

Grafeno: sueño o realidad de la nanotecnología

Palabras clave: Grafeno, nanoestructuras de carbono, Nanociencia y Nanotecnología.

Key words: Graphene, Carbon nanostructures, NanoScience and Nanotechnology.

Resumen:

El grafeno, una nanoestructura de carbono, es un logro del desarrollo y los avances de la Nanotecnología; siendo el grafeno un componente estructural del grafito, posee propiedades tan sorprendentes que lo ha convertido en un potencial sustituto del silicio en el diseño y fabricación de nuevos circuitos integrados. Este artículo resume sus orígenes, así como sus interesantes propiedades prácticas y teóricas que dieron lugar a que fuera el motivo por el cual se otorgara en 2010 el Premio Nobel de Física a dos de los científicos que más han estudiado el grafeno. Sus presentes y futuras aplicaciones, tanto en la nanoelectrónica como en la nano-optoelectrónica, han hecho posible que este material pase de ser un sueño académico a ser una promisoría realidad.

Abstract:

The graphene, a carbon nanostructure, is a success of the development and the advances of the Nanotechnology; being the graphene a structural component of the graphite, it possesses properties so surprising that it has been transformed into a potential substitute of the silicon in the design and production of new integrated circuits. The present article summarizes the graphene origins, as well as its interesting practical and theoretical properties which were the reason to grant in 2010 the Nobel Prize of Physics to two of the scientists who more have studied the graphene. Its present and future applications, in nanoelectronics as well as in nano-optoelectronics, have made possible that this material passes from an academic dream to be a promissory reality.



Joaquín Tutor Sánchez

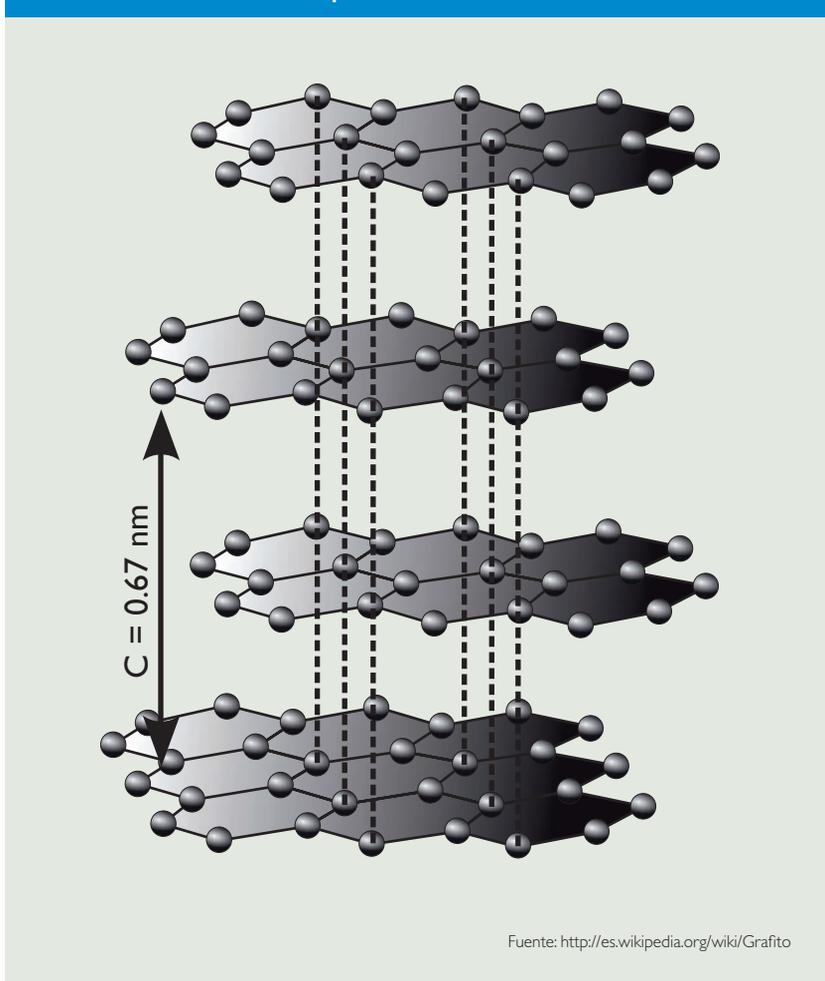
Doctor en Ciencias Físicas. Profesor asociado doctor en la ETSI-ICAI (Universidad Pontificia Comillas). Evaluador de proyectos y redes temáticas en el CYTED. Investigador para la empresa Cirta Emissions.

A raíz de la decisión de otorgar el Premio Nobel de Física 2010 a los científicos Andrei Geim y Konstantin Novoselov por sus revolucionarios descubrimientos sobre el grafeno, la prensa sensacionalista nos ha presentado este material como si fuera un objeto matemático: "grafeno material bidimensional". Con exactitud debemos decir que el grafeno es una estructura laminar plana, de un átomo de grosor, compuesta por átomos de carbono densamente empaquetados en una red cristalina mediante enlaces covalentes que se formarían a partir de la superposición de los enlaces híbridos sp^2 de los átomos de carbonos. Debido a ese tamaño de espesor laminar, del orden de las dimensiones de un átomo de carbono, el grafeno debe considerarse como una nanoestructura "cuasi bidimensional" denominada por las siglas Q2D (quasi bidimensional system).

El grafeno tiene un origen muy humilde: el grafito (Figura 1), que es una de las formas alotrópicas en las que se puede presentar el carbono junto al diamante y a los fullerenos. Este material es conocido desde hace siglos y fue nombrado así por Abraham Gottlob Werner en el año 1789; el término grafito deriva del griego $\gamma\rho\alpha\phi\epsilon\upsilon\nu$ (graphein) que significa escribir. También se denomina plumbagina y plomo negro.

La estructura cristalina del grafito puede considerarse formada por varias capas de grafeno superpuestas (Figura 2). Esta estructura laminar

Figura 2. Estructura cristalina del grafito en la que se observan las interacciones entre las distintas capas de anillos aromáticos condensados



hace que el grafito sea un material marcadamente anisótropo y que sus propiedades fundamentales sean su color negro con brillo metálico y que se trate de un material refractario que

se exfolia con facilidad. En la dirección perpendicular a las capas presenta una conductividad eléctrica baja que aumenta con la temperatura, comportándose de esta forma como un semiconductor. Sin embargo, a lo largo de las capas la conductividad eléctrica es mayor y aumenta proporcionalmente con la temperatura, comportándose como un conductor semi-metálico.

Entre las múltiples aplicaciones del grafito sabemos que es un buen material para la elaboración de ladrillos, crisoles, etc. Se utiliza en la fabricación de diversas piezas en ingeniería, como pistones, juntas, arandelas, rodamientos, etc.; es un buen conductor de la electricidad y se usa para fabricar electrodos de baterías (Figura 3) así como en otras aplicaciones eléctricas; se emplea en reactores nucleares, como moderadores y reflectores. El grafito mezclado con una pasta cerámica sirve para fabricar lápices (Figura

Figura 1. Muestra de grafito



Figura 3. Baterías con electrodos de grafito



ra 4) y es usado para crear discos de grafito parecidos a los discos de vinilo salvo por su mayor resistencia a movimientos bruscos de las agujas lectoras.

Sin embargo, una parte ha resultado ser mejor que el todo: El grafeno (Figura 5), como elemento estructural componente del grafito es el material más conductor y resistente que existe en la actualidad, y estas características lo hacen un futuro sustituto del silicio en la fabricación de chips en la electrónica integrada.

Podría pensarse que el reciente y creciente interés por el grafeno se debe a que es un nuevo material. Sin embargo la realidad es otra y bien distinta. El grafeno ha sido conocido y fue descrito

hace más de 60 años. El enlace químico de átomos de carbono y su estructura se describieron durante la década de 1930, mientras que su estructura de bandas electrónica fue calculada por primera vez por P. R. Wallace en 1947. La palabra grafeno fue oficialmente adoptada en el ámbito de la física de materiales y en la química en 1994, después de haber sido usada indistintamente como monocapa de grafito en el campo de la ciencia de superficies.

Entre las propiedades más destacadas del grafeno podemos destacar las siguientes:

- Posee una alta conductividad térmica e igualmente una altísima conductividad eléctrica.

Figura 4. Lápices de grafito

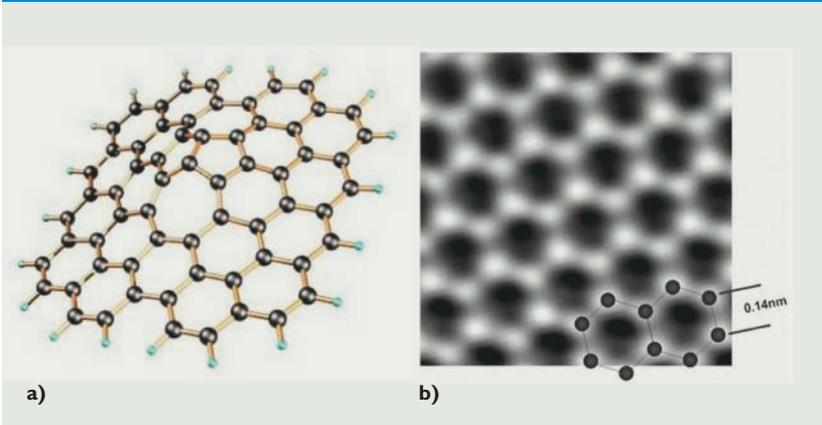


- Posee una alta elasticidad, una gran dureza y una resistencia mecánica 200 veces mayor que el acero.
- Desde el punto de vista químico, el grafeno puede reaccionar químicamente con otras sustancias para formar compuestos con diferentes propiedades. Esto hace al grafeno un material de gran potencial de desarrollo industrial.
- Soporta cualquier tipo de radiación ionizante, lo que también aumenta su potencial industrial.
- Es tan ligero como la fibra de carbono, pero la mejora en flexibilidad.

Desde el punto de vista teórico, existen dos propiedades muy interesantes relacionadas con este material:

Cuando estudiamos el proceso de conducción electrónico en el grafeno, los electrones se comportan como quasi partículas, en este caso como partículas cargadas eléctricamente pero sin masa. Los electrones que se trasladan sobre el grafeno, se comportan como quasi partículas sin masa. Estas quasi partículas, conocidas como fermiones de Dirac, juegan un papel muy importante en la Teoría

Figura 5. (a) Simulación de capas de grafeno; (b) grafeno real, imagen de microscopía electrónica de transmisión (TEM). @ Wikipedia.



Cuántica Relativista. Estos fermiones de Dirac se mueven a una velocidad constante independientemente de su energía (como ocurre con los fotones), y en este caso a unos 10^6 m/s. La importancia del grafeno, en este aspecto, consiste en estudiar experimentalmente este comportamiento que había sido predicho teóricamente hace más de 50 años.

La otra propiedad teórica trascendental del grafeno reside en lo siguiente: en este material se presenta, casi didácticamente, el efecto Hall cuántico, por el cual la conductividad perpendicular a la corriente electrónica toma valores discretos, o cuantizados, permitiendo esto medirla con una precisión increíble. La cuantización implica que la conductividad del grafeno nunca puede ser cero. Esto ha hecho promisorio al grafeno como estándar para las normas metroológicas del efecto Hall cuántico. Sobre esto se trabaja en diferentes laboratorios de Metrología a nivel mundial, entre ellos el Centro Español de Metrología.

Sobre muchos de estos estudios experimentales y teóricos han trabajado desde hace varias décadas los científicos Andre Geim y Konstantin Novoselov, principalmente en los experimentos de aislamiento de capas de grafeno en 2004. Geim y Novoselov han sido galardonados con el Premio

Nobel de Física 2010 por sus trabajos pioneros en el desarrollo del grafeno para el diseño de nuevos dispositivos electrónicos flexibles y más eficientes, tales como ordenadores, pantallas táctiles y paneles solares. Lo que en sus inicios parecía un sueño por las sorprendentes propiedades que se visionaban.

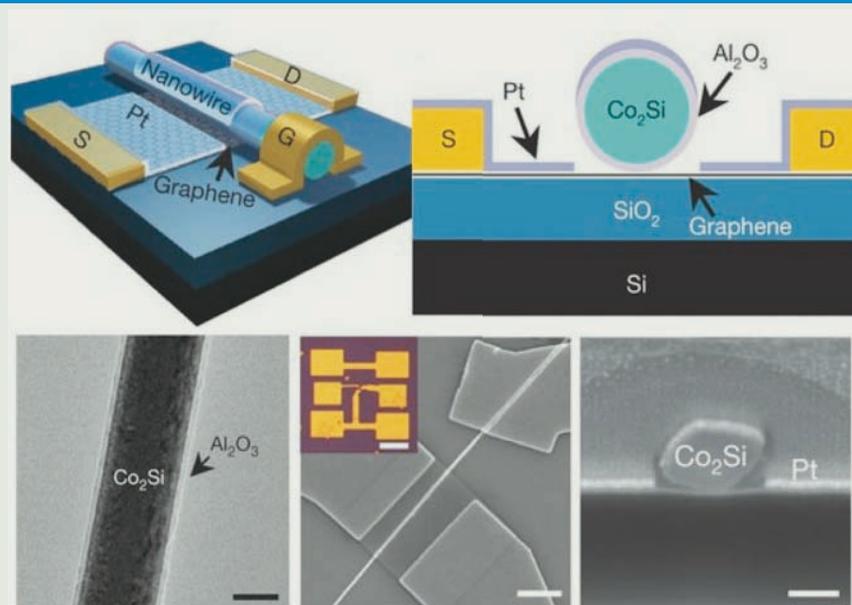
Se sabe que muchas nanoestructuras que han sido recientemente descubiertas, tales como los nanotubos de carbono, están relacionadas con el grafeno. En la Figura 6 se muestra esquemáticamente cómo se configuran los nanotubos a partir de láminas de grafeno. Los nanotubos de carbono fueron descubiertos en 1991 por Sumio Iijima, científico japonés ampliamente galardonado por sus trabajos en estos materiales y que recibió el Premio Príncipe de Asturias de Investigación Científica y Técnica en 2008 junto a otros cuatro científicos por ser referentes mundiales en el campo de la Ciencia de Materiales y la Nanotecnología. Tradicionalmente los nanotubos de carbono se han descrito como hojas de grafeno enrolladas sobre sí mismas, y de hecho las propiedades de los nanotubos de carbono pueden entenderse en términos de las del grafeno. Los nanopergaminos de carbono (carbon nanoscroll: Figura 6) se han estudiado teórica y experimental-

mente en los últimos tiempos; recientemente, en abril de 2010, dos científicos de universidades norteamericanas M. M. Fogler, y A. H. Castro Neto, y el científico español Francisco Guinea, investigador del Instituto de Ciencia e Materiales de Madrid (ICMM-CSIC), publicaron un artículo en el que entre otros aspectos teóricos estudiaban el control electrostático de la envoltura de los nanopergaminos como una demostración de la factibilidad de su uso en el diseño de nuevos equipos electrónicos.

Volviendo al grafeno, el noticiero de Internet 20minutos.es, en su sección de Tecnología, publicaba una noticia titulada "El grafeno impreso será la base de las futuras pantallas táctiles". En efecto, un grupo de científicos y tecnólogos de la Universidad de Sungkyunkwan en Corea del Sur y de la empresa transnacional Samsung, han centrado su atención en el estudio del grafeno impreso el cual permitiría crear pantallas flexibles de gran resistencia gracias a su notable transparencia y una significativa conexión eléctrica. Estos investigadores han logrado depositar una capa de grafeno de 63 centímetros de longitud sobre una lámina de poliéster. En la actualidad la fabricación de las pantallas flexibles se basa en la utilización de óxido de estaño e indio, adoleciendo estos compuestos de ser materiales frágiles y demasiado caros. Por ello su sustitución por el grafeno impreso promete ser una nueva tecnología más eficiente y barata, una vez se solventen algunas dificultades de degradación de las capas de grafeno. También en esta dirección del grafeno impreso podíamos señalar lo que está haciendo una empresa en Jessup, Maryland, USA: la empresa Vorbeck Material lanzó al mercado, a finales del 2009, uno de los primeros productos basado en el nanomaterial conocido como grafeno. Vorbeck Material está fabricando tintas conductoras basadas en el grafeno y que pueden ser utilizadas para imprimir antenas de identificación de radiofrecuencia (RFID, sus siglas en inglés) y contactos eléctricos para pantallas flexibles. La empresa se aprovecha del bajo coste de las tintas de grafeno y ya posee un acuerdo con la empresa alemana de productos quí-

Figura 6. Esquema de la estructura del grafeno, de nanotubos de carbono de paredes múltiples y de nanopergaminos. (Imagen impresa con permiso de la Sociedad Americana de Química). Julio 20 de 2009.





<http://www.nanomercado.com>

micos BASF, y el pasado año recibió 5,1 millones de dólares en financiación de la firma de inversiones privadas Stoneham Partners.

En lo que a circuitos integrados se refiere, muchos centros de investigación y departamentos de desarrollo de grandes empresas electrónicas ya han venido trabajando en las posibles vías de erradicación de algunos "males" del grafeno como su degradación. El pasado 16 de septiembre salió a la luz un artículo de la revista *Nature*, en su número 467, sobre los trabajos de algunos investigadores dirigidos hacia la disminución de los efectos de degradación del grafeno en sus aplicaciones de la electrónica de alta velocidad, lo cual representa una desventaja tecnológica considerable. Pues bien, Lei Liao y sus colaboradores de la Universidad de California, han diseñado y experimentado un nuevo método de fabricación de transistores de grafeno que evita la degradación. El método consiste en colocar encima del grafeno nanohilos con un núcleo metálico de Co_2Si y un envoltorio aislante de Al_2O_3 , (ver Figura 7).

Estos nanohilos pueden actuar como terminal de puerta (G) en un transistor basado en grafeno en cuyos extremos se encuentra la fuente (S) y el drenador (D). La Figura 7 ilustra el dispositivo. Estos nuevos transisto-

res de grafeno tienen una longitud de canal de 140 nanómetros y son capaces de funcionar a una frecuencia de corte entre 100 y 300 GHz, solo limitada por la capacitancia parásita del sustrato de silicio. Esta frecuencia es comparable a la de los mejores transistores de alta movilidad electrónica del mercado que tienen longitudes de canal similares. El resultado es un transistor ultrarápido cuya velocidad es similar a la de los mejores dispositivos de silicio existentes de tamaño similar y con mucha menos degradación que los primeros prototipos. Y lo más relevante: este dispositivo ya está al alcance de simuladores de circuitos que pueden utilizar nuestros estudiantes de ingeniería en sus trabajos de fin de carrera. Aún no está en el mercado, sólo a nivel de laboratorios de I+D, pero no falta mucho para verlo a "nuestro lado" en la vida cotidiana.

Y en toda esta carrera de convertir el sueño del grafeno en una nueva realidad tecnológica, España no queda atrás. La empresa tecnológica Graphenea, ubicada en el centro Nanogune de San Sebastián, en el País Vasco, se suma a una línea de investigación que puede transformar la electrónica del futuro. Graphenea se propone producir obleas de grafeno de alta calidad, bajo coste y tamaño industrial, lo que

representará un extraordinario hito de la NanoCiencia y la Nanotecnología española

En definitiva, soñar si cuesta..... cuesta inversiones, esfuerzo, dedicación y mucho trabajo científico y tecnológico para lograr una nueva tecnología: la nanotecnología del grafeno. ■

Bibliografía

1. <http://es.wikipedia.org/wiki/Grafeno>
2. P.R. Wallace, *Physical Review* 71, 622 (1947)
3. N. M. R. Peres. *Reviews of Modern Physics* 82, 2673-2700 (2010)
4. S. Iijima, *Nature* 354, 56 (1991)
5. M.M. Fogler, A.H. Castro Neto, and F. Guinea *Phys. Rev. B* 81, 161408(R) (2010)
6. Grafeno impreso:
<http://www.20minutos.es/noticia/748198/0/pantalla/tactil/grafeno/>
7. Tintas de grafeno:
http://www.technologyreview.com/es/read_article.aspx?id=666
8. Nanotransistores de Grafeno:
http://www.nanomercado.com/nanotransistores-ultrarrapidos-basados-e/_C3VTDDat-mVFzWaf4OIn_f6qQsNXbt8raC_1of6pFMy2TkeEKtqx6ekUwwcYyfYhi
9. Lei Liao et al., *Nature* 467: 305-308, 16 September 2010.
10. Empresa GRAPHENEA, Gipuzkoa
<http://www.diariovasco.com/v/20101010/al-dia-local/gipuzkoa-entra-carrera-grafeno-20101010.html>