



## LAS FTALOCIANINAS, UNA ALTERNATIVA DE LA INDUSTRIA DE LOS SEMICONDUCTORES

MARÍA ELENA SÁNCHEZ VERGARA  
Profesora-Investigadora Universidad Anáhuac México

En esta época donde la Industria 4.0 sobrepasa en prácticamente cualquier tipo de empresa, el planeta se encuentra inmerso en una crisis generada por la falta de microchips. Estos componentes son los “cerebros” que permiten el funcionamiento de artículos electrónicos como computadoras, teléfonos celulares, *tablets*, pantallas planas, electrodomésticos y automóviles, por mencionar solo algunos productos de uso cotidiano. La crisis se generó debido al cierre de fronteras comerciales y a la reducción en la producción de estos microchips, por causas asociadas a la pandemia y las restricciones sanitarias de la COVID-19. Aunque, por un lado, hubo industrias como la automotriz, que canceló o disminuyó sus pedidos de microchips, por otro lado, hubo industrias como las dedicadas a la fabricación de computadoras, *tablets* y otros dispositivos similares, que aumentaron su demanda de microchips, debido al auge del trabajo remoto desde casa. Ante el avance de la vacunación contra la COVID-19, la industria automotriz reanudó la demanda de chips y esto se sumó a los requerimientos de las empresas especializadas en tecnologías de la información. Por lo anterior, los fabricantes de microchips se han visto desbordados, provocando una crisis ge-

neral en la producción de microchips, ya que la fabricación de estos componentes es un proceso que dura varios meses por la complejidad de su manufactura. Un microchip es un pequeño componente capaz de almacenar y/o procesar información, y está constituido de una estructura muy delgada de material semiconductor, sobre la cual se fabrican circuitos electrónicos (Figura 1).

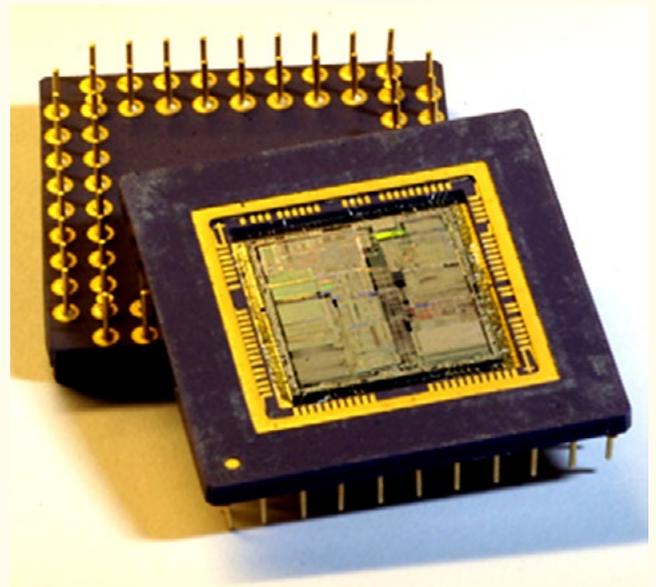


Figura 1. Chip de silicio. Imagen tomada de <https://www.freeimages.com/es/photo/silicon-chip-with-die-1564477>



La mayoría de microchips se fabrican con un semiconductor que es el silicio; el metaloide conocido por encontrarse en el grupo IVA de la tabla periódica de los elementos químicos. Aunque el silicio se encuentra presente en el compuesto químico más abundante en la corteza terrestre que es el óxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ), su procesamiento es complejo, contaminante y muy costoso. Para su obtención, es preciso someter al  $\text{SiO}_2$  a un proceso de reducción con carbono, en un horno de arco eléctrico a temperatura entre 1500 y 2000 °C. El silicio resultante es de grado metalúrgico (Si-GM) y no es un material de alta pureza, por lo que se requiere refinar. Durante su refinación, el Si-GM se hace reaccionar en un reactor fluidizado con HCl anhídrido a 300 °C, hasta que se forma el tricloro silano ( $\text{HSiCl}_3$ ). Finalmente, el  $\text{HSiCl}_3$  se hace reaccionar con hidrógeno a 1100 °C durante un periodo de tiempo que va de las 200 a las 300 horas, para producir dentro de cámaras de vacío el silicio de alta pureza. Este proceso fue desarrollado por la empresa Siemens en la década de los años sesenta y requiere una gran cantidad de energía, por lo que se han desarrollado procesos alternativos que emplean menos energía, sin embargo, siguen siendo costosos, complejos y contaminantes. Es importante considerar que una vez que se cuenta con el silicio puro, se requiere cristalizarlo con el fin de ordenar su estructura atómica y con esto obtener sus propiedades semiconductoras, altamente cotizadas por la industria. Para lograr lo anterior, se fabrica una oblea en la que los átomos de silicio se ordenan mediante un procedimiento ideado en 1916 por el científico polaco Jan Czochralski. En este proceso se utiliza un cristal semilla depositado en un baño de silicio que va solidificándose a su alrededor, y con su red cristalina orientada de la misma forma que dicho cristal semilla. Al final del proceso de crecimiento se forma un monocristal cilíndrico del cual posteriormente se obtendrán las obleas (Figura 2a) que pueden ser utilizadas

como material semiconductor en la fabricación de microchips (Figura 2b).

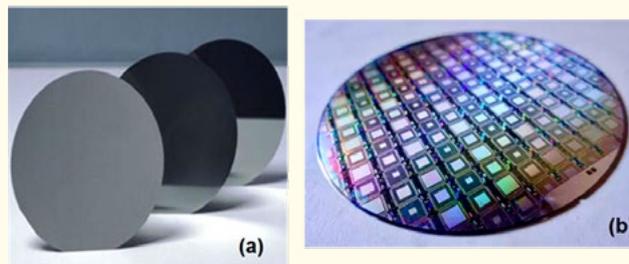


Figura 2. (a) Obleas de silicio (imagen tomada de: <https://image.made-in-china.com/155f0j00aNRtDMjcOCzt/Silicon-Wafer-Price-for-Semiconductors.jpg>) y (b) oblea de silicio con impresión de chips (imagen tomada de: <https://hardzone.es/app/uploads-hardzone.es/2020/02/wafer-oblea-125-mm.jpg?x=480&quality=20>)

Es importante considerar, que al ser la obtención del silicio semiconductor y la fabricación de microchips procesos tan especializados, pocas son las empresas a nivel mundial que pueden desarrollar tanto al silicio grado semiconductor, como a los microchips. Esto hace necesario la generación de semiconductores más simples, menos contaminantes en su fabricación y de menor costo. De aquí que haya surgido la Electrónica orgánica, una rama de la electrónica encargada del desarrollo de semiconductores orgánicos, que cumplan los requisitos mencionados anteriormente y que tengan, al mismo tiempo, las propiedades semiconductoras del silicio y sus derivados. Los semiconductores orgánicos son moléculas principalmente planas, integradas por enlaces covalentes con una alta deslocalización electrónica. Para lograr esta deslocalización, los semiconductores orgánicos están integrados por enlaces conjugados o alternados simples (enlaces  $\sigma$ ) y dobles (enlaces  $\pi$ ), como los que se observan en las moléculas presentadas en la Figura 3. Esta deslocalización electrónica genera canales de conducción por los que circulan las cargas eléctricas a lo largo de los semiconductores que, al ser moléculas planas, se pueden apilar y formar bloques moleculares ordenados que facilitan el paso de los electrones.

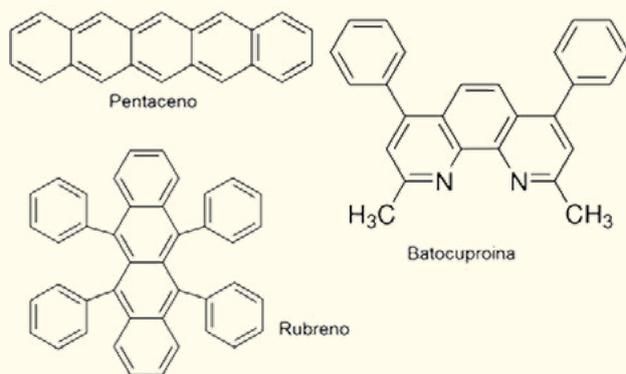


Figura 3. Semiconductores orgánicos.

Dentro de los semiconductores orgánicos las ftalocianinas metálicas han cobrado gran importancia, debido a que la mayoría de ellas son moléculas planas, están formadas por un macrociclo de 18 electrones  $\pi$  y, debido a la deslocalización de éstos, se presentan propiedades químicas y físicas excepcionales. Las ftalocianinas también poseen una amplia región de absorción en la región visible del espectro electromagnético, lo que las hace ser tan utilizadas en la industria de las pinturas, como colorantes, y desde luego presentan importantes propiedades semiconductoras. Adicionalmente, este comportamiento semiconductor en las ftalocianinas puede ser potenciado mediante dos modificaciones en su estructura molecular: (i) la introducción de átomos metálicos en el centro del macrociclo, ya que pueden incorporar más de 70 elementos dentro de su cavidad, y (ii) la adición de sustituyentes tanto coordinados al metal, como en la periferia de dicho macrociclo. En la Figura 4 se observan diferentes tipos de ftalocianinas, tanto sin el metal en su centro (Figura 4a), como con diferentes átomos metálicos en él como son el zinc (Zn), el litio (Li), el titanio (Ti) y el cobre (Cu), y también con diferentes tipos de sustituyentes coordinados al metal (Figura 4d) y enlazados en la periferia del macrociclo (Figura 4e). Actualmente, también es posible obtener ftalocianinas como la mostrada en la Figura 4f, en donde las moléculas se encuentran formando cadenas poliméricas.

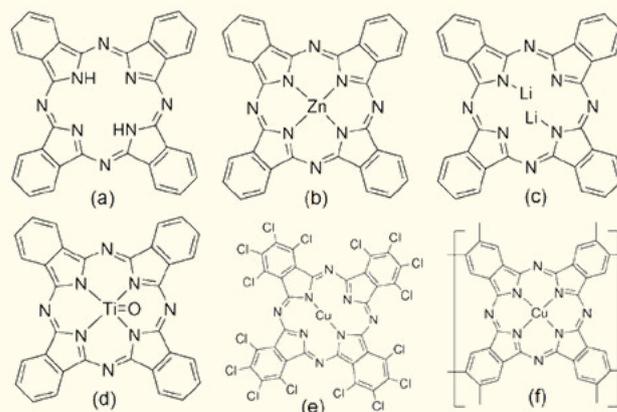


Figura 4. (a) Ftalocianina, (b) ftalocianina de zinc, (c) ftalocianina de litio, (d) titanil ftalocianina, (e) ftalocianina de cobre verde y (f) poliftalocianina de cobre.

Es muy importante mencionar que actualmente, los semiconductores orgánicos presentan desventajas con respecto al silicio. Una de ellas es su baja estabilidad química, ya que en condiciones de servicio, la misma humedad del medio ambiente los puede descomponer químicamente. Los enlaces covalentes que presentan los semiconductores orgánicos son débiles y tampoco soportan las altas temperaturas a las que un microchip puede llegar a desempeñarse normalmente. Las ftalocianinas, por su parte, presentan una gran estabilidad térmica, no funden, subliman arriba de 200 °C, lo cual puede ser aprovechado para su purificación y fabricación de películas delgadas semiconductoras. Además, algunas ftalocianinas, como la de cobre, a altas presiones pueden alcanzar temperaturas de hasta 900 °C sin sufrir deformaciones en su estructura. Con respecto a la estabilidad química, las ftalocianinas en general poseen muy poca solubilidad en disolventes como alcoholes, éteres y cetonas, solamente pueden ser solubilizadas en disolventes de alto punto de ebullición, tales como quinolina, triclorobenceno y benzofenona. Estos disolventes no están presentes en condiciones de servicio de los microchips, por lo que las ftalocianinas pueden ser utilizadas en la fabricación de estos componentes, así como también en dispositivos optoelectrónicos como



son los diodos orgánicos de emisión de luz (OLEDs), los transistores orgánicos (OFETs), las celdas orgánicas fotovoltaicas (OPVCs) y varios tipos de sensores y quimiresistores.

En el laboratorio de investigación sobre semiconductores orgánicos de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Anáhuac México, se han desarrollado un número importante de dispositivos optoelectrónicos a base de películas delgadas de ftalocianinas de magnesio, cobre, zinc, indio y cobalto, por mencionar algunas de ellas. También se ha modificado su comportamiento semiconductor, por la adición de sustancias dopantes que mejoran la conductividad eléctrica en las películas de ftalocianinas metálicas. Otro desarrollo importante es la fabricación de membranas semiconductoras a base de ftalocianina de magnesio y nylon 11. La fabricación de estas membranas híbridas ha permitido mejorar aún más la estabilidad de las ftalocianinas frente a la presencia de agentes químicos y la radiación solar. A continuación, se da una pequeña lista de artículos científicos publicados por este grupo de investigación, en ellos se puede profundizar sobre este importante tipo de semiconductores orgánicos, en los que todavía queda mucho por estudiar y desarrollar, si se quiere que en un futuro cercano apoyen a la industria del silicio y, en general, a la industria electrónica y sus aplicaciones.

- Sánchez-Vergara, M. E., Guevara-Martínez, E., Arreola-Castillo, A. y Mendoza-Sevilla, A. (2020). Fabrication of Hybrid Membranes Containing Nylon-11 and Organic Semiconductor Particles with Potential Applications in Molecular Electronics. *Polymers*, 12, 9. <https://doi.org/10.3390/polym12010009>
- Sánchez-Vergara, M. E., Díaz-Ortega, N., Maldonado-Ramírez, H. J., Ballinas-Indili, R., Ríos, C., Salcedo, R., Álvarez-Toledano, C. (2020). Comparison of Interaction Mechanisms of Lead Phthalocyanine and Disodium Phthalocyanine with Functionalized 1,4 dihydropyridine for optoelectronic applications. *Journal of Molecular Structure*, 1218, 128525. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2020.128525>
- Sánchez-Vergara, M. E., Gómez-Gómez, M., Hamui, L., Álvarez-Bada, J. R., y Jiménez-Sandoval, O. (2021). Optoelectronic behaviour of zinc phthalocyanines doped with anthraquinone derivatives and their potential use in flexible devices. *Materials Technology*, 36:4, 250-259. <https://doi.org/10.1080/10667857.2020.1747807>
- Hamui, L., y Sánchez-Vergara, M. E. (2021) Innovative Implementation of an Alternative Tetrathiafulvene Derivative for Flexible Indium Phthalocyanine Chloride-Based Solar Cells. *Micromachines*, 12, 633. <https://doi.org/10.3390/mi12060633>
- Sánchez-Vergara, M. E., Canseco, M. J., Ballinas, R., Carmona, G., Álvarez, J. R. y Álvarez, C. (2022). Studies on the Structure, Optical, and Electrical Properties of Doped Manganese (III) Phthalocyanine Chloride Films for Optoelectronic Device Applications. *Coatings*, 12, 246. <https://doi.org/10.3390/coatings12020246>