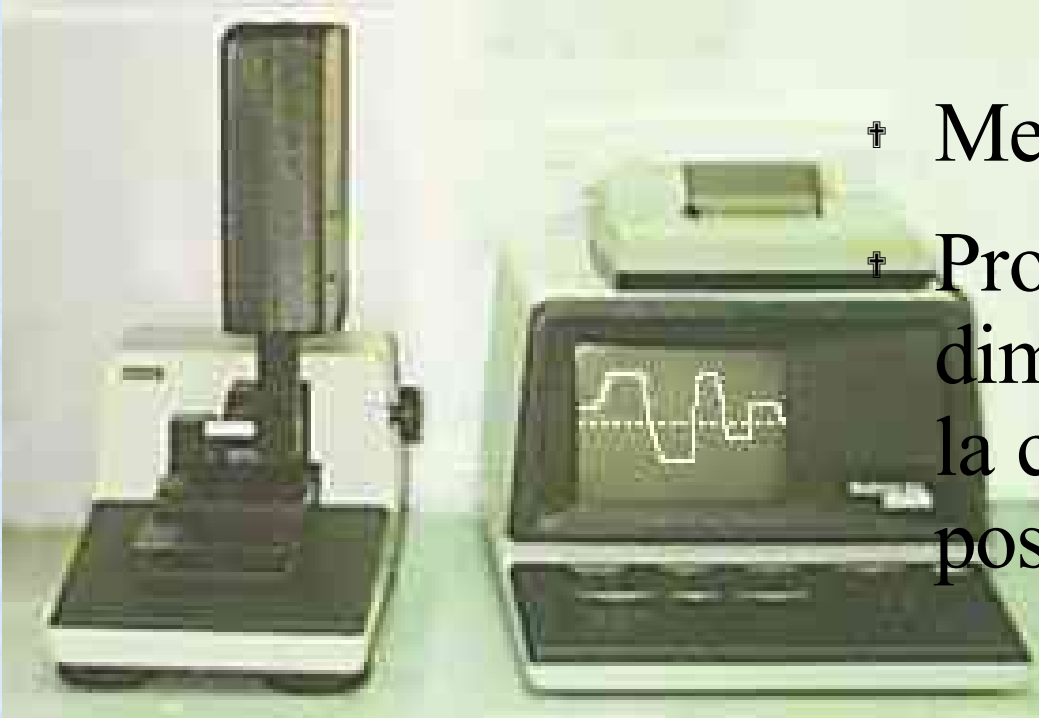
Pruebas y mediciones

- † Perfil
- † Conductividad
- † Espesores de capas
- † Microscopía



-
-
-

Profilómetro



- † Medida del perfil
- † Profilómetro de aguja. La dimensión de la aguja impone la característica mínima que es posible medir

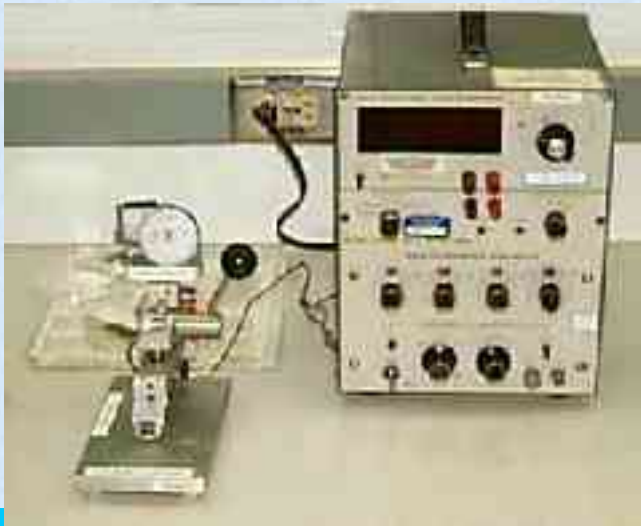


-
-
-
-
-
-
-
-

-
-
-

Conductividad

- † Método de los cuatro puntos
- † Mide la resistividad. Para la resistencia hay que proporcionar el espesor



-
-
-

Espesor

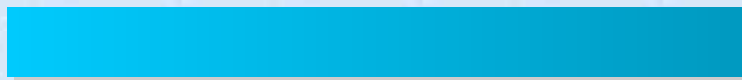
- † Método óptico, basado en la reflectividad
- † Mide el espesor de la capa superior, sabiendo cuáles son las inferiores



-
-
-

Elipsómetro

† Medida de espesor



-
-
-
-
-
-
-
-

-
-
-

Cortado de obleas

- † Proporciona los dispositivos finales, a falta de encapsular
- † Cortado con diamante



-

-
-
-

Microscopía óptica



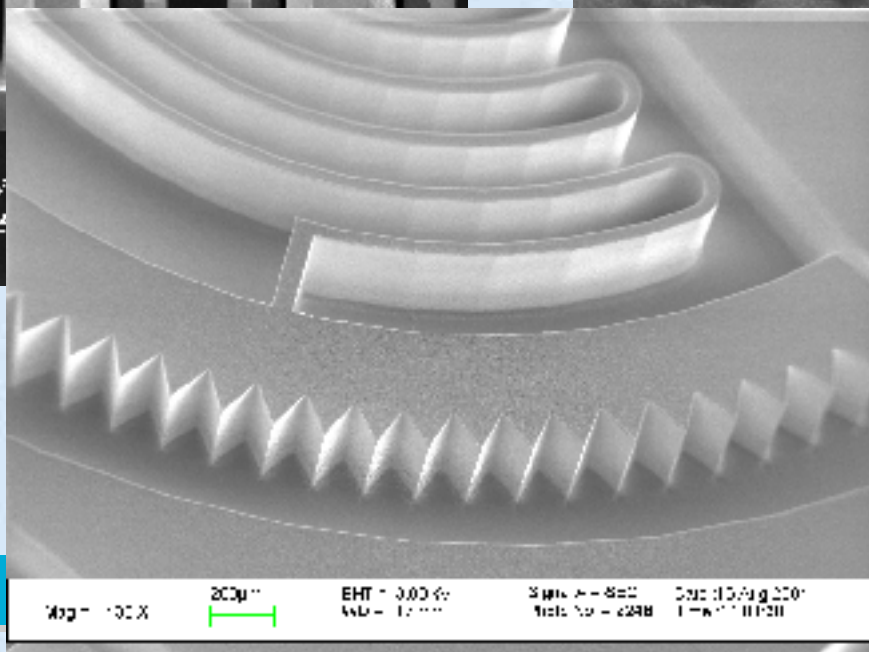
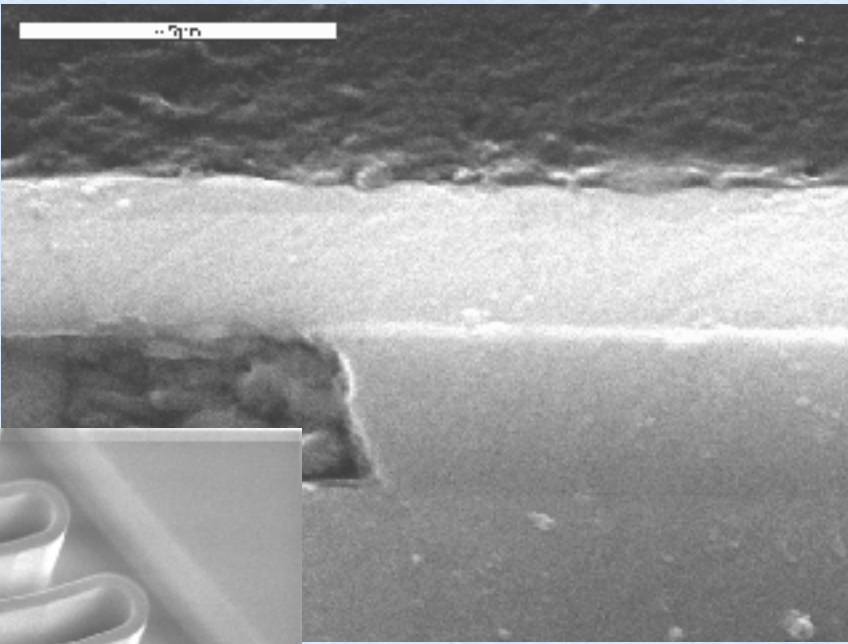
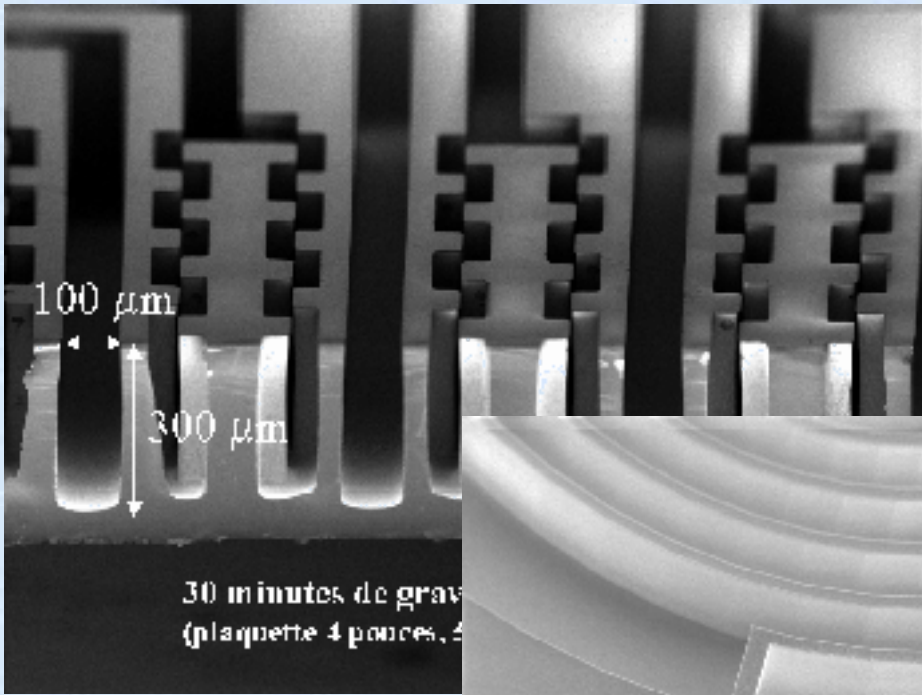
-
-
-

Microscopía electrónica (SEM)



-
-
-

Imágenes SEM



-
-
-

-
-
-

Bibliografía



Marc J. Madou,
"Fundamentals of microfabrication",
CRC Press, 1997



Stephen D. Senturia,
"Microsystem design",
Kluwer Academic, 2001



Nadim Maluf,
"An introduction to microelectromechanical systems engineering", Artech House, 2000



-
-
-
-
-
-
-
-