



GRAFENO

*DESDE LOS NANO HEXÁGONOS HACIA LAS
INFINITAS APLICACIONES*

Gabriela C. Peláez -

gabrielacpelaez@gmail.com

2do cuatrimestre 2020

*Física Contemporánea 2 - Departamento
de Física - FCEyN - UBA*

*Profesores: Lombardo Fernando - Villar
Paula*

En el siguiente artículo repasaremos algunas de las características más destacables del grafeno, las cuales son la base de la gran diversidad de aplicaciones que tiene y promete tener este material en todo tipo de tecnologías de todas las áreas.

Índice

Introducción	1
Todo bien con el grafeno pero, ¿Qué es un semiconductor?	3
Estructura electrónica del grafeno, ¿de dónde viene el panal?	7
Aplicaciones para todos	9
Conclusión	12
Bibliografía	13

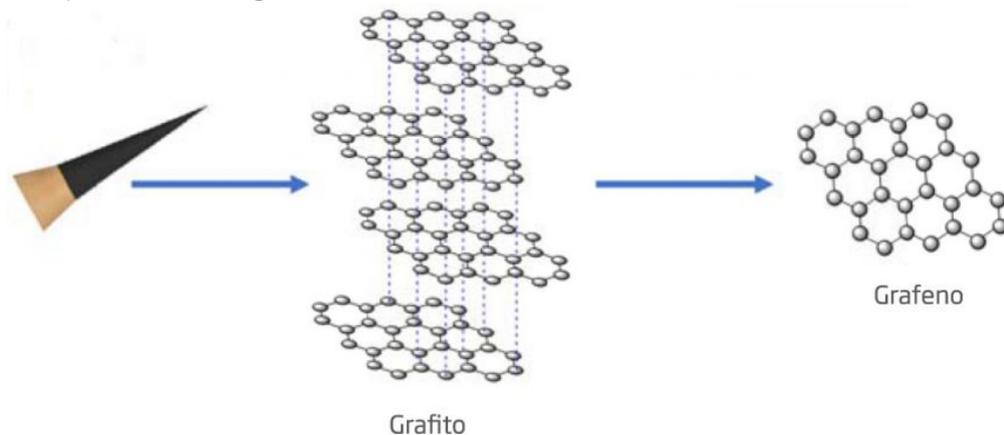
Introducción

Día a día, la tecnología avanza pequeños pasos, que se hacen grandes con el paso de un año, y gigantes con el paso de una década. Investigadores de todas las ramas trabajan continuamente para que estos avances sucedan. En este artículo nos centraremos únicamente en un material que tiene especial aplicación en el desarrollo de micro y nano componentes electrónicos, entre muchas otras: el grafeno. Aún con sus jóvenes dieciséis años de vida, el grafeno es un material que promete mejorar la calidad de los microprocesadores de nuestras computadoras, e incluso más, podría aportar sus increíbles propiedades a una gama tan amplia de tecnologías que van desde aviones, hasta camperas, pasando por raquetas de tenis y la desalinización de agua.

Pero, ¿qué es el grafeno? Proveniente del grafito, en palabras acotadas, se puede decir que es un material bidimensional compuesto por carbono, es decir, se trata de una lámina la cual su ancho está en el rango del tamaño de un átomo de este elemento; es un semiconductor, lo que significa que dependiendo de una variedad de factores, como la temperatura, el campo eléctrico, magnético o la radiación que se le aplica, se puede comportar como un aislante o como un conductor. Esto lo hace un gran candidato para reemplazar, o más bien, "colaborar" con el silicio en la fabricación de circuitos electrónicos con mayor rendimiento y menor disipación de calor, lo que le daría una solución al problema planteado por Moore hace ya unos cuantos años.

Pero las propiedades de este famoso material no se agotan en lo relacionado a la conducción, además cuenta con una gran resistencia a la tracción y una dureza mucho mayor que la del acero en las mismas dimensiones, es transparente, químicamente inerte y la lista sigue. Todas estas características son dadas por la estructura electrónica particular que tiene este material. La unión de los átomos de carbono es tal que los enlaces forman una trama hexagonal como un panal de abejas sintético. En otras palabras, son los orbitales de los átomos de carbono los que están posicionados de forma tal que permiten esta variedad de propiedades. Ya ahondaremos con más detalle a lo largo de este artículo.

Históricamente, el primero en plantear teóricamente la estructura electrónica y propiedades del grafeno fue Philip Russell Wallace en 1947, pero no fue sino hasta el 2004 que los físicos Andréy Gueim y Konstantín Novosiólov pudieron exfoliar una única capa de grafito, es decir, una capa de grafeno, ya que este material tan común del que está compuesto cualquier lápiz, es a escala microscópica, una superposición de sucesivas capas de grafeno, apiladas unas sobre otras. Luego de este acontecimiento, en el 2010 Guiem y Novosiólov ganaron el Premio Nobel de física por sus investigaciones sobre este material.



Todavía no se pueden apreciar en la vida diaria la larga lista de aplicaciones que los investigadores nos han prometido que tendrá este material, y pareciera que solo son promesas vacuas que se pierden en el viento, pero tenemos que tener en cuenta que, aunque todo avanza más vertiginosamente en nuestros tiempos, comparado con el tiempo de vida que tiene el grafeno, la cantidad de avances que se han logrado son increíbles. El descubrimiento del grafeno permitió que se inventen otros materiales bidimensionales, como el Nitruro de Boro y el Dicalcogenuro de Galio, y recientemente el grupo de investigación del MIT, dirigido por el español Pablo Jarillo-Herrero, ha propuesto nuevas posibilidades a partir de superponer dos capas de este material y rotar una respecto a la otra en un ángulo específico (o "mágico"), que lo denominaron *grafeno rotado*. La investigación en el área existe y está en auge, solo es cuestión de esperar y que

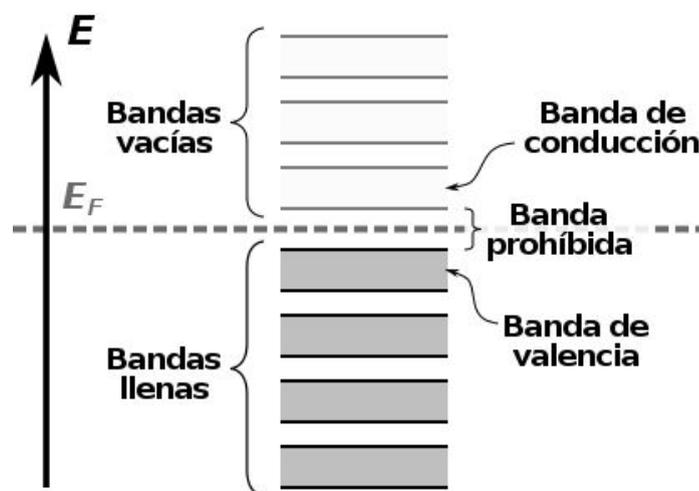
la producción industrial mejore, para poder empezar a ver el grafeno en más productos de nuestra vida diaria.

Todo bien con el grafeno pero, ¿Qué es un semiconductor?

Para entrar en contexto, veamos por qué es interesante que el grafeno sea un semiconductor. Podemos ejemplificar dos situaciones en las que esto podría ser provechoso. Por un lado, las láminas de grafeno son transparentes, y también, conductoras, entonces se estipula que se podrían fabricar componentes electrónicos como, por ejemplo, pantallas de celulares o televisores, sobre láminas completamente transparentes. En otra instancia, está el problema planteado por el cofundador de Intel, Gordon Moore, quien en 1965 afirmó que, aproximadamente cada dos años, se doblaría la cantidad de transistores por unidad de superficie en los circuitos integrados. Hoy en día, estos circuitos están formados mayoritariamente de silicio, otro semiconductor, y desde que fue planteada, la Ley de Moore se ha ido cumpliendo. Pero es evidente que la duplicación tiene un límite, ya que los electrones circulan por estos circuitos de silicio cada vez más pequeños y con mayor velocidad (debido a una mayor velocidad de procesamiento de las computadoras, por ejemplo), lo que se traduce en un mayor gasto energético, es decir, mayor efecto Joule. Este problema se ha podido controlar hasta el momento, a costa de limitar la capacidad de procesamiento de los circuitos integrados, pero con la suma (y no necesariamente reemplazo) del grafeno con el silicio, se podría encontrar una solución a este conflicto. ✓

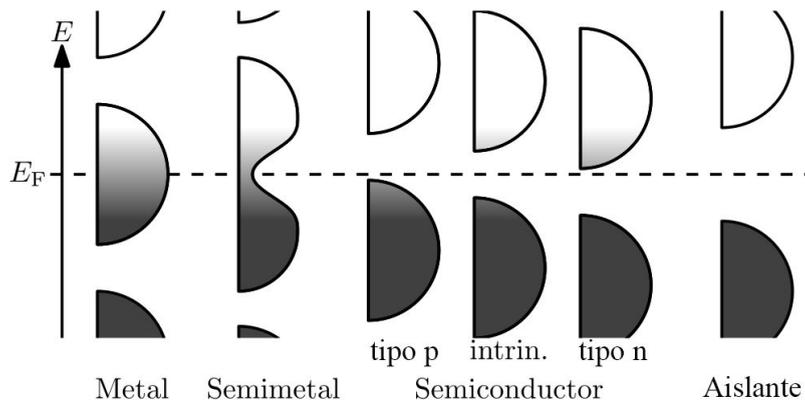
Ahora que sabemos qué papel podría jugar el grafeno como semiconductor, estamos en condiciones de explicar más en detalle los procesos y fenómenos que le dan esta característica. Los materiales se pueden clasificar en tres grandes grupos y podemos pensarlos como un espectro en el que, en un extremo, por ejemplo empezando desde la izquierda, se encuentran los conductores y en el otro extremo a la derecha, los aislantes. Los materiales que se establecen en el centro del espectro son, como ya se podrá adivinar, los semiconductores, que pueden comportarse como aislantes o como conductores dependiendo de distintos factores externos, como el campo magnético o eléctrico al que son sometidos o al dopaje que se les haga, que explicaremos qué es un poco más adelante. Lo que posiciona a un material en este espectro, es decir, lo que determina su conductividad, es la posición de las llamadas *Bandas de Valencia* o bandas llenas, y de las *Bandas de Conductividad* o bandas vacías respecto al Nivel o *Energía de Fermi*. Vamos por partes, antes de adentrarnos en esto, tenemos que entender de dónde vienen estas llamadas bandas.

En los circuitos eléctricos, los que se mueven por el material (por decirlo de una forma coloquial) son los electrones, que, a su vez, se los puede denominar partículas fermiónicas o *fermiones*. No nos adentraremos a explicar cuáles son las características de este tipo de partículas, nos basta con saber que verifican el Principio de Exclusión de Pauli, que dicta que los fermiones no pueden ocupar simultáneamente un mismo estado cuántico, es decir, no pueden estar en un mismo nivel energético a la vez. Entonces, cuando en un átomo hay varios electrones, estos van ocupando los distintos niveles, desde el más energéticamente bajo en adelante, sin superponerse. La Energía de Fermi es la correspondiente al nivel más alto ocupado por un electrón (a 0°K), es decir, que los niveles que están por debajo de éste están llenos y se los denomina bandas de valencia, y los que están por encima están vacíos, y se los llama bandas de conducción. Un detalle que vale la pena remarcar es que, en general, cuando pensamos en los estados de energía que puede tener un electrón, pensamos en el caso discreto de un solo átomo, pero ahora estamos hablando de materiales extensos. Aunque en cada átomo que compone el material los electrones



no pueden tener un mismo estado energético, si pueden estarlo dos electrones de dos átomos vecinos y por eso hablamos de bandas, es el nivel en el que conviven los electrones de todos los átomos con una misma energía.

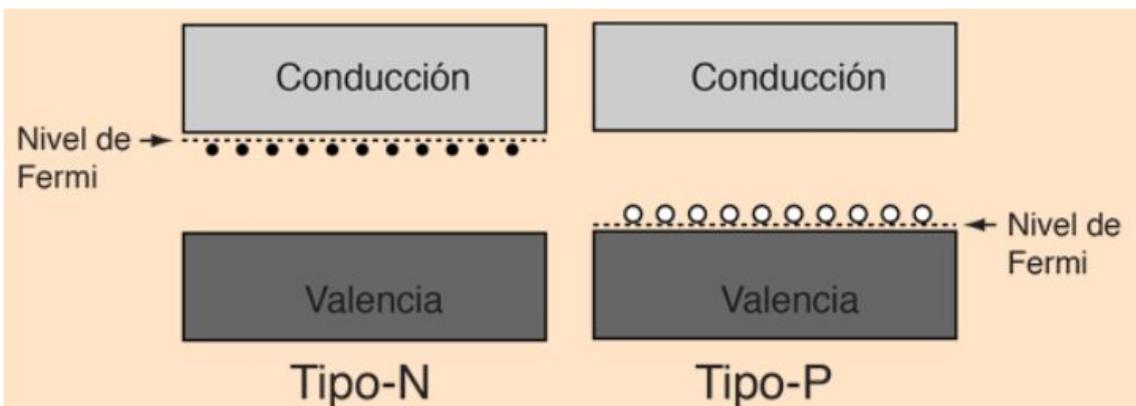
Volviendo a la imagen mental del "espectro conductivo" que habíamos armado unos párrafos atrás, y como podemos ver en la figura de debajo, los materiales son más o menos conductores dependiendo de qué tan alejadas están entre sí las bandas de valencia y las bandas de conducción, ya que, entre más separadas están, mayor dificultad tendrá el electrón para pasar de un nivel al otro. Esta separación entre las bandas, es decir, el costo energético que tienen que "pagar" los electrones para pasar de un lado u otro del nivel de Fermi, se lo llama *band gap* o banda prohibida.



Hasta ahora hemos dejado entrever que el movimiento de los electrones entre las bandas separadas por el nivel de Fermi está relacionado con la conductividad, pero ¿cómo es este mecanismo?

A temperaturas mayores al cero absoluto, algunos electrones pueden excitarse y, así, cruzar la banda prohibida y llegar a la banda de conducción. Como bien dice su nombre, los electrones que se encuentran en esta banda están disponibles para conducir. Sin embargo, en este reordenamiento que hizo la partícula, dejó tras de sí una deficiencia de carga o *hueco*. Así se genera una corriente en la que algunos electrones suben a la banda vacía, dejando un hueco vacante en la banda de valencia, que es llenado por otro electrón cercano que estaba en la banda superior, y así sucesivamente. Este juego entre las cargas disponibles en la banda de conducción y los huecos que estas mismas generan, son las que contribuyen al flujo de corriente, aunque su valor neto termina siendo nulo.

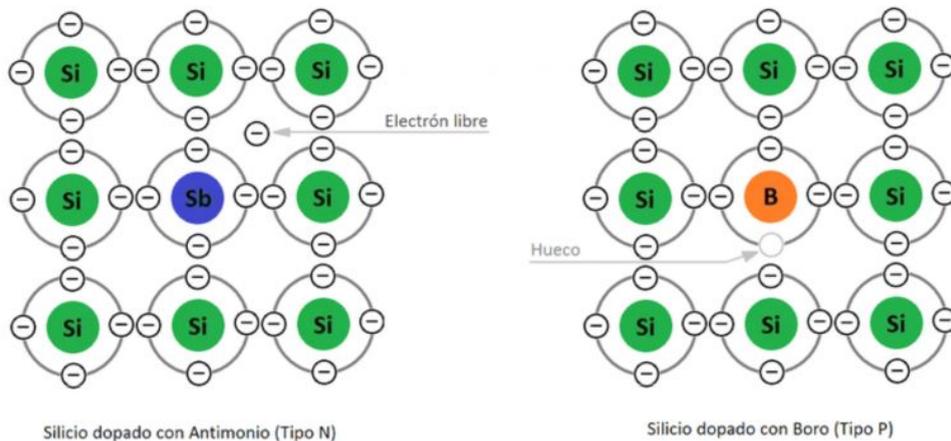
Los semiconductores que acabamos de describir los llamamos *intrínsecos*, porque cuentan con esta propiedad de forma natural, y los casos paradigmáticos son el silicio y el germanio. Sin embargo, a estos materiales se les puede añadir impurezas, o dicho más comúnmente, se los



puede *dopar*. Hay dos tipos de dopajes, los *tipo p*, que crea una abundancia de huecos (o cargas *positivas*, por eso la *p*) por encima de la banda prohibida, lo que hace que ésta se achique, el nivel de Fermi se desplace y permite que los electrones excitados de la banda de valencia crucen esta

diferencia con mayor facilidad. Por otro lado, con los materiales dopados *tipo n*, el proceso es similar, solo que en este caso el dopaje provee electrones adicionales (o cargas *negativas*) en una banda de valencia extra más cercana a la siguiente banda de conducción, por lo que éstos pueden ser más fácilmente excitados hacia la banda vacía.

Estas impurezas que se agregan al material son otros elementos químicos que tiene una cantidad de electrones tal en su capa externa que permite este agregado de huecos o cargas. Por ejemplo, en un dopaje tipo n sobre silicio se puede hacer con fósforo o antimonio, como el silicio tiene cuatro electrones en su última capa, y cualquiera de estos dos elementos tiene cinco, la forma en la que se une con los átomos de silicio es igual, pero queda un electrón no ligado. Esto sucede igual en un dopaje tipo p, (que se puede hacer con aluminio o boro, que tienen tres electrones de valencia), solo que sucede lo contrario, como ya dijimos, en vez de aportar un electrón, cada elemento agregado aporta un hueco.



Hasta el momento hablamos de los semiconductores por sí mismos, saltando que sucedería si les aplicáramos alguna influencia externa sobre ellos. Si, por ejemplo, hiciéramos circular una corriente por un trozo de silicio, ya sea dopado o no, el movimiento de los electrones y los huecos sería el mismo que el que se describió recién, solo que sometido a la diferencia de potencial dada por la fuente externa.

Volviendo un poco al caso del grafeno, éste es un semiconductor especial, porque las bandas vacías y las bandas de valencia están pegadas en el nivel de Fermi, lo que le otorga dos características: por un lado, se lo denomina "semimetal", porque al estar unidos ambos grupos de bandas, estas tienen una forma similar a la de los metales, y por otro, es un semiconductor de "cero-banda" y como los electrones no tiene un nivel de energía el cual superar, pueden pasar de una banda a la otra con mayor facilidad, sin pagar el costo del band gap. Además, el dopaje o la manipulación del nivel de Fermi se puede realizar mediante campos eléctricos o magnéticos, sin necesidad de recurrir a cambiar la estructura cristalina del material. Por ejemplo, si tenemos un

arreglo formado por dos láminas, una de grafeno y otra de un metal, a su vez están separadas por un aislante muy fino y aplicamos un voltaje constante entre las láminas, el campo eléctrico resultante modifica la conductividad del grafeno. Dependiendo de la polaridad del voltaje, es decir, de la orientación del campo E, los electrones se van a mover hacia las bandas de conducción o hacia las bandas de valencia, lo que se traduce en cargas adicionales o huecos disponibles en las bandas.



Estructura electrónica del grafeno, ¿de dónde viene el panal?

Podemos decir que los electrones son el “pegamento” que mantiene unidos los enlaces químicos de las moléculas y, por lo tanto, a los propios materiales. Entender la estructura electrónica de un material, es decir, cómo los electrones forman estas uniones, es entender las propiedades del material mismo.

Antes de adentrarnos de lleno a entender la razón de la particular trama hexagonal del grafeno, repasemos un poco qué son los *orbitales atómicos*. Si pensamos en único átomo, supongamos que sea uno de fósforo, y nos fijamos en la tabla periódica, su número atómico es 15. Recordando la regla del octeto que aprendimos en alguna clase de química que guardamos oxidada en algún rincón de nuestra mente, sabemos que en la primera capa corresponden dos electrones, en la siguiente ocho y en la última, cinco. Es decir, éstos se “acomodan” en tres distintas capas. Los orbitales son *donde* se acomodan estos electrones o, mejor dicho, dónde es probable encontrarlos, dada esta probabilidad por una solución particular de la ecuación de Schrödinger correspondiente a esta partícula. Esta ecuación nos dice la geometría particular de cada orbital, al que le corresponde una energía específica.

No nos adentraremos a explicar más en profundidad sobre cómo van cambiando los orbitales en las distintas capas energéticas, nos alcanza con saber que los correspondientes a la última capa son los responsables de que se den las uniones químicas entre distintos elementos, de asentar este “pegamento” del que hablábamos al inicio.

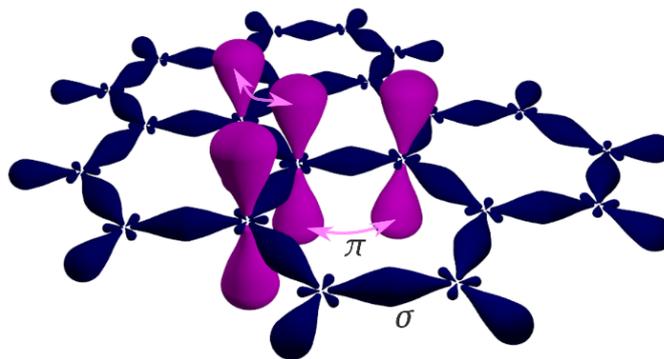
Necesitamos un paso antes de explicar la estructura electrónica del grafeno, hablemos un poco sobre la *geometría molecular*. Como sabemos, las moléculas están formadas por átomos que pueden estar unidos de distintas maneras, dependiendo de la naturaleza de los mismos (uniones iónicas, covalentes y metálicas). Aunque solemos pensarlo como circuitos en una hoja, las moléculas se acomodan en el espacio tridimensionalmente. Al unirse los distintos elementos, los electrones en la última capa de cada átomo se repelen entre sí y esta repulsión es la que le da su geometría a la molécula. Esta geometría puede describirse mediante la longitud y el ángulo de los

enlaces y a distinta disposición, distintas propiedades tendrá finalmente el material. Por ejemplo, una simple molécula de dióxido de carbono consta de dos enlaces covalentes dobles, su geometría es lineal y éstos están separados por un ángulo de 180° .



Molécula de dióxido de carbono

Con esto, podemos adentrarnos en cómo es la estructura electrónica del grafeno. Un átomo de carbono tiene seis electrones distribuidos en sus orbitales. Dos de ellos se acomodan en el primer orbital, por lo que nos quedan cuatro. Tres de estos electrones se unen forma covalente con los carbonos vecinos, completando el octeto estable y acomodándose a 120° entre sí, en una geometría molecular trigonal plana, es decir, todas las uniones entre los carbonos que forman el grafeno comparten el mismo plano, el responsable que podamos decir que es un material



bidimensional. En la figura, las uniones covalentes están representadas por los orbitales violeta oscuro y es la que le da al grafeno la famosa forma de panal de abeja y, además, es la que le provee sus destacables propiedades mecánicas.

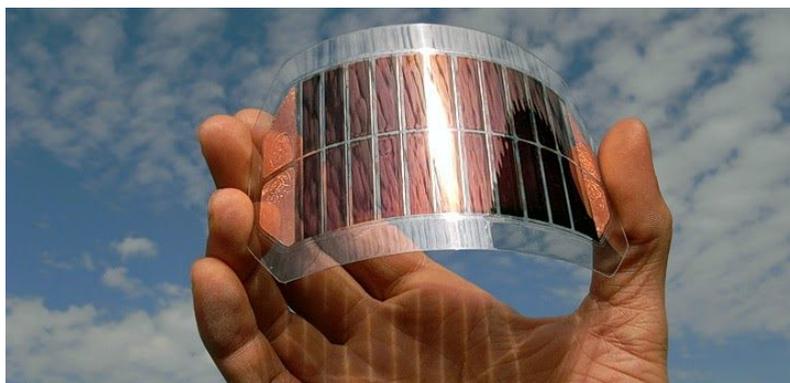
El electrón que nos queda se acomoda en un orbital perpendicular a este plano formado por la trama hexagonal, y es al que se le deben las propiedades conductoras que describimos en la sección anterior. Se dice que este electrón se encuentra deslocalizado, lo que significa que los electrones en estos orbitales, en cada átomo de carbono, están libres o disponibles para moverse por el plano y no se les puede asignar una posición definida dentro del material. Así es como facilitan la conducción eléctrica.

A continuación, entraremos más en detalle sobre la variedad de propiedades que tiene el grafeno y que a su vez puede otorgarle a otros materiales, además de las dos que ya contamos hasta ahora. ✓

Aplicaciones para todos

El futuro es imparable, y aunque parece lejano, muchos de los avances tecnológicos que se nos prometió que mejorarían nuestras vidas durante de años, ya están en nuestro día a día. Pero no esperamos sólo las promesas de la tecnología relacionadas con el confort, también queremos aquellas relacionadas a solucionar problemas contemporáneos como la contaminación y el calentamiento global o la cura de enfermedades. El grafeno tiene potencial para involucrarse y dar grandes avances en la tecnología relacionada con todas estas situaciones (las urgentes y las no tanto), a continuación revisaremos someramente algunas de ellas.

En principio, las aplicaciones que nos tendrían que parecer más obvias a esta altura son las relacionadas con la conductividad eléctrica, que nos hemos dedicado largamente a desarrollar cómo es en el caso del grafeno. Esta propiedad puede ser aprovechada, por ejemplo, en el desarrollo de baterías, ya que permite disminuir sus tiempos de carga y descarga en estos aparatos que la contengan. Con láminas de óxido de grafeno a las que se le inducen intencionalmente imperfecciones y defectos, se pueden desarrollar ánodos de batería diez veces más rápidos de los actuales en las baterías de litio. En otro campo, se ha podido mejorar la eficiencia de celdas solares gracias a utilizar grafeno dopado con silicio amorfo (TFSA). Esto hace que el grafeno se vuelva un mejor conductor, lo que a su vez mejora la capacidad de las celdas. Además, la TFSA es más estable, es decir, es más duradera, que otras combinaciones de elementos.



Muchas de las aplicaciones que se le atribuyen al grafeno dependen de los materiales a los que se lo acople o combine. Como es bidimensionalmente fino, esto hace que sea a su vez muy flexible y liviano, lo que permite combinar esta flexibilidad y su conductividad (tanto eléctrica

como térmica, a la que no le hemos dado mucho espacio en este informe), para generar artefactos que creeríamos imposibles. Por ejemplo, en unión con textiles se podrían obtener prendas impermeables y con gran conservación del calor. Además, el grafeno podría permitir que se integren sensores en la misma indumentaria. Sin embargo, los procesos de manufactura actuales siguen siendo costosos en tiempo y dinero y los materiales usados no son biodegradables y usan grandes concentraciones de tintas hechas en base a metales pesados, además que son necesarias grandes cantidades de agua para la fabricación de estas telas.

Otra promesa tecnológica, que surge de combinar todas estas propiedades del grafeno, son las pantallas flexibles. Al ser tan fino, esto hace que sea transparente a nuestros ojos, y si se une a otros materiales translúcidos y flexibles, se pueden obtener sensores tan delgados como el fabricante lo requiera. Estos sensores constan de una capa de grafeno que cubre un arreglo de cavidades que forman un dispositivo capacitivo micro-electro-mecánico. Éstos pueden detectar diferencias de presión con una sensibilidad considerable, sumado a las propiedades conductoras que ya bien conocemos, se podrían fabricar "pieles" electrónicas aplicables en salud, tecnología hogareña, videojuegos, robótica y más.

Las propiedades que describimos en las secciones anteriores también están relacionadas con las propiedades fotónicas y ópticas del grafeno. Por la gran movilidad de pueden tener las cargas a través de su superficie y la absorción de un espectro considerable de la luz que posee, puede ser utilizado en la detección, modulación y manipulación de la luz. Esta característica puede ser utilizada en dispositivos de laboratorio, pero también tiene aplicaciones en telecomunicaciones.

Anteriormente mencionamos como el grafeno podría mejorar notablemente la calidad y el rendimiento de los circuitos integrados de las computadoras, no reemplazando, pero sí apoyando al silicio, el cual es el material mayoritariamente utilizado con este fin por ser un semiconductor. A lo largo de este escrito ya han quedado plasmadas las razones por las que el grafeno se comporta como un semiconductor, pero además, debido a su buena conductividad térmica, podría mejorar el rendimiento de estos circuitos disipando el calor más fácilmente, lo que se traduce en un menor gasto energético general en estos dispositivos.

Otro área de aplicación del grafeno es en el revestimiento de aviones, automóviles y cascos. Esto último, por ejemplo, podemos verlo en los productos fabricados por una alianza entre empresas italianas e investigadores en el tema, la cual permitió la manufacturación de cascos con un recubrimiento que contiene el material que nos atañe. Esta innovación permite una mejor distribución de la fuerza en el caso de un impacto y provee una mejor conductividad del

calor, lo que se traduce en una mejor experiencia para el usuario. El proceso de fabricación comienza con la producción de un polvo de grafeno, que luego se mezcla con otros compuestos con los que se recubre el exterior de los cascos. Los mismos que ya se encuentran en venta hoy en día.



En el caso de los aviones, por un lado, en colaboración entre industria y academia, se está investigando para poder incorporar el grafeno a componentes que ya integran estas máquinas para poder hacerlos más livianos, y por lo tanto, que la maquinaria final consuma menos combustible; por otro, aunque aún se está estudiando el generar compuestos con los que se pueda recubrir aviones, ya que las condiciones a las que están expuestos estos son muy extremas, se cree que para dentro de diez años ya podríamos ver en aplicado este avance a gran escala.

Otra área de aplicación para este material, completamente distinta, es la de la medicina. Hoy en día ya se utiliza el grafeno para desarrollar biosensores capaces de detectar moléculas importantes del organismo como ácidos nucleicos, proteínas y sus factores de crecimiento, fusionando este material con otros componentes biológicos como hidratos de carbono. También se ha demostrado que el óxido de grafeno inhibe el crecimiento de bacterias, aunque todavía no se puede determinar completamente la razón de este efecto. Aún más, se ha podido ver que hay una gran biocompatibilidad entre los tejidos orgánicos y estos nanomateriales, lo que hace suponer que podrían ser utilizados para la reparación de funciones de tejidos que hayan sido perjudicadas.

Por último, hay grupos de investigación dedicados a indagar sobre el desarrollo de dispositivos con base en el grafeno que sirvan para descontaminar y desalinizar aguas o gases, ya que debido a que su estructura nanométrica puede ser manipulada en laboratorio, de forma tal que se pueden producir láminas con agujeros o rendijas lo suficientemente pequeñas para que dejen pasar o no moléculas, dependiendo de su tamaño.

Conclusión

A fin de cuentas, el grafeno es un material que promete revolucionar todas las áreas a las que tiene alcance, tiene propiedades extraordinarias y estas se pueden diseñar y manipular prácticamente a deseo del fabricante. Sin embargo, aunque las ideas son muchas y lo que se ha alcanzado a desarrollar hasta ahora es significativo, es poco el tiempo que ha pasado desde que se lo pudo sintetizar por primera vez y todavía queda mucho por caracterizar.

Uno de los obstáculos más imponentes que se cierne sobre las aplicaciones del grafeno es la dificultad que todavía representa poder fabricarlo de manera barata y de calidad de forma masiva. Esto no significa que sea difícil de conseguir, con una simple búsqueda en internet se puede acceder a comprar polvo de óxido de grafeno, entre otras presentaciones en las que aparece. Lo que sucede es que este polvo es aplicable a determinados usos, y se fabrica de una determinada manera que no es la misma que es necesaria para la elaboración de las láminas transparentes, por ejemplo.

Otro aspecto importante es que aún hace falta confirmar la biocompatibilidad y la toxicidad de los materiales de grafeno, antes de que puedan ser utilizados ampliamente. Aunque algunos estudios confirman que el grafeno no es tóxico para los organismos y las células humanas, a medida que la aplicación práctica y la preparación de nuevos materiales basados en grafeno aumente, esto debería corroborarse sistemáticamente.

La sintetización del grafeno permitió que se pudiera indagar e inventar toda una nueva gama de materiales bidimensionales, que implican a su vez, toda una nueva física esperando al ingenio de los investigadores, con desarrollos increíbles como es el caso del grafeno rotado. Sin duda, la clave para el desarrollo del grafeno es la colaboración entre investigadores de todas partes del mundo, y de esta área con la industria.

Comentarios

• Esta muy bien escrita y explicaciones muy claras.

Charla

Hay que basarla en qué es y para que se usa.
Habrá que explicar entonces qué son los superconductores → puedes buscar videos para ejemplificar
"Superconductividad: un superhéroe de mucha ciencia y poca ficción"

Bibliografía

- Depine, R. (2016), Chapter 1, Electromagnetics of graphene. Graphene Optics: Electromagnetic Solution of Canonical Problems. IOP Concise Physics.
- <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/index.html>
- IUPAC. Compendium of Chemical Terminology, 2nd ed. (the "Gold Book"). Compiled by A. D. McNaught and A. Wilkinson. Blackwell Scientific Publications, Oxford (1997). Online version (2019-) created by S. J. Chalk. ISBN 0-9678550-9-8.
- Simons, Jack (2003). [«Chapter 6. Electronic Structures»](#). An introduction to theoretical chemistry. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Orchin, Milton; Roger S. Macomber, Allan Pinhas y R. Marshall Wilson (2005). "Atomic Orbital Theory"
- Thauso Gad Pachamango, B., Zapata Revoredo, L.. (2008), Propiedades del grafeno y sus aplicaciones en el campo energético, Campus V. XXIII, N. 26, PP. 187-198, ISSN 1812-6049
- <http://graphene-flagship.eu/>
- <https://www.mub.eps.manchester.ac.uk/graphene/>
- Rodríguez Villalón, A., (2016), Grafeno: síntesis, propiedades y aplicaciones biomédicas. Trabajo de Fin de Grado, Facultad de Farmacia Universidad Complutense.

Bibliografía

- Depine, R. (2016), Chapter 1, Electromagnetics of graphene. Graphene Optics: Electromagnetic Solution of Canonical Problems. IOP Concise Physics.
- <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/index.html>
- IUPAC. Compendium of Chemical Terminology, 2nd ed. (the "Gold Book"). Compiled by A. D. McNaught and A. Wilkinson. Blackwell Scientific Publications, Oxford (1997). Online version (2019-) created by S. J. Chalk. ISBN 0-9678550-9-8.
- Simons, Jack (2003). [«Chapter 6. Electronic Structures»](#). An introduction to theoretical chemistry. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Orchin, Milton; Roger S. Macomber, Allan Pinhas y R. Marshall Wilson (2005). "Atomic Orbital Theory"
- Thauso Gad Pachamango, B., Zapata Revoredo, L.. (2008), Propiedades del grafeno y sus aplicaciones en el campo energético, Campus V. XXIII, N. 26, PP. 187-198, ISSN 1812-6049
- <http://graphene-flagship.eu/>
- <https://www.mub.eps.manchester.ac.uk/graphene/>
- Rodríguez Villalón, A., (2016), Grafeno: síntesis, propiedades y aplicaciones biomédicas. Trabajo de Fin de Grado, Facultad de Farmacia Universidad Complutense.