



Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú. Decana de América

Facultad de Ciencias Físicas

Escuela Profesional de Física

Grafeno, nanomaterial del futuro

MONOGRAFÍA TÉCNICA

Para optar el Título Profesional de Licenciado en Física

AUTOR

Jaime Marcelo VILLANUEVA PRÍNCIPE

ASESOR

Dr. Pablo Héctor RIVERA RIOFANO

Lima, Perú

2022



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Villanueva, J. (2022). *Grafeno, nanomaterial del futuro*. [Monografía técnica de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ciencias Físicas, Escuela Profesional de Física]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

Metadatos complementarios

Datos de autor	
Nombres y apellidos	Jaime Marcelo Villanueva Príncipe
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	06430563
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0003-4310-5884
Datos de asesor	
Nombres y apellidos	Pablo Héctor Rivera Riofano
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	08280449
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0003-3609-3889
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	Jesús Félix Sánchez Ortiz
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	06532590
Miembro del jurado 1	
Nombres y apellidos	Rocío Amelia Montalvo Balarezo
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	00640970
Datos de investigación	
Línea de investigación	A.2.1.1. Superconductividad
Grupo de investigación	No aplica.

Agencia de financiamiento	Sin financiamiento.
Ubicación geográfica de la investigación	Universidad Nacional Mayor de San Marcos Facultad de Ciencias Físicas 12°03'36.5"S 77°04'53.9"W de longitud y - 12.060126, -77.081642 de latitud.
Año o rango de años en que se realizó la investigación	2021 - 2022
URL de disciplinas OCDE	1.03.02 -- Física de la materia condensada https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#1.03.02 1.03.03 -- Física de partículas, Campos de la Física https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#1.03.03



Universidad Nacional Mayor de San Marcos
Universidad del Perú. Decana de América

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

ESCUELA PROFESIONAL DE FÍSICA

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE MONOGRAFÍA TÉCNICA EN LA MODALIDAD VIRTUAL PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE LICENCIADO EN FÍSICA

Siendo las 19:30 horas del lunes 31 de enero del 2022, en la Sala de Sesión Virtual de la Facultad de Ciencias Físicas, bajo la Presidencia del Dr. Jesús Félix Sánchez Ortiz, la Lic. Rocío Amelia Montalvo Balarezo (Miembro), y el Dr. Pablo Héctor Rivera Riofano (Asesor) se dio inicio a la Sesión Pública Virtual de Sustentación de Monografía Técnica para la obtención del Título Profesional de Licenciado en Física, mediante la Modalidad M3 - Por Suficiencia Profesional, del Bachiller:

JAIME MARCELO VILLANUEVA PRÍNCIPE

El Presidente del Jurado en primer lugar dio lectura al documento formal que designa al Jurado y aprueba el acto de sustentación de la Monografía Técnica, así como el Resumen del Expediente e invitó al citado Bachiller a realizar la presentación y exposición de su Monografía Técnica titulada:

“Grafeno, nanomaterial del futuro”

Concluida la exposición del candidato y luego de las preguntas de rigor por parte del Jurado, el Presidente del Jurado con el apoyo de la Unidad de Informática, invitó al Bachiller y al público a abandonar momentáneamente la Sala de Sesión Virtual, para dar paso a la deliberación y calificación por parte del Jurado.

Al término de la deliberación del Jurado el Dr. Jesús Félix Sánchez Ortiz invitó al candidato y al público en general a pasar a la Sala de Sesión Virtual, para dar lectura al Acta de Calificación, en cuyo contenido se ha registrado la nota obtenida por el bachiller, la misma que ha sido de:

15	QUINCE	BUENO
.....
(NÚMERO)	(LETRAS)	(MENCIÓN)

Habiendo concluido la Sustentación de la Monografía Técnica, el Presidente del Jurado, remitirá el Acta al Vicedecano Académico de la Facultad de Ciencias Físicas, quien la suscribirá dando fe de la realización del acto virtual de manera remota.

El Acta de Calificación será remitida al Director de la Escuela Profesional de Física quien a su vez solicitará la aprobación del Consejo de Facultad para el otorgamiento del Título Profesional de Licenciado en Física al Bachiller Jaime Marcelo Villanueva Príncipe.



Universidad Nacional Mayor de San Marcos
Universidad del Perú. Decana de América

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

ESCUELA PROFESIONAL DE FÍSICA

Siendo las 20:24 horas, se dio por concluido el acto académico, expidiéndose tres (03) Actas originales de la Sustentación de la Monografía Técnica.

Ciudad Universitaria, lunes 31 de enero del 2022.

Dr. Jesús Félix Sánchez Ortiz
PRESIDENTE

Lic. Rocío Amelia Montalvo Balarezo
MIEMBRO

Dr. Pablo Héctor Rivera Riofano
ASESOR



Firmado digitalmente por LOZANO
BARTRA Whualkuer Enrique FAU
20148092282 soft
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 14.08.2022 08:45:24 -05:00

Dr. Whualkuer Enrique Lozano Bartra
VICEDECANO ACADÉMICO - FCF

Datos de la plataforma virtual institucional del acto de sustentación:

ENLACE:

Unirse a la reunión Zoom

<https://us06web.zoom.us/j/87115448050?pwd=dXJsS0srQ3B1T2luSC9yUW5wNUdmZz09>

ID de reunión: 871 1544 8050

Código de acceso: 700512

Grabación archivada en:

<https://www.facebook.com/FCFUNMSM/videos/609660383460168>



Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú. Decana de América

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

ESCUELA PROFESIONAL DE FÍSICA

INFORME DE ORIGINALIDAD

1. Facultad: Ciencias Físicas.
2. Escuela Profesional: Física.
3. Director de la Escuela Profesional de Física: Dr. Carlos Javier Solano Salinas.
4. Operador del programa Informático de similitudes: Carmen Ysabelet Cano Gonzales - Secretaria de la Escuela Profesional de Física.
5. Documento evaluado: Monografía técnica para optar el Título Profesional de Licenciado en Física: **“Grafeno, nanomaterial del futuro”**
6. Autor del documento: Jaime Marcelo Villanueva Príncipe.
7. Asesor: Dr. Pablo Héctor Rivera Riofano.
8. Fecha de recepción del documento: 13/12/21
9. Fecha de aplicación del programa informático de similitudes: 17/12/21
10. Software utilizado
 - Turnitin
11. Configuración del programa detector de similitudes
 - Excluye textos entrecomillados
 - Incluye Bibliografía
 - Excluye cadenas menores a 40 palabras
12. Porcentaje de similitudes según programa detector de similitudes: 2% (dos por ciento)
13. Fuentes originales de las similitudes encontradas
 - hdl.handle.net 76%
 - Submitted to Universidad Nacional de Colombia 1%
 - Submitted to Pontificia Universidad Catolica del Peru 1%

Observaciones: se comprobó que la fuente hdl.handle.net corresponde a la monografía técnica.

Corresponde a una versión previa del documento actualmente analizado.

1. Calificación de originalidad
 - Documento cumple criterios de originalidad, con observaciones.
2. Fecha del Informe: 17 de diciembre del 2021

Carmen Ysabelet Cano Gonzales
Secretaria de la Escuela Profesional de Física



Firmado digitalmente por SOLANO
SALINAS Carlos Javier FAU
20148092282 soft
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 17.12.2021 12:53:33 -05:00



Dr. Carlos Javier Solano Salinas
Director (e) de la Escuela Profesional de Física

Jurado Examinador

Presidente Dr. Jesús Félix Sánchez Ortiz.

Miembro Lic. Rocío Amelia Montalvo Balarezo.

Asesor Dr. Pablo Héctor Rivera Riofano.

*A Dios, mis padres y hermanas,
por el apoyo incondicional brindado
para hacer realidad este proyecto.*

Agradecimientos

Al Dr. Pablo Héctor Rivera Riofano por su oportuna y acertada asesoría para la elaboración de este trabajo.

*Contempla las estrellas y aprende de ellas
la verdadera forma de honrar al Maestro.
En su silencio eterno, siguen su curso
según las leyes de Newton.
Albert Einstein.*

Resumen

Este trabajo, tiene un espíritu de ensayo en el cual mostramos el alcance que ha tenido el grafeno en los últimos dieciséis años, desde su obtención experimental en el 2004, que abarca desde la investigación de nuevos materiales, hasta las amplias posibilidades tecnológicas y las más recientes aplicaciones técnicas desde el ahorro de la energía hasta el medio ambiente pasando por la biomedicina, dispositivos electrónicos que puede tener un gran impacto en el bienestar de la sociedad en general.

Hacemos una reseña del grafeno, comparamos su estructura respecto a los otros alótopos de carbono, sucintamente describimos sus características mecánicas, térmicas, electrónicas, ópticas y topológicas, en última instancia al mencionar la bicapa de grafeno rotado.

Palabras claves: Grafeno, carbono, alótopos, bicapas, biosensores.

Abstract

This work has an essay spirit in which we show the scope that graphene has had in the last sixteen years, since its first experimental obtention in 2004, which ranges from the new materials research, in the wide technological possibilities and in the latest technical applications ranging from energy savings to the environment passing by biomedicine, electronic devices that can have a major impact on the well-being of society in general.

We review the graphene, comparing its structure with respect to other carbon allotropes, succinctly we describe mechanical, thermal, electronic, optical and topological characteristics, lately to refer to twisted bilayer graphene.

Keywords: Graphene, carbon, allotropes, bilayer, biosensors.

Índice general

1. Introducción	1
1.1. Objetivo.....	2
1.1.1. Objetivos particulares	2
1.2. Metodología	2
2. Nanociencia	3
2.1. Richard Feynman y el mundo de lo pequeño.....	4
2.1.1. Introducción	4
2.1.2. Conferencia de Feynman en la reunión anual de la Sociedad Americana de Física.....	4
2.2. ¿Qué es la nanociencia?.....	6
3. Nanotecnología	9
3.1. Nanotecnología.....	9
3.2. El efecto túnel.....	10
3.3. Diodo de efecto tunel resonante.....	11
3.4. El microscopio de efecto túnel (STM).....	12
3.4.1. Historia.....	12
3.4.2. Sonda de escaneo: un átomo a la vez	13
3.4.3. Don Eigler y los átomos del elemento xenón.....	14
3.4.4. Características del microscopio de efecto túnel (STM)	14
4. Breve historia del grafeno	17
4.1. Antecedentes	17
4.2. Precursores.....	17

4.2.1.	Philip Russell Wallace y la teoría de bandas del grafito	17
4.2.2.	Hanns-Peter Boehm y la exfoliación del grafito	18
4.2.3.	A. Geim y K. Novoselov en la obtención del grafeno	18
5.	El fascinante átomo de carbono	21
5.1.	El carbono	21
5.2.	Estructura del átomo de carbono	22
5.3.	Hibridación del átomo de carbono	22
5.3.1.	Hibridación sp^3 del carbono	24
5.3.2.	Hibridación sp^2 del carbono	24
5.3.3.	Hibridación sp del carbono	25
5.4.	Formas alotrópicas del carbono	26
5.4.1.	Grafito	27
5.4.2.	Diamante	28
5.4.3.	Nanotubos	29
5.4.4.	Fullerenos	30
6.	El grafeno	31
6.1.	Introducción	31
6.2.	Electrónica del grafeno	31
6.3.	¿Qué es el grafeno?	32
6.4.	Estructura atómica del grafeno	32
6.5.	¿Cómo se obtiene el grafeno?	33
6.6.	Propiedades del grafeno	33
6.6.1.	Propiedades mecánicas	33
6.6.2.	Propiedades térmicas	36
6.6.3.	Propiedades Eléctricas	37
6.7.	Principales aplicaciones del grafeno	40
6.7.1.	Dispositivos electrónicos	40
6.7.2.	Energías renovables	41
6.7.3.	Fabricación de pantallas táctiles flexibles	42
6.7.4.	Desalinización y depuración del agua de mar	42
6.7.5.	Generación y almacenamiento de energía	42
6.7.6.	Sensores y biosensores ultrasensibles de grafeno	43

6.8. Multicapas de grafeno rotado	44
6.9. Perspectivas del grafeno	45
7. Conclusiones	47
Bibliografía	49

Índice de figuras

3.1. André Geim y Konstantin Novoselov galardonados con el Premio Nóbel de Física en el año 2010 [6].	10
3.2. Esquema explicativo del efecto túnel y esquema del microscopio de barrido por efecto túnel (STM) [9].	11
3.3. En el lado izquierdo de la figura se muestra un diodo de tunelamiento de doble barrera sobre el que se aplica sucesivamente una diferencia de potencial eléctrica para aumentar la corriente de tunelamiento. En el lado derecho de la figura se muestra la característica corriente-voltaje del diodo mostrado en la izquierda. La corriente de tunelamiento disminuye cuando el nivel resonante del pozo desciende por debajo del potencial de los contactos. [7].	12
3.4. Diagramas esquemáticos de (A) Microscopio de efecto túnel de barrido (STM) y (B) Microscopio de fuerza atómica (AFM). Para STM, la corriente del túnel se mantiene constante por la altura de la punta, controlada por z-piezo. Para AFM, la fuerza (deflexión del resorte) se mantiene constante. La imagen corresponde a la figura 7.6 de la referencia [2].	14
3.5. Don Eigler y su equipo utilizando un STM colocaron 35 átomos de Xe sobre una superficie de Ni mostrando las letras de la IBM [12].	15
3.6. Microscopio de efecto túnel, una herramienta que permite visualizar la materia a nivel atómico, así como manipular átomos al modo que pronosticaba Richard Feynman [14].	16
4.1. Mineral de grafito [17].	20
5.1. Diagrama esquemático del átomo de carbono [19].	21
5.2. Esquema de los isótopos del carbono [20].	22

5.3. Configuración electrónica del carbono [18].	23
5.4. Hibridación sp^3 del átomo de carbono [22].	24
5.5. Geometría tetraédrica de los orbitales híbridos sp^3 [23].	25
5.6. Hibridación sp^2 del átomo de carbono [24].	25
5.7. Geometría trigonal de los orbitales híbridos sp^2 [25].	26
5.8. Hibridación sp del átomo de carbono [26].	26
5.9. Geometría lineal de los orbitales híbridos sp [27].	27
5.10. Alótropos del carbono: Fullerenos, nanotubos, grafeno, grafito y diamante [28].	27
5.11. Estructura cristalina del grafito [29].	28
5.12. El grafito es un material de carbono que se mezcla con la arcilla para elaborar las puntas de los lápices [31].	28
5.13. El diamante, mineral natural; forma cristalina del carbono [33].	29
5.14. Nanotubo de carbono [34].	29
5.15. El fullereno de forma esférica. [35].	30
6.1. Red hexagonal del grafeno muy semejante a un panal de abejas [38].	32
6.2. Estructura bidimensional del grafeno. Anillos hexagonales que tiene una altura de aproximadamente de un solo átomo [40].	33
6.3. Proceso de exfoliación mecánica.	34
6.4. El grafeno, mostrando su forma bidimensional [42].	35
6.5. Energía solar más eficiente gracias a las celdas livianas de grafeno [43].	35
6.6. Nanotubo, material flexible [44].	36
6.7. Celular transparente y flexible en base al grafeno [45].	36
6.8. Grafeno, material resistente. Puede detener una bala [47].	37
6.9. Estructura de bandas: banda de conducción (BC), banda de valencia (BV) y banda prohibida (BP) [48].	39
6.10. Estructura de bandas electrónicas para metales, semiconductores, aislantes y el grafeno [49].	40
6.11. Estructura de bandas del grafeno con los conos de Dirac. [15, 50].	40
6.12. Transistor de grafeno [52].	41
6.13. Placas solares de grafeno [53].	41
6.14. Móvil de pantalla flexible de grafeno [54].	42

6.15. Membrana de grafeno que actúa como filtro para desalinizar el agua de mar y convertirlo en agua potable [55].	43
6.16. Batería de grafeno [56].....	43
6.17. Sensores de humedad basados en el grafeno [57].	44
6.18. Superred de grafeno bicapa rotado en ángulo mágico [59].	45

Índice de tablas

5.1. Tipos de hibridación del carbono	24
6.1. Conductividad térmica de varios materiales	37
6.2. Conductividad eléctrica de varios materiales.....	38

Capítulo 1

Introducción

La nanociencia y la nanotecnología son términos asociados a la manipulación de objetos nanométricos y mesoscópicos por parte de la física, química y biología que han sido desarrollados durante las décadas del 70-90 del siglo XX y en las primeras décadas del presente siglo. Se consideran ciencias emergentes horizontales al igual que la edición de genes, CRISP-CAS9, la robótica, la inteligencia artificial y la computación cuántica, que conforman el desarrollo de tecnologías convergentes a la actual cuarta revolución industrial que se está implementando en los próximos años. Se vislumbra que éstas tecnologías convergentes contribuirán significativamente al crecimiento económico en las próximas décadas. Se estima que algunos de los materiales nanotecnológicos, como por ejemplo el grafeno, innoven completamente sectores industriales tan consolidados como el de la electrónica, donde el grafeno sustituiría, parcialmente, algunos materiales que en la actualidad están en todas partes, como el silicio. El grafeno, la red hexagonal de átomos de carbono con unas propiedades extraordinarias que abarcan desde una gran conductividad a excelentes propiedades mecánicas, entre otras, fue descubierto en el Departamento de Física de la Universidad de Manchester, Reino Unido, en el 2004¹, por un equipo de físicos conformado por los rusos André Geim, que investigaba junto al estudiante de postdoctorado Konstantin Novoselov las propiedades del grafito y sus derivados, gracias a esta investigación fueron galardonados con el premio Nobel de Física en el año 2010 [1].

La nanociencia y la nanotecnología está desarrollando numerosos avances para muchos campos, a parte de la física, la química y la biología, a la medicina y a la tecnología. Im-

¹Después del éxito alcanzado por la obtención del grafeno, la Universidad de Manchester decide financiar el *Manchester Centre for Mesoscopic and Nanotechnology*.

pulsará la creación de nuevos materiales con propiedades extraordinarias, nuevas aplicaciones informáticas con componentes probablemente más rápidos o biosensores capaces de detectar y destruir células cancerígenas en las partes más delicadas del cuerpo humano, como el cerebro. Las posibilidades que se plantean son enormes y muchos progresos de la nanociencia estarán entre los grandes avances tecnológicos que cambiarán el mundo [2,3]

1.1. Objetivo

El objetivo de la monografía técnica es mostrar, mediante una revisión de la literatura y haciendo una investigación bibliográfica fundamentada, los antecedentes, las características, las propiedades y las aplicaciones del grafeno, en un lenguaje simple y apropiado para estudiantes de nivel secundario.

1.1.1. Objetivos particulares

1. Describir el nacimiento de la nanociencia y la nanotecnología.
2. Describir la estructura física del carbono y el grafeno.
3. Mostrar las propiedades y características del grafeno.
4. Mostrar las aplicaciones más notables del grafeno.
5. Mostrar las nuevas facetas que presenta el grafeno en multicapas.

1.2. Metodología

Para realizar la investigación documental sobre el grafeno, se dio inicio con la recopilación de la información basada principalmente en fuentes electrónicas, tales como libros, tesis, papers y monografías. Se seleccionó el material bibliográfico existente con la información pertinente hacia los objetivos de la monografía.

Capítulo 2

Nanociencia

La nanociencia, en términos concretos, surge gracias a la invención del microscopio de escaneo por efecto túnel (STM) en 1981 por Gerd Binnig y Heinrich Rohrer, quienes fueron galardonados con el Premio Nobel de Física en 1986 por dicho invento [8]. Esta asombrosa herramienta con resolución atómica, amplió enormemente la obtención de imágenes a escala atómica y se utilizó también para la manipulación de átomos y moléculas [3] sobre una superficie. Esta herramienta fue desarrollada por la física de superficies, una rama que surge en los años 60s cuando surgen las técnicas de alto vacío para evaporar materiales a muy bajas presiones y obtener películas de alta calidad con espesores de algunos angstroms y con control estricto de las impurezas.

En los años 90s, para hacer más atractivo las áreas de la física y la química en el desarrollo de las heteroestructuras, superficies e interfaces se inventa el término nanociencia. Como el desarrollo de la construcción de dispositivos mediante la técnica *up to down* hizo posible abordar también, ciertos problemas relevantes como la fabricación de nuevas máquinas moleculares que *caminan* y se *mueven* autónomamente, los cuales están siendo probados como transportadores de compuestos activos a zonas relevantes del cuerpo humano donde se dejan dichos compuestos para realizar el trabajo específico en aquella zona. La nanociencia y la nanotecnología se retroalimentan con cada uno de sus avances, por ello cada avance involucra nuevos avances en un ritmo vertiginoso y cada vez se replantean nuevos hitos y nuevas interpretaciones mecánico-cuánticos de sus resultados [3].

2.1. Richard Feynman y el mundo de lo pequeño

2.1.1. Introducción

Muchos consideran que el inicio de la nanociencia y nanotecnología es una tarde en 1959, cuando el físico norteamericano Richard Feynman, ganador del premio Nobel de Física en 1965 por su contribución al desarrollo de la electrodinámica cuántica, planteó el tema en una conferencia anual de la Sociedad Americana de Física realizada en el Instituto Tecnológico de California, titulada “Hay mucho espacio en el fondo”¹. Plantea que si somos capaces de crear técnicas para la manipulación de los átomos y moléculas, la posibilidad de escribir enciclopedias enteras sobre la cabeza de un alfiler en un futuro es bastante factible. El preveía la posibilidad, en un futuro muy cercano, de manipular directamente los átomos y las moléculas. Feynman explicó que ninguna ley física impedía la miniaturización de las computadoras, o el almacenamiento de la información de todos los libros existentes en un cubo del tamaño de una partícula de polvo o construir máquinas con átomos o moléculas. Pero, por aquel entonces aún no se contaban con las herramientas necesarias para realizar el trabajo que Feynman sugería [3].

2.1.2. Conferencia de Feynman en la reunión anual de la Sociedad Americana de Física

Richard Feynman en su conferencia planteó las siguientes ideas:

Hay mucho espacio en el fondo

“Me imagino que los físicos experimentales a menudo deben mirar con envidia a hombres como Kamerlingh Onnes, que descubrió un campo como las bajas temperaturas, que parece ser un tema sin fondo y en el que se puede bajar y bajar. Tal hombre es un líder y tiene temporalmente el monopolio en la aventura científica” [3].

“Percy Bridgman, en el proyecto de obtener presiones más altas, abrió otro nuevo campo y fue capaz de entrar en él y guiarnos todo este tiempo. El desarrollo del alto vacío ha sido un desarrollo complementario y del mismo tipo” [3].

“Me gustaría describir un campo, en el cual se ha hecho muy poco, pero hay una gran

¹*There is plenty of room at the bottom.*

cantidad de trabajo para ser realizado en principio, es semejante a la física del estado sólido en el cual hay un interés por los fenómenos extraños que ocurren en situaciones complejas. Pero es un tema que podría tener un enorme número de aplicaciones técnicas. De lo que quiero hablar es del problema de manipular y controlar las cosas a pequeña escala” [3].

“¿Por qué no podemos escribir los 24 volúmenes de la Enciclopedia Británica en la cabeza de un alfiler?” [3].

“Veamos lo que está involucrado. La cabeza de un alfiler es un dieciseisavo de una pulgada. Si se amplía éste en 25,000 diámetros, el área de la cabeza del alfiler es igual al área de todas las páginas de la Enciclopedia Británica. Por lo tanto, todo lo que hay que hacer es reducir el tamaño de toda la escritura de la Enciclopedia en 25,000 veces” [3].

“La potencia resolutive del ojo es alrededor de 1/120 de una pulgada, este es aproximadamente igual al diámetro del punto fino de mediotono de la reproducción de la Enciclopedia. Cuando se demagnifica este punto en 25,000 veces se alcanza el diámetro de 80 angstroms, el cual representa 32 átomos colocados en línea de un metal ordinario. En otras palabras, el área de dicho punto contiene 1000 átomos” [3].

Reordenando los átomos

“Pero hay que considerar la cuestión final en sí, en última instancia, en el futuro quizás podemos organizar los átomos de la manera que queramos, los mismos átomos! ¿Qué pasaría si pudiéramos organizar los átomos uno por uno de la manera que queramos? Dentro de lo razonable, por supuesto, no podemos ponerlos de manera que sean químicamente inestables, por ejemplo” [3].

“Hasta ahora nos hemos contentado con excavar en el suelo para encontrar minerales. Los calentamos y hacemos cosas a gran escala con ellos, y esperamos obtener una sustancia con tan poca impureza, y así sucesivamente. Pero siempre debemos aceptar algunos arreglos atómicos que nos da la naturaleza. No hemos encontrado nada como un arreglo parecido a juego de ajedrez, con las impurezas arregladas exactamente cada 1000 angstroms u otro patrón similar” [3].

“He pensado en algunos de los problemas de construir circuitos eléctricos a pequeña escala y el problema de la resistencia es serio. Si se construye un circuito correspondiente a pequeña escala, su frecuencia natural aumenta, ya que la longitud de onda disminuye como la escala de tamaño del dispositivo; pero el *skin depth*² sólo disminuye con la raíz cuadrada de la relación

²*Skin depth* es la distancia vertical que una onda electromagnética penetra en una superficie metálica,

de escala, de modo que los problemas resistivos son de creciente dificultad. Posiblemente podemos controlar la resistencia mediante el uso de la superconductividad si la frecuencia no es demasiado alta, o mediante otros trucos” [3].

Átomos en un mundo pequeño

“Cuando llegamos al mundo muy, muy pequeño, digamos circuitos de siete átomos, tenemos muchas cosas nuevas que sucederían y que representan oportunidades completamente nuevas para el diseño. Los átomos a pequeña escala se comportan como nada a gran escala, ya que satisfacen las leyes de la mecánica cuántica. Entonces, a medida que bajamos y jugamos con los átomos allí abajo, estamos trabajando con diferentes leyes y podemos esperar hacer cosas diferentes. Podemos fabricar de diferentes formas. Podemos usar, no solo circuitos, sino algún sistema que involucre los niveles de energía cuantificados, o las interacciones de espines cuantificados, etc” [3].

“A nivel atómico, tenemos nuevos tipos de fuerzas y nuevos tipos de posibilidades, nuevos tipos de efectos. Los problemas de fabricación y reproducción de materiales serán muy diferentes. Como dije, me inspiran los fenómenos biológicos en los que las fuerzas químicas se utilizan de forma repetitiva para producir todo tipo de efectos extraños (uno de los cuales es el autor). Los principios de la física, por lo que puedo ver, no hablan en contra de la posibilidad de maniobrar las cosas átomo por átomo. No es un intento de violar ninguna ley; es algo, en principio, que se puede hacer; pero, en la práctica, no se ha hecho porque somos demasiado grandes” [3].

2.2. ¿Qué es la nanociencia?

Finalmente, para cerrar las ideas planteadas en torno a este tema. La nanociencia estudia fenómenos que ocurren en sistemas con dimensiones a escala nanométrica. Nano es un prefijo griego que denota la milésima parte de un millonésimo. Por ejemplo, el diámetro de un átomo de hidrógeno es aproximadamente una décima parte de un nanómetro (0.1058 nm). Por lo que la escala nanométrica es la escala más pequeña que se podría considerar en la mecánica cotidiana. En el campo de la nanociencia, la física atómica converge con la física y la química

$\delta_0 = c / \sqrt{2\pi\sigma\omega}$, donde c , σ y ω son la velocidad de la luz, la conductividad del metal y la frecuencia angular, respectivamente.

a través de sistemas complejos. Si bien, la mecánica cuántica domina el mundo del átomo, los nanosistemas pueden contener cientos o miles de átomos. En las nanoestructuras están involucrados la mecánica cuántica y el comportamiento estadístico de una gran colección de átomos en constante interacción. De la conjunción del comportamiento cuántico y la complejidad estadística, emergen fenómenos complejos que involucra a la física mesoscópica donde la mecánica cuántica, la mecánica estadística y la mecánica clásica se superponen pero sin una frontera definida donde nuevos modelos teóricos deben ser desarrollados para explicar la fenomenología a nanoescala, las reacciones químicas y los más intrincados procesos biológicos. Tal es así, que los estudios a escala nanométrica tienen mucho en común, así se analicen en el ámbito de la física, la química o la biología.

Un mol de cualquier material contiene el número de átomos dado por el Número de Avogadro, 6.023×10^{23} átomos/g. Sólo una parte muy, pero muy pequeña de este número de Avogadro subyace en gran parte de la tecnología sugerida por Richard Feynman en su charla de 1959. [3].

Capítulo 3

Nanotecnología

3.1. Nanotecnología

En 1974 el científico japonés Norio Taniguchi acuñó el término *nano-tecnología* para definir el procesamiento, separación y manipulación de materiales con la precisión de un nanómetro [4].

El desarrollo de las herramientas y técnicas para estudiar los sistemas nanométricos y mesoscópicos realizados en física, química y biología han sido compartidos por la ingeniería para desarrollar e implementar los procesos nanotecnológicos en el ámbito industrial para la producción a gran escala de aplicaciones en beneficio de la sociedad humana. Las posibilidades de aplicaciones son infinitas, solamente limitadas por la imaginación. Actualmente se están desarrollando aplicaciones en el terreno de los dispositivos electrónicos, en las comunicaciones, en la robótica, en la computación cuántica.

En este aspecto, el de las aplicaciones, el grafeno es el material más significativo que está teniendo rápidas aplicaciones en el campo de la nanotecnología. El grafeno ha sido estudiado teóricamente desde 1947, año en que se publicó el artículo de P.R. Wallace en el *Physical Review* titulado “The band theory of graphite” en el que se desarrolla la estructura de bandas del grafeno mediante la aproximación “tight binding” [15] y la primera evidencia experimental del grafeno obtenido sobre un sustrato de dióxido de silicio descrito en un artículo publicado en la revista *Science* en el 2004 [5] cuyos autores, Andrei Geim y Kosta Novoselov, rápidamente obtuvieron el Premio Nóbel de Física del 2010 [1]. Con 57 años de intervalo entre ambos eventos, lo que ocurre es una gran avalancha de publicaciones que muestran un interés especial por la comunidad científica internacional acerca de las posibilidades tecnológicas del grafeno.

Obviamente la gran industria tomó nota de este detalle para impulsar el desarrollo de aplicaciones a gran escala para diferentes productos. Algunos de estos desarrollos los discutiremos brevemente en los próximos capítulos.

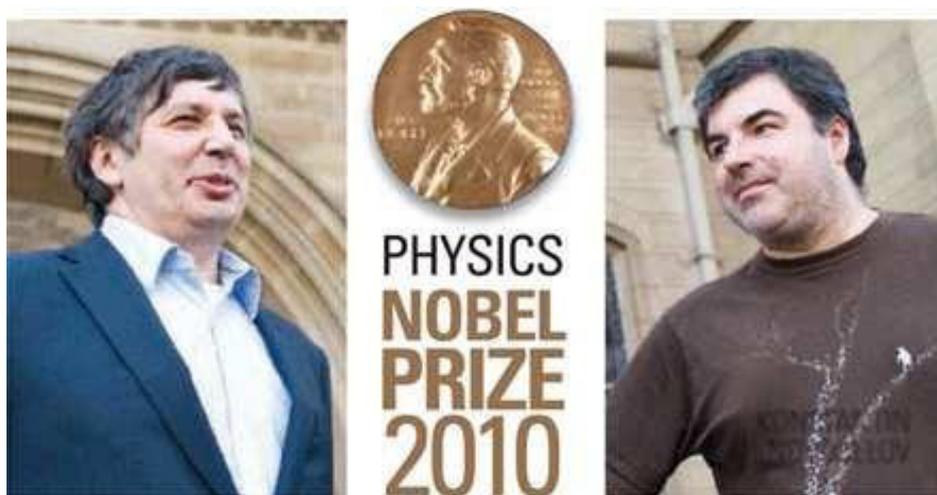


Figura 3.1: André Geim y Konstantin Novoselov galardonados con el Premio Nóbel de Física en el año 2010 [6].

3.2. El efecto túnel

El efecto túnel a través de una barrera de potencial es un fenómeno cuántico en la que la función de onda de los portadores de carga tienen una probabilidad finita de atravesar la barrera de una altura y un ancho determinados de modo que detrás de la barrera se detecte una función de onda transmitida y cumple la regla de la óptica que la suma del coeficiente de reflexión y transmisión son iguales al coeficiente de incidencia.

Una de las aplicaciones más conocidas del efecto túnel como un fenómeno estrictamente cuántico es el microscopio de barrido de efecto túnel (STM), que se caracteriza por mantener constantes la corriente de tunelamiento o la diferencia de potencial de la barrera entre dos medios conductores por el que circula una corriente de tunelamiento. Los autores del diseño y construcción del dispositivo, Gerd Binnig y Heinrich Rohrer, fueron galardonados por el Premio Nóbel de Física de 1986 [8].

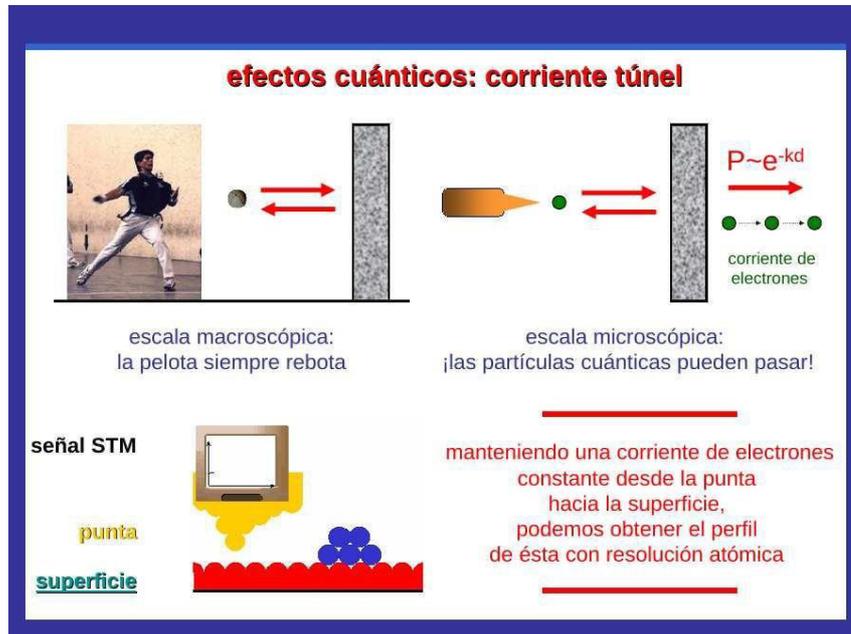


Figura 3.2: Esquema explicativo del efecto túnel y esquema del microscopio de barrido por efecto túnel (STM) [9].

3.3. Diodo de efecto tunel resonante

Previamente, en los años 70s, Leo esaki y Raphael Tsu trabajando en el *T.J. Watson Research Center* de la IBM en Nueva York desarrollan “los materiales cuánticos hechos por humanos” al proponer y obtener, en varios artículos publicados, las superredes y pozos cuánticos hechos de GaAs y AlGaAs, dos materiales semiconductores de *gap* directo que presentan una movilidad mayor comparado a los portadores de carga en el silicio.

El diodo de efecto túnel resonante, constituye el primer ejemplo desde el surgimiento de la mecánica cuántica que un dispositivo mecánico-cuántico hecho por el hombre de materiales semiconductores de diferente *gap* pueden emular experimentalmente el sistema contacto-barrera-pozo-barrera-contacto estudiado en todos los libros de mecánica cuántica desde sus inicios en 1926. Ellos crecieron las muestras con espesores de 4 nm para pozos y barreras y de 55 nm para pozos y 8 nm para barreras. Estas muestras obtenidas en un sistema *Molecular Beam Epitaxy* fue la primera evidencia experimental de la manipulación de monocapas superficiales de átomos de unos pocos nanómetros de espesor [7].

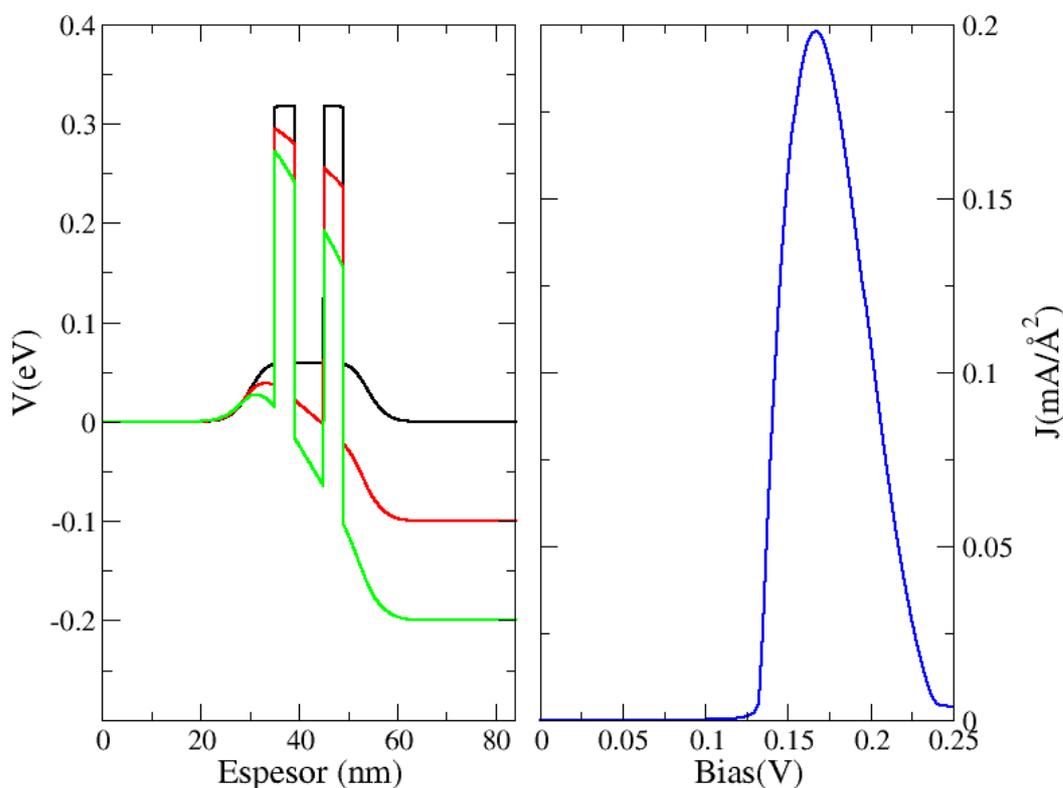


Figura 3.3: En el lado izquierdo de la figura se muestra un diodo de tunelamiento de doble barrera sobre el que se aplica sucesivamente una diferencia de potencial eléctrica para aumentar la corriente de tunelamiento. En el lado derecho de la figura se muestra la característica corriente-voltaje del diodo mostrado en la izquierda. La corriente de tunelamiento disminuye cuando el nivel resonante del pozo desciende por debajo del potencial de los contactos. [7].

3.4. El microscopio de efecto túnel (STM)

3.4.1. Historia

La nanociencia y la nanotecnología se establecieron sólidamente en el escenario, gracias al microscopio de escaneo por efecto túnel¹. El STM es el instrumento que surgió del desarrollo de la física de superficies y para el vulgo es la piedra angular de la nanociencia y la nanotecnología, puesto que permitió un buen desarrollo en diferentes disciplinas tales como la física de semiconductores, la biología molecular, la medicina y desde el punto de vista mediático, las imágenes obtenidas por el STM se divulgaron masivamente en la media.

¹STM, por sus siglas en inglés, *Scanning Tunneling Microscope*.

En 1981, el microscopio de barrido de efecto túnel fue construido por los físicos alemanes Gerd Binnig y Heinrich Rohrer en los laboratorios de la IBM con sede en Zurich (Suiza), quienes -años después-, fueron galardonados con el Premio Nobel de Física en 1986 [8]. Como su nombre lo indica, el STM está basado en la gran capacidad que poseen los electrones para atravesar (tunelar) una barrera de potencial finita, cuya manipulación, de la barrera de potencial, permite controlar la corriente eléctrica entre la punta y la superficie de la muestra permitiendo perfilar la superficie mediante un circuito retroalimentador que mantiene o la corriente constante o el voltaje constante durante el escaneo o barrido. Este microscopio permite formar imágenes de un solo átomo y también de una sola molécula. Fue el primer instrumento utilizado para visualizar superficies a nivel atómico.

En unas pocas generaciones de diseño, el mecanismo del STM básico se volvió tan pequeño, compacto y rígido que era capaz de obtener una resolución atómica cuando se operaba sobre una mesa. Además de proporcionar imágenes de resolución atómica, la sonda podía usarse para mover cosas sobre una superficie a escala nanométrica. A diferencia del microscopio electrónico, el STM puede operar sin la necesidad de un alto vacío. De esta manera, esta notable herramienta hizo posible *tocar* átomos por vez primera [10].

3.4.2. Sonda de escaneo: un átomo a la vez

El desarrollo del microscopio de escaneo por efecto túnel (STM) dio paso al desarrollo del microscopio de fuerza atómica (AFM)², ambos usan como sondas (*tips*) un alambre muy delgado y afilado de tungsteno cuya punta termina en tres o un átomo. Esta punta se acerca a la superficie controlando la diferencia de potencial entre la punta y la superficie mediante un circuito retroalimentador y los datos de la corriente y el voltaje en el mapeo de la superficie son colectados por un circuito en el STM y mientras que en el AFM, la colecta de datos se realiza ópticamente mediante la reflexión de un laser en un espejo colocado sobre la punta de tungsteno cuyo movimiento al mapear la superficie es detectado en el patrón de reflexión, es decir, se observa directamente la interacción de fuerzas atómicas. Se considera que el AFM tiene mejor resolución porque detecta *in-situ* la variación espacial de la punta sobre la superficie, mientras que en el STM se realiza a través del circuito retroalimentador.

El STM y el AFM tienen resolución atómica, el efecto túnel ocurre cuando la función de

²AFM, *Atomic Force Microscopy*

onda de un electrón en un átomo de la punta se superpone o enmaraña³ a la función de onda de un electrón en un átomo ubicado en la superficie. La fuerza entre la punta y la muestra es atractiva en espacios grandes (fuerzas de Van der Waals) y repulsivo en espacios pequeños (superposición del principio de exclusión) [2].

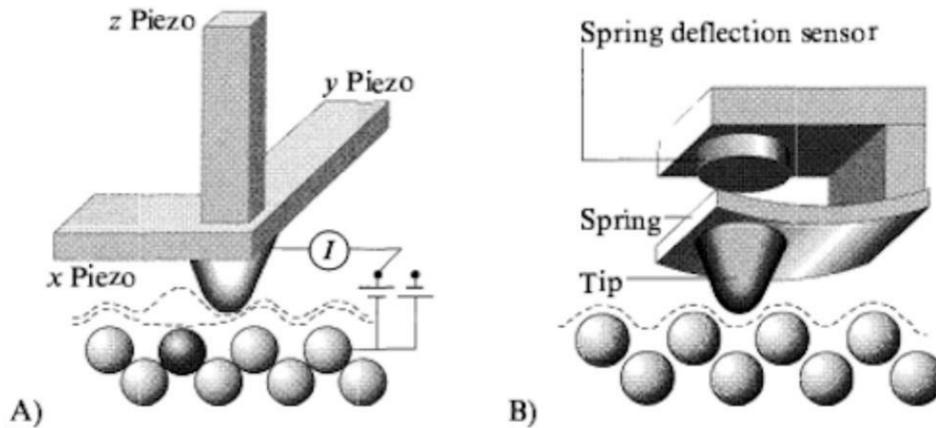


Figura 3.4: Diagramas esquemáticos de (A) Microscopio de efecto túnel de barrido (STM) y (B) Microscopio de fuerza atómica (AFM). Para STM, la corriente del túnel se mantiene constante por la altura de la punta, controlada por z-piezo. Para AFM, la fuerza (deflexión del resorte) se mantiene constante. La imagen corresponde a la figura 7.6 de la referencia [2].

3.4.3. Don Eigler y los átomos del elemento xenón

En 1989, Don Eigler fue la primera persona en la historia en usar el STM para mover y controlar átomos, individualmente. Poco después, el 11 de noviembre de ese mismo año, Eigler y su equipo utilizaron el STM para deletrear las letras de IBM con 35 átomos del elemento xenón. Esta capacidad sin precedentes para manipular átomos individuales marcó una nueva era en el avance de la experimentación, en la nanociencia y la anunciada era de la nanotecnología y los nanomateriales [11].

3.4.4. Características del microscopio de efecto túnel (STM)

El microscopio de efecto túnel tiene las siguientes características: Posee una punta metálica muy aguda y conductora que termina en uno o tres átomos donde se aplica un voltaje

³Estados enmarañados o *entanglement states*.

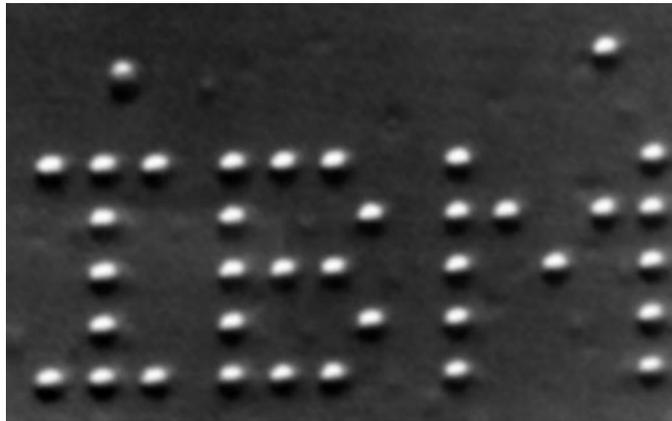


Figura 3.5: Don Eigler y su equipo utilizando un STM colocaron 35 átomos de Xe sobre una superficie de Ni mostrando las letras de la IBM [12].

entre la punta y la superficie de la muestra. Dicha punta se acerca al objeto a una distancia muy pequeña (aproximadamente 1 nm) pero no lo toca. Se hace circular una corriente y los electrones “tunelan” de la punta a la muestra o viceversa dependiendo de la polaridad del voltaje, produciendo de esta manera, una corriente que se amplifica. Para obtener una corriente de efecto túnel, tanto la punta como la muestra deben ser conductores o semiconductores. Esta técnica ofrece alta resolución a escala atómica, para lo cual se debe trabajar con muy buenos conductores, tales como el platino (Pt), oro (Au), cobre (Cu) y plata (Ag). Las puntas metálicas más utilizadas para esta técnica son de wolframio (W), paladio (Pd) y la aleación platino-iridio (Pt-Ir) [13].

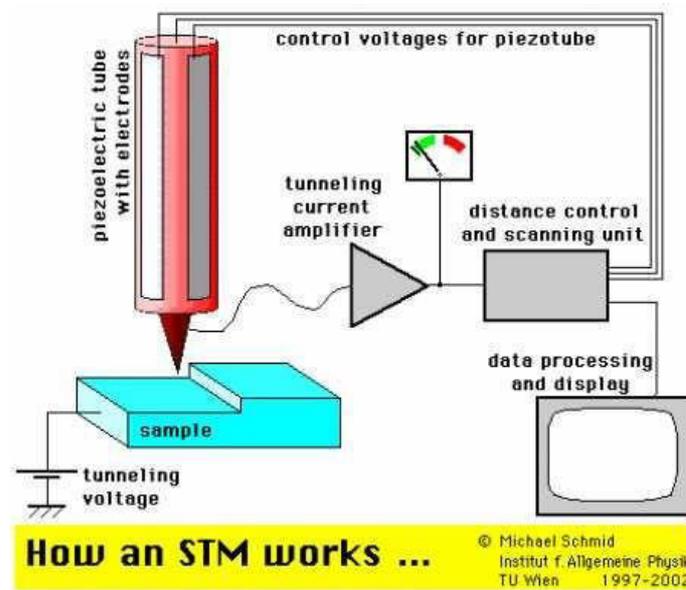


Figura 3.6: Microscopio de efecto túnel, una herramienta que permite visualizar la materia a nivel atómico, así como manipular átomos al modo que pronosticaba Richard Feynman [14].

Capítulo 4

Breve historia del grafeno

4.1. Antecedentes

En el siglo XVI los ingleses hallaron una mina de grafito en la región de Cumberland, Inglaterra. Este mineral resultó ser excelente para la fabricación de cañones y balas, ya que el calor del metal fundido no le afectaba. En 1794 el físico italiano Alessandro Volta realizó un listado de elementos conductores de la corriente eléctrica en el que incluyó al grafito. En 1889, siguiendo las posibilidades del carbono, Hugues y Chambers patentaron filamentos de carbono, fabricados empleando como fuente de energía el vapor [4].

4.2. Precursores

4.2.1. Philip Russell Wallace y la teoría de bandas del grafito

Introducción

En la década de 1940, Philip Russell Wallace estudiaba las propiedades del grafito y afirmó que estaba formado por capas de una estructura bidimensional, lo que posteriormente se llamaría grafeno, con iguales propiedades que el grafito.

Así mismo, P.R. Wallace, describió su estructura de banda, llamada por entonces “monocapa de grafito”, mediante un estudio teórico usando la aproximación de “ligaciones fuertes”¹ donde el grafito era tratado como un semiconductor con energía de activación igual a cero, es

¹“Tight binding” approximation.

decir, sin electrones libres a temperatura cero Kelvin [15].

Teoría de bandas del grafito

Philip Russell Wallace en su artículo en la revista *Physical Review*, de mayo de 1947, escribió lo siguiente:

“El propósito de este artículo es desarrollar una base para la explicación de algunas de las propiedades físicas del grafito a través de la teoría de bandas de los sólidos. Nos ocuparemos principalmente de su conductividad eléctrica y su anisotropía sino también de la conductividad térmica, susceptibilidad diamagnética y absorción óptica” [15].

“Dado que los espacios de los planos de celosía del grafito es grande (3.35\AA) comparado con el espaciado hexagonal en la capa (1.42\AA), se puede obtener una primera aproximación en el tratamiento del grafito despreciando las interacciones entre planos, y suponiendo que la conducción tiene lugar solo en capas. El grafito posee cuatro electrones de valencia. Tres de estos forman vínculos estrechos con los átomos vecinos en el plano” [15].

4.2.2. Hanns-Peter Boehm y la exfoliación del grafito

En 1967, el químico Hanns-Peter Boehm y su equipo de trabajo desarrollaron un proceso para obtener grafeno mediante la exfoliación química del grafito. En este proceso, el grafito se separa por medio de ácidos fuertes, produciendo de esta manera, hojas de carbono muy delgadas.

En 1986, H. P. Boehm y su equipo le pusieron el nombre de grafeno a la monocapa de grafito, en el que combinaron la palabra “grafito” y el sufijo “eno” [16].

4.2.3. A. Geim y K. Novoselov en la obtención del grafeno

Introducción

En el año 2004, Konstantin Novoselov, y sus colaboradores midieron experimentalmente las propiedades electrónicas del grafeno adherido sobre un sustrato de dióxido de silicio. En este año, Novoselov y su equipo obtuvieron grafeno estable en condiciones normales de humedad y temperatura [16].

Efecto del campo eléctrico en películas de carbono delgadas atómicamente

André Geim y Konstantin Novoselov describieron películas de grafito monocristalino, con varios átomos de espesor, que son estables en condiciones normales de ambiente y de muy alta calidad.

“La capacidad de controlar las propiedades electrónicas de un material mediante el voltaje aplicado externamente, es la base de la electrónica moderna. En muchos casos, es el efecto del campo eléctrico el que permite variar la concentración del portador en un dispositivo microconductor y, en consecuencia, cambiar la corriente eléctrica a través de él” [5].

“A medida que la industria de los semiconductores se acerca a los límites de las mejoras de rendimiento para las tecnologías actuales dominadas por el silicio, existe una búsqueda constante de nuevos materiales no tradicionales cuyas propiedades puedan ser controladas por el campo eléctrico. Los ejemplos más notables de tales materiales son los conductores orgánicos y los nanotubos de carbono” [5].

“Divulgamos la observación del efecto del campo eléctrico en un material natural bidimensional llamado grafeno de pocas capas atómicas. Grafeno es el nombre que se le da a una sola capa de átomos de carbono empaquetados densamente en una estructura de anillo de benceno, y se usa ampliamente para describir las propiedades de muchos materiales a base de carbono, incluido el grafito, los fullerenos, los nanotubos, etc. Los nanotubos generalmente se consideran láminas de grafeno enrollados en cilindros de tamaño nanométrico” [5].

“Hemos podido preparar láminas de grafito de espesores de hasta unas pocas capas atómicas (incluido el grafeno de capa única), fabricar dispositivos a partir de ellas y estudiar sus propiedades electrónicas” [5].

“Nuestras películas de grafeno se prepararon mediante exfoliación mecánica de pequeñas mesas de grafito pirolítico altamente orientado. Se descubrió que este enfoque era altamente confiable y nos permitió preparar películas de grafeno de pocas capas de hasta 10 micras de tamaño” [5].



Figura 4.1: Mineral de grafito [17].

Capítulo 5

El fascinante átomo de carbono

5.1. El carbono

El carbono es el elemento químico más importante en el planeta Tierra pues conforma las moléculas orgánicas que se autorepican continuamente y que se encuentran de todo ser vivo que habita el planeta. Sus propiedades químicas le han permitido unirse a una gran cantidad de átomos distintos para formar moléculas enormes y complejas. El carbono es la base de la química orgánica, y casi todas las moléculas biológicas contienen a este elemento, con excepción de la molécula del agua [18].

El átomo de carbono está constituido por 6 protones, 6 neutrones y 6 electrones. Ocupa el sexto lugar en la Tabla Periódica por poseer 6 protones. La masa del carbono es de 12.0111 una (unidades de masa atómica).

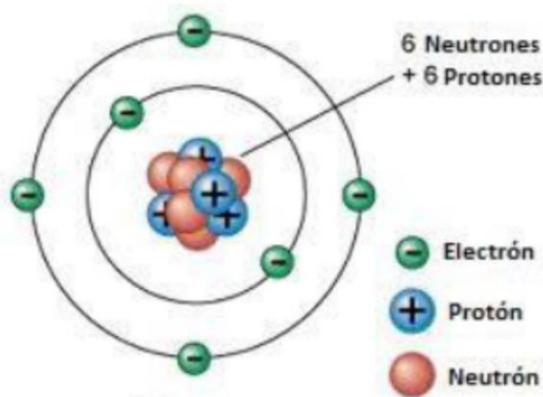


Figura 5.1: Diagrama esquemático del átomo de carbono [19].

El carbono tiene tres isótopos importantes. Los isótopos del carbono son $^{12}_6\text{C}$ (6 protones y seis neutrones), $^{13}_6\text{C}$ (6 protones y siete neutrones) y $^{14}_6\text{C}$ (6 protones y ocho neutrones). Siendo el isótopo $^{12}_6\text{C}$ el más abundante en la Tierra con una presencia del 98.89 % [19].

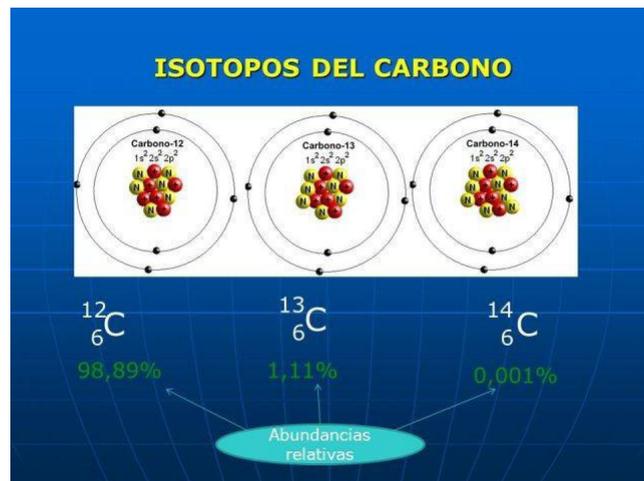


Figura 5.2: Esquema de los isótopos del carbono [20].

5.2. Estructura del átomo de carbono

En su estado fundamental, el carbono tiene la siguiente configuración electrónica: $1s^2 2s^2 2p^2$. Esta configuración nos indica que el carbono posee seis electrones orbitando alrededor del núcleo y dos de ellos orbitan en la parte más externa (orbital $2p$). Estos son los electrones de valencia que le permiten formar enlaces múltiples con mucha facilidad, de esta manera, el carbono puede conectarse entre sí mediante enlaces dobles y triples y, generar muchas estructuras tanto moleculares como cristalinas. A estas estructuras se les denomina formas alotrópicas del carbono, y aquí se ubican el grafeno, los fullerenos, los nanotubos, el grafito y el diamante [18].

5.3. Hibridación del átomo de carbono

Llamamos orbitales híbridos al resultado de solapar (superponer) orbitales atómicos. Este proceso de superposición de orbitales altera la naturaleza original de los orbitales y se produce cuando los átomos se aproximan para formar enlaces. De acuerdo con la configuración electrónica del átomo de carbono, solamente dos electrones que ocupan el orbital $2p$ están disponibles

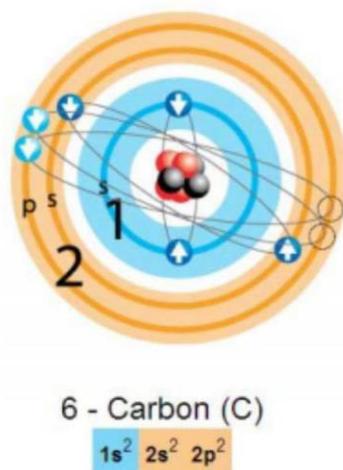


Figura 5.3: Configuración electrónica del carbono [18].

para formar enlaces, sin embargo, dado que la diferencia de energía entre los orbitales $2s$ y $2p$ es nula, son posibles distintos tipos de hibridación cuando se produce una interacción del átomo de carbono con otros átomos próximos. El proceso de hibridación se da cuando uno de los electrones del orbital $2s$ salta a un orbital $2p$, de modo que el átomo de carbono se encuentra en un estado excitado previo a la hibridación. Finalmente, se produce una combinación de orbitales puros en un estado excitado formando orbitales híbridos equivalentes. Estos nuevos orbitales híbridos dejan de ser llamados $2s$ y $2p$ y son ahora llamados sp^3 , sp^2 y sp (un poco de ambos orbitales). Estos orbitales híbridos resultantes poseen orientaciones bien definidas que dan lugar a fuertes enlaces covalentes llamados σ [21].

Por ejemplo, para los orbitales híbridos sp^3 , tenemos los tres estados del átomo de carbono:

- Estado fundamental: $1s^2 2s^2 2p_x^1 2p_y^1 2p_z^0$.
- Estado excitado: $1s^2 2s^1 2p_x^1 2p_y^1 2p_z^1$.
- Estado hibridado: $1s^2 (2sp^3)^1 (2sp^3)^1 (2sp^3)^1 (2sp^3)^1$.

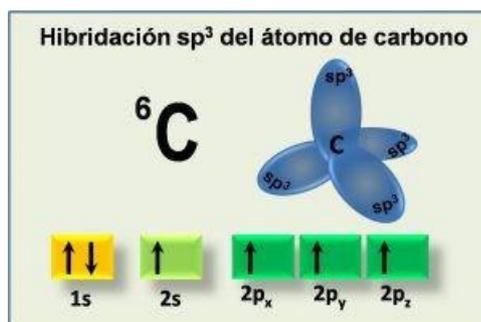
Dependiendo de la cantidad de orbitales involucrados en el proceso de la combinación de orbitales, son posibles tres tipos de hibridación en el carbono:

Tipos de hibridación	Orbitales resultantes	Geometría molecular resultante	Ángulos
sp^3	4 orbitales híbridos sp^3	Tetraédrica	109.5°
sp^2	3 orbitales híbridos sp^2 1 orbital p puro	Trigonal plana	120°
sp	2 orbitales híbridos sp 2 orbitales p puros	Lineal	180°

Tabla 5.1: Tipos de hibridación del carbono.

5.3.1. Hibridación sp^3 del carbono

La hibridación denominada sp^3 o tetragonal, que se obtiene al combinar los orbitales $2s$, $2p_x$, $2p_y$ y $2p_z$, originan cuatro orbitales híbridos equivalentes orientados en el espacio, ubicándose en los vértices de un tetraedro regular con ángulos de enlace de 109.5° . Estos cuatro enlaces formados son enlaces covalentes σ que tienen por función darle estabilidad estructural a la molécula. Esta hibridación es la base de la estructura molecular del diamante, una de las formas alotrópicas del carbono [18].

Figura 5.4: Hibridación sp^3 del átomo de carbono [22].

5.3.2. Hibridación sp^2 del carbono

En la hibridación sp^2 del carbono se generan tres orbitales híbridos que se obtienen al combinar los orbitales $2s$, $2p_x$ y $2p_y$. Estos tres orbitales híbridos con enlaces covalentes σ , en

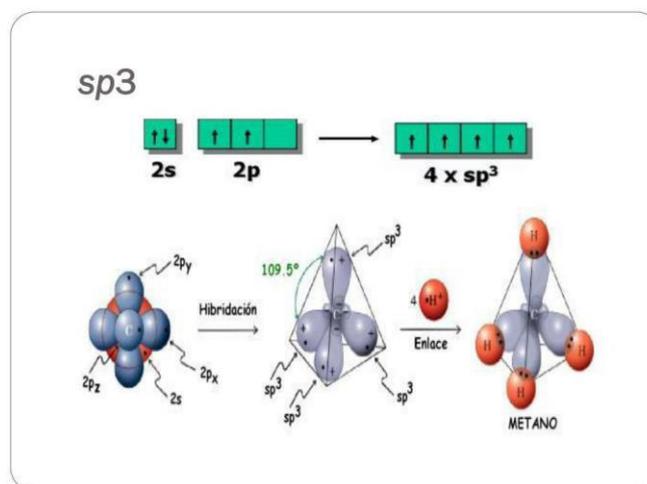


Figura 5.5: Geometría tetraédrica de los orbitales híbridos sp^3 [23].

el plano $x-y$, se orientan en una geometría trigonal plana con una separación angular de 120° entre sí. Sin embargo, queda el orbital $2p_z$ sin hibridar, que es perpendicular al plano formado por los orbitales hibridados, y que se encuentra disponible para la formación de un enlace π con otros átomos. Esta es la hibridación más estable del carbono a condiciones de presión y temperatura ambiente, dando lugar a una estructura hexagonal de los átomos, análoga a un panal de abejas, de las que se forma el grafeno y el grafito [21].

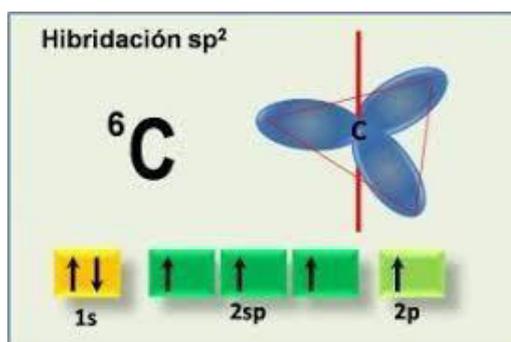


Figura 5.6: Hibridación sp^2 del átomo de carbono [24].

5.3.3. Hibridación sp del carbono

En la hibridación sp o lineal, se generan dos orbitales híbridos, que resultan de la combinación de los orbitales $2s$ y $2p$, los cuales forman un ángulo de 180° , y cuya geometría molecular es lineal. Dado que, en este proceso, los orbitales $2p_y$ y $2p_z$ no intervienen en la hibridación,

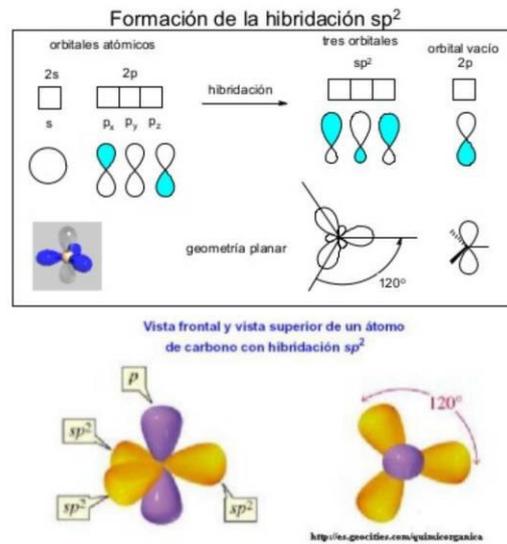


Figura 5.7: Geometría trigonal de los orbitales híbridos sp^2 [25].

sus electrones débilmente ligados, están disponibles para la formación de enlaces π . Este tipo de hibridación lo podemos encontrar en la molécula del dióxido de carbono (CO_2) [21].



Figura 5.8: Hibridación sp del átomo de carbono [26].

5.4. Formas alotrópicas del carbono

El carbono, por ser un elemento muy notable de la Tabla Periódica, ha llamado la atención de los científicos para su investigación. El carbono posee varias formas alotrópicas, es decir, es un elemento que puede aparecer en más de una forma con distintas propiedades físicas y químicas, debido a la distinta agrupación de los átomos que conforman sus moléculas. Los

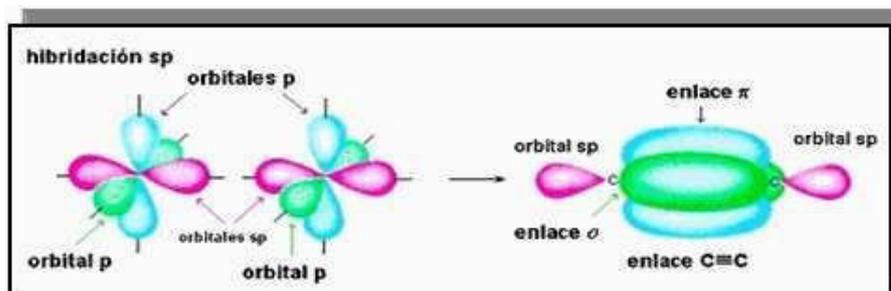


Figura 5.9: Geometría lineal de los orbitales híbridos sp [27].

alótopos del carbono pueden ser:

1. Tridimensionales: diamante, grafito.
2. Bidimensionales: grafeno.
3. Unidimensionales: nanotubos.
4. Cero dimensionales: fullerenos.

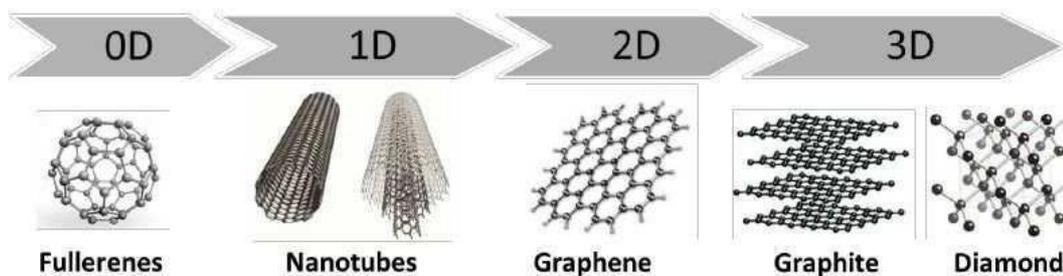


Figura 5.10: Alótopos del carbono: Fullerenos, nanotubos, grafeno, grafito y diamante [28].

Esta alotropía tan extensa del carbono, se debe a la gran capacidad de los átomos de este elemento para formar redes muy complejas y numerosas con diversas estructuras [21].

5.4.1. Grafito

El grafito es un material ligero de color negro que se obtiene de la extracción del carbón. Es la forma alotrópica más estable del carbono debido a que sus capas están constituidas completamente por átomos de carbono, unidos por enlaces covalentes, formando una red hexagonal plana de átomos de carbono. Entre las capas bidimensionales hexagonales existe

una interacción de Van der Waals que se caracterizan por formar enlaces débiles y es el motivo por el cual las láminas de grafito se exfolian con una pequeña fuerza mecánica y le proporciona al grafito la utilidad de ser usado como capa lubricante entre las balas y cañones, en siglos pasados, y actualmente, en los disparadores de misiles, asimismo se utilizan como elemento activo en los frenos de autos, camiones y trenes.

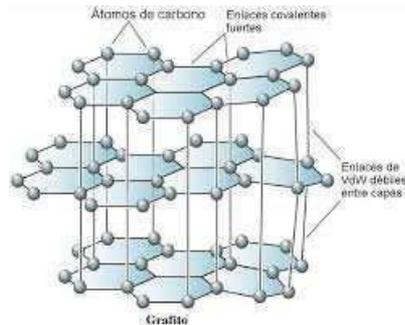


Figura 5.11: Estructura cristalina del grafito [29].

En el siglo XIX, el químico alemán Wagner le dio el nombre de grafito al material utilizado en los lápices. De esta manera, el grafito está presente en la mina de los lápices, un objeto muy familiar que se suele utilizar en la vida cotidiana.

La aplicación histórica más importante del grafito fue en los moldes para hacer balas de cañón [30].



Figura 5.12: El grafito es un material de carbono que se mezcla con la arcilla para elaborar las puntas de los lápices [31].

5.4.2. Diamante

El diamante, es otra forma alotrópica estable del carbono, su estructura tetraédrica que constituye una red tridimensional que involucra enlaces covalentes entre sus átomos, los cua-

les, le confieren propiedades físicas excelentes, tales como alta conductividad térmica, brillo excepcional, dureza formidable, elevado punto de fusión y un comportamiento eléctrico aislante [32].



Figura 5.13: El diamante, mineral natural; forma cristalina del carbono [33].

5.4.3. Nanotubos

Los nanotubos de carbono son tubos o cilindros muy finos y pequeños constituído solo por átomos de carbono (C) cuya estructura se puede visualizar solamente a través de un microscopio electrónico.

Esta red compleja de carbono está formada por una o más láminas delgadas de grafeno enrolladas sobre sí mismas.

Este material sólido tiene una alta resistencia a romperse y es muy flexible. Es un buen conductor del calor y la electricidad. Es un material muy liviano.

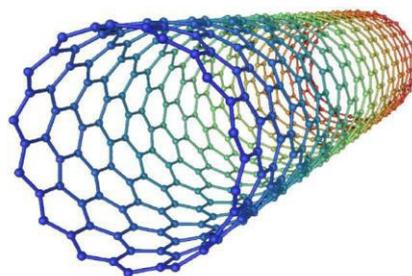


Figura 5.14: Nanotubo de carbono [34]

5.4.4. Fullerenos

Los fullerenos son un tipo de molécula de carbono similares al grafito, y que está compuesto de hojas de anillos enlazados en forma hexagonal, pero conteniendo anillos pentagonales. Los fullerenos son la tercera forma molecular del carbono, después del grafito y el diamante.

Los fullerenos tienen una construcción geométrica particular que utiliza formas físicas como el de una esfera. El fullereno más conocido es aquel que está formado por 60 átomos de carbono (C_{60}).

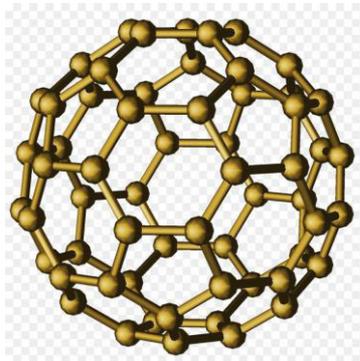


Figura 5.15: El fullereno de forma esférica. [35]

Capítulo 6

El grafeno

6.1. Introducción

El grafeno ha surgido como un nuevo material que promete notables aplicaciones tecnológicas y enormes posibilidades teóricas fascinantes.

Uno de los grandes objetivos de la ciencia es reducir las dimensiones de los dispositivos electrónicos, para mejorar su rendimiento. Uno de los materiales que se vislumbra como posible material para tales aplicaciones, es el grafeno por sus notables propiedades electrónicas y su impresionante estabilidad mecánica [36].

6.2. Electrónica del grafeno

Desde su descubrimiento experimental, en el 2004, el grafeno ha sido aclamado como el material que revolucionará los dispositivos electrónicos. En el grafeno, los átomos de carbono están distribuidos mediante enlaces sp^2 en una superficie plana, este enlace corresponde a un enlace covalente, que es muy intenso y le da las propiedades de flexibilidad, tensión, rigidez y buenas propiedades térmicas debido a que toda oscilación de hileras de átomos de carbono en el plano se acopla a la siguiente hilera sin disipar energía, lo que permite que el grafeno puede disipar energía térmica a través de ella con mayor capacidad térmica que otros materiales. Mientras que los orbitales $2p_z$ perpendiculares al plano que conforman los enlaces moleculares π acoplados a través del plano del grafeno son los caminos donde los portadores de carga se transportan con una buena movilidad a temperatura ambiente que resulta diez veces más alta que en el silicio.

El efecto de campo generado por una corriente en los canales de los transistores podrían reducirse notablemente en un factor de cien si fueran reemplazados por grafeno [36].

6.3. ¿Qué es el grafeno?

El grafeno tiene una estructura nanométrica bidimensional, constituido por una única capa de átomos de carbono (monocapa), organizados en forma de una red hexagonal muy semejante a un panal de abejas. El grafeno es una forma alotrópica del carbono que posee enlaces covalentes que están presentes en la superposición de los híbridos sp^2 , los cuales generan carbonos enlazados. A pesar de ser un material muy fino, ligero, flexible y transparente, destaca su gran dureza. Posee una gran conductividad térmica y eléctrica [37] como explicamos líneas atrás.

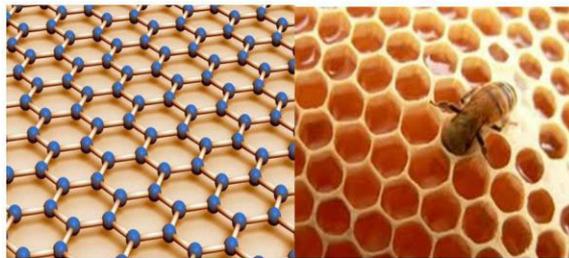


Figura 6.1: Red hexagonal del grafeno muy semejante a un panal de abejas [38].

6.4. Estructura atómica del grafeno

Los átomos de carbono en el grafeno poseen cuatro electrones en su capa de valencia, en la cual, tres de ellos presentan una hibridación sp^2 mediante enlaces covalentes sigma (σ) en el plano xy , con una orientación geométrica trigonal plana y con un ángulo de separación de 120° , donde el orbital puro $2p_z$ es perpendicular al plano xy que da origen a la formación de los enlaces tipo (π) que son los responsables de la gran movilidad electrónica que presenta el grafeno [39].

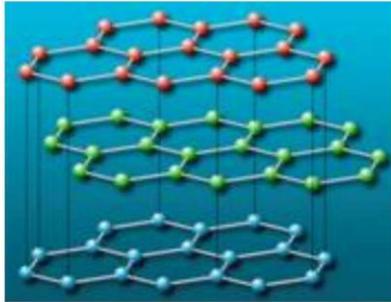


Figura 6.2: Estructura bidimensional del grafeno. Anillos hexagonales que tiene una altura de aproximadamente de un solo átomo [40].

6.5. ¿Cómo se obtiene el grafeno?

El grafeno en su estado libre es inestable y se forman los nanotubos. Por ello es necesario colocar el grafeno sobre un sustrato. Históricamente se han desarrollado varias técnicas para obtener el grafeno en forma de lámina sobre un sustrato, algunas técnicas tiene un alto costo. Una técnica más barata fue la técnica de usar el grafito y mediante microexfoliación sucesiva para obtener capas más delgadas de grafito. Esta técnica llamada también la *técnica de la cinta adhesiva* [51] consiste en pegar la cinta adhesiva en el grafito y luego pegar y despegar sucesivamente sobre diferentes sustratos de dióxido de silicio y luego con microscopía óptica y electrónica buscar la que tenga pocas capas de grafeno. En el 2004, habían varios grupos que competían para obtener el grafeno sobre un sustrato usando la microexfoliación mecánica, el grupo ganador estaba en la Universidad de Manchester, liderados por Andrei Geim publicaron el artículo en la revista Science donde muestran comparativamente las propiedades electrónicas de una y más capas de grafeno [5]. En 1962, Hanns-Peter Boehm obtiene una muestra de grafeno por primera vez, en 1986 Hanns-Peter Boehm bautiza como **grafeno** a la lámina bidimensional de átomos de carbono. [51].

6.6. Propiedades del grafeno

6.6.1. Propiedades mecánicas

Material bidimensional

El grafeno es considerado como un material bidimensional por estar constituido por átomos de carbono distribuidos en dos dimensiones espaciales y de un átomo de espesor.

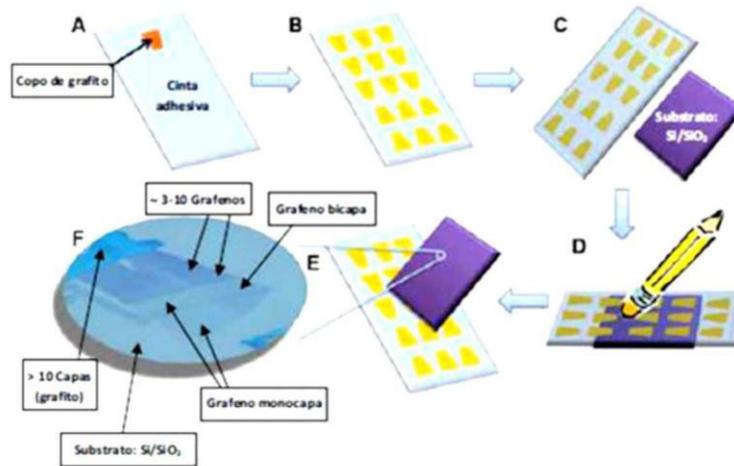


Figura 6.3: Proceso de exfoliación micromecánica del grafito. (A) Un copo de grafito es adherido a una cinta adhesiva. (B) Se exfolia el copo en repetidas ocasiones, obteniéndose copos más finos. (C) Se presionan los copos contra una superficie limpia de Si/SiO₂ que actuará como sustrato. (D) Se frota con suavidad la parte trasera de la cinta adhesiva, asegurándose así un contacto entre los copos y el sustrato. (E) Se retira con cuidado la cinta, dejando láminas de grafeno sobre el sustrato junto con una gran cantidad de material gráfitico. (F) Cuando se encuentran sobre el sustrato de Si/SiO₂ las láminas de grafeno se pueden identificar con un microscopio óptico que permite discriminar entre grafenos de diferentes capas. Figura y descripción tomado de [41].

Material ligero

El grafeno por su carácter bidimensional es un material sumamente ligero. Tan es así, que una lámina de grafeno de 1 metro cuadrado llega a pesar solo 0.77 miligramos, y comparando con la misma superficie del acero, el peso del grafeno es 200 veces menor.

Material flexible

El grafeno es también un material muy flexible, es decir, que se puede doblar con facilidad; es elástico porque puede deformarse y recuperar su forma original y, es maleable porque se puede moldear en láminas. Esta gran flexibilidad se debe al alargamiento de los enlaces *sp*. Su constante de elasticidad es muy grande, tal que, una lámina de grafeno puede estirarse hasta un 10 % de su tamaño natural, y es reversible; además, puede doblarse hasta un 20 % y recuperar su forma inicial. Una muestra de su flexibilidad son los nanotubos, que pueden enrollarse en sí mismo. Las superficies de los materiales de grafeno, garantizan durabilidad y pocas probabilidades de romperse.

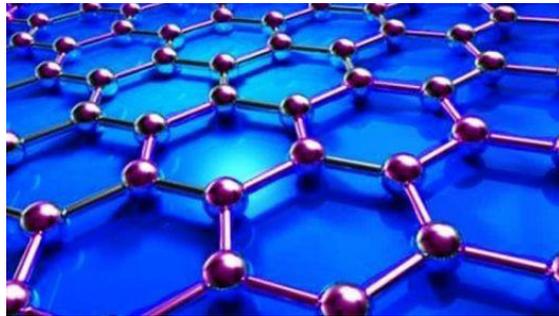


Figura 6.4: El grafeno, mostrando su forma bidimensional [42].



Figura 6.5: Energía solar más eficiente gracias a las celdas livianas de grafeno [43].

Material transparente

El grafeno en su estado puro, es un material transparente, muy semejante al vidrio, debido a que posee el espesor de un átomo. Pero, absorbe aproximadamente el 2.3 % de la luz natural, lo cual es bastante para un material bidimensional.

Material resistente

El grafeno es un material muy resistente que puede soportar una tensión de 42 N/m, mientras que una lámina de acero con las mismas características, tendría una resistencia de solo 0.40 N/m. El motivo de esta resistencia mecánica del grafeno, obedece a las uniones covalentes tipo σ presentes entre los átomos de carbono que conforman la lámina de grafeno [46].

Como el grafeno es un material bidimensional, no se toma en cuenta el grosor de la lámina, por ser láminas de espesores atómicos, por lo que, se introduce el concepto de módulo de Young bidimensional (E_{2D}), que es una magnitud que nos indica cuánta tensión es necesaria para que ocurra una deformación en una lámina.

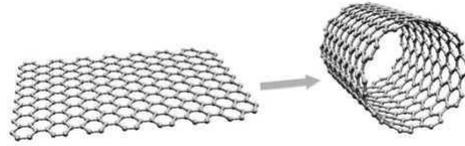


Figura 6.6: Nanotubo, material flexible [44].



Figura 6.7: Celular transparente y flexible en base al grafeno [45].

6.6.2. Propiedades térmicas

Conductividad térmica

La conductividad térmica, es una propiedad física que mide la capacidad que poseen ciertos materiales para conducir el calor. Es decir, transferir la energía cinética de sus moléculas a otro material con el cual está en contacto. Esta propiedad destaca notablemente en el caso del grafeno, por tener una alta conductividad térmica debido a su estructura bidimensional cuyos enlaces covalentes son mayores energéticamente a cualquier excitación térmica y como forman láminas con muy poco peso, y esto le da una relativa facilidad a los átomos de carbono para moverse colectivamente en el plano [39] disipando cualquier incremento de energía térmica.

A temperatura ambiente, la conductividad térmica del grafeno con respecto a la plata, cobre, oro, aluminio y acero, se muestra en la siguiente tabla:

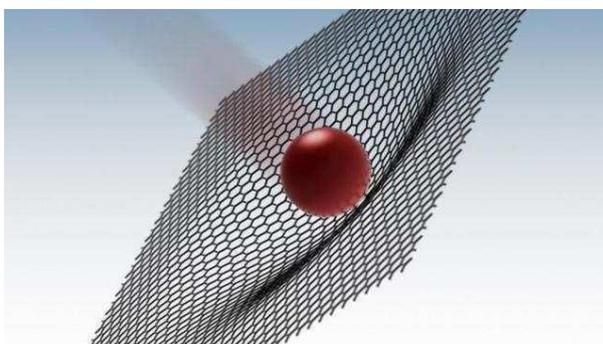


Figura 6.8: Grafeno, material resistente. Puede detener una bala [47].

Material	Grafeno	Plata	Cobre	Oro	Aluminio	Acero
Conductividad						
térmica	5000	420	400	317	240	79
(W/mK)						

Tabla 6.1: Conductividad térmica de varios materiales.

6.6.3. Propiedades Eléctricas

Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica, es una propiedad física de ciertos materiales que mide la capacidad que tiene un material para transportar la corriente eléctrica a través de sí mismo. La conductividad depende mucho de sus estructura atómica y molecular del material. En el caso del grafeno, este material, resulta ser un gran conductor de la electricidad debido a su estructura de hibridación sp^2 , de red hexagonal bidimensional de átomos de carbono, donde el enlace perpendicular al plano se acoplan a los otros orbitales perpendiculares formando los orbitales π que se distribuyen paralelo al plano de los orbitales covalentes σ , de modo que los electrones se mueven libremente encima de la estructura covalente del grafeno [37].

A temperatura ambiente, la conductividad eléctrica del grafeno con respecto a la plata, cobre, oro, aluminio y acero, se muestra en la siguiente tabla:

Material	Grafeno	Plata	Cobre	Oro	Aluminio	Acero
Conductividad eléctrica (10^6 S/m)	0.96	0.68	0.60	0.45	0.38	0.10

Tabla 6.2: Conductividad eléctrica de varios materiales.

Estructura de bandas de energía

Las propiedades eléctricas de un material sólido dependen de su estructura de bandas. La estructura de bandas describe la estructura electrónica de un material. Establece que al combinar orbitales atómicos, se pueden generar orbitales moleculares. Dependiendo de la distancia interatómica y del número de electrones de enlace, se pueden formar bandas llenas, vacías o separadas por bandas prohibidas, formándose de esta manera, bandas de valencia, bandas de conducción y bandas prohibidas.

Banda de valencia (BV) Esta banda está conformada por los electrones situados en el último nivel energético de los átomos. Los electrones de valencia son los responsables para la formación de enlaces entre los átomos para formar moléculas y sólidos, sin embargo, estos no intervienen en la conducción eléctrica.

Banda de conducción (BC) Esta banda está conformada por estados cuánticos vacíos del sólido, donde los electrones libres que han logrado desligarse de sus respectivos átomos se movilizan libremente. Esta banda es la responsable de la conducción de la corriente eléctrica.

Banda prohibida (BP) En un material aislante, la separación entre la banda de valencia y la banda de conducción es muy grande (~ 10 eV), lo cual significa que, un electrón situado en la banda de valencia requiere de mucha energía para ser liberado y así convertirse en un electrón libre y contribuir a la conducción. En un material conductor las dos bandas están solapadas o superpuestas, de modo que con una pequeña excitación térmica, los electrones de valencia se tornan libres y comienzan a moverse provocando la conducción eléctrica. Pero en un material semiconductor la banda prohibida es pequeña, y con excitaciones térmicas o campos eléctricos aplicados cuyas energía resulten

mayores a la banda prohibida, los electrones de valencia son liberados y contribuyen a la conducción. [19].

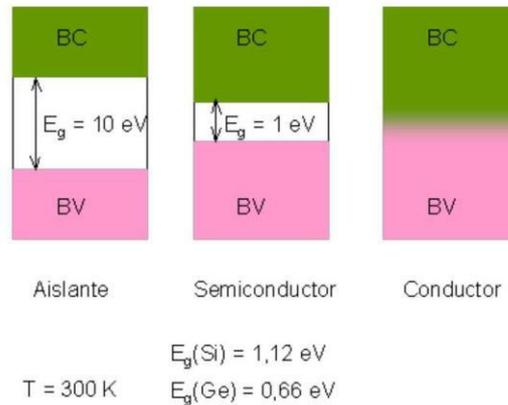


Figura 6.9: Estructura de bandas: banda de conducción (BC), banda de valencia (BV) y banda prohibida (BP) [48].

Estructura electrónica y conducción

Para el caso del grafeno, las bandas de conducción y valencia se intersectan en un punto, llamado el punto de Dirac y en este punto también se encuentra el nivel de Fermi, debido a que el nivel de Fermi se encuentra justo entre las bandas de valencia y de conducción. Los portadores de carga en dicho punto se mueven con velocidades relativísticas. El nivel de Fermi es el nivel de energía más elevado que está ocupado por electrones, a la energía de este nivel se le llama energía de Fermi (E_F).

El grafeno comparte con los metales una banda prohibida nula y un tipo de portador de carga: electrones, y con los materiales semiconductores, el grafeno comparte dos tipos de portadores de carga: electrones y huecos. Por lo que el material puede conducir muy bien la electricidad [18].

Los portadores de carga pierden su masa

En el grafeno, los portadores de carga son cuasi-partículas sin masa que se mueven a una velocidad constante, llamada la velocidad de Fermi-Dirac (v_F).

En el caso de los metales, semiconductores y aislantes, las masas efectivas están dadas por la curvatura de las bandas de energía, pero en el caso del grafeno, estas curvas no existen

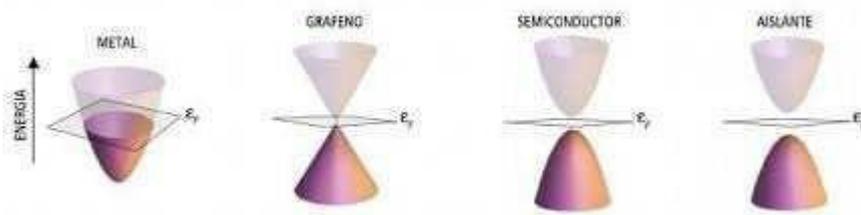


Figura 6.10: Estructura de bandas electrónicas para metales, semiconductores, aislantes y el grafeno [49].

puesto que la energía depende linealmente del momento de los portadores, por lo tanto, los portadores de carga se comportan como partículas sin masa efectiva. En estos puntos de intersección de los conos, los electrones y los huecos se mueven sin obstáculos, alcanzando una velocidad de 1×10^6 m/s, por ello, el grafeno es denominado un material relativístico [19].

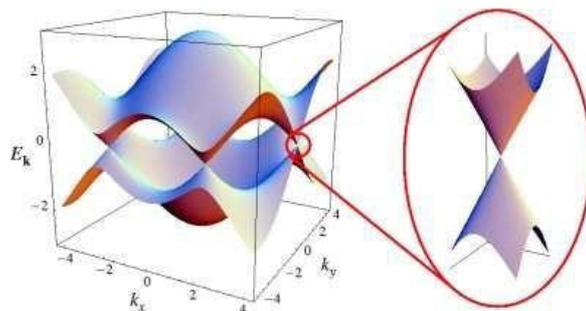


Figura 6.11: Estructura de bandas del grafeno con los conos de Dirac. [15, 50]

6.7. Principales aplicaciones del grafeno

6.7.1. Dispositivos electrónicos

Debido a las excelentes propiedades electrónicas del grafeno, la industria de los semiconductores se proyecta en construir ordenadores de alta velocidad mediante el desarrollo de microprocesadores con transistores muy pequeños de grafeno, lo cual permitiría a los electrones recorrer distancias lo más pequeñas posibles. Como el grafeno permite a los electrones una gran movilidad hasta 200 veces más que el silicio, los dispositivos tendrían una gran rapidez de procesamiento [41].

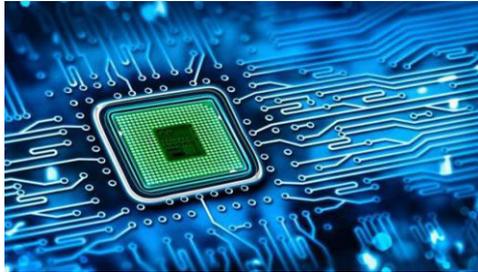


Figura 6.12: Transistor de grafeno [52].

6.7.2. Energías renovables

La sociedad actual demanda energías limpias y renovables, como la energía solar o eólica, que reemplacen los combustibles fósiles convencionales. Por tal motivo, se están investigando sobre otros materiales capaces de almacenar y convertir directamente esas energías renovables.

El grafeno, debido a su estructura bidimensional, su alta conductividad eléctrica y térmica, su gran resistencia mecánica y flexibilidad, tiene un gran potencial de convertirse en un material que puede ser aplicado en este campo de las energías renovables.

Una aplicación importante del grafeno es la fabricación de placas solares fotovoltaicas más ligeras, flexibles y económicas. En la fabricación de celdas solares fotovoltaicas se utiliza una hoja de una capa de grafeno de muy alta conductividad que se combina con una malla fina de nanocables metálicos, los cuales transportarán la corriente eléctrica generada en las células que conforman el panel solar. Se estima que la eficiencia de conversión es de un 10 % de las células solares fabricadas de grafeno.

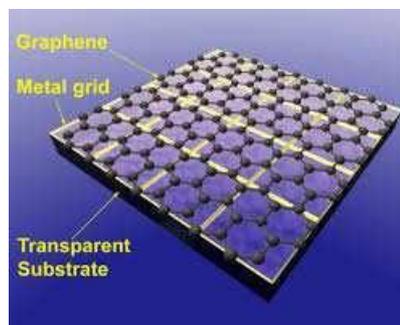


Figura 6.13: Placas solares de grafeno [53].

6.7.3. Fabricación de pantallas táctiles flexibles

Las excelentes propiedades del grafeno, de transparencia, flexibilidad y conductividad eléctrica, hacen del grafeno un material ideal para la fabricación de pantallas táctiles flexibles para dispositivos electrónicos, de alta vida útil y de un costo muy económico. Ya se están fabricando dispositivos electrónicos flexibles, muy sensibles a la luz, el cual permitirá la fabricación de teléfonos móviles y ordenadores completamente flexibles.



Figura 6.14: Móvil de pantalla flexible de grafeno [54].

6.7.4. Desalinización y depuración del agua de mar

Una de las preocupaciones más importantes a nivel mundial es la disponibilidad de fuentes de agua potable para el consumo humano.

Un sistema muy rentable para potabilizar grandes caudales de agua se está desarrollando en base al uso de láminas de grafeno perforadas. Este sistema necesita para funcionar muy poca presión, lo cual implica el consumo considerablemente inferior de energía que los sistemas convencionales basados en la ósmosis inversa, además resultan ser más eficientes porque las láminas de grafeno serán mucho más duraderas que las membranas tradicionales [39].

6.7.5. Generación y almacenamiento de energía

La gran área superficial del grafeno y su excelente conductividad eléctrica, hacen de este material como un potencial sustituto del grafito para la fabricación de ánodos de baterías de ión litio. Un equipo de ingenieros de la Universidad de Northwestern (USA) han diseñado un electrodo para este tipo de baterías que permite la conservación de la carga hasta diez veces más que las actuales. La carga máxima se produjo al sustituir las láminas de silicio por racimos

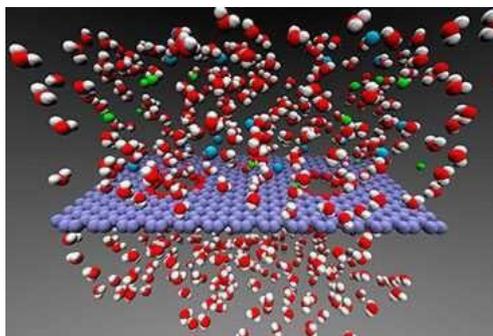


Figura 6.15: Membrana de grafeno que actúa como filtro para desalinizar el agua de mar y convertirlo en agua potable [55].

de grafeno para aumentar la cantidad de iones de litio que una batería puede almacenar. Una mayor rapidez de carga en el dispositivo se logró debido a un proceso de oxidación química, con el cual se pudo perforar pequeños orificios de entre 20 y 40 nanómetros de ancho, en las láminas de grafeno. De esa manera se da una mayor movilidad a los iones de litio y a encontrar con más rapidez un lugar para almacenarse [41].



Figura 6.16: Batería de grafeno [56].

6.7.6. Sensores y biosensores ultrasensibles de grafeno

La gran capacidad de absorción de moléculas externas en su red cristalina, le permite al grafeno ser utilizado en la fabricación de sensores y biosensores de alta sensibilidad. Esta propiedad hace que cualquier elemento externo a la lámina del grafeno quede retenido en su estructura. El cual, produce alteraciones en la estructura, generando electrones o huecos en su estructura según la naturaleza del material detectado.

Estas alteraciones producen pequeños cambios en la resistividad del grafeno que puede ser

medido y usado como señal para captar la presencia de otros elementos [39].



Figura 6.17: Sensores de humedad basados en el grafeno [57].

6.8. Multicapas de grafeno rotado

En los últimos cinco años, los sistemas formados por multicapas rotadas de materiales bidimensionales han generado un gran interés debido a su capacidad para crear nuevos comportamientos electrónicos ajustables de acuerdo al ángulo de rotación entre las monocapas.

Entre los sistemas bidimensionales, el grafeno bicapa rotado ha mostrado recientemente su capacidad para albergar formaciones superperiódicas en las que los portadores de carga se correlacionan fuertemente. El sistema de bicapa rotado se obtiene superponiendo una capa de grafeno sobre otra y rotando una respecto a la otra ángulos que varían de pequeños hasta grandes valores, pero para un pequeño ángulo de 1.1° , en el material resultante aparecen una superestructura que también tiene una forma hexagonal, denominada superred (en color amarillo), ver Fig.6.18, en el cual los portadores de carga se correlacionan semejante a las de un material superconductor [58].

Así mismo, aplicando la presión en el grafeno bicapa, se observa el aumento en el acoplamiento entre las capas, el cual produce un cambio en la transición de la superconductividad a ángulos más altos y temperaturas más elevadas [58].

Este resultado ha originado una intensa actividad de investigación en los últimos meses, puesto que se ha levantado la cuestión de la topología como un mecanismo de cuantización a los habitualmente observados en la mecánica cuántica como la cuantización de la energía, el momento angular orbital y la de espín.

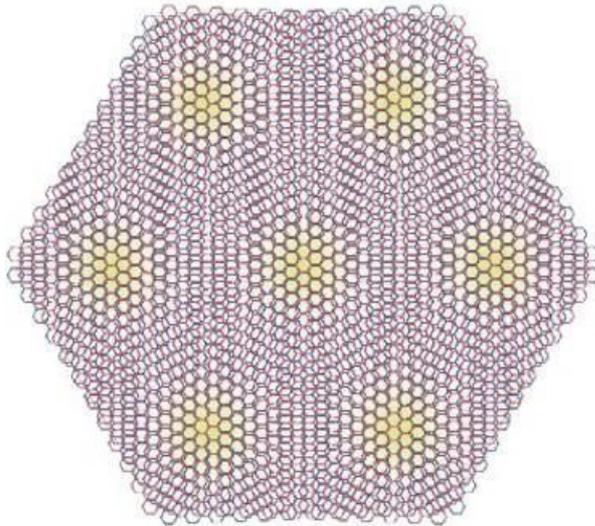


Figura 6.18: Superred de grafeno bicapa rotado en ángulo mágico [59].

6.9. Perspectivas del grafeno

Se vislumbra en un futuro, que el grafeno llegará a alterar el mundo de las telecomunicaciones y los aparatos electrónicos superrápidos. Debido a su resistencia y ligereza. Es posible que el grafeno se use en un futuro para crear nuevos objetos ligeros, flexibles y fuertes, desde la fabricación de aviones hasta raquetas de tenis y pantallas táctiles.

Desde que se fabricó el primer transistor, el mundo de la electrónica ha dominado el mercado en base al silicio. Desde hace mucho los esfuerzos se han realizado para sustituir el silicio que tiene un *gap* indirecto por otro material de *gap* directo que evite el sobrecalentamiento de los dispositivos de silicio. Se espera que el grafeno sea el material que sustituya al silicio pero tiene una desventaja, el grafeno no tiene *gap* por ello que la búsqueda de materiales bidimensionales semejantes al grafeno que tengan un comportamiento de semiconductor está aún vigente.

Sin embargo, se espera en un futuro, que el desarrollo de nuevas tecnologías facilite nuevas formas de producir el grafeno con las propiedades adecuadas que son imprescindibles en las aplicaciones electrónicas y pronto su producción a gran escala resulten más económicos. Hay señales que muestran que esos cambios serán inminentes debido al desarrollo tecnológico y las fuertes inversiones en investigación científica que ya se están llevando a cabo [60].

Capítulo 7

Conclusiones

Si en el siglo XIX la ciencia y la tecnología se desarrollaron en el macromundo y en el siglo XX se avanzó en el desarrollo de las microtecnologías, sin duda, en el siglo XXI seremos testigos del desarrollo de la nanotecnología, la computación cuántica, la inteligencia artificial y la edición de genes.

El perfeccionamiento de los microscopios ópticos en el siglo XIX y de los microscopios electrónicos, de efecto túnel y fuerza atómica en el siglo XX , así como el desarrollo de las técnicas de microfabricación y nanofabricación han permitido un conocimiento y dominio del mundo micro, meso y nanoscópico, que está teniendo un efecto muy intenso en la industria de la electrónica, microcirugía, la microbiología, la edición de genes, etc.

Por ello, se afirma, que en el siglo XXI están convergiendo las tecnologías del siglo XX y que hacen posible la exploración de las propiedades de la materia a escalas nanométricas, que permiten el control de átomos y moléculas, así como el diseño de diferentes nanomateriales [61].

El carbono, un elemento fundamental de la vida en la Tierra, base de toda la materia orgánica, ha generado muchas estructuras moleculares, siendo el grafeno una de sus formas alotrópicas, un material que se espera tendrá múltiples aplicaciones en un futuro cercano por sus propiedades extraordinarias.

Bibliografía

- [1] <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2010/summary/>
- [2] Edward L. Wolf, *Nanophysics and nanotechnology: An introduction to Modern Concepts in Nanoscience*, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim (2004).
- [3] S. M. Lindsay, *Introduction to Nanoscience*, Oxford University Press, Oxford (2010).
- [4] Nuria Penalva; *Ciencia imprescindible para curiosos*, Editorial LIBSA, Madrid (2017).
- [5] K.S. Novoselov, A.K. Geim, S.V. Morozov, D. Jiang, Y. Zhang, S.V. Dubonos, I.V. Grigorieva y A.A. Firsov; *Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Film*, *Science* **306**, 666 (2004).
- [6] <https://science.sciencemag.org/content/330/6001/159/tab-figures-data>.
- [7] L.L. Chang, L. Esaki y R. Tsu; *Appl. Phys. Lett.* **24**, 593 (1974).
- [8] <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1986/summary/>
- [9] https://cfm.ehu.es/ricardo/master/docs/historia_nanotecnologia2.pdf
- [10] Christian Joachim y Laurence Plévert: *Nanosciences. The Invisible Revolution*, World Scientific, Singapore (2008). Versión en español: *Nanociencias. La revolución invisible*, Editorial Trillas, México (2009).
- [11] <https://docplayer.es/10363694-Historia-de-lananotecnologia.html>
- [12] [https://en.wikipedia.org/wiki/IBM_\(atoms\)](https://en.wikipedia.org/wiki/IBM_(atoms)).
- [13] Tema 9: Microscopía de Efecto Túnel y Fuerza Atómica. En <https://www.uco.es/TranspTema9.pdf>.

- [14] <https://lananotecnologiaysusaplicaciones.weebly.com/microscopios-nanotecnoloacutegicos.htm>.
- [15] P.R. Wallace; *The Band Theory Of Graphite*, Phys. Rev. **71**, 622 (1947).
- [16] Moisés Eduardo Jiménez Hidalgo; Grafeno, 6 de junio del 2017, artículo encontrado en bigbag.nucleares.unam.mx/FAMC/JiménezHidalgoM_Grafeno.pdf
- [17] https://mineriaenlinea.com/rocas_y_minerales/grafito/.
- [18] Wilfredo Antonio Gómez Arias, *Fonones flexurales: Ecuación de Dirac generalizada en grafeno curvo*, Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México, México (2013).
- [19] Mario Amor García, *Grafeno: Biografía de un material*, Trabajo Fin de Grado en Filosofía, Departamento de Historia de la Ciencia, Universidad Nacional de Educación a Distancia, UNED, España (2017).
- [20] <https://100cia.site/index.php/quimica/item/3408-cual-es-la-diferencia-entre-el-carbono-12-y-el-carbono-14>.
- [21] Claramaría Rodríguez Gonzales, *Obtención de hojas de óxido de grafeno para el desarrollo de nanocompositos poliméricos*, Tesis doctoral, Facultad de Ciencias Físico-Matemática, Universidad Autónoma de Nuevo León, México (2012).
- [22] <https://moronej.000webhostapp.com/2018/09/hibridacion-de-orbitales-atomicos>.
- [23] <https://www.slideserve.com/eliza/hibridacion-del-tomo-de-carbono>.
- [24] <https://steemit.com/spanish/@emiliomoron/hibridaciondeorbitalesatmicoshibridaciontipospsup2sup-6lrfw7zywn>.
- [25] <https://es.slideshare.net/CARMENNADIRGUTIERREZ/hibridaciones-sp3-sp2-sp-excel>.
- [26] <https://www.youtube.com/watch?v=PPuWG0xw2XU>
- [27] <https://www.monografias.com/trabajos48/nanotecnologia/nanotecnologia2.shtml>

- [28] <https://elnanoescopista.com/la-tabla-periodica-mas-pequena-del-mundo-la-nanotabla-periodica/>.
- [29] <https://www.slideshare.net/museocienciaiespedroespinoza/1-grafito-1-e-vicente-castro/2?smtNoRedir=1>
- [30] Hassan Raza, editor, *Graphene Nanoelectronics. Metrology, Synthesis, Properties and Applications*, Springer, Heidelberg (2012).
- [31] <https://quimicaencasa.com/el-carbono-y-sus-formas-alotropicas/>.
- [32] Claudia Hernández Gervacio y Dalia Mariela Quiróz Ceballos, *Grafeno: Estado del Arte*, Tesis de Maestría, Centro de Investigación en Materiales Avanzados, CIMAV, México (2015).
- [33] <https://www.infobae.com/2016/05/29/1814781-cuanto-cuestan-los-diamantes-mas-caros-del-mundo/>.
- [34] <https://meetthings.com/blog/wp-content/uploads/2015/05/Nanotubo-de-carbono.png>.
- [35] <http://tics4aesomaimverin.blogspot.com/2017/04/caracteristicas-de-los-fullerenos.html>.
- [36] Hideo Aoki y Mildred S. Dresselhaus, editores, *Physics of Graphene*, Springer, Heidelberg (2014).
- [37] Irene Paz Ortega, *El grafeno: Posibilidades del grafeno en la arquitectura*, Trabajo de Fin de Grado, Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid, Universidad Politécnica de Madrid, España (2018).
- [38] <https://innovaciontecnomaterial.blogspot.com/2013/04/grafeno-vs-siliceno.html>
- [39] Hermenegildo Rodríguez Galbarro, *Propiedades y Aplicaciones del Grafeno*, Tutorial N° 119, <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn119.html>

- [40] <https://www.seas.es/blog/automatizacion/elgrafenopropiedadescaracteristicas-y-aplicaciones/>
- [41] Monografías del SPOT N° 12. Propiedades y aplicaciones del grafeno. www.tecnologiaeinnovacion.defensa.gob.es/monografia_sopt_12.
- [42] <https://e-eficiencia.com/grafeno-nueva-fuente-electrica/>.
- [43] https://www.lespanol.com/omicrofono/tecnologia/20150123/energia-solar-eficiente-gracias-celdas-grafeno/5499565_0.html.
- [44] <https://construinnova.net/2017/06/04/nanotubos-de-carbono-para-infraestructuras-inteligentes/>.
- [45] <https://www.atriainnovation.com/metales-transparentes-como-son-y-aplicaciones/>.
- [46] www.graphenano.com. *El grafeno: propiedades y aplicaciones*.
- [47] <https://www.abc.es/ciencia/20141201/abci-grafeno-prueba-balas-201412011200.html>.
- [48] <http://personales.upv.es/jquiles/prffi/semi/ayuda/hlpbandas.htm>
- [49] <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/91642/fichero/1642-GRANADOS.pdf>.
- [50] Zhao Jing, Zhang Guang-Yu y Shi Dong-Xia; *Review of graphene-based strain sensors*, Chin. Phys. B **2**(5), 057701 (2013).
- [51] https://en.wikipedia.org/wiki/Discovery_of_graphene.
- [52] <https://computerhoy.com/noticias/hardware/este-transistor-grafeno-podria-permitir-velocidad-100-ghz-45522>.
- [53] <https://www.mundodelgrafeno.com/2013/01/placas-solares.html>.
- [54] https://as.com/meristation/2017/09/25/betech/1506329560_292917.html.
- [55] <https://segundoenfoque.blogspot.com/2017/04/que-son-los-filtros-de-grafeno.html>.

- [56] <https://techdroy.com/primer-a-bateria-comercial-grafeno/>.
- [57] <https://grafeno.co/crean-sensores-de-humedad-basados-en-grafeno/>.
- [58] Yuan Cao, Valla Fatemi, Shiang Fang, Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi, Efthimios Kaxiras y Pablo Jarillo-Herrero; *Unconventional superconductivity in magic-angle graphene superlattices*, Nature **556**,43 (2018).
- [59] <https://physicsworld.com/a/ferromagnetism-appears-in-twisted-bilayer-graphene/>
- [60] Manuel Lozano Leyva, Director, *La Nanotecnología. El mundo de las máquinas a escala nanométrica*, National Geographic, Madrid (2019).
- [61] Pedro Gómez Romero, *Nanomundo. Un paseo por la Nanotecnología*, Ibérica, Madrid (2016).
-