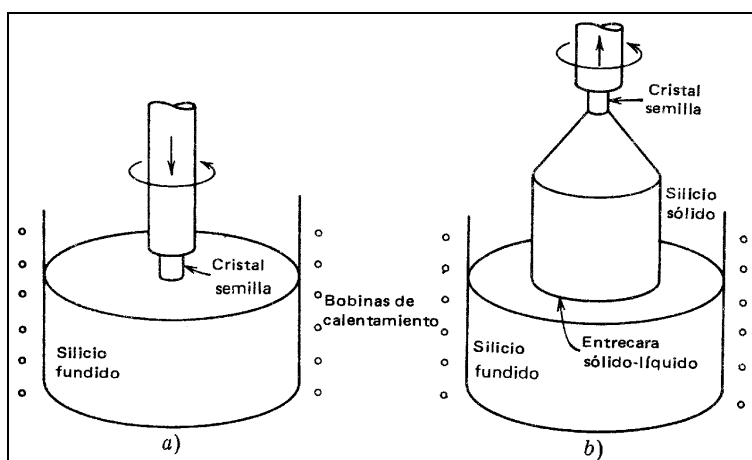


# TECNOLOGIA DE CIRCUITOS INTEGRADOS

## 1. CRECIMIENTO DEL CRISTAL, PRODUCCION DE OBLEAS

En general para crear monocristales de alta calidad se usa el *método Czochralski*, en el cual primero se funde silicio policristalino de alta pureza, en un crisol no reactivo, y se mantiene a una temperatura precisamente por arriba del punto de fusión. Se agrega una cantidad, cuidadosamente controlada, de la impureza contaminante deseada, tal como fósforo o boro.

A continuación, en la fundición, se introduce un cristal semilla de alta calidad, de la orientación cristalina deseada, haciéndolo girar al mismo tiempo, como se indica en la figura. Se deja que una porción de este cristal se disuelva en el silicio fundido, para eliminar las porciones externas tensas y exponer las superficies frescas. Entonces el cristal semilla continúa girando y se extrae lentamente de la fundición. Conforme se extrae, se enfría, y el material de la fundición se va adhiriendo al cristal, formándose un cristal aún más grande (a la derecha, en la figura). Bajo las condiciones cuidadosamente controladas que se mantienen durante el crecimiento, los átomos nuevos de silicio continúan la estructura cristalina del material ya solidificado. De esta manera, pueden fabricarse lingotes de silicio de un solo cristal, cilíndrico y de varios centímetros de diámetro. Conforme la tecnología de crecimiento del cristal ha avanzado el diámetro de los cristales se ha incrementado desde una pequeña fracción de centímetro hasta los ocho o diez centímetros actuales (35 cm de diámetro en 2003).



Una vez que se ha desarrollado el lingote de un solo cristal, se corta en delgadas obleas circulares. A continuación, las obleas se tratan al agua fuerte, para eliminar las marcas de la sierra, y se pulen con arena sucesivamente más fina y solventes químicos hasta que se obtiene una superficie brillante como un espejo y libre de defectos.

Formación de un lingote de semiconductor de un solo cristal, mediante el proceso de Czochralski.

## 2. TECNOLOGIA PLANAR

El proceso *planar* del silicio consiste en la introducción selectiva de átomos contaminantes en pequeñas áreas del silicio, desde una superficie de la oblea, para formar regiones de material tipo p y n. Se dice que la tecnología es planar porque la fabricación se lleva a cabo por medio de procesos realizados desde un plano de la superficie.

Comúnmente, se agregan los átomos contaminantes, depositándolos sobre la superficie del silicio y, a continuación, *difundiéndolos* hacia aquellas regiones del silicio que no están protegidas por una capa de dióxido de silicio. Como los átomos contaminantes se introducen desde la superficie y las difusiones típicas son del orden de unas cuantas micras o menos, las regiones activas del dispositivo semiconductor están asimismo dentro de unas cuantas micras de una de las superficies de la oblea de silicio. El resto de la oblea (ancho de cientos de micras) sirve como soporte mecánico de la importante región superficial.

Una ventaja decisiva de la tecnología planar es que cada paso del proceso de fabricación se aplica a la oblea de silicio completa, al mismo tiempo. De esta manera pueden introducirse simultáneamente los átomos contaminantes a varios miles de pequeñas regiones separadas de la oblea. Dado que el costo de fabricación de una oblea no cambia de manera significativa por su tamaño o por las dimensiones de las regiones difundidas, el uso de obleas de diámetro mayor y de dimensiones menores de los dispositivos minimiza el costo de fabricación por dispositivo. La fabricación simultánea de varios dispositivos

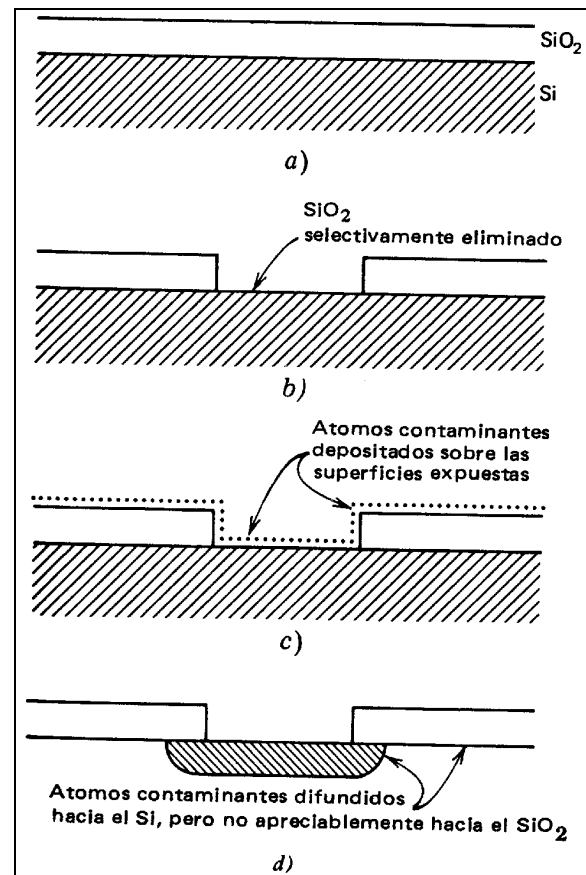
semiconductores relacionados y con interconexión en el mismo trozo de semiconductor conduce a todo un circuito en un fragmento de silicio. Este tipo de elemento, llamado *circuito integrado*, se desarrolló a partir de la capacidad inherente del proceso planar de fabricar muchos dispositivos al mismo tiempo.

En la figura se muestran etapas básicas de fabricación en el proceso planar del silicio:

- formación del óxido
- eliminación selectiva del óxido
- depósito de los átomos contaminantes sobre la oblea
- difusión de los átomos contaminantes hacia las regiones expuestas del silicio.

Los procesos básicos que trataremos a continuación:

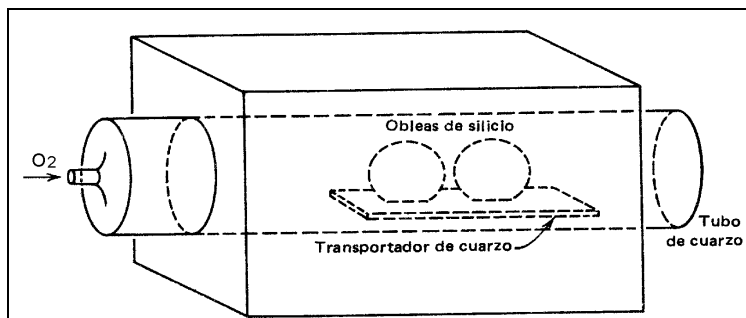
- Oxidación
- Fotoenmascaramiento
- Difusión o Implantación iónica
- Crecimiento epitaxial y de silicio policristalino
- Interconexiones y montaje



## - Oxidación

Para crear sobre la oblea una capa de óxido, se deja fluir oxígeno sobre la superficie de silicio, mientras que la oblea se calienta a una temperatura alta. Durante este proceso de oxidación, la oblea se coloca dentro de un tubo de cuarzo, el cual así mismo se pone dentro de la abertura cilíndrica de un horno calentado mediante una resistencia. Son comunes las temperaturas entre 900 y 1200°C, avanzando la reacción con mayor rapidez a las temperaturas más altas. Generalmente el límite superior de temperatura queda determinado por el ablandamiento y degradación del tubo de cuarzo del horno y otros accesorios fijos, a temperaturas muy superiores a 1200°C, aunque el propio silicio no se fundirá hasta 1412°C.

El ambiente oxidante puede ser de oxígeno seco o húmedo. Por lo general, esto último se produce haciendo pasar oxígeno seco de alta pureza, a través de agua que se mantiene cerca de su punto de ebullición, o bien, admitiendo hidrógeno y oxígeno para hacerlos reaccionar directamente en el horno de oxidación. La oxidación se lleva a cabo con mucha mayor rapidez en un ambiente de oxígeno húmedo que, como consecuencia, se usa para la formación de capas protectoras más gruesas de dióxido de silicio. El crecimiento de un óxido grueso en el ambiente más lento de oxígeno seco puede conducir a un movimiento indeseable de las impurezas introducidas en la oblea, durante los pasos previos.

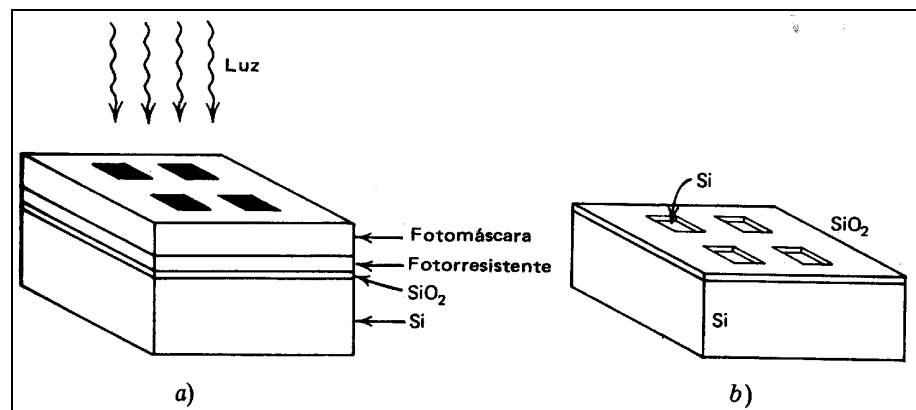


Se hace crecer una capa aislante de dióxido de silicio, sobre obleas de silicio, colocándolas en un horno a alta temperatura, en un flujo de gas que contiene oxígeno.

### - Fotoenmascaramiento.

Una vez que se ha formado la capa protectora de óxido sobre la oblea de silicio, debe eliminarse selectivamente de aquellas áreas en las que van a introducirse los átomos contaminantes. Normalmente, la remoción selectiva se lleva a cabo usando un plástico sensible a la luz llamado fotorresistente. Primero se cubre la oblea oxidada con el líquido fotorresistente, colocando unas cuantas gotas sobre una oblea que gira rápidamente. Después de que se ha secado el fotorresistente, se coloca sobre la oblea un negativo fotográfico (llamado máscara), como se muestra en la figura y se alinea usando un microscopio. Entonces, se expone el fotorresistente a la luz ultravioleta, lo que hace que sus moléculas se polimericen en las áreas que se exponen a la luz. El fotorresistente no es afectado en las regiones que están protegidas por las porciones opacas de la máscara. Entonces se revela el fotorresistente, para eliminarlo de las áreas en donde no se endureció, dejando una capa protectora, resistente a los ácidos, sobre las áreas seleccionadas del óxido.

Las regiones no protegidas por el óxido se atacan químicamente con una solución de ácido fluorhídrico, con el fin de exponer la superficie desnuda del silicio y, eliminándose posteriormente el fotorresistente de las áreas restantes. Ahora quedan porciones de silicio cubiertas por óxido que están protegidas frente a una posterior difusión de impurezas.



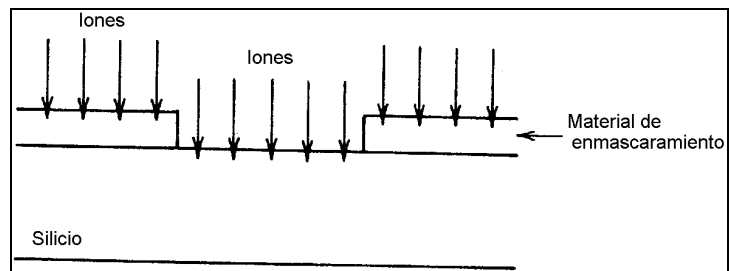
Las áreas de las que debe eliminarse el óxido se definen polymerizando un fotorresistente sensible a la luz, mediante un negativo fotográfico o máscara.

### - Difusión e implantación iónica.

El proceso de difusión comprende dos pasos. Primero, los átomos contaminantes se colocan sobre o cerca de la superficie de la oblea, mediante un paso de depósito gaseoso, o bien, cubriendo la oblea con una capa que contenga la impureza contaminante deseada. Después le sigue una difusión de introducción, la cual mueve los átomos contaminantes hacia dentro de la oblea. La forma de la distribución del contaminante queda determinada principalmente por la manera en que se coloca el contaminante cerca de la superficie, mientras que la profundidad de la difusión depende principalmente de la temperatura y del tiempo de la difusión de introducción.

Cuando los átomos contaminantes se colocan sobre un trozo de silicio y la oblea se calienta hasta una temperatura lo suficientemente alta, los átomos contaminantes emigran en el cristal. Este movimiento ocurre debido al gradiente de concentración de los átomos contaminantes, con los átomos moviéndose desde la región de alta concentración, cercana a la superficie, hacia las regiones de concentración más baja, hacia adentro de la oblea.

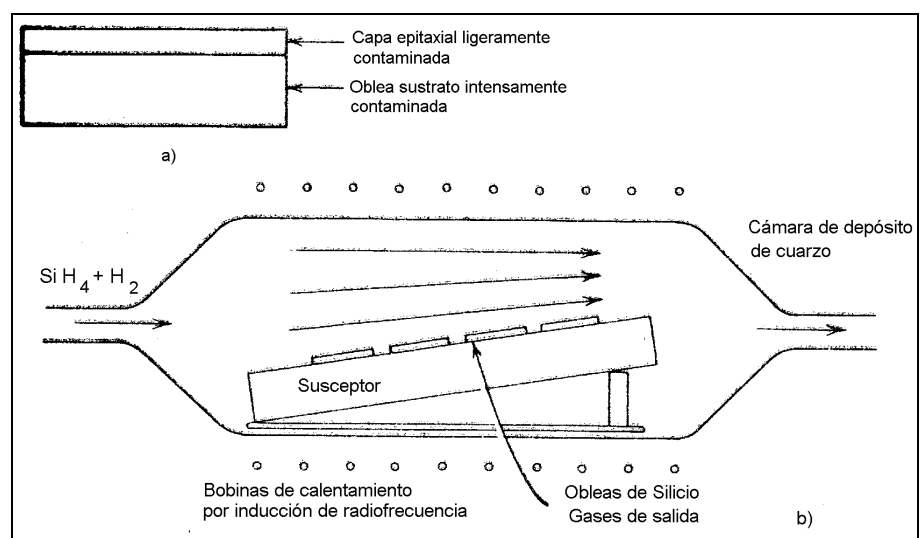
La introducción de impurezas contaminantes puede hacerse también por implantación iónica. Primero se ioniza el átomo contaminante y se acelera mediante un campo eléctrico hasta una energía alta (20-200 keV). Un haz de estos iones choca contra la superficie del semiconductor (ver figura), y penetra (menos de una micra). Como se hace un daño considerable al cristal es necesario un tratamiento de recocido para restaurar la calidad de la red cristalina. Pueden usarse los átomos así implantados como fuente para una posterior difusión.



Implantación iónica: Iones de alta energía chocan y penetran en las regiones seleccionadas del semiconductor.

### - Crecimiento epitaxial y de silicio policristalino.

Al proceso de crecer sobre una oblea una capa extra de semiconductor (intrínseco o extrínseco) se le llama *crecimiento epitaxial*. Para depositar una capa epitaxial de silicio encima de una oblea de silicio, se coloca ésta en una cámara calentada, donde, sobre la oblea caliente, se hace pasar un gas, tal como el silano,  $\text{SiH}_4$ , o el tetracloruro de silicio,  $\text{SiCl}_4$ , como se muestra en la figura. El gas se descompone sobre la superficie de la oblea, dejando una delgada capa de silicio sólido. Si se calienta la oblea hasta una temperatura suficientemente alta, los átomos de silicio depositados pueden emigrar sobre la superficie de silicio, antes de ser enterrados por los átomos que llegan después. Cuando alcanzan posiciones energéticamente favorables, se arreglan de modo que se continúe la estructura cristalina de la oblea-substrato de silicio, obteniéndose una capa de monocristal de alta calidad.



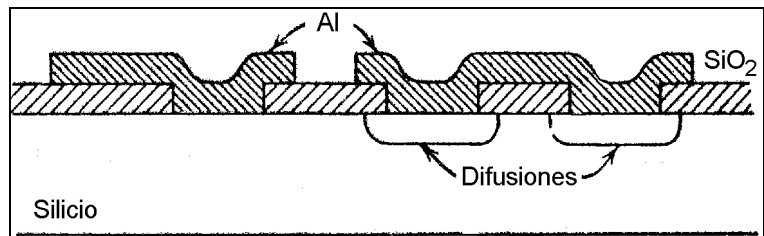
a) Capa epitaxial ligeramente contaminada, desarrollada sobre una oblea sustrato de silicio fuertemente contaminado.

b) Sistema de depósito epitaxial, mostrando las obleas de silicio sobre un susceptor que se calienta por inducción, a partir de las bobinas de radiofrecuencia localizadas fuera de la cámara de depósito de cuarzo.

Para interconectar los dispositivos de un chip se necesitaran pistas conductoras de la electricidad. Aunque normalmente se usa aluminio, su bajo punto de fusión impide cualquier otro paso posterior a alta temperatura. Otra solución es crear pistas de silicio policristalino, mediante un método semejante al del crecimiento epitaxial pero como normalmente este silicio se deposita sobre óxido de silicio amorfo, no será un monocristal. Normalmente se compone de muchos cristalitas pequeños, por lo que se conoce como silicio policristalino. Aunque sus propiedades son inferiores a las del silicio monocristalino si puede ser usado como conductor, o como electrodo en un circuito integrado.

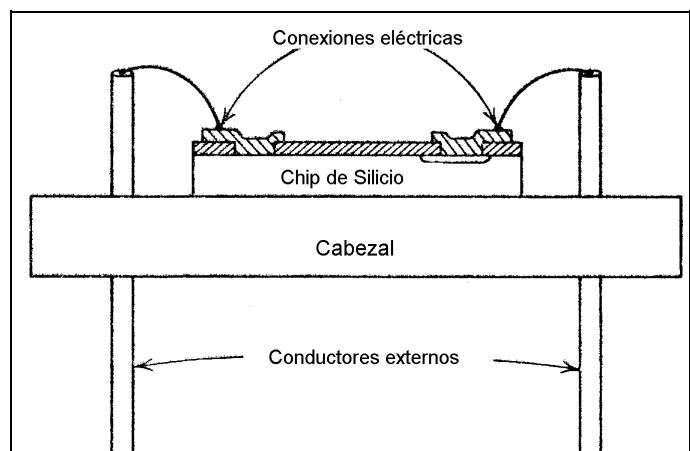
### 3. INTERCONEXIONES Y MONTAJE

Hasta aquí, en nuestro estudio de la tecnología de los circuitos integrados, se han considerado los pasos básicos de oxidación, del fotorresistente y de difusión, que se combinan y repiten con el fin de fabricar las regiones tipo P y tipo N deseadas, que comprenden a un dispositivo semiconductor o circuito integrado. Después de que se ha formado la estructura básica del semiconductor, por la contaminación del silicio, aún falta proporcionar la trayectoria eléctrica entre las diversas regiones contaminadas. En la figura se ilustra el método más sencillo para realizarlo. Primero se elimina el óxido de silicio de protección, de las áreas en donde se desea establecer el contacto con el semiconductor y se deposita una capa de metal sobre la superficie, por evaporación a partir de una fuente caliente en el vacío. A continuación se elimina el metal, por lo común aluminio o una aleación de aluminio, de donde no se desea, mediante operaciones de enmascaramiento con fotorresistente y ataque con un ácido similares a las que se analizaron antes.



Puede usarse una delgada capa de aluminio para conectar varias regiones contaminadas de un dispositivo semiconductor.

Después, se coloca la oblea en un horno de baja temperatura ( $500^\circ\text{C}$ ) para alear el metal al silicio y asegurar un buen contacto eléctrico. En seguida, se corta la oblea de silicio en trozos separados que contengan uno o más dispositivos semiconductores. Estos pedacitos se sueldan a un envase a un envase y se conectan alambres que van de los conductores del envase al metal del trocito semiconductor figura F.6. Por último, se sella el envase con una cubierta de cerámica o de metal o con plástico.

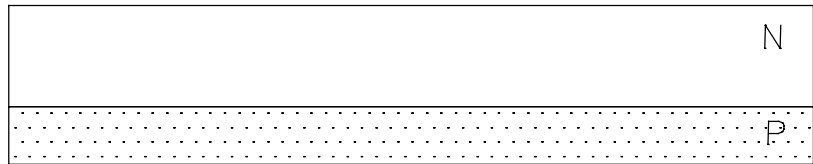


El chip semiconductor se monta sobre un envase y se conectan los cables que unen los terminales externos con los contactos metálicos en el chip.

#### 4. EJEMPLO: Creación de cinco dispositivos con la tecnología planar.

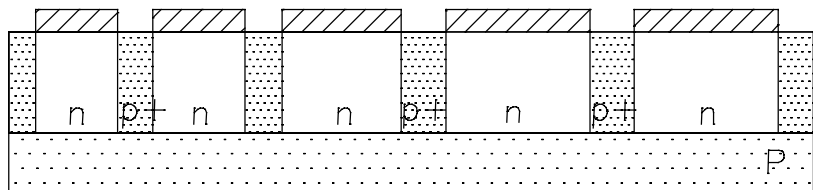
1 Sobre la oblea inicial (de tipo p) se crea una capa epitaxial de silicio tipo N

1



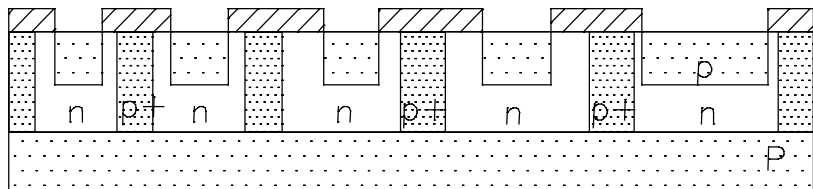
2 Se oxida la superficie, posteriormente se elimina el óxido de las zonas en las que se van a difundir impurezas aceptoras. Se difunden las impurezas hasta que se transforma la zona sin óxido de la capa epitaxial en barreras de tipo p+, cuya misión es aislar el funcionamiento de los distintos dispositivos.

2



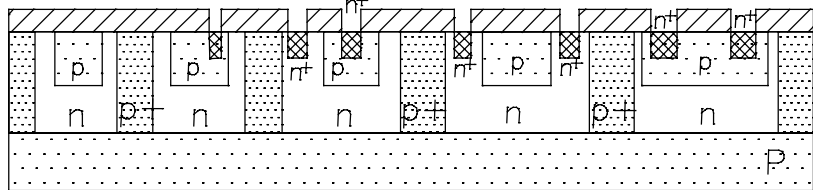
3 Con una nueva capa de óxido, que se elimina selectivamente se procede a difundir de nuevo impurezas aceptoras, para crear las zonas "P" de los dispositivos que se fabricarán.

3



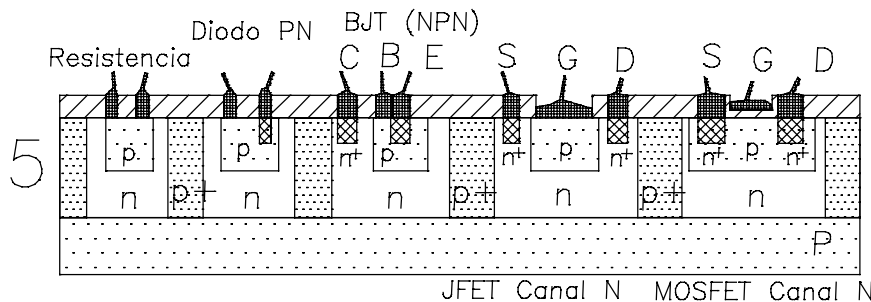
- Aluminio
- Óxido
- Tipo n+
- Tipo p
- Tipo n
- Sustrato (p)

4



4 Con una nueva capa de óxido, y removida de forma selectiva se procede a difundir impurezas donadoras hasta crear las nuevas "islas" de semiconductor n+.

5 Finalmente deposita aluminio para formar los contactos eléctricos. Al final se tiene en un mismo chip una resistencia, un diodo PN, un transistor bipolar NPN, y un JFET y MOSFET de canal N.



Para crear una máscara de óxido (con el fin de proteger zonas de forma selectiva):

- Se oxida toda la superficie (o se crece una capa de óxido)
- Se cubre toda la superficie del óxido con "Fotorresist" (resina fotosensible).
- Se pone encima del óxido la máscara (que hace de cliché), y se ilumina con luz ultravioleta.
- Se ataca la resina no polimerizada.
- Se ataca el óxido, que sólo desaparecerá de donde la resina no se polimerizó.
- Cuando la máscara de óxido ha sido usada, se elimina completamente el óxido.