

## 51. MÁSCARA DE FOTOLITOGRAFÍA

Ref.- ELECTRONyCOM-10

La fotolitografía (de lithos=piedra y graphos=dibujo o escritura, o sea, dibujar sobre piedra) es uno de los procesos utilizados para plasmar los patrones de los circuitos integrados en las obleas de silicio y es un proceso fundamental en la fabricación de la industria de semiconductores. Consiste en la transferencia de un patrón definido a una superficie sensible a la luz, como puede ser una oblea (un sustrato de silicio, vidrio, zafiro, etc.) que está recubierta con una capa fotosensible. Estos procesos fotolitográficos se asemejan a los procesos litográficos empleados en trabajos de impresión. Los **procesos de fotolitografía** incluyen varias etapas clave que se realizan de manera secuencial para definir patrones en la capa fotosensible de forma cíclica como se puede observar en la Figura 1. Por tanto, para fabricar un circuito integrado se deben de realizar de forma iterativa y cíclica una serie de pasos que incluyen:

- Preparación del sustrato: El sustrato, generalmente silicio, se limpia (pulido) y recibe capas de acondicionamiento para mejorar la adhesión de la capa fotosensible. También se puede realizar una deposición o modificación del material del sustrato (Pasos 1, 2, y 3 en la Figura 1).
- Recubrimiento: Se aplica una capa de un material fotosensible, llamada fotoresina, sobre el sustrato mediante técnicas como "spin-coating" en las que el material se aplica al centro del sustrato y se deja que se extienda uniformemente sobre la superficie mediante fuerzas de aceleración centrípeta de forma que se cree una superficie uniforme (Paso 4).



Figura 1. Ciclo de fabricación de un circuito integrado. La fabricación de un chip es un proceso iterativo que involucra diferentes pasos (deposición de dieléctricos, grabado, litografía,

# ANTIGUOS INSTRUMENTOS DE LABORATORIO DE FÍSICA DE LA UNIVERSIDAD DE SALAMANCA

- Exposición o fotolitografía: Se expone la capa fotosensible de la oblea a una fuente de luz ultravioleta a través de una **máscara de fotolitografía** que contiene el patrón a transferir a través de una lente. Donde la luz incide, la fotoresina se vuelve soluble o insoluble, dependiendo del tipo de fotoresina utilizado. De forma mecánica el diseño de la máscara se transfiere sobre toda la superficie de la oblea (Paso 5). Por tanto, con técnicas similares al revelado fotográfico se transfiere un patrón (que marca el diseño de los diferentes elementos) desde una fotomáscara a la superficie de la oblea.
- Revelado: Tras la exposición, se aplica un revelador químico que elimina el material fotoresina expuesto o no expuesto, revelando así el patrón definido por la máscara en la capa de material de la oblea (Paso 6).
- Grabado o etching: En algunos casos, se realiza un proceso de etching para transferir el patrón a la capa inferior, ya sea mediante grabado químico o físico.
- Procesos de fabricación: en las zonas expuestas se pueden ejecutar diferentes procesos en cada ciclo, por ejemplo: introducción de dopantes mediante difusión o implantación iónica, deposición de dieléctricos, ejecución de las metalizaciones, etc. (Paso 7)
- Lavado: se retira la resina sobrante y el ciclo vuelve a comenzar (Paso 8) hasta que se realizan todos los procesos necesarios para el tipo de circuito integrado diseñado.

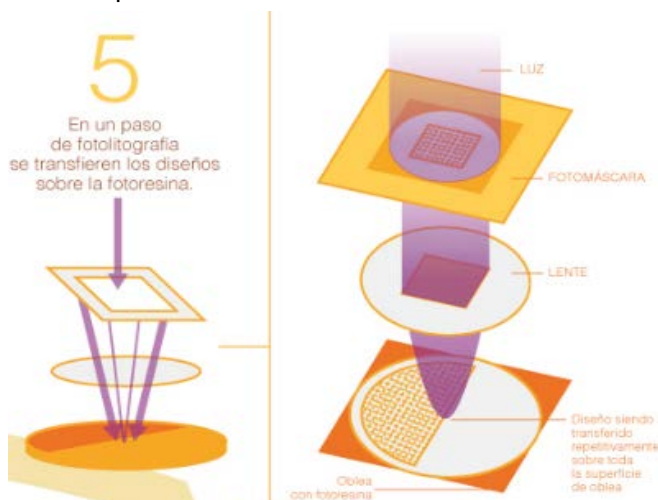


Figura 2. Proceso de fotolitografía.

En cuanto a las **máscaras fotolitográficas**, son componentes críticos en el proceso de fotolitografía, ya que definen los patrones que se proyectan sobre la capa fotosensible. Estas máscaras son diseñadas con software especializado y se crean mediante técnicas de litografía



Figura 3. Máscara de Fotolitografía cedida por el Instituto de Microelectrónica de Barcelona. Centro Nacional de Microelectrónica. Barcelona. Máscara de fabricación de diodos PIN en sustratos de Carburo de Silicio (SiC). Definición de los contactos metálicos.

# ANTIGUOS INSTRUMENTOS DE LABORATORIO DE FÍSICA DE LA UNIVERSIDAD DE SALAMANCA

avanzada. Su calidad y precisión afectan a la funcionalidad y rendimiento de los componentes electrónicos fabricados.

**Historia de la fotolitografía: Desde el proceso planar a la actualidad:** El desarrollo de las fotomáscaras no puede ser atribuido a una única persona, sino que es el resultado de contribuciones colectivas de muchos ingenieros y científicos a lo largo del tiempo. Sin embargo, algunas figuras clave y empresas pioneras desempeñaron roles cruciales en su desarrollo.

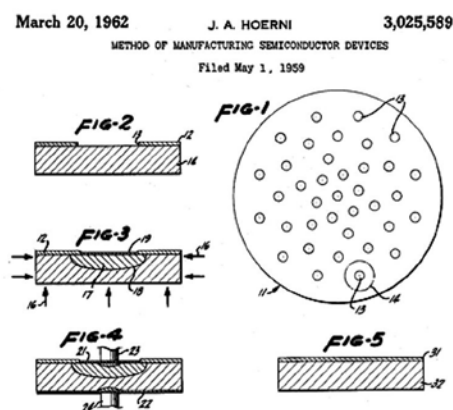


Figura 4. Jean Hoerni con una geometría de un transistor en el fondo. Imagen de la patente de Hoerni del proceso de fabricación planar, 1962

El concepto de utilizar máscaras para transferir patrones en la fabricación de dispositivos electrónicos tiene sus raíces en las primeras técnicas de grabado químico y la fotolitografía, que evolucionaron a partir de métodos utilizados en la industria fotográfica. En la década de 1950, Jean Hoerni, uno de los miembros fundadores de Fairchild Semiconductor, desarrolló el **proceso planar**, que incluía el uso de máscaras fotolitográficas para definir áreas específicas de dopaje en las obleas de silicio. Este avance fue fundamental para la creación de los primeros circuitos integrados. En la misma época, Robert Noyce, también cofundador de Fairchild Semiconductor, junto con Jack Kilby de Texas Instruments, fueron pioneros en el desarrollo de los primeros circuitos integrados. La implementación de máscaras fotolitográficas fue crucial en sus trabajos para fabricar dispositivos semiconductores de manera reproducible y eficiente. Fairchild Semiconductor, bajo la dirección de Noyce y Hoerni, perfeccionó las técnicas de fotolitografía y el uso de máscaras en la producción de semiconductores. Las máscaras de la década de 1950 eran generalmente de vidrio o cuarzo con patrones grabados en cromo, y se utilizaba luz ultravioleta (UV) para transferir patrones de circuitos a una oblea de silicio, pero la resolución era limitada (tamaño de pocos micrómetros). Su precisión y calidad mejoraron con el tiempo a medida que avanzaban las técnicas de fabricación y los equipos de fotolitografía. En las décadas de 1970 y 1980, se empezaron a utilizar longitudes de onda más cortas, mejorando la resolución. La introducción de la luz ultravioleta profunda (DUV) permitió la creación de patrones

# ANTIGUOS INSTRUMENTOS DE LABORATORIO DE FÍSICA DE LA UNIVERSIDAD DE SALAMANCA

---

submicrométricos, esenciales para los primeros microprocesadores y memorias de alta densidad. A medida que la industria avanzaba hacia escalas nanométricas, se desarrollaron nuevas técnicas para superar los límites de difracción de la luz, como la litografía extrema ultravioleta (EUV). Esta técnica enfrenta desafíos técnicos importantes, pero es vital para la producción de nodos de tecnología de 7 nm y más pequeños. Además de la fotolitografía óptica, se han explorado otras técnicas como la litografía por haz de electrones (EBL) y la litografía nano impresora. En resumen, la evolución de la fotolitografía ha sido impulsada por la necesidad constante de aumentar la densidad de los transistores y mejorar el rendimiento de los circuitos integrados. Desde los días de la luz UV hasta la adopción de la EUV, cada avance ha requerido innovaciones significativas en óptica, materiales y técnicas de fabricación para seguir el ritmo de la Ley de Moore y las crecientes demandas de la industria de semiconductores para la fabricación de microchips.

En un proceso de fabricación de semiconductores actual, como el utilizado por Intel, ADM, etc. se requieren múltiples etapas de máscaras fotolitográficas para definir los patrones complejos presentes en un circuito integrado, y las etapas típicas podrían ser las siguientes:

- **Máscara de Patrón de Contacto/Agua:** Define la ubicación de los contactos en el sustrato de silicio, que son esenciales para conectar componentes como transistores y vías de interconexión.
- **Máscara de Patrón de Transistores:** En esta etapa, se utilizan máscaras específicas para definir la estructura y disposición de los transistores en el sustrato de silicio.
- **Máscaras de Interconexión:** Sirven para definir las vías de interconexión entre los componentes del circuito, permitiendo la comunicación y transferencia de datos.
- **Máscaras de Capas de Aislamiento:** Definen las capas aislantes que separan las interconexiones metálicas y evitan cortocircuitos entre los componentes del chip.
- **Máscaras de Capas Metálicas:** Para constituir las vías de interconexión metálicas entre los elementos del circuito, como las líneas de señal y potencia.
- **Máscaras de Capas de Contacto:** Definen los contactos entre las capas metálicas y las capas semiconductoras para garantizar la conectividad eléctrica en el chip.
- **Máscaras de Pruebas y Validación:** Son máscaras adicionales para la verificación de la calidad y funcionamiento del chip, así como para la realización de pruebas funcionales.

La evolución continua de las tecnologías de fotolitografía y las máscaras fotolitográficas es fundamental para seguir avanzando en la miniaturización y la complejidad de los dispositivos electrónicos modernos.

- <https://granrevoluciondelaelectronica.usal.es/chip/video/>
- <https://www.computerhistory.org/siliconengine/invention-of-the-planar-manufacturing-process/>
- <https://blogs.publico.es/ignacio-martil/2021/12/10/fotolitografia-el-cuello-de-botella-de-la-fabricacion-de-chips/>
- <https://youtu.be/oBKhN4n-EGl>
- Véase también “Circuitos integrados años 70 y 80”