

# FOTOLITOGRAFÍA

Ing. Mariano Morel (ICYTE - FI - UNMdP)

Ciudad de Mar del Plata, Argentina

marianomorel@fi.mdp.edu.ar

## PROCESOS SEMICONDUCTORES: TRABAJO #1

MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA - FI UBA

**Resumen**—La fotolitografía es una técnica fundamental en la fabricación de dispositivos semiconductores, que permite la creación de patrones microscópicos precisos en superficies de sustratos. Este documento es un resumen de los procesos y aplicaciones de la fotolitografía en la industria de semiconductores, que además busca señalar las áreas de investigación y desarrollo futuro. Se discuten las tecnologías y técnicas de fotolitografía más avanzadas, como la litografía de rayos X y la litografía ultravioleta extrema (EUV), junto con sus aplicaciones y desafíos asociados. También se examinan los materiales utilizados en el proceso de fotolitografía y se proporciona una visión general de los tiempos y costos asociados.

**Index Terms**—Fotolitografía, semiconductores, microelectrónica, circuitos integrados, EUV.

### I. CRONOLOGÍA TECNOLÓGICA

Los avances de la fotografía desde principios del siglo XX, el desarrollo de películas fotosensibles y técnicas de revelado, proporcionaron la base para la fotolitografía, permitiendo la proyección de imágenes precisas en superficies sensibles a la luz. El concepto de fotolitografía tiene sus raíces en la primera mitad del siglo XX, cuando se comenzaron a explorar técnicas para transferir patrones precisos a superficies para diversas aplicaciones, como la fabricación de circuitos eléctricos y dispositivos ópticos. A medida que la industria de semiconductores comenzó a desarrollarse en las décadas de 1950 y 1960, surgió la necesidad de crear estructuras microscópicas precisas en las superficies de silicio y otros materiales semiconductores, por lo que la fotolitografía fue de gran y total utilidad.

La primera técnica de fotolitografía utilizada en la fabricación de semiconductores fue la *fotolitografía de contacto* (FIG. 1). En este método, una máscara fotográfica con determinado patrón, se colocaba directamente sobre la superficie del sustrato, recubierto de un material fotosensible llamado fotoresist que se exponía a la luz. Como punto negativo, este proceso producía un deterioro en la oblea y en la máscara. Un proceso similar mejorado contra el deterioro, era el proceso de fotolitografía por proximidad, pero como contrapartida tenía una disminución en la definición de la imagen. Para la década de los '80 se desarrolló la *fotolitografía de proyección* (FIG. 2). En este método cuya definición de línea era de 1-2 micrones, se utilizaba una lente para proyectar la imagen de la máscara sobre el sustrato, lo que permitía una mayor resolución y control sobre los patrones creados. Para las últimas tres décadas se desarrollaron técnicas de fotolitografía de múltiples pasos. Entre las décadas de 1990 y 2000, apareció la *litografía por haz de electrones* (FIG. 3) controlado el

haz por computadora, con definición en el orden de los 0.2 micrones con velocidades de producción baja, y por otra parte la litografía de rayos X (FIG. 4) de alta producción y bajo deterioro, cuyo desafío inicial fue que las máscaras absorbieran los rayos X [1]. Estas técnicas permitieron la creación de patrones aún más pequeños y complejos. Finalmente, por la década de 2010, la *litografía EUV* comenzó a implementarse comercialmente en la fabricación de chips de semiconductores de última generación, utilizando luz ultravioleta extrema con una longitud de onda mucho más corta que la fotolitografía convencional. Aunque inicialmente enfrentó desafíos de rendimiento y costo, los avances en la tecnología EUV han permitido la producción en masa de chips con nodos de proceso de unos pocos nanómetros, es decir permitió una mayor resolución y la capacidad de definir características mucho más pequeñas en los chips.

Cabe mencionar, que existe en la fabricación de semiconductores moderna, otras técnicas y tecnologías de fotolitografía tal como la *Litografía por Inmersión en Agua* [2], en la cual se utiliza agua entre la lente y el sustrato para mejorar la resolución, permitiendo una mayor profundidad de enfoque y una mejor resolución. Esta técnica es adecuada para la fabricación de chips de alta densidad.

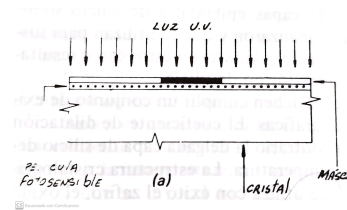


Figura 1. Fotolitografía de Contacto

### II. PROCESO DE FABRICACIÓN

#### II-A. Fundamentos

El método base en la técnica de fotolitografía implica una serie de pasos fundamentales comenzando con un sustrato semiconductor (wafer), típicamente silicio, que se limpia y se recubre con una capa delgada de material fotosensible llamado fotoresist. El espesor típico del fotoresist puede estar entre 0,5 micrómetros y 1,5 micrómetros, aunque esto puede variar según el proceso utilizado y los requisitos de diseño del dispositivo. En aplicaciones de litografía de alta resolución, el espesor puede llegar a unos pocos cientos de nanómetros o incluso menos. Posteriormente, se coloca una máscara

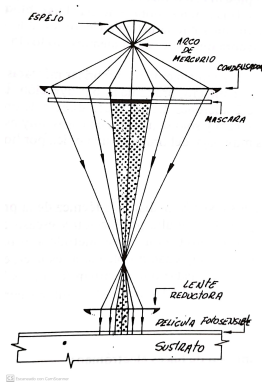


Figura 2. Fotolitografía de Proyección

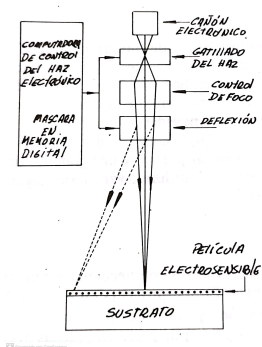


Figura 3. Fotolitografía de Haz de Electrones

fotográfica sobre el sustrato. Esta máscara contiene patrones precisos que se desean transferir al sustrato. La máscara está compuesta por sustrato de cuarzo o vidrio recubierto con una película metálica delgada y una capa de material fotosensible. La máscara y el sustrato se exponen a una fuente de luz ultravioleta. Los patrones en la máscara bloquean selectivamente la luz (concepto de ventanas), creando patrones de luz y sombra en la capa de fotoresist sobre el sustrato. El fotoresist puede ser *negativo* o *positivo* [3] dependiendo de como cambia su solubilidad a la exposición de luz. Una vez terminados estos pasos del proceso, el sustrato se sumerge en un solvente que elimina selectivamente el fotoresist expuesto a la luz, dejando los patrones deseados en la capa de fotoresist sobre el sustrato. Los patrones en la capa de fotoresist se transfieren al sustrato subyacente mediante procesos de grabado, como el grabado químico (con HF) o el grabado por plasma. Esto crea estructuras precisas en la superficie del sustrato, como líneas conductoras, transistores u otras características de circuitos microelectrónicos.

## II-B. Proceso y Máquina EUV

La técnica actual utilizada es la de fotolitografía EUV que conlleva muchos de los pasos fundamentales ya descritos como se describe en [4] o en tantos otros libros. A continuación mencionan brevemente los particulares a esta técnica y algunos números relevantes del proceso. Se comienza con la preparación del sustrato. Luego se genera un haz de luz ultravioleta extrema utilizando una fuente de plasma, con longitudes de onda muy cortas. Se agrega una máscara EUV que contiene el

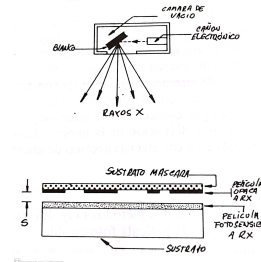


Figura 4. Fotolitografía de Rayos X

patrón que se desea transferir al sustrato, de material resistente a la intensa radiación EUV que proporcionar una alta precisión en la transferencia del patrón. Posteriormente, el haz de luz pasa a través de la máscara, que proyecta el patrón sobre la oblea recubierta de fotoresist. El patrón en la máscara se reduce significativamente de tamaño antes de proyectarse en la oblea debido a la longitud de onda ultracorta de la luz EUV. Finalmente, la luz EUV expone el fotoresist en la oblea, creando un patrón en la capa fotosensible. Después de la exposición, la oblea se somete a un proceso de revelado químico que elimina el fotoresist expuesto, dejando el patrón deseado en la oblea. Es posible luego, efectuar un grabado químico para eliminar material no deseado o la deposición de capas adicionales de material para construir estructuras tridimensionales.

El equipo para este fin (que ronda los 150 millones de euros), posee una gran cámara de vacío, dentro de la que se instala todo el sistema óptico y las etapas de máscara y obleas. Dentro del equipo hay un disco que desplaza las obleas dentro y fuera del equipo. Este subsistema se encarga de proyectar la luz UVE sobre la superficie de obleas que deben hacerlo con gran precisión, ya que hay que grabar imágenes en la oblea en escala nanométrica. Este disco tiene una masa muy grande para proporcionar una elevada inercia y estabilidad en sus movimientos. Estos equipos son muy pesados, en el orden de las decenas de toneladas. La máquina contiene brazos robóticos que mueven obleas y motores que aceleran el soporte de la máscara a unas decenas de veces la aceleración de la gravedad. El equipo contiene cientos de miles de piezas y cables. Un dato interesante, es que el calor de la luz UVE altera microscópicamente las dimensiones de los espejos donde se refleja, por lo que internamente debe ser corregido mediante sensores y actuadores. Además estos espejos tienen deterioro en el tiempo. Un dato no menos importante, es que la luz debe reflejarse en 12 lentes con una reflectividad del 70% en cada una, llegando a la oblea alrededor del 1.4% de la luz de la fuente. La pregunta es, porque es tan complejo este proceso y su máquina. Si bien la respuesta es amplia, hay dos factores relevantes, en primer lugar, la radiación UVE es difícil de generar de manera controlada. En segundo lugar, la radiación UVE es fácilmente absorbida por el aire y toda clase de materia sólida. Así es que se utilizan ópticas reflectantes y cámaras de vacío. Es necesario usar también, por cuestiones de absorción de luz, máscaras reflectantes. Algunos números para esta técnica: Oblea de silicio: 300mm de diámetro, de espesor de 750µm. Capa de fotoresist: 100-300nm de espesor.

Longitud de onda EUV: 13.5nm. Potencia de la fuente EUV: varios kilovatios. Tamaño de la máscara: 26 x 33mm. Patrón en la máscara: hasta 8nm. Reducción del patrón: de 4x a 10x. Tamaño del patrón: de 20-40nm. Grabado húmedo o grabado seco con plasma [3]. En la figura 5 se puede observar la maquina EUV y en la figura 6 la recorrido de la luz ultra violeta dentro de la maquina.

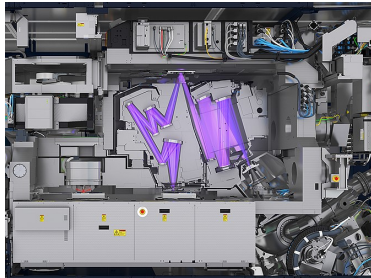


Figura 5. Maquina de Fotolitografía EUV

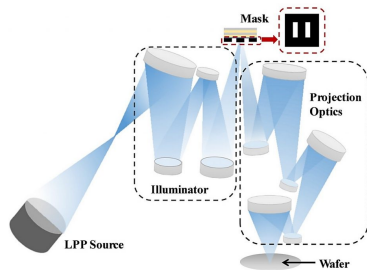


Figura 6. Camino de la luz ultra violeta

### III. EL MUNDO DEL SICILIO

Las fábricas de semiconductores que utilizan fotolitografía son numerosas y están distribuidas en todo el mundo. Algunas de las más importantes son: *Intel Corporation* tiene varias plantas de fabricación en todo el mundo, incluidas instalaciones en Estados Unidos (Oregón, Arizona, Nuevo México), Irlanda, Israel y China. Utilizan tecnologías de fotolitografía avanzada, incluida la litografía EUV. *Taiwan Semiconductor Manufacturing Company* es uno de los mayores fabricantes de semiconductores del mundo y tiene múltiples plantas de fabricación en Taiwán, China, Estados Unidos y otros lugares. Utilizan una variedad de técnicas de fotolitografía. Al igual que Intel, también utiliza fotolitografía EUV. *Samsung Electronics* tiene instalaciones de fabricación en Corea del Sur y otros países, donde producen chips de memoria y procesadores. *GlobalFoundries* tiene plantas de fabricación en Estados Unidos, Alemania y Singapur. *SK Hynix* es uno de los principales fabricantes de memoria DRAM y NAND Flash del mundo, con instalaciones de fabricación en Corea del Sur y China. *United Microelectronics Corporation* es otro fabricante de semiconductores con sede en Taiwán, con plantas de fabricación en Taiwán, China y Singapur.

De la mano con la mención de a estas empresas y la localización de sus fabricas, es necesario nombrar cual es la situación geopolítica en la fabricación de dispositivos electrónicos, el cual es un tema complejo y en constante evolución que

involucra una variedad de factores políticos, económicos y tecnológicos. La industria de semiconductores es altamente interdependiente a nivel global, con cadenas de suministro que se extienden a través de múltiples países. Muchas empresas occidentales diseñan chips de semiconductores pero los fabrican en plantas ubicadas en Asia, donde la mano de obra es más barata y la infraestructura de fabricación es más avanzada. Las tensiones geopolíticas entre países y regiones pueden tener un impacto significativo en la fabricación de dispositivos electrónicos. Las tensiones comerciales entre Estados Unidos y China han llevado a restricciones en el comercio y la tecnología que afectan a empresas como Huawei y otras empresas chinas de tecnología. Por otro lado muchos países están preocupados por garantizar su seguridad y soberanía tecnológica, lo que ha llevado a un aumento en la inversión en capacidades de fabricación y diseño de semiconductores en sus propios países. Esto incluye iniciativas como la *Made in China 2025* y la *European Chips Act* en Europa. La competitividad en la fabricación de dispositivos electrónicos está impulsada por la innovación en tecnologías de fabricación y diseño. Las empresas y los países que lideran en términos de innovación tecnológica tienen una ventaja competitiva en la industria global de semiconductores.

### IV. DESAFÍOS

La fotolitografía enfrenta varias limitaciones y desafíos que afectan su capacidad para seguir avanzando y mantener el ritmo con las demandas de la industria. Aunque se han logrado avances significativos en la mejora de la resolución de la fotolitografía, hay un límite físico impuesto por la longitud de onda de la luz utilizada en el proceso. A medida que los diseños de los circuitos se vuelven más densos y complejos, alcanzar resoluciones más altas se vuelve cada vez más desafiante. Por otra parte, la implementación de nuevas tecnologías de fotolitografía, como la litografía EUV, conlleva costos significativos de inversión en equipos y infraestructura. Además, el costo por oblea puede aumentar debido a la necesidad de máscaras y materiales fotosensibles más costosos.

Existen además desafíos técnicos en la fotolitografía EUV y la litografía de haz de electrones. Para la primera, la gestión de la reflectividad de las capas de metalización, y para la segunda, la necesidad de mejorar la velocidad y la eficiencia.

Otro aspecto importante es el impacto ambiental teniendo en cuenta que los procesos de fotolitografía pueden implicar el uso de productos químicos y materiales tóxicos, así como grandes cantidades de energía. Reducir el impacto ambiental de estos procesos y encontrar alternativas más sostenibles es otro desafío importante para la industria.

### REFERENCIAS

- [1] A. D. Tremosa, *Electrónica del Estado Sólido*, 2nd ed. by Marymar Buenos Aires, 1980.
- [2] X. Fu, Y. Huang, L. Hu, H. Xie, and W. Chen, "Flow behavior control in immersion lithography," *Flow Measurement and Instrumentation*, vol. 53, pp. 190–203, 2017, flow Control. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095559861630084X>
- [3] C. G. L. A. J. Galatro, C. Gayoso, *Microelectrónica - Circuitos Integrados CMOS Digitales, Teoría y Práctica*, S. de Informática y Desarrollo, Ed., 1994.
- [4] V. Bakshi, *EUV Lithography*, ser. SPIE Press monograph. SPIE Press, 2009. [Online]. Available: <https://books.google.com.ar/books?id=91XeKLC9MUEC>