

Fabricación de un circuito integrado

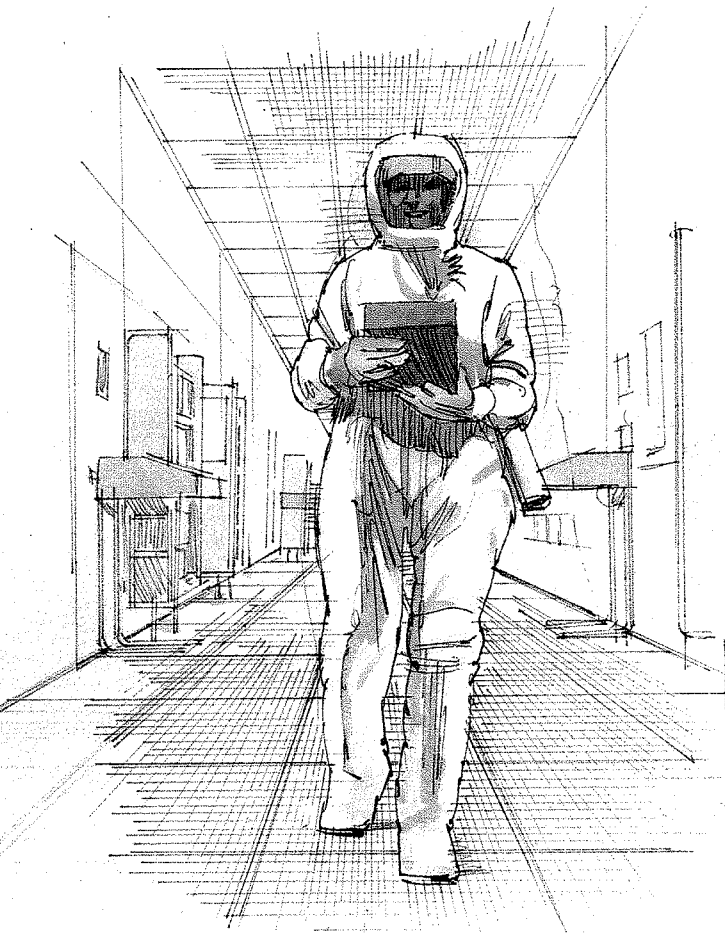
No sería posible la técnica digital moderna sin los microcircuitos de silicio. ¿Cómo se fabrican esas miniaturas?

Craig R. Barrett

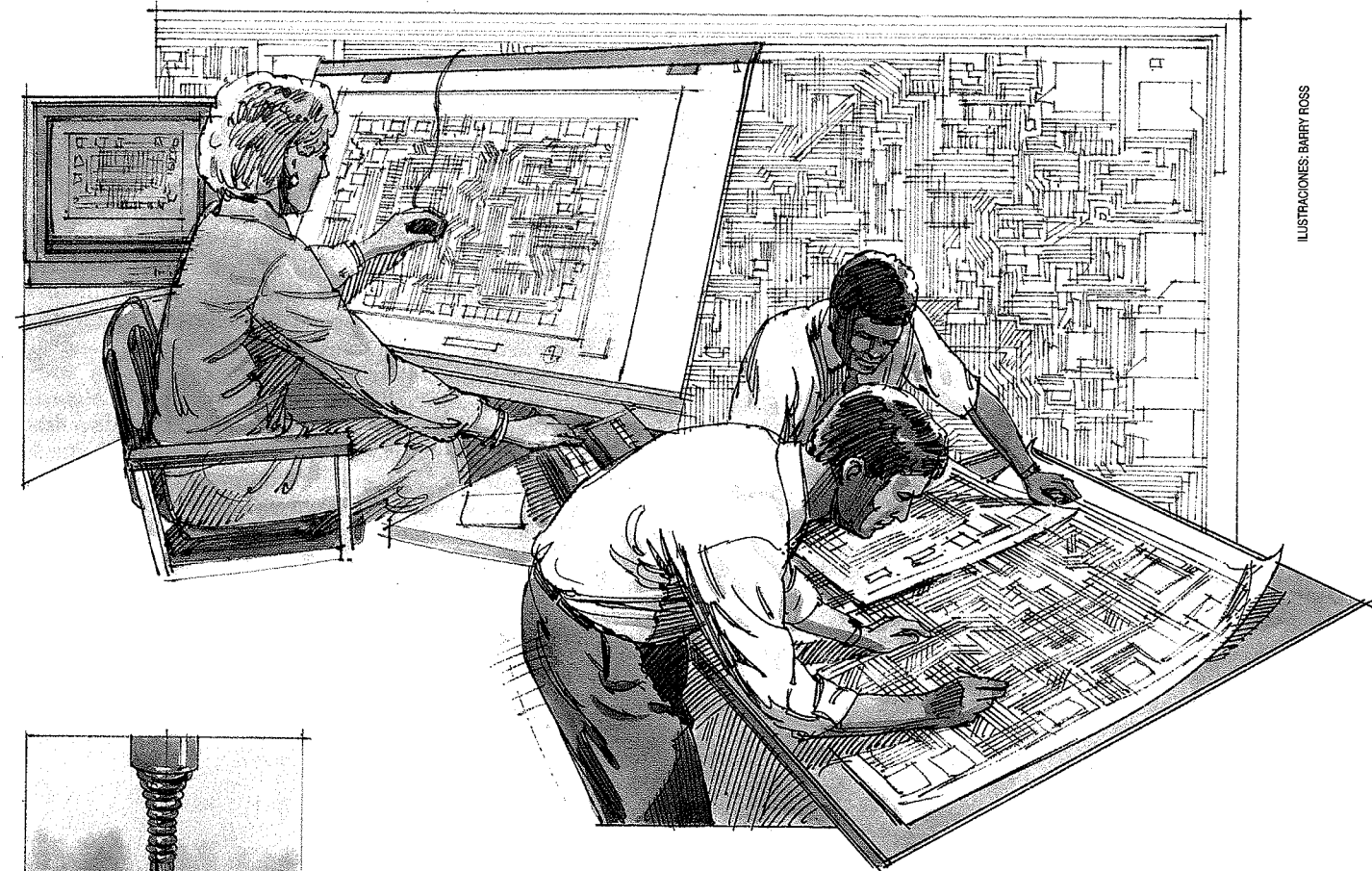
El dispositivo en que se fundamenta el mundo digital es el circuito integrado, un cuadrado diminuto de silicio que alberga millones de transistores. Se trata, probablemente, del artefacto más complejo jamás creado por los humanos. Aunque plano en apariencia, forma una estructura tridimensional, construida con parsimonia depositando sobre un sustrato de silicio finas películas de materiales que, ora conducen, ora aíslan, la electricidad. Estas películas, ensambladas según patrones elaborados de antemano con el mayor cuidado, forman los transistores, que funcionan como interruptores encargados de controlar el flujo de electricidad a través del circuito o "chip". La apertura y cierre de estos interruptores permiten la manipulación del código binario subyacente a todo cuanto hace un ordenador.

La construcción de un chip requiere numerosos procesos fabriles, cuya realización exige semanas. Para que el microcircuito opere, la ejecución de cada paso ha de ser perfecta. Las condiciones son muy estrictas. Por ejemplo, dado que una mota de polvo puede echar a perder todo un chip, la fabricación ha de hacerse en una "sala blanca" que no contenga más de 30 partículas —de tamaño inferior a 1 micra— por metro cúbico de aire. Como referencia, en una de nuestras salas de estar se cuentan entre 3 y 30 millones de partículas por metro cúbico de aire. Gran parte del equipo necesario para la fabricación de microcircuitos hace uso de la técnica más avanzada, lo cual se traduce en que las factorías de circuitos integrados, en las instalaciones más modernas y perfectas, requieren inversiones astronómicas.

Una técnica fundamental en la fabricación de microcircuitos es el proceso "planar", ideado en 1957 por Jean Hoerni, de Fairchild Semiconductor. El proceso planar proporcionaba un método para levantar una estructura estratificada sobre una base, o sustrato, de silicio. Dicha técnica fue crucial para el desarrollo del primer circuito integrado, creado por Robert N. Noyce, en 1958. (Más



tarde, Noyce sería cofundador, con Gordon E. Moore, de Intel Corporation, la compañía que inventó el microprocesador y se convirtió en principal proveedora de semiconductores.) La técnica planar tendía un puente que iba del transistor al circuito integrado, y abrió el camino para el proceso de manufactura de los microcircuitos actuales. Tal proceso requiere centenares de pasos, que cabe agrupar en unas cuantas operaciones básicas.

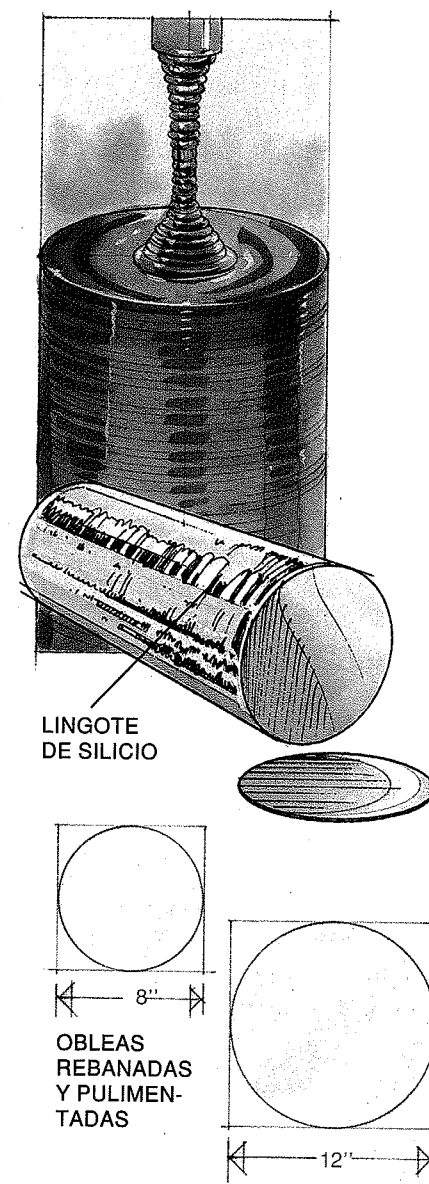


Diseño del microcircuito

La primera operación es el diseño del microcircuito. Cuando es preciso construir decenas de millones de transistores en un cuadrado de silicio que tiene el tamaño de la uña de un niño, la ubicación de los transistores y las interconexiones entre ellos ha de preverse con sumo detalle. Cada transistor ha de responder a la función asignada; cada combinación de grupos de transistores ha de crear inversores, sumadores, decodificadores u otros elementos circuitales. El proyectista no debe olvidar la finalidad prevista para el chip. Mientras que un microprocesador ha de encargarse de ejecutar las instrucciones en un ordenador, los chips de memoria tienen por misión almacenar datos. La estructura de ambos tipos de microcircuito difiere bastante. Debido a la complejidad de los chips actuales, el trabajo de diseño se realiza por ordenador, aunque los ingenieros repasan en copia ampliada el diagrama estructural del microcircuito.

El cristal de silicio

El material de base para la construcción de circuitos integrados es un cristal de silicio. El silicio, que es después del oxígeno el elemento más abundante en la corteza terrestre, constituye el principal ingrediente de la arena de las playas. Es un semiconductor natural, lo que significa que podemos trabajarlo y convertirlo en un aislante o en un conductor. Los aislantes, como el vidrio, impiden el paso de la electricidad; los conductores, como el cobre, permiten el paso de la electricidad a través de ellos. Para formar un cristal, el silicio en bruto obtenido de rocas cuaríferas se somete a un tratamiento con productos químicos que eliminan las impurezas, hasta lograr un material que es silicio casi al 100 por cien. Con este silicio purificado, fundido, se forman cristales cilíndricos o lingotes. Los lingotes son rebanados en obleas, del orden de décimas de milímetro. En un proceso de "planarización", se pulimentan las obleas con una lechada abrasiva hasta lograr una superficie impecable y lisa, como un espejo. El diámetro de las obleas es de unos 300 mm. El aumento de la oblea, al permitir fabricar de una vez un número mayor de microcircuitos, abarata los costes.

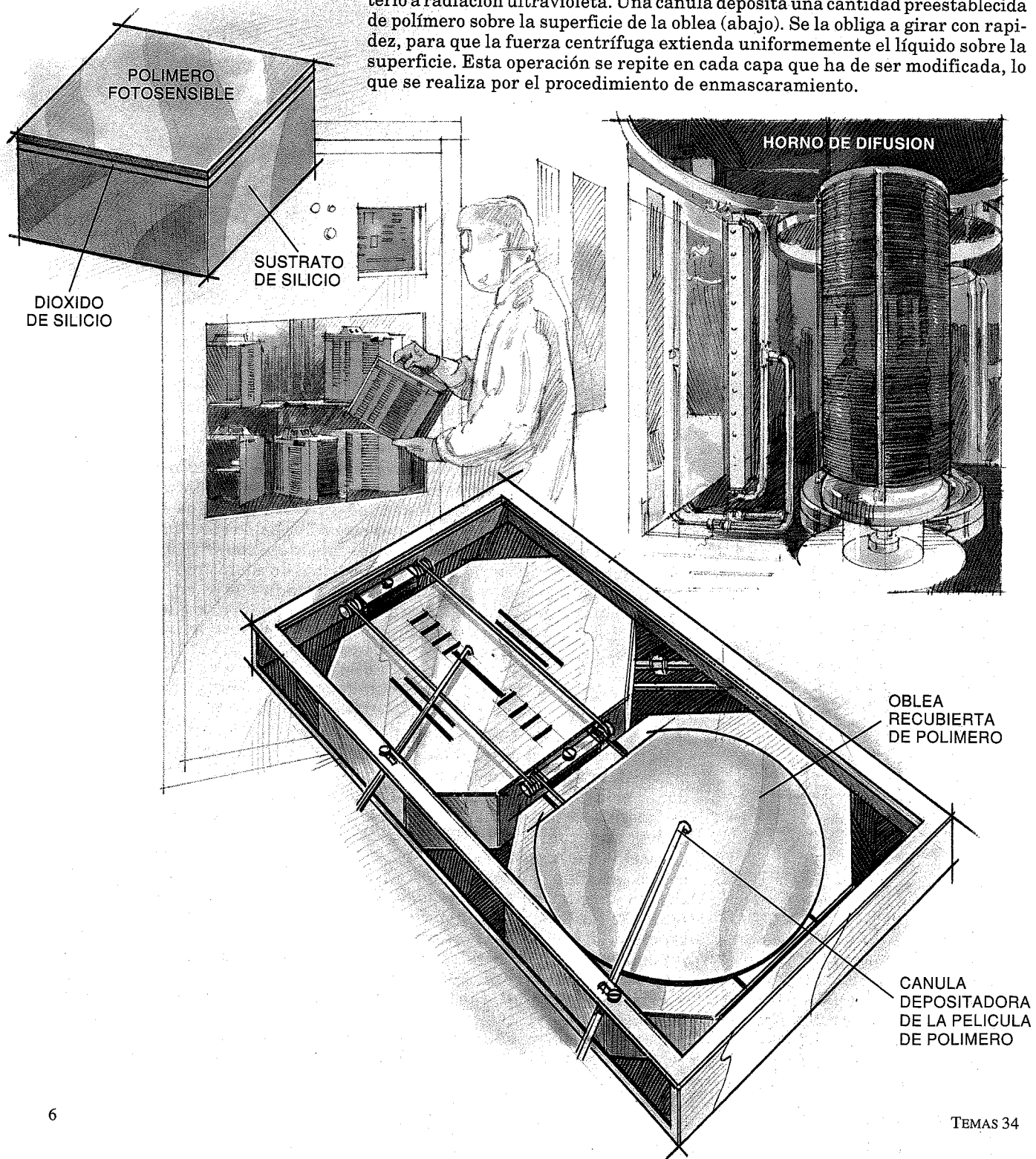


Los primeros estratos

Preparada la oblea, comienza la construcción de los circuitos en el chip. La producción de los transistores y de sus interconexiones requiere cierto número de pasos fundamentales, que han de repetirse muchas veces. Los microcircuitos complejos constan de 20 estratos o más, y pueden exigir varios centenares de pasos distintos para ir construyendo los estratos uno por uno.

La primera capa es de dióxido de silicio, material que no conduce la electricidad y actúa, por consiguiente, de aislante. Para crearla, las obleas se introducen en un horno de difusión (arriba, a la derecha) que es, en esencia, un horno de alta temperatura donde debe desarrollarse una película de óxido sobre la superficie de la oblea.

La oblea, retirada del horno, se encuentra lista para el primer paso de configuración fotolitográfica. Se aplica a la superficie una capa de un líquido polimérico viscoso y sensible a la luz ("fotorresistivo") que se torna soluble al someterlo a radiación ultravioleta. Una cánula deposita una cantidad preestablecida de polímero sobre la superficie de la oblea (abajo). Se la obliga a girar con rapidez, para que la fuerza centrífuga extienda uniformemente el líquido sobre la superficie. Esta operación se repite en cada capa que ha de ser modificada, lo que se realiza por el procedimiento de enmascaramiento.

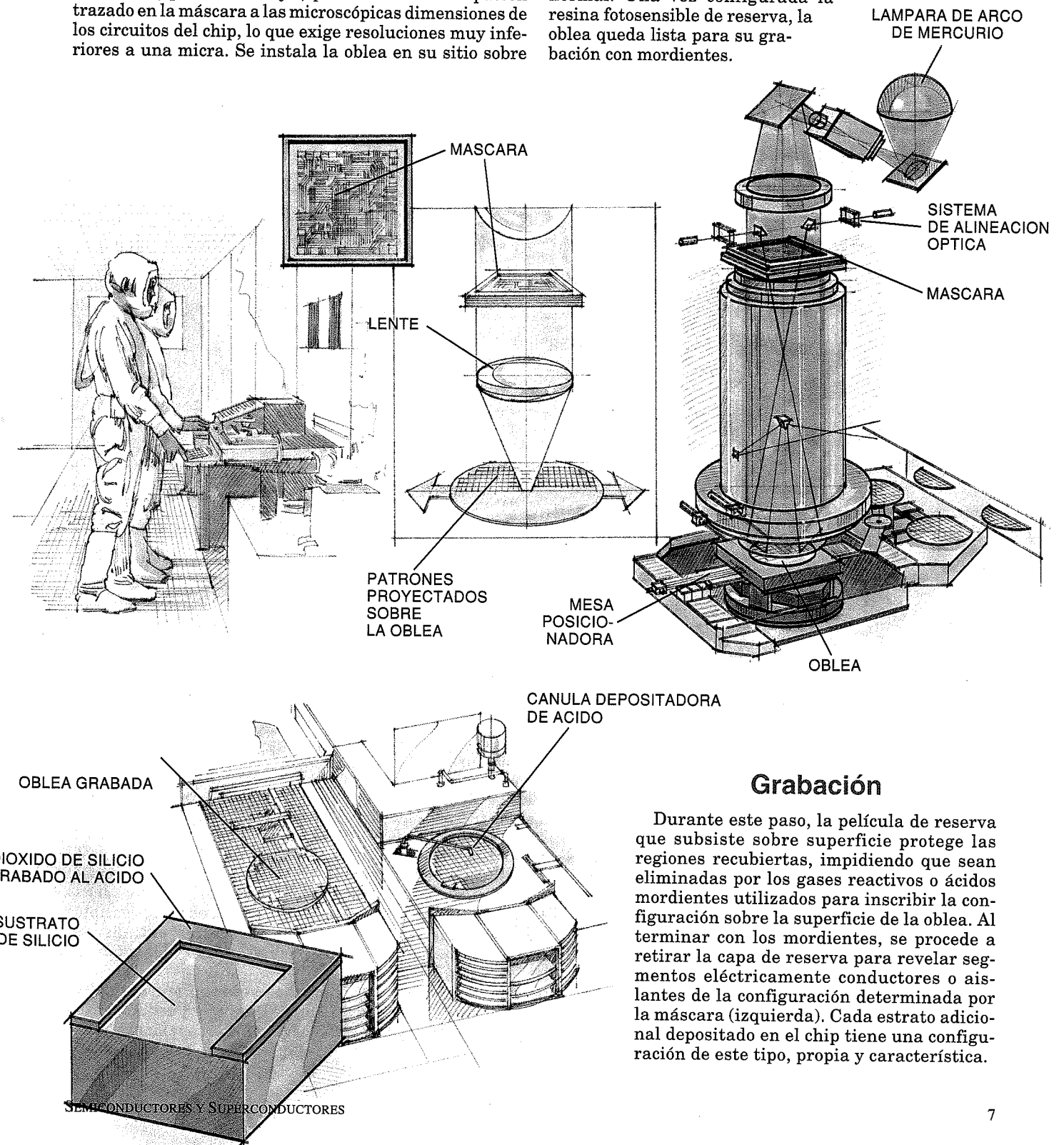


Máscaras

Las máscaras son dispositivos a través de los cuales se hace pasar luz ultravioleta para definir la configuración circuital de cada estrato del microcircuito. Por tratarse de una configuración intrincada, que debe quedar definida y situada sobre el chip con gran precisión, la distribución de espacios opacos y transparentes en la máscara ha de establecerse con máximo rigor en la fase de diseño del microcircuito.

La imagen de la máscara se transfiere a la oblea mediante una máquina posicionadora controlada por ordenador, que la desplaza paso a paso. Dispone de unos sistemas ópticos muy perfectos (abajo), que han de reducir el patrón trazado en la máscara a las microscópicas dimensiones de los circuitos del chip, lo que exige resoluciones muy inferiores a una micra. Se instala la oblea en su sitio sobre

una mesa desplazable, bajo el sistema óptico. La luz ultravioleta emitida por una lámpara de arco o por un láser atraviesa los espacios transparentes del motivo trazado en la máscara e ilumina la película de polímero fotosensible que recubre a uno de los chips. Seguidamente, la mesa de posicionado desplaza la oblea la distancia exacta para situar otro chip bajo la luz. En cada chip, las regiones de la capa fotosensible que han recibido iluminación se vuelven solubles, lo que permite eliminarlas mediante disolventes orgánicos, quedando revelada la configuración que les ha sido proyectada, como en una película fotográfica normal. Una vez configurada la resina fotosensible de reserva, la oblea queda lista para su grabación con mordientes.

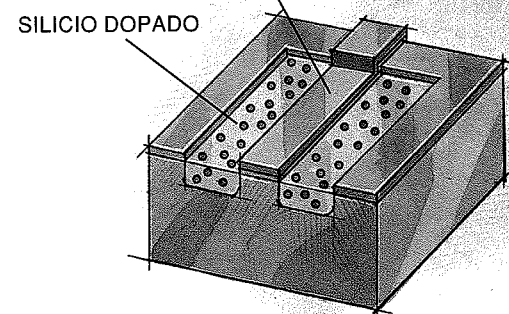
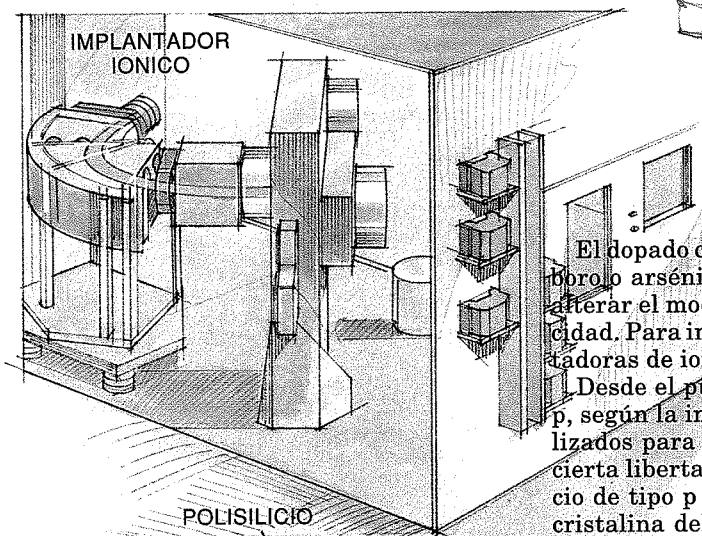
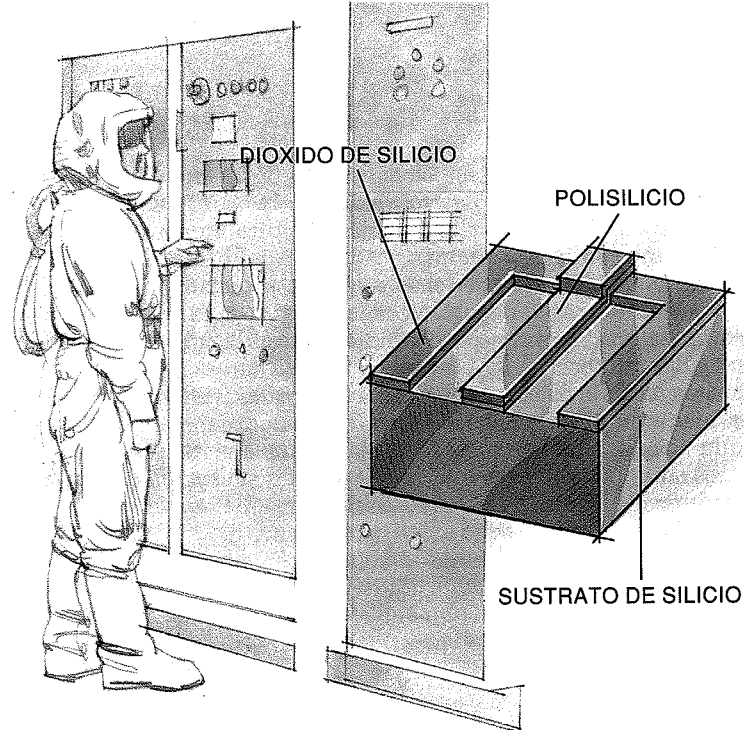


Grabación

Durante este paso, la película de reserva que subsiste sobre superficie protege las regiones recubiertas, impidiendo que sean eliminadas por los gases reactivos o ácidos mordientes utilizados para inscribir la configuración sobre la superficie de la oblea. Al terminar con los mordientes, se procede a retirar la capa de reserva para revelar segmentos eléctricamente conductores o aislantes de la configuración determinada por la máscara (izquierda). Cada estrato adicional depositado en el chip tiene una configuración de este tipo, propia y característica.

Adición de estratos

Ulteriores pasos de enmascaramiento y grabación van depositando nuevos materiales en el chip. Entre ellos se cuentan polisilicio, así como diversos óxidos y conductores metálicos de aluminio y tungsteno. Para impedir la formación de compuestos espurios durante las etapas siguientes podría requerirse la aportación de otros materiales, conocidos como barreras de difusión. Sobre cada estrato de material, es creada, por enmascaramiento y grabación, una cierta configuración de regiones conductoras y no conductoras (derecha). En conjunto, estas configuraciones, alineadas y superpuestas, definen los circuitos del chip, creando una estructura tridimensional. Pero se necesita aún un ajuste fino, que se consigue mediante impurificación controlada, o "dopado".



Dopado

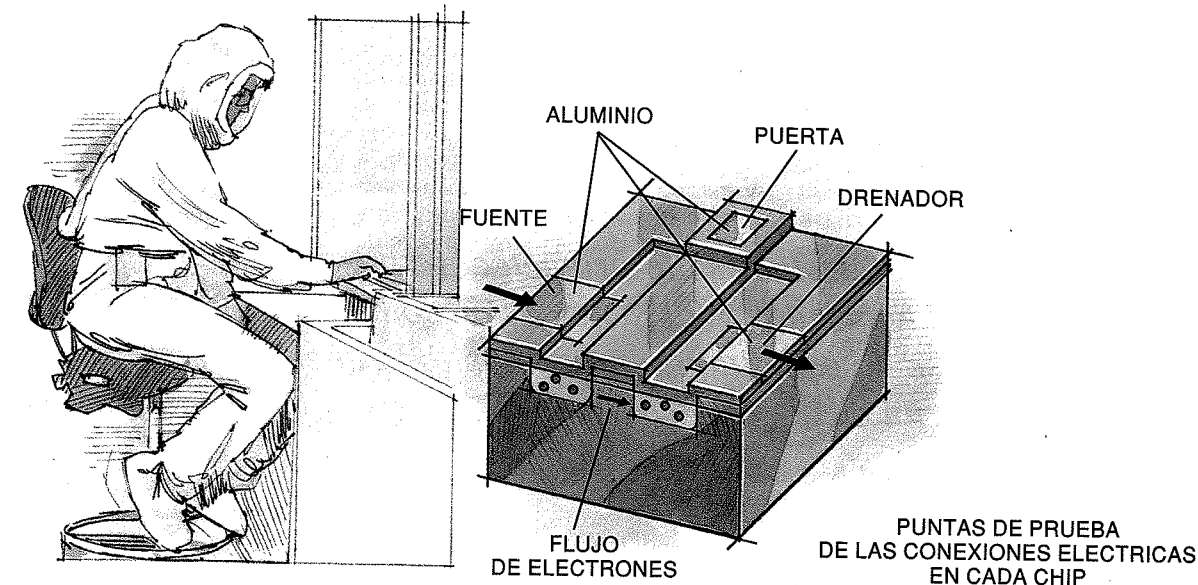
El dopado consiste en la adición deliberada de impurezas químicas, como boro o arsénico, a determinadas regiones de la oblea, con el propósito de alterar el modo en que el silicio de la zona impurificada conduce la electricidad. Para inyectar estas impurezas en el chip están las máquinas implantadoras de iones.

Desde el punto de vista eléctrico, el silicio puede ser de tipo n o de tipo p, según la impureza añadida. Los átomos de los materiales dopantes utilizados para crear silicio de tipo n poseen un electrón extra, que goza de cierta libertad de movimiento. Los átomos impurificadores para crear silicio de tipo p están faltos de un electrón; al quedar incrustados en la red cristalina del silicio forman un "hoyo" o "hueco" eléctrico. En los puntos donde ambos tipos de silicio quedan en contacto, los electrones supernumerarios del silicio de tipo n pueden fluir hasta el de tipo p y ocupar los huecos.

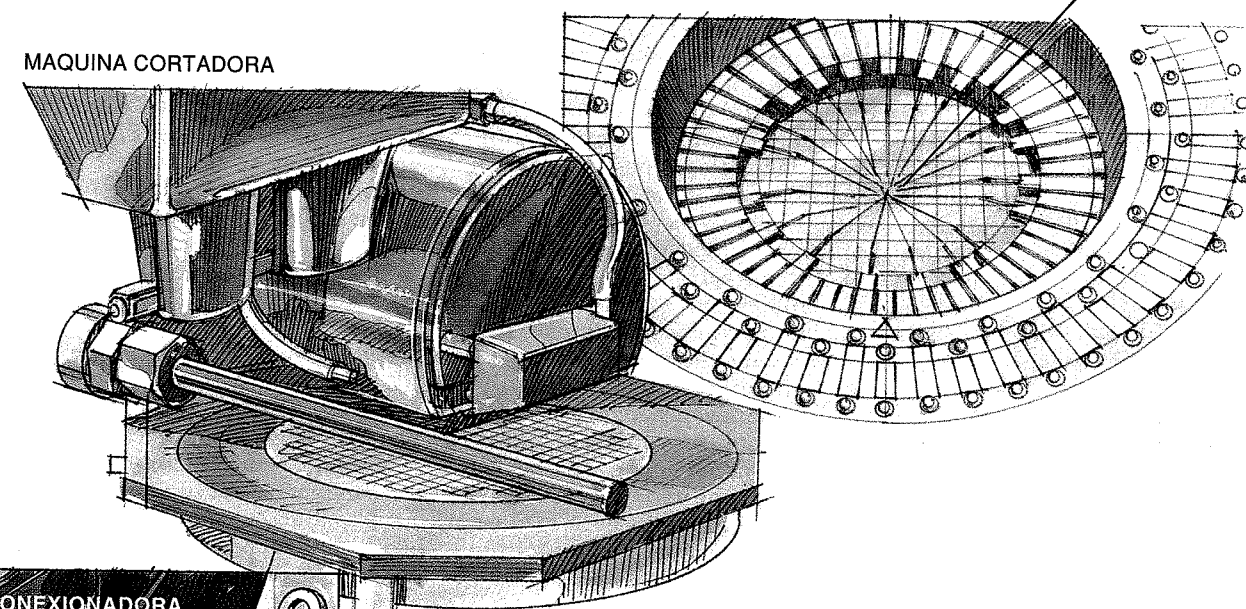
Este flujo de electrones no es indefinido. Los iones dotados de carga positiva del silicio de tipo n y los portadores de carga negativa del silicio tipo p no tardan en crear una fuerza eléctrica que impide un ulterior flujo neto de electrones desde la región n hacia la región p.

El material situado en la base del chip es silicio de tipo p. Durante la fabricación, en uno de los pasos de grabación se retiran ciertas regiones de las capas de polisilicio y de dióxido de silicio previamente depositadas sobre la base de silicio puro, dejando así desnudas dos franjas de silicio de tipo p. Separándolas, queda una franja que conserva todavía su capa de polisilicio conductor; se trata de la "puerta" del transistor. El material dopante aplicado ahora a las dos franjas de silicio p las transforma en silicio de tipo n. Al aplicar a la puerta una carga positiva son atraídos los electrones situados bajo ella en el sustrato de silicio del transistor. Estos electrones abren un canal entre una de las franjas tipo n (fuente o surtidor) y la otra (el drenador). Una tensión positiva aplicada al drenador produce un paso de corriente eléctrica desde la fuente hacia el drenador. En esta situación, el transistor está en conducción; es un interruptor cerrado. Una carga negativa en la puerta desaloja los electrones del canal, impidiendo así el paso de corriente desde la fuente al drenador. Ahora el transistor está "en corte": es un interruptor abierto. Merced a estas conmutaciones de cierres y aperturas, el transistor representa los unos y ceros que constituyen el código binario, el lenguaje de los ordenadores.

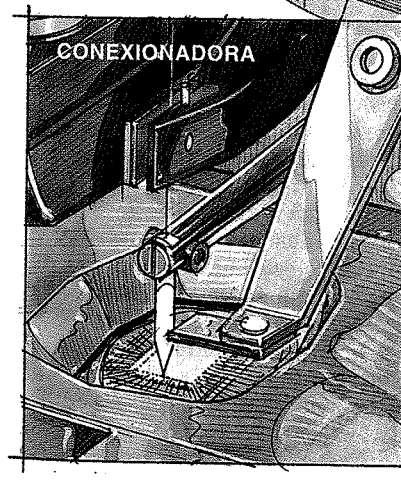
Las operaciones anteriores, realizadas muchas veces en muchos estratos, crean en el chip su miríada de transistores. Para que puedan constituir un circuito integrado, falta por establecer las interconexiones entre transistores.



MAQUINA CORTADORA



CONEXIONADORA



Interconexiones

Este último paso comienza con operaciones adicionales de enmascaramiento y grabación que abren una delgada capa de contactos eléctricos entre los estratos del chip. Mediante fotolitografía, se deposita y configura luego una película de aluminio, creando una suerte de cableado que interconecta los transistores del chip (arriba). La razón de utilizar aluminio para esta función se debe a que el aluminio establece buen contacto eléctrico con el silicio y se une bien con el dióxido de silicio.

Con este paso concluye el procesamiento de la oblea. Acto seguido, por medio de diminutas puntas de prueba eléctricas, los microcircuitos pasan, uno por uno, la prueba de ensayo, para confirmar el correcto funcionamiento de todas sus conexiones (arriba, a la derecha). Después, una máquina cortadora secciona la oblea en chips (arriba, a la izquierda); se separan las piezas correctas de las defectuosas. Los chips útiles se montan en unidades de encapsulamiento provistas de hilos metálicos. Después, máquinas conectoras de hilos (a la izquierda) sujetan estos hilos metálicos a los chips. Los contactos eléctricos entre la superficie del microcircuito y las patillas de los contactos exteriores se establecen mediante hilos muy delgados de oro o aluminio. Terminado el encapsulamiento, los microcircuitos terminados están listos para cumplir sus funciones digitales.