

# Deposición, Metalización y Electromigración en Microelectrónica

Ing. Mariano Morel (ICYTE - FI - UNMdP)

Ciudad de Mar del Plata, Argentina

marianomorel@fi.mdp.edu.ar

## PROCESOS SEMICONDUCTORES: TRABAJO #2

MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA - FI UBA

**Resumen**—La metalización de conductores juega un papel crucial en la industria de la microelectrónica, donde se enfrenta constantemente al desafío de satisfacer las demandas de densidad de integración, rendimiento y confiabilidad. Este artículo revisa las técnicas de metalización de conductores y su interacción con el fenómeno de electromigración en dispositivos electrónicos de alta densidad.

Se hará mención de los métodos convencionales de deposición de metal, como la evaporación, la deposición química de vapor y la sputtering, así como las técnicas emergentes, como el electrodeposición, que ofrecen una mayor precisión y control sobre las propiedades del recubrimiento. Además, el artículo invita a repensar los desafíos asociados con la miniaturización de los dispositivos, como el aumento de la resistencia eléctrica y la aparición de fenómenos de electromigración.

La electromigración emerge como una preocupación significativa en estructuras de interconexión a escala nanométrica. Se abordan los mecanismos subyacentes de la electromigración y su impacto en la fiabilidad a largo plazo de los dispositivos electrónicos. Además, se examinan las estrategias de mitigación, como el diseño adecuado de la arquitectura de interconexión y el uso de materiales de barrera para prevenir la migración de átomos.

En resumen, este artículo destaca la importancia crítica de la metalización de conductores y la electromigración en la microelectrónica moderna, proporcionando una visión integral de los avances recientes y los desafíos pendientes en este campo dinámico y en constante evolución.

**Index Terms**—Electromigración, conductores, microelectrónica, metalización.

### I. TÉCNICAS DE DEPOSICIÓN

Para que un dispositivo a construir funcione, debe darse un vínculo físico a los patrones geométricos del sustrato, logrado a partir de los metales y los aislantes. Los primeros forman las conexiones eléctricas y los segundos, separan los conductores unos de otros, del sustrato y de contaminantes externos. El espesor de esta deposición es del orden del micrómetro o menor.

Para la deposición de estas películas delgadas se utiliza la deposición en vacío y la deposición química por vapor (CVD). En la deposición en vacío, el material de la película se transfiere al sustrato desde la fuente sólida a través del vacío. Este método trabaja mejor para compuestos muy estables con moderado punto de fusión, más cuando se requiere alta pureza, ideal para utilizarlo en conductores metálicos. Cabe aclarar que la condición de vacío no es ideal, sino mas bien es una atmosfera de gases muy diluidos. En bajas presiones y altas temperaturas (sin llegar al punto de ebullición), los

gases se comportan según la teoría cinética de los gases. Sin entrar en ecuaciones de un gas ideal y de la teoría cinética, es importante mencionar que las características de los gases influyen en la deposición de las películas delgadas, sobre todo a presiones bajas. Los parámetros a considerar son el peso molecular, diámetro molecular, abundancia en aire y punto de ebullición. Las dos fuentes para deposición en vacío son por evaporación y por pulverización (sputtering). Para el primer caso, el material se calienta hasta su punto de ebullición dentro de una fuente de evaporación. Luego, el vapor se condensa sobre el sustrato para formar la película delgada. Si se quiere depositar aluminio, este se coloca en un crisol que es recipiente hecho de material refractario que se emplea para fundir materia a temperatura muy elevada, con el fin de que el material del crisol no se disuelva con el aluminio, y se introduzcan impurezas. En este sentido y para evitarlo, se hace impactar un haz de electrones de alta energía directamente sobre el material, de manera que se funda solo. Será necesario para tal fin un estricto proceso de control. La velocidad de evaporación dependerá de la energía entregada por el haz. En la FIG. 1 se muestra el proceso del método descripto. Existen cuestiones relacionadas con la topografía del sustrato, que incide en la uniformidad de la película depositada. Si bien este tema no se abordará, es importante mencionar que existen técnicas para mitigar este efecto, tal como sucede cuando se coloca al sustrato en dispositivos que los hagan rotar, mejorando la cobertura de la deposición, teniendo como contrapartida la de lograr películas mas delgadas.

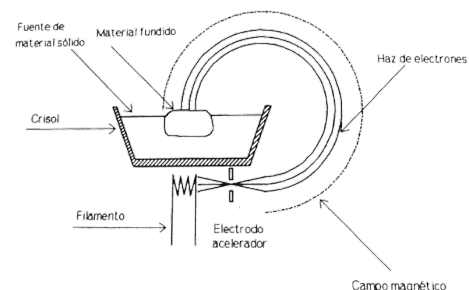


Figura 1. Evaporación en vacío

La técnica de sputtering [1] implica la aceleración de iones (por ejemplo el argón ionizado) causada por aplicación de campos eléctricos y el bombardeo de los iones a la fuente

del metal. Los iones volatilizan los átomos del metal. Estos átomos se convierten en un gas ionizado que posteriormente se depositan sobre el sustrato creando la película metálica. En la FIG. 2 que es ilustrativa del método, se observa un recinto de alto vacío, en donde se introduce un gas inerte que produce plasma. En cátodo es del metal a depositar y en ánodo el sustrato. Se utiliza un potencial del orden de los kilovolts en los electrodos. El gas se ioniza dando plasma, y los iones positivos son acelerados hacia el cátodo. Así se desprenden los átomos del metal para generar la deposición.

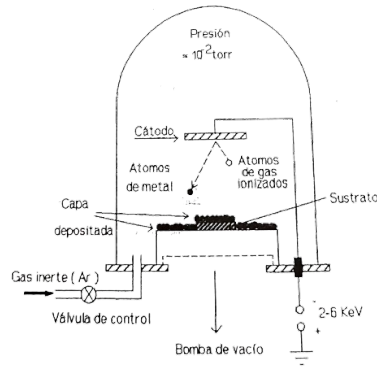


Figura 2. Sputtering

Siguiendo con los métodos de deposición mencionados, en la CVD [2] la capa depositada no es monocristalina sino amorfa o policristalina. El método sirve para deposición de compuestos no cristalinos sobre un sustrato caliente por reacción o descomposición de compuestos gaseosos que llegan a la superficie. La temperatura del proceso se encuentra en general entre los 300 a 900 grados centígrados a presión atmosférica. Existen diferentes reacciones químicas entre el silicio, oxígeno, nitrógeno e hidrogeno bajo diferentes condiciones de temperaturas y presiones para realizar una variedad de deposiciones con fines distintos de metalizaciones o aislaciones.

En cuanto a los avances en técnicas de deposición se encuentra la de electrodeposición, que es el proceso mediante el cual se depositan metales u otros materiales sobre un sustrato utilizando corriente eléctrica. Este proceso se realiza en una celda electroquímica donde el sustrato se convierte en el cátodo y el material a depositar se coloca como ánodo. Sobre este método se continúa el desarrollo e investigación de técnicas para depositar materiales a escala nanométrica, también sobre el proceso para depositar materiales selectivamente en áreas específicas del sustrato y nuevas formulaciones de baños electrolíticos para depositar aleaciones metálicas y compuestos químicos complejos con propiedades específicas.

## II. METALIZACION DE CONDUCTORES

La metalización de conductores es el proceso de deposición de películas de metal para realizar posteriormente, interconexiones entre elementos del circuito. El proceso se inicia con la cobertura del sustrato con una película aislante abriendo ventanas mediante etching, de manera de lograr los contactos entre metal y el sustrato. El metal se deposita sobre el

sustrato y luego se transfiere el patrón mediante fotolitografía. Finalmente se remueven las zonas no deseadas quedando las interconexiones realizadas. Por lo general se utiliza aluminio el cual es un buen conductor eléctrico, con una resistividad de  $2,7 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$ . Para películas delgadas las densidades de corriente involucradas pueden ser elevadas como para que suceda la electromigración, lo que puede limitar el rendimiento de los conductores metálicos y del tiempo de vida de los circuitos integrados.

## III. ELECTROMIGRACIÓN

La electromigración es el movimiento de átomos del metal "corriente abajo" [3] debido a las altas densidades de corriente. Los sólidos metálicos tendrán iones que se pueden mover bajo un flujo de corriente con una velocidad [4] igual a

$$v = \left( \frac{j \cdot r \cdot q}{k \cdot T} \right) \cdot D_0 \cdot e^{-\frac{E_a}{k \cdot T}} \quad (1)$$

donde:

- $v$  es la velocidad de los iones,
- $j$  es la densidad de corriente,
- $r$  es la resistividad,
- $q$  es la carga efectiva del ion,
- $k$  es la constante de Boltzmann,
- $T$  es la temperatura,
- $D_0$  es el coeficiente de difusión pre-exponencial,
- $E_a$  es la energía de activación.

para el aluminio,  $E_a$  es igual a 1.4eV en el cuerpo del aluminio y 0.5eV en el borde de grano y 0.3eV en la superficie. El borde de grano se refiere a la región de un material donde dos cristales individuales, o granos, se encuentran y forman un límite entre sí. Cuando una corriente eléctrica pasa a través de un conductor metálico, como un cable o una pista en un chip semiconductor, los átomos del metal pueden moverse bajo la influencia de esta corriente. Sin embargo, la estructura cristalina del material no es uniforme en todo el material. En cambio, está compuesta por muchos granos individuales, cada uno con una orientación cristalina ligeramente diferente. Así los bordes de grano son sitios de acumulación de átomos debido a diversos factores, como variaciones en la densidad de corriente, defectos cristalinos, diferencias en la difusión de los átomos y otros. Esta acumulación de átomos en los bordes de grano puede causar tensiones mecánicas y cambios en la microestructura del material. A su vez pueden ser sitios propensos a la formación de vacíos o huecos, que pueden ser sitios de inicio para fallos inducidos por la electromigración. Los átomos que migran a lo largo de los bordes de grano pueden acumularse en estos vacíos, creando aún más tensión y debilitando la estructura del material. En la FIG. 3 el aluminio fluye a lo largo de los bordes de grano bajo la influencia de una corriente, moviéndose mas rápido donde los bordes son paralelos al flujo de corriente. Se produce un angostamiento corriente arriba y acumulación corriente abajo. El angostamiento produce que se eleve la temperatura por calentamiento resistivo que acelera el proceso. Así es que ocurre una ruptura en una zona conductora que eventualmente

hace fallar el circuito. El tiempo medio de falla se modela con la siguiente ecuación:

$$TMF = K \left( \frac{z \cdot x}{j^2} \right) \cdot e^{-\frac{E_a}{k \cdot T}} \quad (2)$$

donde:

- $K$  es una constante empírica,
- $z$  es el espesor,
- $x$  es el ancho de la tira de metal

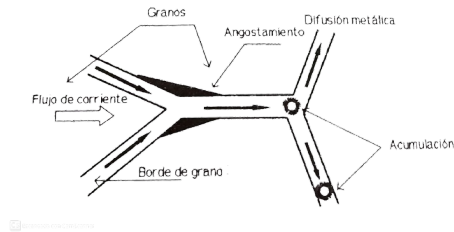


Figura 3. Electromigración: Borde de grano

#### IV. DESAFÍOS

Como se describió en la sección anterior, la electromigración es el proceso mediante el cual los iones metálicos se desplazan bajo la influencia de un campo eléctrico a lo largo de los conductores metálicos. Los factores que afectan la electromigración son: la densidad de corriente [5], que cuanto mayor sea a través del conductor, mayor será el efecto de electromigración; las corrientes, que cuanto más altas sean, aumentan la velocidad de los iones metálicos, lo que acelera el proceso de migración; el material del conductor, en donde la electromigración es más pronunciada en ciertos metales, como el aluminio y el cobre, que se utilizan comúnmente en la fabricación de circuitos integrados y por otro lado, la difusividad y la movilidad de los iones metálicos que varían según el material del conductor, lo que afecta la susceptibilidad

a la electromigración; la temperatura que también influye en la electromigración, ya que cuanto más altas, los iones metálicos tienen mayor movilidad y la velocidad de la electromigración aumenta. La formación de vacíos mencionada y las discontinuidades en el material del conductor pueden interrumpir el flujo de corriente y eventualmente causar fallos en el dispositivo, como así también la acumulación de material en áreas críticas puede alterar las características eléctricas del dispositivo, como la resistencia y la capacitancia, lo que afecta su rendimiento y fiabilidad a largo plazo.

Haciendo referencia concreta a la posibilidad de mitigar y prevenir este fenómeno, es posible generar diseños de circuitos con anchos de línea y espaciamentos adecuados para reducir la densidad de corriente. También una correcta utilización de materiales con alta resistencia a la electromigración, como aleaciones de cobre con aditivos específicos. Y por último el control de temperatura de funcionamiento dentro de rangos específicos, son paleativos que ayudan a prolongar la vida útil del dispositivo.

#### REFERENCIAS

- [1] K.-H. Dahmen, "Chemical vapor deposition," in *Encyclopedia of Physical Science and Technology (Third Edition)*, third edition ed., R. A. Meyers, Ed. New York: Academic Press, 2003, pp. 787–808. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B0122274105001022>
- [2] J.-O. Carlsson and P. M. Martin, "Chapter 7 - chemical vapor deposition," in *Handbook of Deposition Technologies for Films and Coatings (Third Edition)*, third edition ed., P. M. Martin, Ed. Boston: William Andrew Publishing, 2010, pp. 314–363. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780815520313000077>
- [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] O. Kononenko, E. Ivanov, V. Matveev, and I. Khodos, "Electromigration activation energy in pure aluminum films deposited by partially ionized beam technique," *Scripta Metallurgica et Materialia*, vol. 33, no. 12, pp. 1981–1986, 1995. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0956716X9500450A>
- [5] H.-U. Schreiber, "Reduced aluminium electromigration in future integrated circuits — a problem of test procedure and threshold mechanisms," *Thin Solid Films*, vol. 175, pp. 29–36, 1989, 22nd International Symposium on Trends and New Applications in Thin Films. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0040609089908043>