

# Fotolitografía

Versión 082718

[www.nano-link.org](http://www.nano-link.org)

# Visión general

**La siguiente presentación muestra cómo se producen los circuitos integrados, donde la fotolitografía tiene un rol crucial. Esta información puede ser utilizada como conferencia o introducción a la actividad de fotolitografía.**

# Introducción a la fotolitografía



<http://www.ichaus.de/news/72>

# **La fotolitografía es la tecnología principal en la fabricación de circuitos integrados (ICS)**

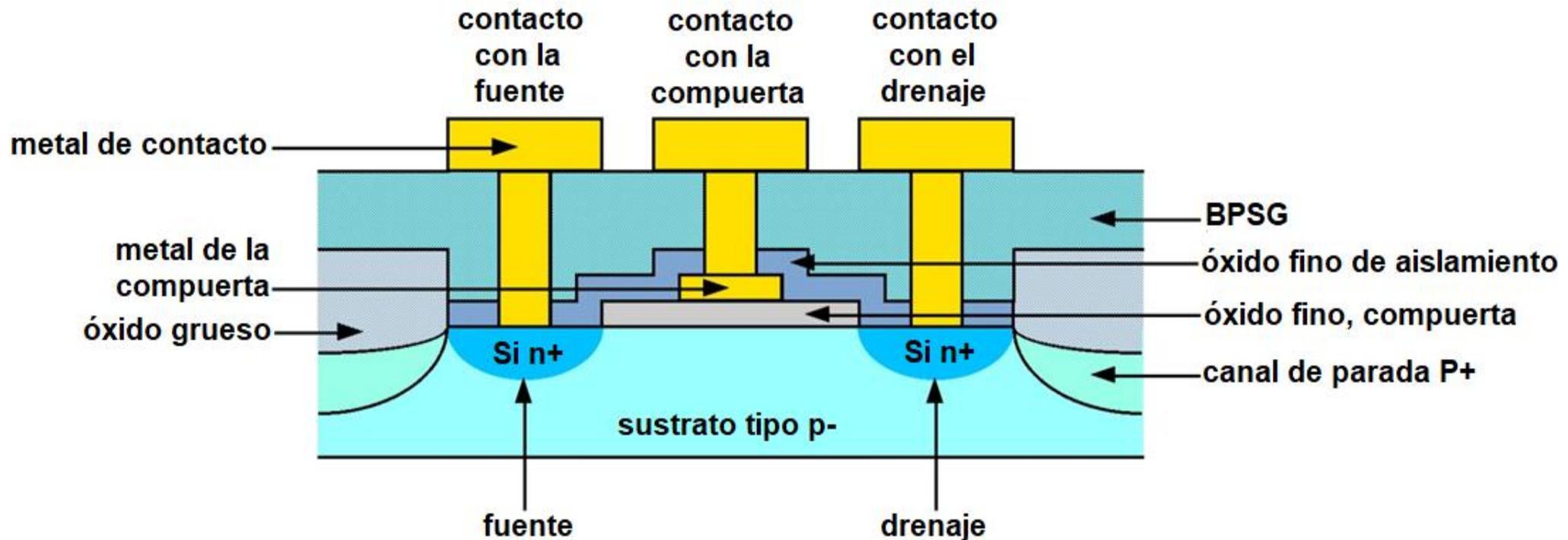
**Para observar una serie de fotos donde se muestra una planta de fabricación de circuitos integrados, acceda al siguiente enlace:**

**<http://www.extremetech.com/computing/85304-intelmicron-fabrication-plant-tour?print>**

# Elemento típico de circuito integrado:

## Un transistor MOSFET

**Diseño  
ideal  
del  
transistor**



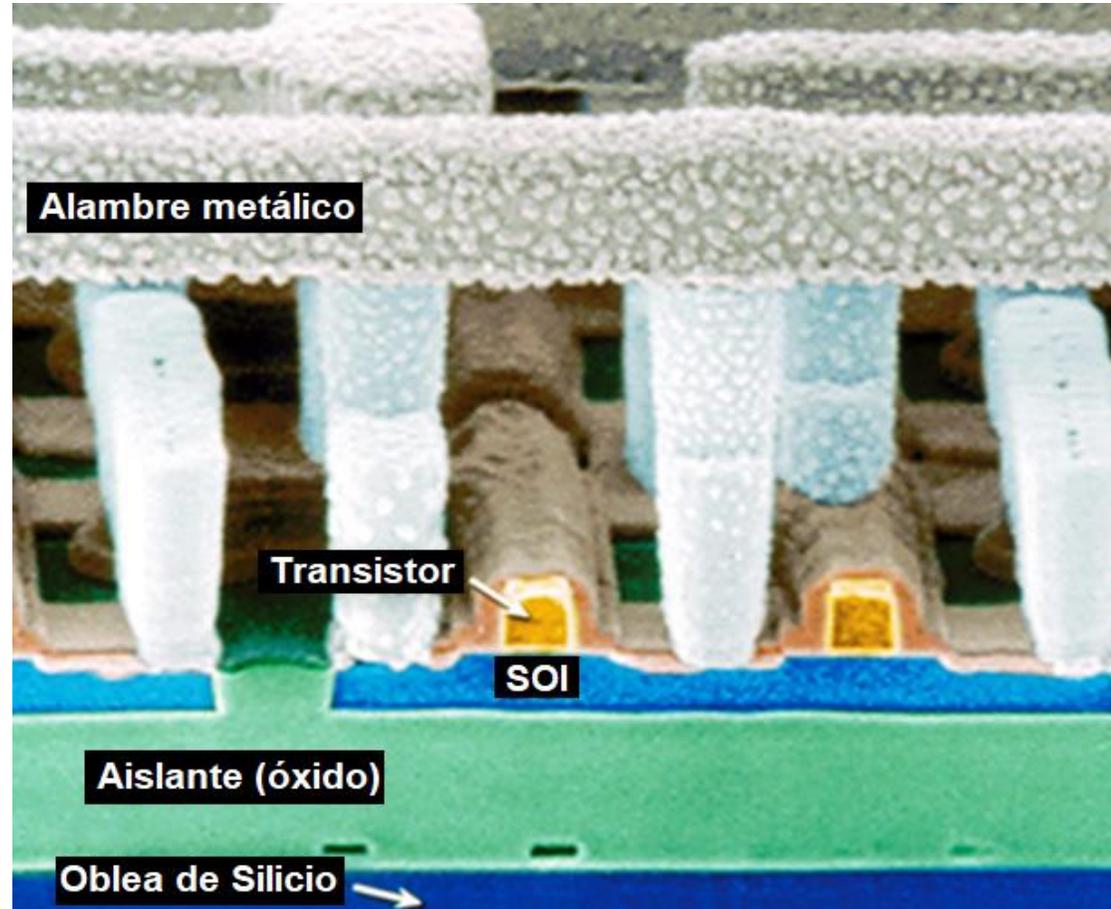
Con autorización de: Andrew Barron "Applications for Silica Thin Films"

<http://cnx.org/content/m24883/1.5/>

# Transistores CMOS reales fabricados en una oblea

Las dimensiones del transistor son por debajo de los 100 nanómetros.

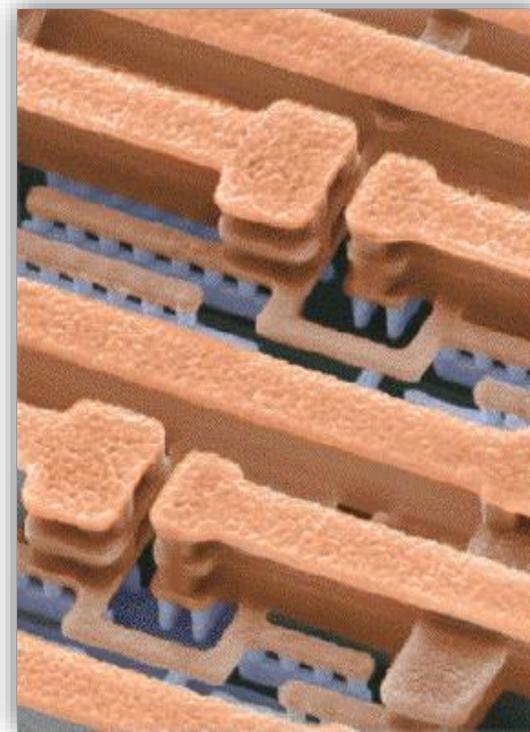
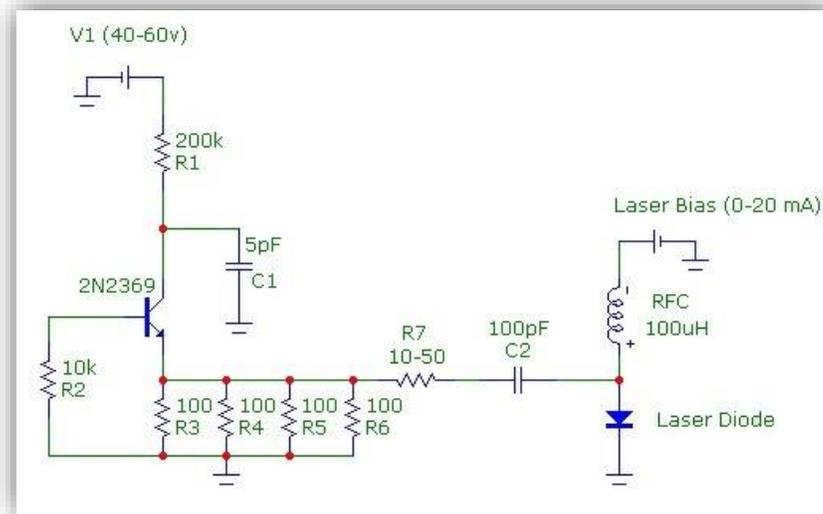
<http://www.computerhistory.org/>



# Micro fabricación – Paso 1: Diseñar el circuito

Diseño tridimensional de la estructura del circuito

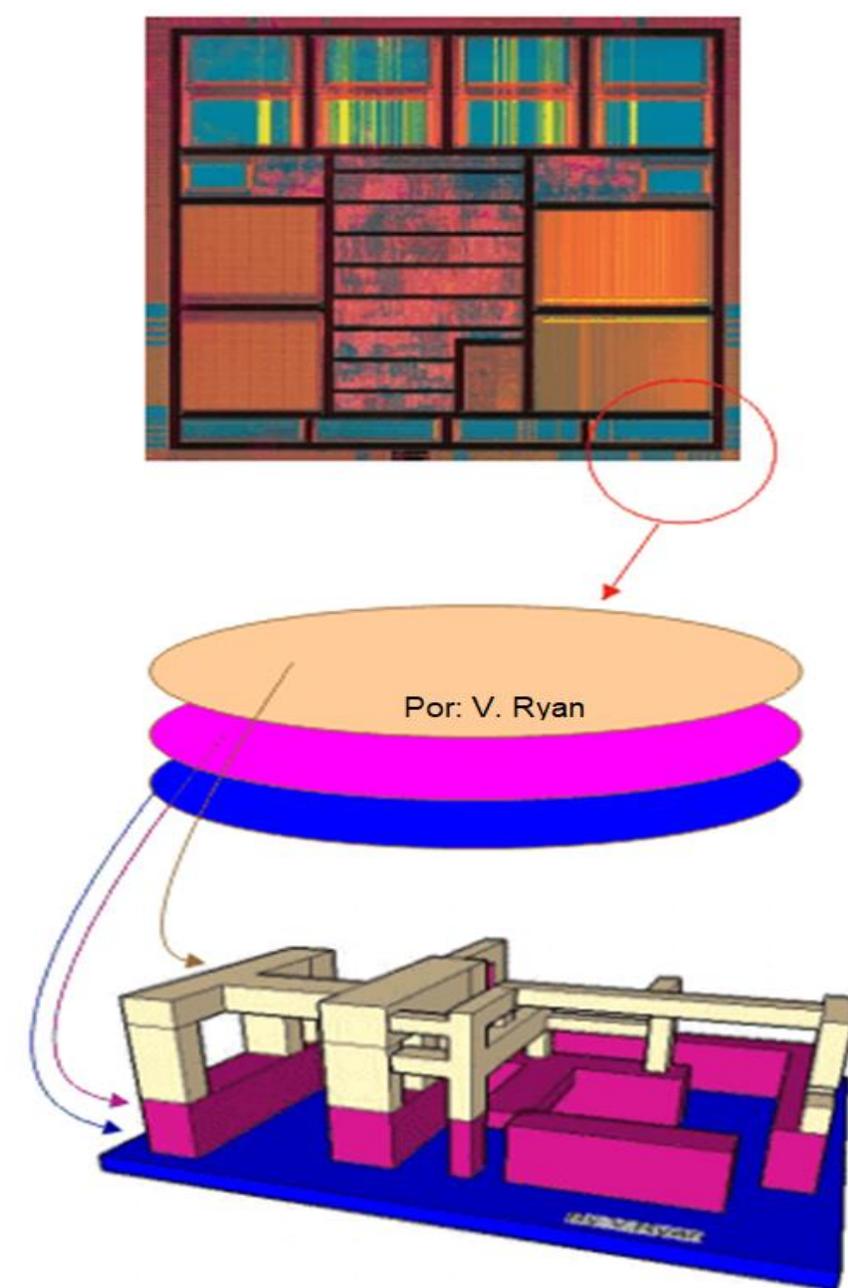
Convertir:  
El diagrama  
esquemático



En:  
Diseño  
tridimensional  
de los  
componentes

# Micro fabricación – Paso 2: Diseñar la máscara

- Dividir la estructura en capas horizontales.
- Capturar el diseño de cada capa bidimensional en la foto-máscara.



Figuras de [www.technologystudent.com/elec1/ic2.htm](http://www.technologystudent.com/elec1/ic2.htm), © 2006, V. Ryan

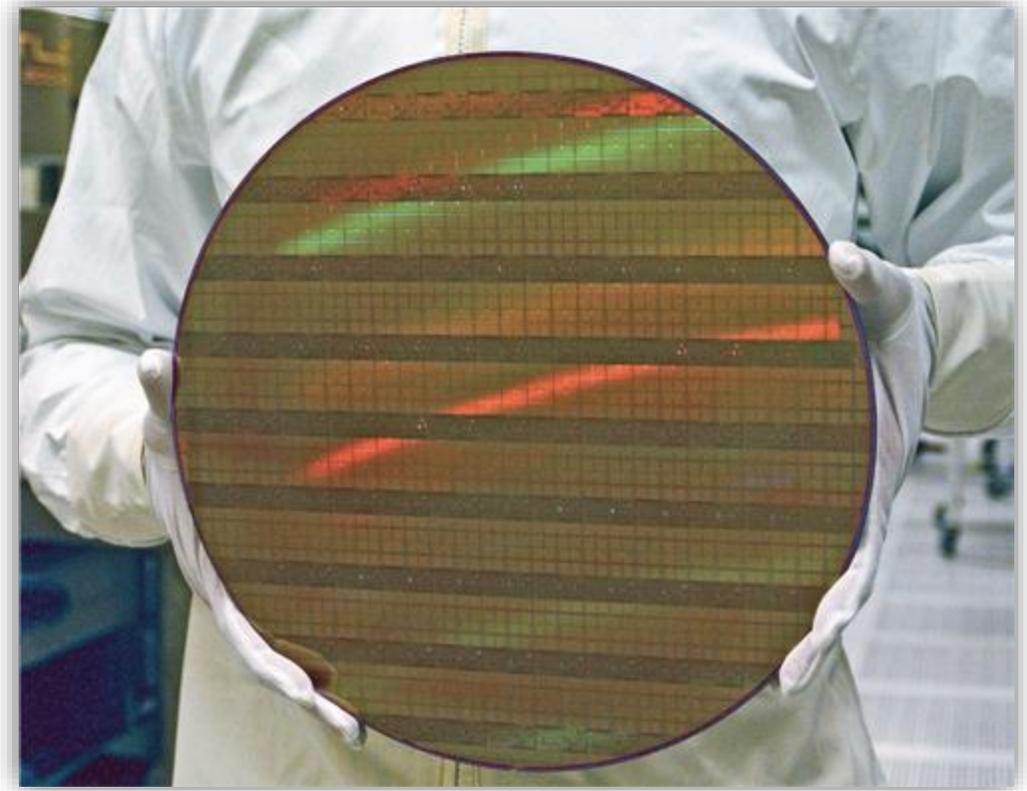
# Foto máscara del circuito

- La foto-máscara es el patrón a seguir para todos los elementos del circuito a través de toda la oblea de una capa.
- Esto se repite para producir muchas copias.



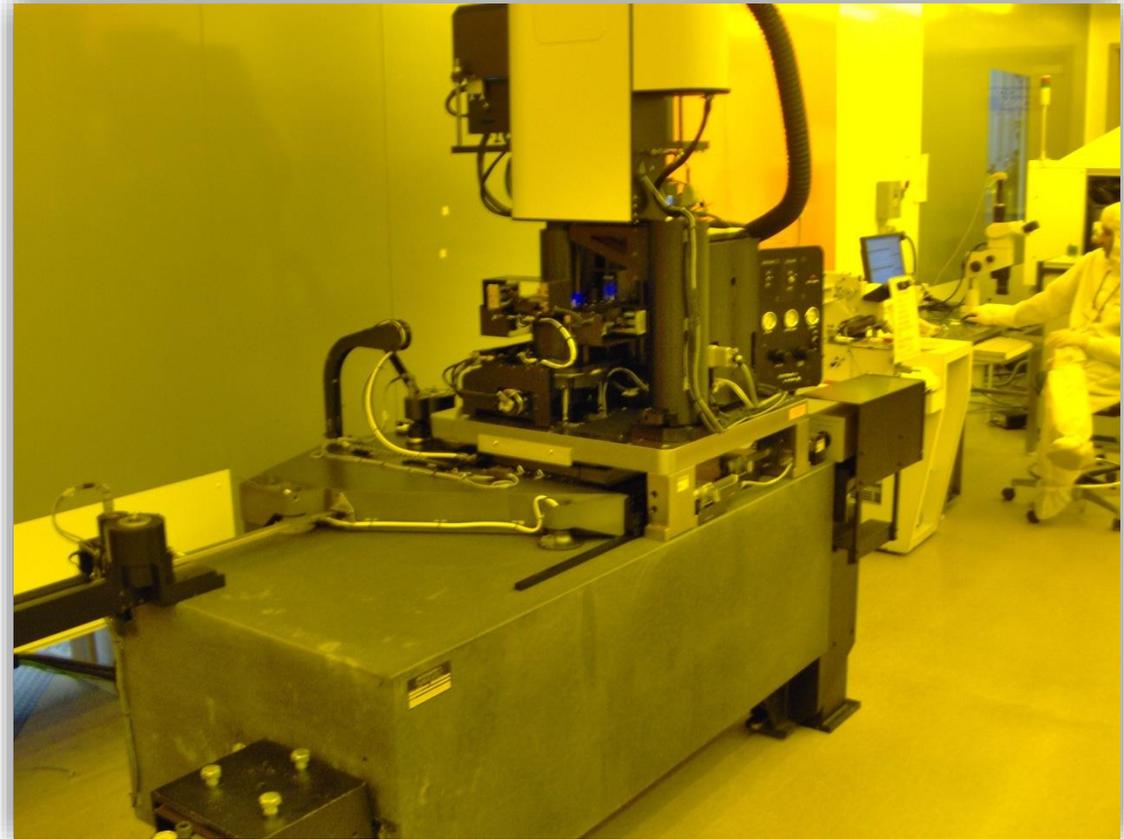
# Micro fabricación

- Utilizando una mascara y la fotolitografía se pueden replica circuitos complejos con millones de componentes en un espacio bien pequeño.
- Cientos de circuitos realizados en cada oblea; cortados, empacados y puestos a prueba.
- Esta es la base para dispositivos electrónicos de alto rendimiento a bajo costo.



# Realizando la foto-máscara

**Generador de  
foto-máscara,  
“University of  
Minnesota  
Nanofabrication  
Center”**



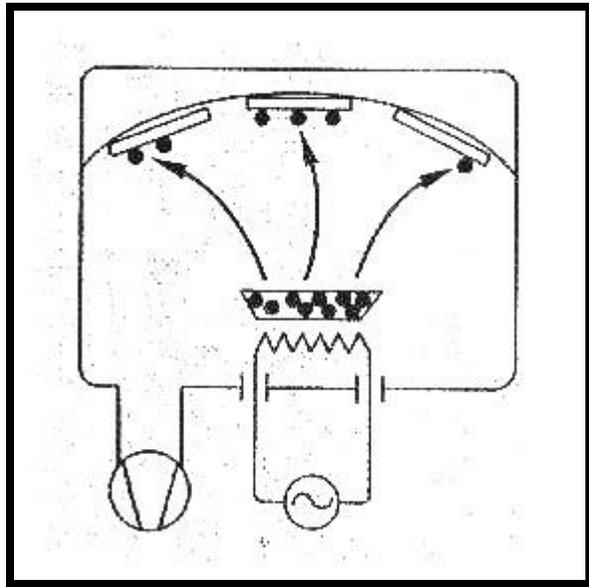
# Micro fabricación – Paso 3:

## Preparar los pasos del proceso

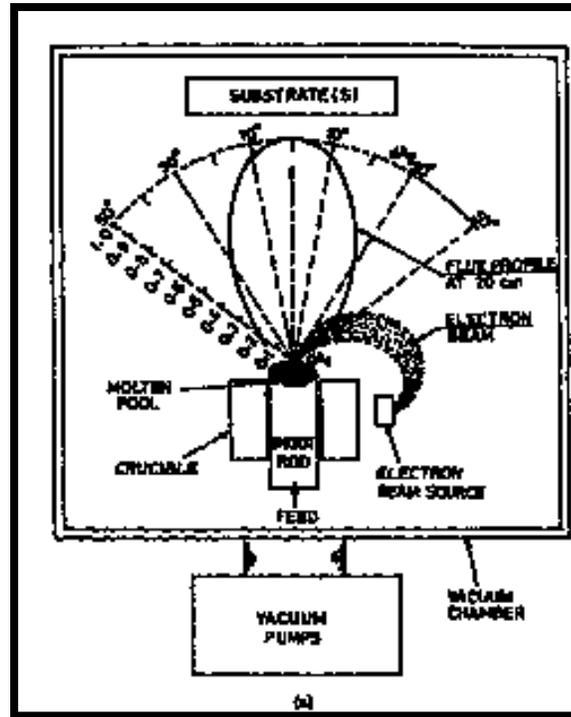
- **Determinar cómo formar cada capa:**
  - **Añadir material** (*deposición*): acumular, agregar o formar una capa fina de metal, aislante o material semiconductor.
  - **Remover material** (*grabado*): quitar material previamente depositado de áreas seleccionadas. Esto es similar a *esculpir* un bloque de piedra o *mecanizar* un bloque de metal para producir una estructura que coincida con el diseño.
- **Modificar una capa:**
  - **Dopaje**: añadir intencionalmente impurezas ionizadas para manipular (adaptar o diseñar) las propiedades eléctricas de la capa.
  - **Oxidación**: exponer una capa ya depositada (ejemplo: silicio, un semiconductor) a oxígeno para provocar que se oxide (ejemplo: dióxido de silicio, un buen aislante).

# Procesos de deposición

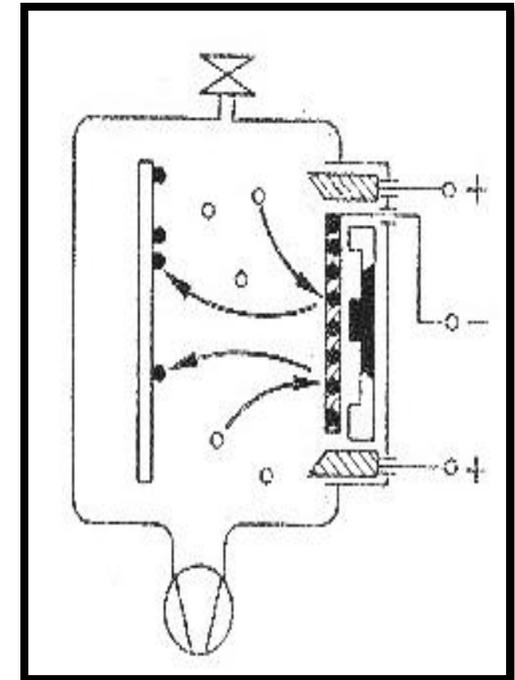
## *Depositando capas metálicas*



**Pulverización catódica  
“sputtering”**



**Evaporación termal**



**Evaporación “e-Beam”**

# Procesos de deposición

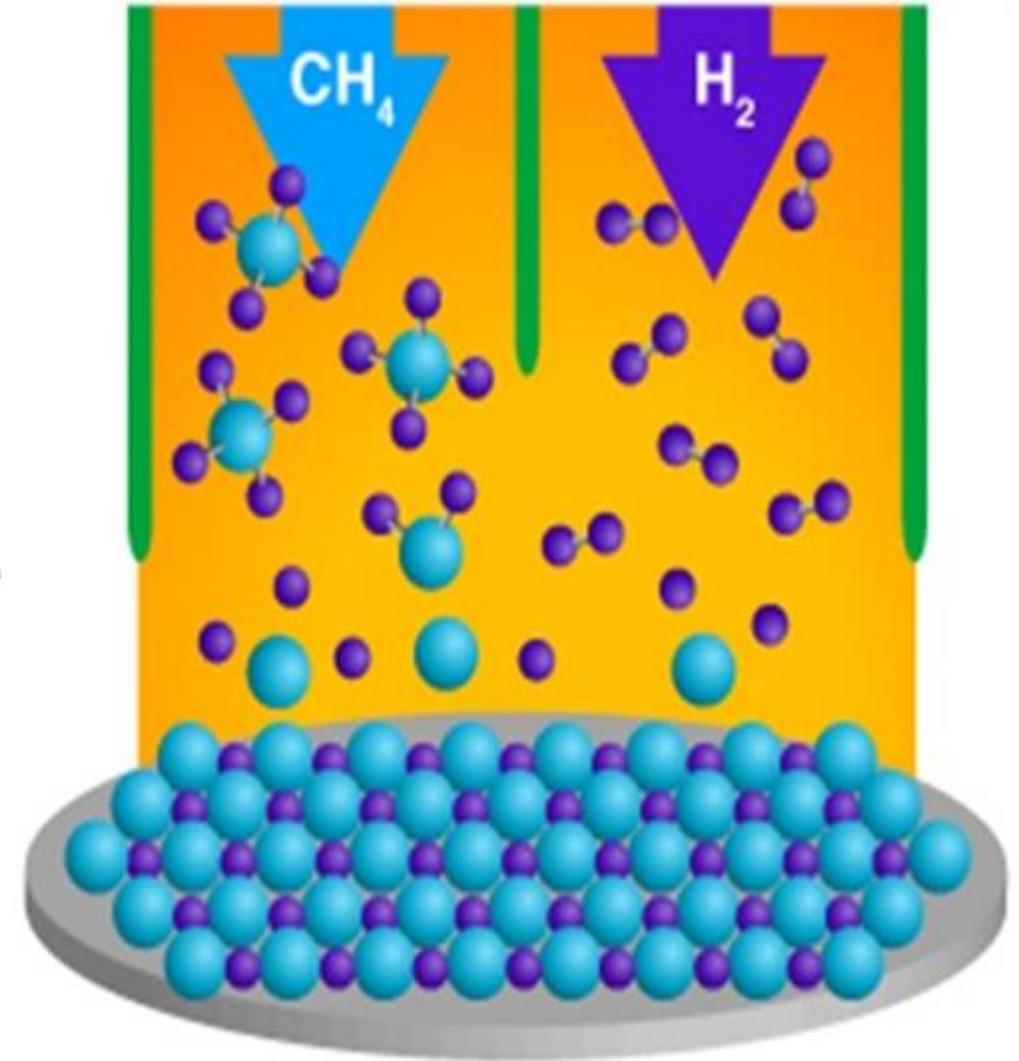
- **Los objetos que serán cubiertos (*sustratos*)** se colocan en una cámara de vacío. En la cámara se produce un vapor de átomos de metal que cubre todas las superficies expuestas en la cámara incluyendo los sustratos.
- En la ***evaporación termal***, un bloque o alambre de metal se calienta con un elemento resistente al calor para formar vapor metálico.
- En la ***evaporación por rayo de electrones*** “e-Beam”, un bloque de metal se calienta cuando un rayo de electrones energizados (energéticos) impactan el metal.
- En la ***pulverización catódica*** “sputtering”, se forma un gas ionizado (*un plasma*) y se atrae eléctricamente a una placa sólida de metal. Esto provoca que los átomos del metal pasen por su fase de vapor, se muevan hacia el sustrato y lo recubran.

# Procesos de deposición

## Deposición química de vapor (CVD)

### Depositar semiconductores and aislantes.

- Puede utilizarse la pulverización catódica “sputtering”.
- También se utiliza la Deposición química de vapor. Químicos reactivos (*precursores*) son añadidos a la cámara de vacío donde reaccionan en su fase de vapor.
- Los productos de la reacción forman un compuesto que al condensarse cubre el sustrato con una capa fina y regular.



Sustrato

# Modificación de capas

## Dopaje

- Para construir un componente útil como un transistor o un diodo, un semiconductor como silicio debe tener ciertas impurezas añadidas. Estas se conocen como *dopantes*.
- Algunos dopantes comunes incluyen boro, aluminio, galio, nitrógeno, fósforo y arsénico.

## Oxidación

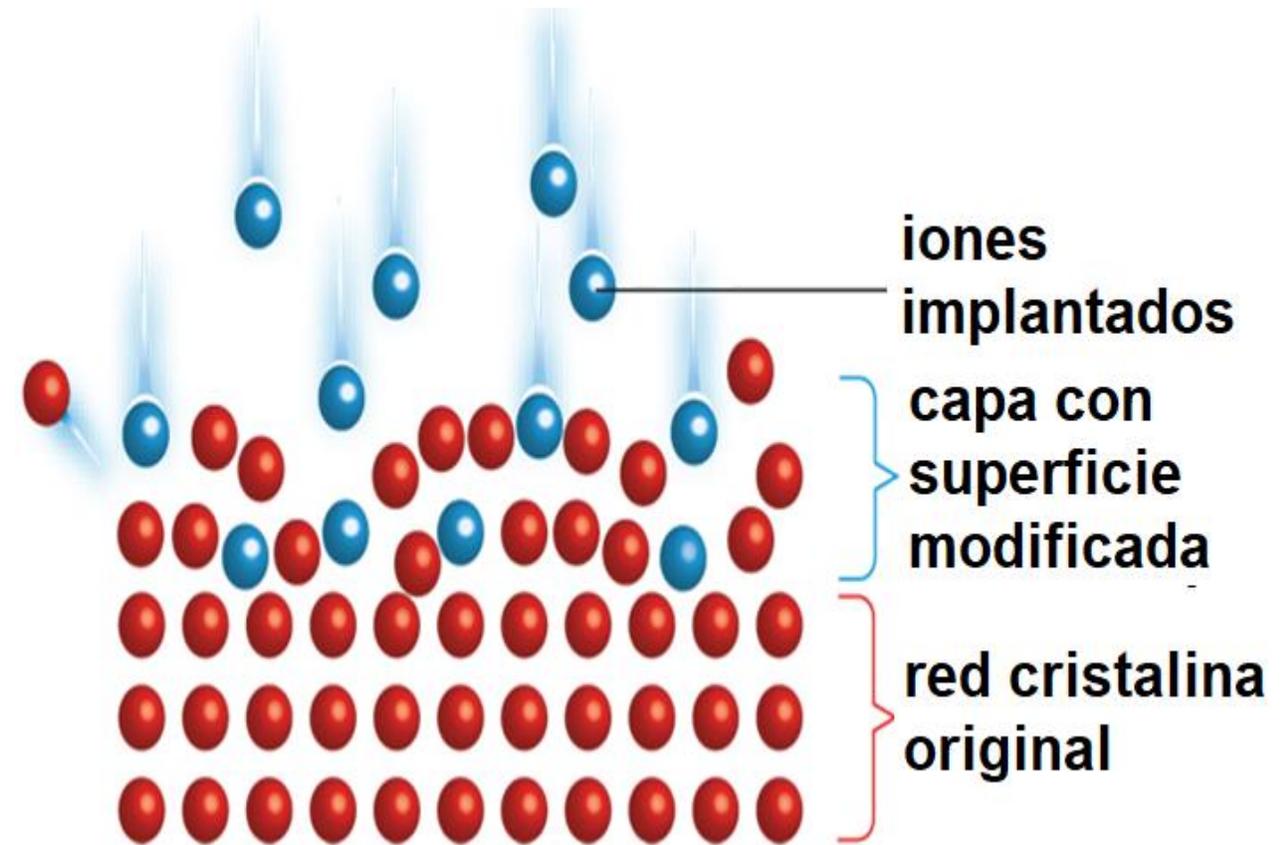
- Una capa pura de silicio puede convertirse en dióxido de silicio (un buen aislante) colocándola en un horno caliente con una atmósfera de oxígeno puro.

# Introducción del dopante

- Los átomos dopantes se introducen en un sustrato de silicio por:
  - *Deposición de vapor*
    - Difusión de átomos en su fase gaseosa.
  - *Implantación de iones*
    - Acelerando un haz de iones dopantes en la superficie.

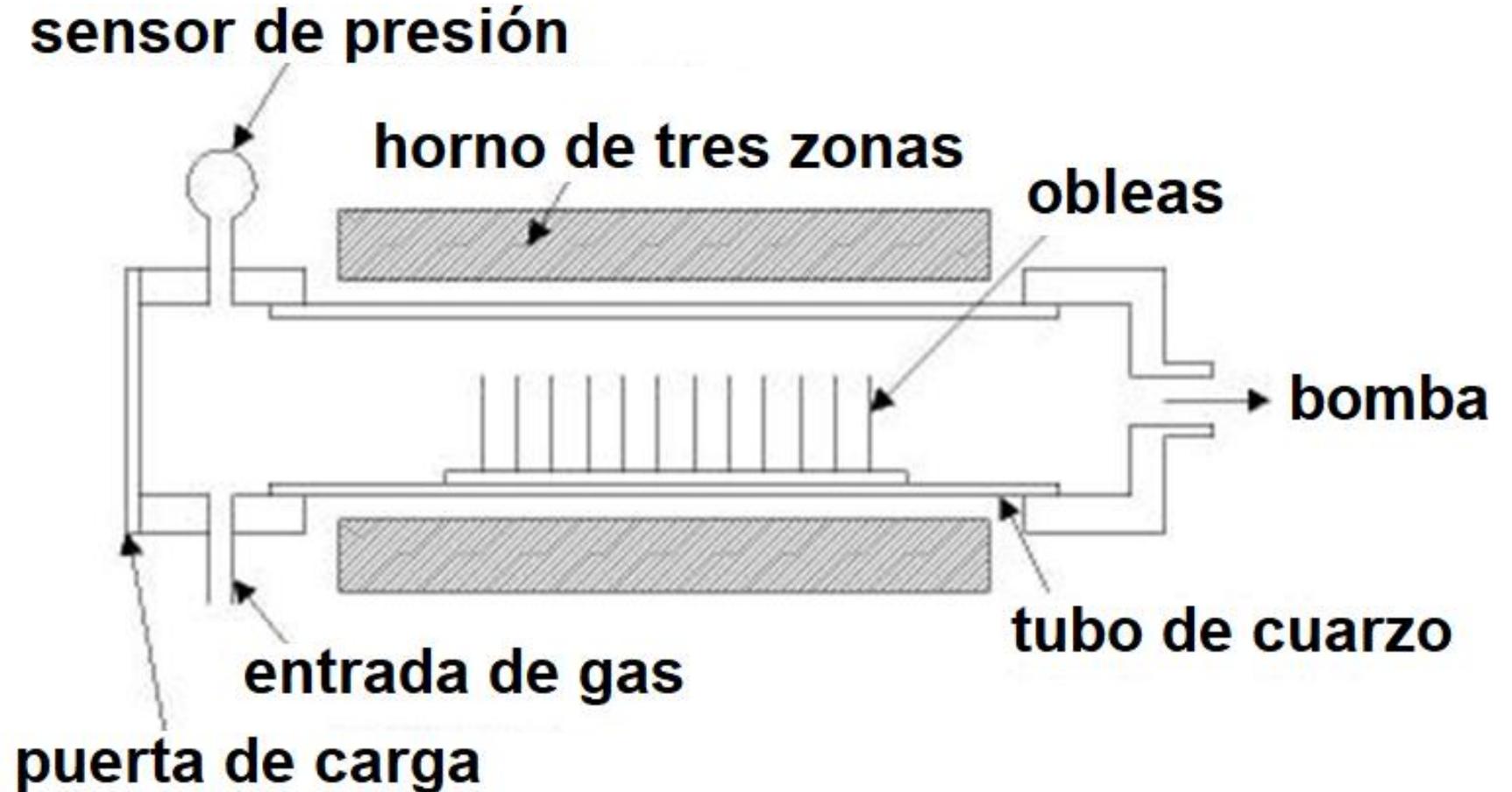
# Dopantes por implantación iónica

- Un haz de iones dopantes energéticos impacta la superficie de silicio, implantando los iones en el sólido. Estos impactos producen defectos indeseables en el cristal de silicio, que deben de repararse recociendo los materiales a altas temperaturas.



# Dopantes por difusión de vapor

Los átomos en fase gaseosa se introducen en una cámara de vacío donde pueden difundirse en el silicio sólido. Se deben usar temperaturas elevadas para acelerar la difusión.



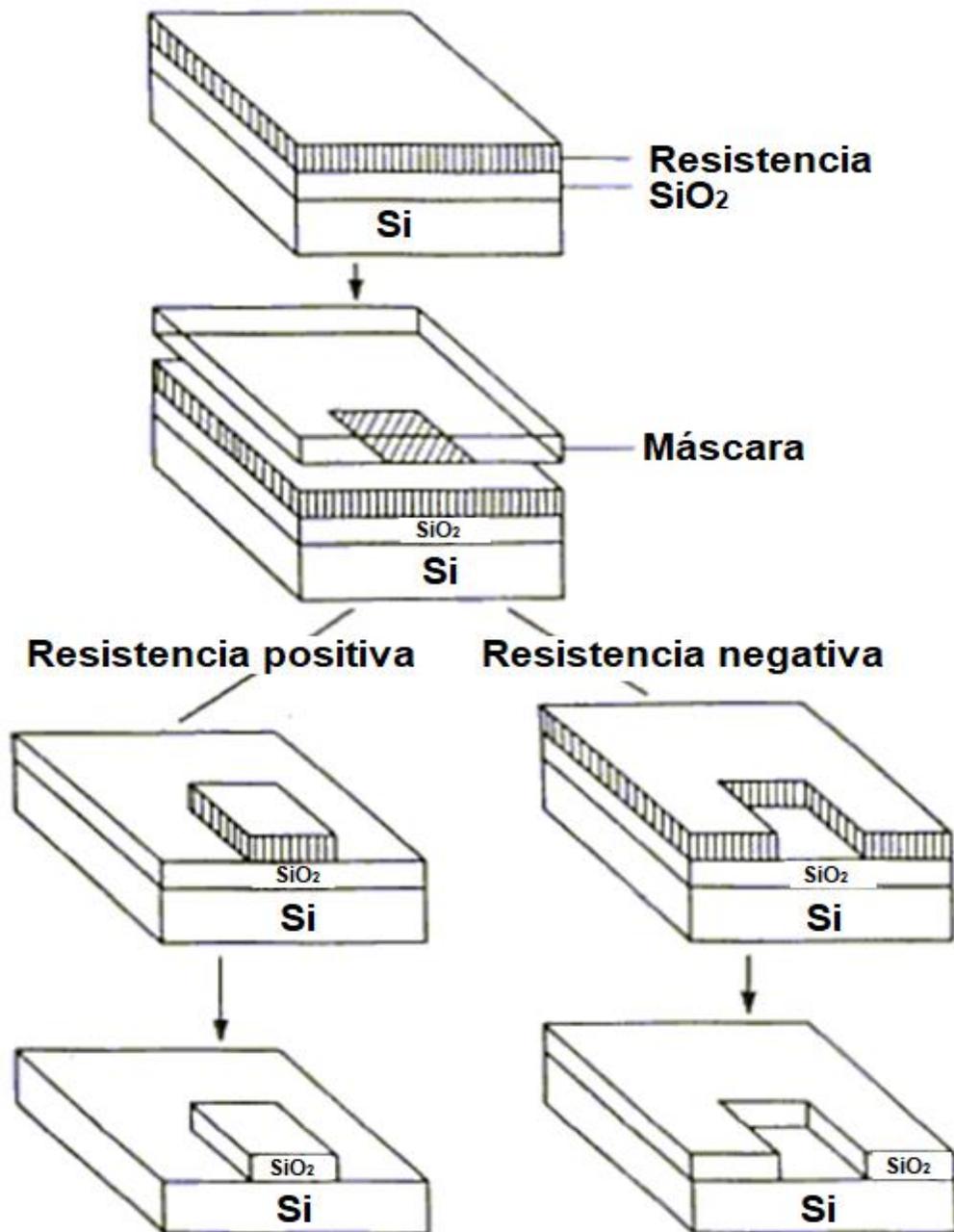
# Micro fabricación – Paso 4:

## Transferir el patrón

**El patrón está contenido en la foto-mascara. Para replicar este patrón en un sustrato de oblea:**

- Deposite la *fotorresistencia* líquida en la oblea mediante recubrimiento por rotación (“giratorio”).
- Coloque el patrón en la resistencia por exposición de luz a través de la foto-máscara.
- Exponga la oblea al grabador (“etchant”). Este proceso se encarga de cualquier área expuesta y esculpe la oblea según el patrón.
- Lave la oblea.
- Repita para la siguiente capa.

# Esquema del proceso de fotolitografía



<http://ahshonorschemistry.wikispaces.com/A-Silicon+Wafer+Patterned>  
con autorización

# Aplicando la fotorresistencia a un sustrato

La fotorresistencia es un químico líquido. Se puede aplicar a la oblea de silicio de muchas maneras, pero generalmente se *reviste por rotación*.

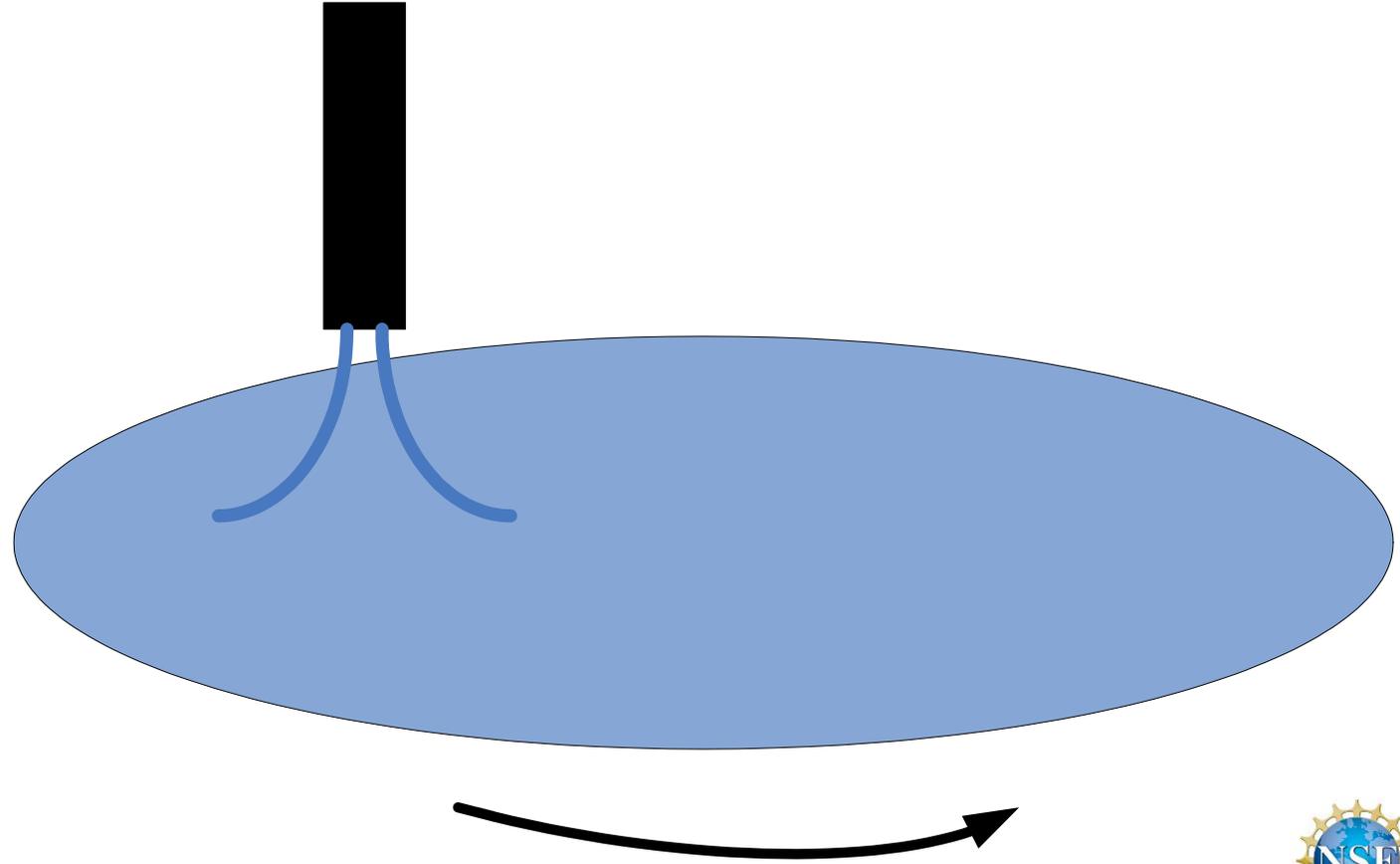
- El *recubierto giratorio* (“spin coater”) es un plato giratorio pequeño y cerrado que puede girar alrededor de 3000 rpm. Sostiene la oblea en su bandeja o plato con un vacío.



# Aplicando la fotorresistencia a un sustrato

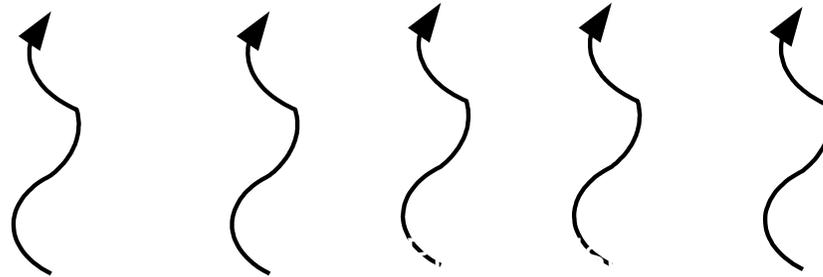
Primero, se aplica una pequeña cantidad de fotorresistencia a la oblea, luego se hace girar la oblea para extender la resistencia.

Por lo general, solo el 1% de la resistencia termina en la oblea; el resto se hace girar.



# Aplicando la fotorresistencia a un sustrato

La fotorresistencia se seca por la pérdida de solvente y se hace más fina por la rotación.



Fotorresistencia líquida

Sustrato de oblea

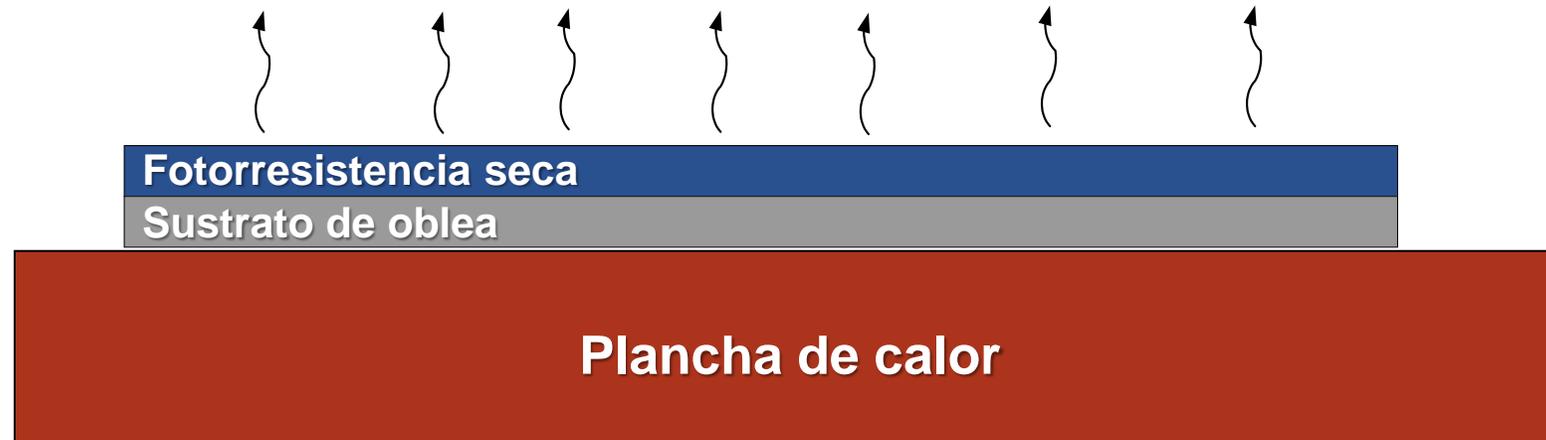
El resultado es una capa fina y uniforme.

Fotorresistencia seca

Sustrato de oblea

# Calentando la fotorresistencia

La fotorresistencia aún tendrá algo de solvente después de girar (la rotación). Se calienta ligeramente (el “horneado suave”) para eliminar el restante del solvente.

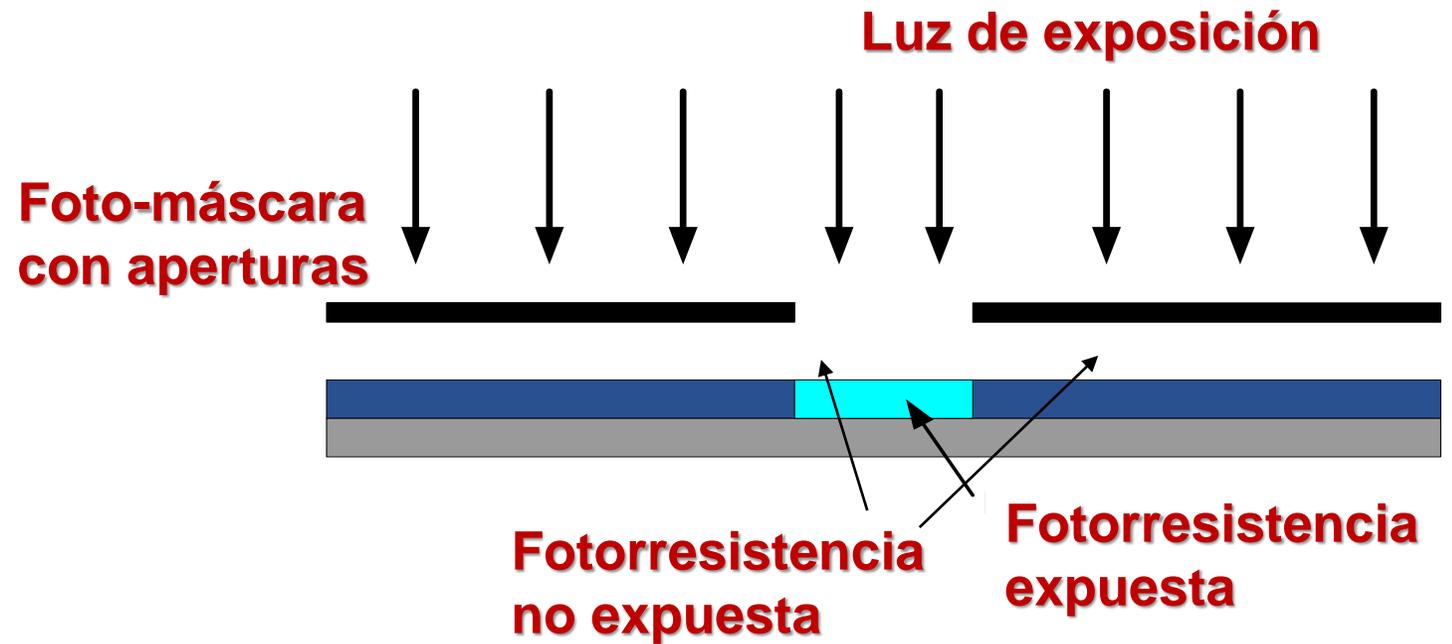


La oblea está lista para exposición.

# Exposición de la fotorresistencia

En la forma más simple de litografía, llamada litografía de contacto, la foto-máscara se coloca sobre la oblea recubierta con fotorresistencia y se le aplica luz intensa.

Dondequiera que la máscara tenga aperturas, la resistencia queda expuesta y pasa por un cambio químico.



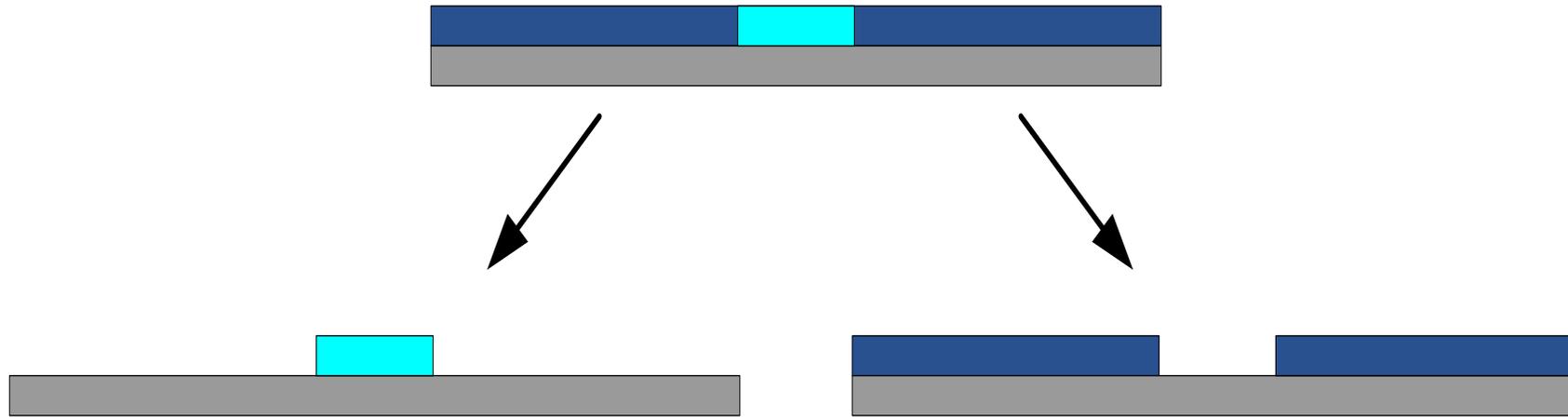
# Fotoquímica

Cuando la luz incide en la fotorresistencia, sus moléculas llevan a cabo una reacción química. El tipo de reacción depende del tipo de resistencia utilizada, ya sea *negativa* o *positiva*.

- En una resistencia negativa, las áreas expuestas a la luz se vuelven *menos* solubles en la solución a base de agua llamada *revelador*. Las áreas expuestas permanecen mientras que el resto de la resistencia se disuelve.
- En una resistencia positiva, las áreas expuestas a la luz se vuelven *más* solubles en el revelador. Estas áreas se disuelven en el revelador dejando todo lo demás intacto.

# Fotorresistencia negativa y positiva

## Fotorresistencia expuesta en la oblea

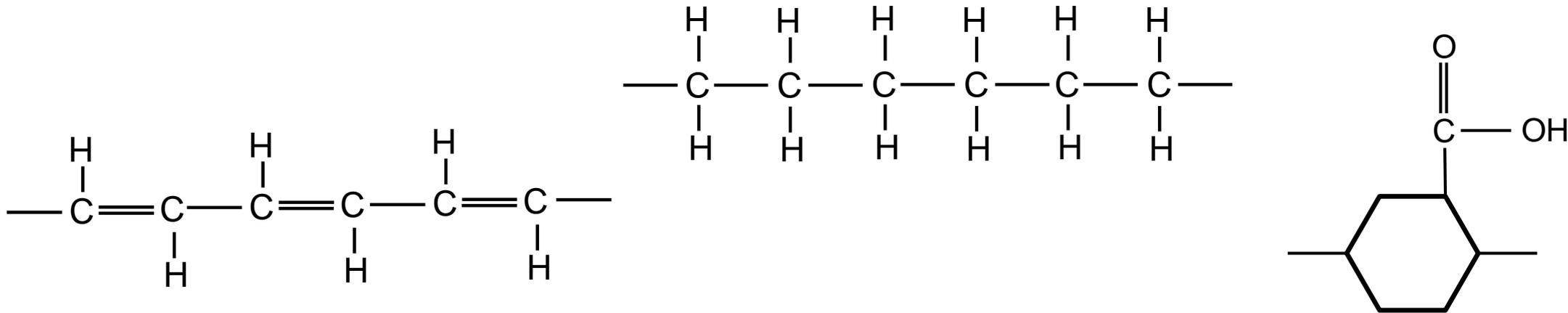


**Resistencia negativa:** el espacio abierto en la máscara se convierte en un elemento opaco en la oblea.

**Resistencia positiva:** el espacio abierto en la máscara sigue siendo un espacio abierto en la oblea.

# Química de la fotorresistencia

Las fotorresistencias consisten en moléculas de polímero disueltas en un solvente. Aquí se muestran tres moléculas de polímeros simples.

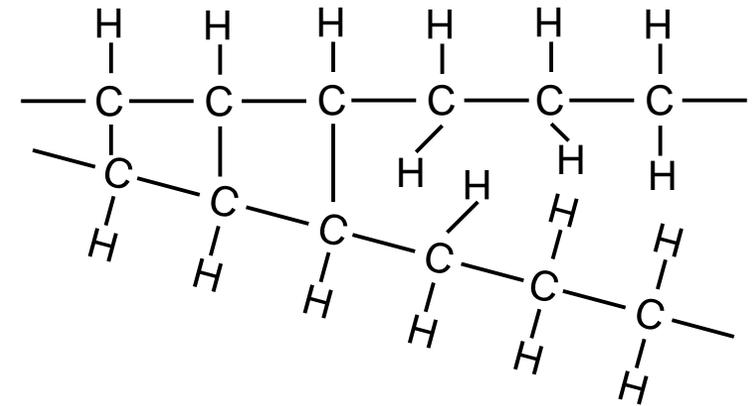


Las letras C's representan átomos de carbono, las H's átomos de hidrógeno y el hexágono es un anillo de 6-carbonos. El patrón puede repetirse miles de veces en un polímero.

# Química de la fotorresistencia

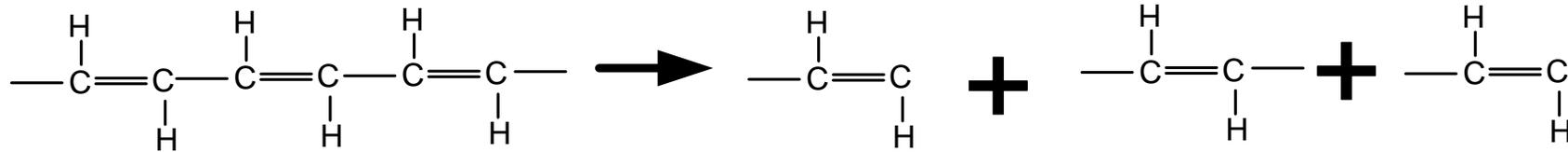
Cuando la luz incide en las moléculas del polímero, llevan a cabo una reacción química. El tipo de reacción depende del tipo de resistencia utilizada.

- En una resistencia negativa, la exposición a la luz puede hacer que los polímeros se *reticulen* (entrecrucen), lo que significa que se unen a las moléculas cercanas para formar una red fuerte.
- El polímero más grande es menos soluble en el solvente (como el revelador). Por lo tanto, cualquier punto en la oblea recubierto con resistencia que haya sido expuesto a la luz no se disolverá cuando la oblea esté sumergida en la solución reveladora. Las moléculas no expuestas (y por lo tanto, que no han reaccionado) no se disolverán en el revelador.



# Química de la fotorresistencia

Cuando una resistencia positiva es expuesta a la luz, las moléculas del polímero tienden a romperse en fragmentos más pequeños.

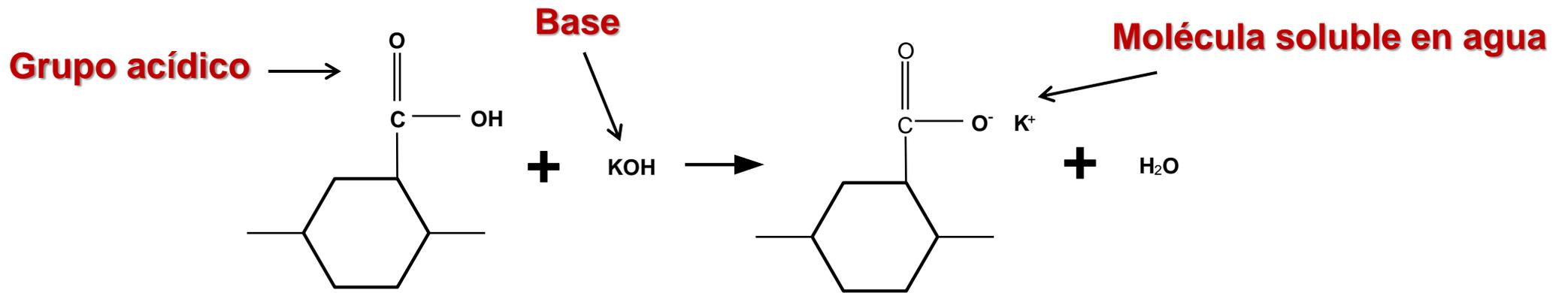


- Estas moléculas más pequeñas y ligeras tienen más probabilidades de disolverse (o se disolverán más rápido) en el revelador. La reacción con la luz también puede producir regiones polares en la molécula, esto resulta en una mayor probabilidad de que se disuelva en agua o soluciones a base de agua.
- Por lo tanto, cualquier punto en la oblea con revestimiento resistente que haya sido expuesto a la luz se disolverá fácilmente cuando la oblea se sumerja en la solución del revelador. Las moléculas de resistencia no expuestas permanecerán en la oblea.

# Química del revelado

Después de que la oblea recubierta con fotorresistencia ha sido expuesta a la luz, se sumerge en una solución a base de agua llamada *revelador*.

Las fotorresistencias están formuladas para que las áreas a eliminar sean ácidas. Si estas áreas ácidas están expuestas a una solución básica (o alcalina), reaccionarán y se disolverán en el revelador.



Los reveladores usualmente son soluciones básicas como hidróxido de potasio (KOH) o hidróxido de sodio (NaOH) en agua.

# Sistemas ópticos para exponer la fotorresistencia

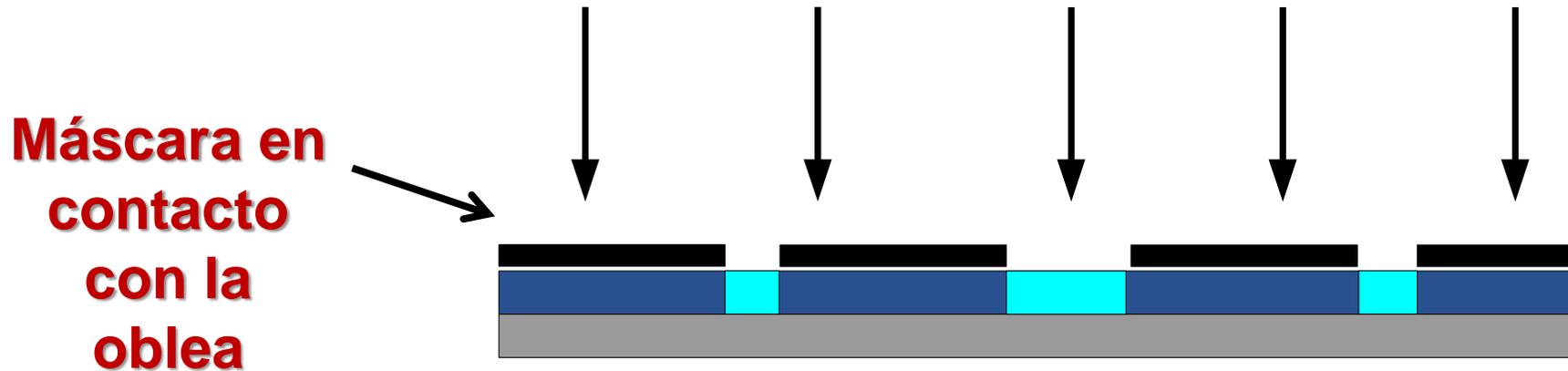
**Los sistemas de exposición deben tener fuentes de luz intensa y precisión óptica para enfocar la luz.**

Esta lámpara de arco a base de mercurio, produce luz intensa en las longitudes de onda azul, violeta y ultravioleta.



# Sistemas de contacto y proyección

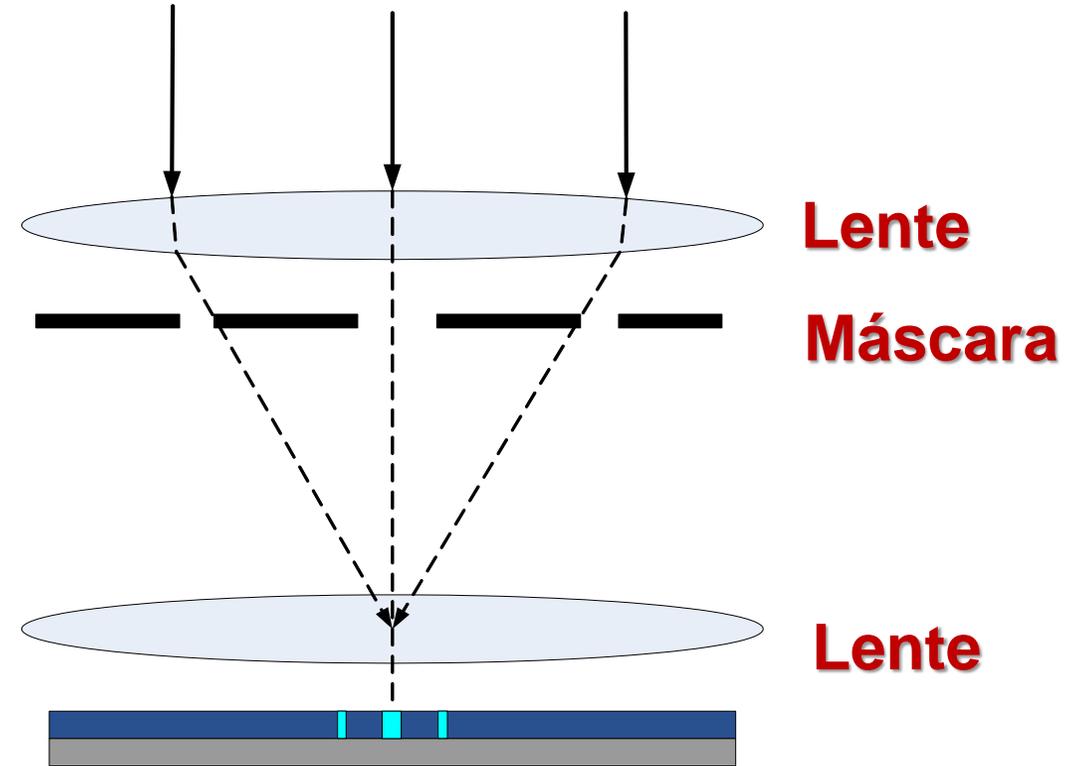
- En la litografía de **contacto**, la máscara se coloca sobre la oblea cubierta con fotorresistencia.



- El patrón de la máscara se reproduce directamente en la resistencia, sin cambios de tamaño.

# Sistemas de contacto y proyección

- En la litografía de **proyección**, el patrón de la máscara se reduce en tamaño utilizando lentes.
- El patrón de la máscara se reduce de 5 a 10x en la resistencia, lo que permite realizar características mucho más pequeñas.



El patrón expuesto en la resistencia es mucho más pequeño que en la máscara.

# Micro fabricación – Paso 5:

## Procesos de grabado

### Grabado húmedo (químico)

- Utiliza una sustancia química que disolverá el material que necesita ser eliminado, mientras no interactúa (tanto) con la capa de enmascaramiento.
- Para Si, SiO<sub>2</sub>, se utiliza ácido fluorhídrico.

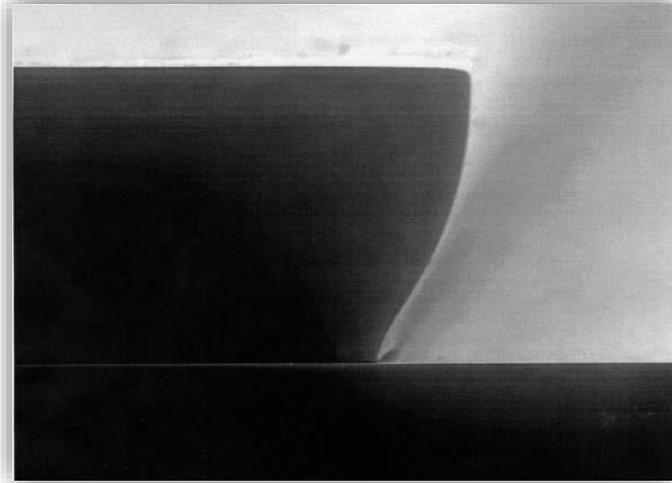
### Grabado en seco

- Utiliza iones reactivo / plasma para atacar el material.
- El material es forzado a su fase de vapor y es bombeado.

# Resultados del grabado

## Grabado húmedo (químico)

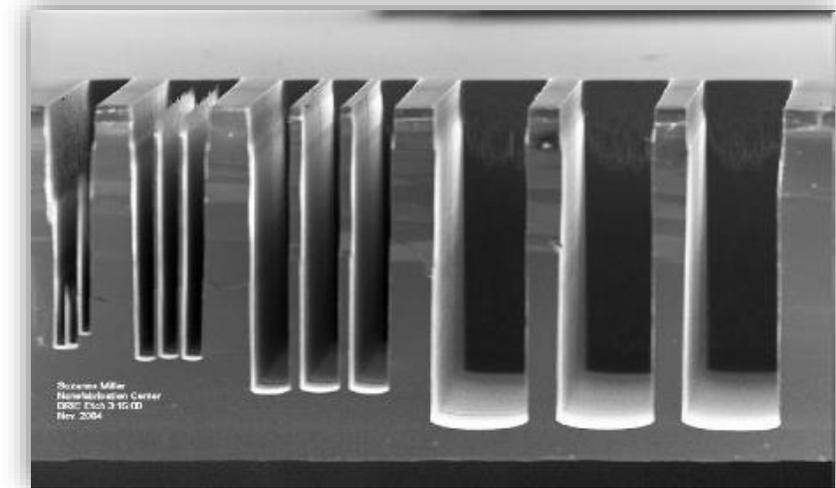
- Rápido, isotrópico (se graba tan rápido como hacia abajo, puede grabar menos una característica).



Grabado húmedo  
Foto: "Futurrex Inc."

## Grabado en seco

- Más lento, anisotrópico (puede grabar paredes rectas con una alta *relación de aspecto*).



Grabado de iones reactivos en seco (DRIE)  
Foto: "University of Minnesota"  
"Nanofabrication Center"

# Micro fabricación – Paso 6:

## Repetir el proceso

**La oblea se lava y la siguiente capa se construye utilizando la misma serie de pasos:**

- Depositar la capa fina o delgada
- Modificar si se desea
- Transferir el patrón utilizando la foto-máscara y resistencia
- Grabar

**Un circuito integrado (IC) típico puede tener más de 15 capas**

**Para observar una animación donde se resume el proceso de fabricación de un circuito integrado, acceda al siguiente enlace:**

**The making of a chip - Youtube video**  
**[www.youtube.com/watch?v=d9SWNLZvA8g](http://www.youtube.com/watch?v=d9SWNLZvA8g)**

Este trabajo está licenciado por “Creative Commons Attribution-NonComercial-ShareAlike 3.0 Unported License”.

Basado en un trabajo en [www.nano-link.org](http://www.nano-link.org).



*Este material está basado en trabajo apoyado por la Fundación Nacional de Ciencia bajo la Concesión Número 0802323. Cualquier opinión, hallazgos, conclusiones o recomendaciones expresadas en este material son las del autor(es) y no necesariamente representan las opiniones de la Fundación Nacional de Ciencias.*