

Internet Electronic Journal*

Nanociencia et Moletrónica

Julio 2010, Vol. 8, N°1, pp. 1489-1508

Grafeno Epitaxial y su Potencial en la Nanotrónica

R. Gómez Puerto*, A. Ramírez Solís

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
Facultad de Ciencias de la Electrónica (FCE),
Laboratorio de Nanotrónica *Alumno de Posgrado,
Ciudad Universitaria, 72550 Puebla, **México**
e-mail: aramirs@siu.buap.mx

recibido: 16.03.10

revisado: 15.05.10

publicado: 31.07.10

Citation of the article;

R. Gómez Puerto, A. Ramírez Solís, Grafeno Epitaxial Y Su Potencial En La Nanotrónica,
Int. Electron J. Nanoc. Moletrón, 2010, Vol. 8, N°1 pp 1489-1508

Copyright © BUAP 2010

<http://www.revista-nanociencia.ece.buap.mx>

Grafeno Epitaxial y su Potencial en la Nanotrónica

R. Gómez Puerto*, A. Ramírez Solís

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
Facultad de Ciencias de la Electrónica (FCE),
Laboratorio de Nanotrónica, *Alumno de Posgrado,
Ciudad Universitaria, 72550 Puebla, **México**
e-mail: aramirs@siu.buap.mx

recibido: 16.03.10

revisado: 15.05.10

publicado: 31.07.10

Internet Electron. J. Nanoc. Moletrón., 2010, Vol.8, N°1, pp 1489-1508

Resumen: Grafeno es llamado a menudo un material 'milagroso' para aplicaciones futuras en la nanoelectrónica. Presenta una estructura geométrica bidimensional de átomos de Carbono fuertemente cohesionados en una superficie uniforme, ligeramente plana (1nm de espesor), con ondulaciones, que forman una malla semejante a un panel de abejas, dado la configuración hexagonal que presentan. Las propiedades electrónicas del Grafeno proporcionan una bonanza para la física experimental y teórica. En el Grafeno los electrones interactúan con su superficie de panel, lo que genera una alta conductividad térmica y eléctrica, Además los electrones mantienen su velocidad incluso a muy bajas temperaturas comportándose como si no tuviesen masa en reposo. El paso de los electrones por el Grafeno origina el Efecto Hall Cuántico que es imprescindible para su comportamiento como semiconductor. Pero mientras que otros semiconductores sólo presentan este efecto a temperaturas muy bajas, el Grafeno lo mantiene bien incluso a temperatura ambiente, lo que le convierte en un excelente semiconductor, permite que los electrones se muevan libremente por el camino que más convenga, no ceñidos a un camino recto como en los transistores convencionales basados en las capacidades semiconductoras del Silicio, que es empleado para crear pequeñísimos tubos por donde fluye la corriente eléctrica. Además, al contrario que en otros sistemas bidimensionales que tengan pequeñas impurezas, en el Grafeno los electrones no se pueden quedar aislados en zonas donde no puedan salir. La mayor parte de la investigación experimental en el Grafeno se centra en las propiedades electrónicas que pueden ser aprovechadas para su uso en la nanoelectrónica, la dificultad de utilizar Grafeno estriba en el uso del sustrato adecuado. En el presente trabajo se presenta y discute el estado actual de la investigación y aplicación del Grafeno como material electrónico.

1. Introducción

La microelectrónica desde hace más de 50 años ha tenido un impacto en áreas de aplicación de la ingeniería electrónica, el termino exactamente tiene que ver con los circuitos integrados de alta densidad y su diseño sobre un solo chip, en componentes y circuitos electrónicos de dimensiones microscópicas y hasta de nivel molecular [1,2,3]. La misma microelectrónica predice que cada dos años se duplica el número de transistores en un circuito integrado [4], lo anterior aunado a que los límites de desempeño físico demandan una nueva forma de electrónica [5] con nuevos conceptos y nuevos materiales [6]. Ha llevado en los últimos años a que la microelectrónica en su estado "clásico" está perdiendo ímpetu. Durante el medio siglo pasado las tecnologías se desarrollaron en base a Silicio, las cuales están llegando a límites físicos, tecnológicos y financieros que impiden la fabricación y funcionalidad de estructuras mucho más pequeñas, lo que motiva a trabajar en nuevos conceptos de una nanoelectrónica molecular. Es por ello que la microelectrónica ha sido la fuerza móvil de la investigación en la nanotecnología [3], no sólo por la necesidad forzada por los límites naturales de la electrónica integrada en estado sólido cuyo avance es requerido para la tecnología de información y de integración artificial, sino también es una posibilidad real con todas las consecuencias que sus logros implican, tales como las herramientas para el control individual de átomos en la conformación de estructuras funcionales, nuevas técnicas con potencial de auto-ensamble, auto-replicación y auto-corrección de fallas [2]. El estado inicial en que se encuentra la rama, guarda muchas oportunidades para una participación activa, siendo la combinación de conocimiento multidisciplinario un paso indispensable para este fin [4].

La Nanociencia se encuentra en una etapa, donde la investigación y la mayoría de las inversiones están dirigidas hacia la comprensión de los fenómenos de la nanoescala, los procesos y la creación de nuevos materiales o nanoestructuras. Las tendencias tecnológicas apuntan a la transición de nanomateriales a nanosistemas, mediante la construcción de sistemas nanoescalares que requieren del uso combinado de las leyes de la nanoescala, principios biológicos, tecnología de la información e integración de sistemas. Es por ello que los nanomateriales han acaparado el interés de la investigación científica de las últimas dos décadas, debido al descubrimiento de propiedades distintas a las que ofrecen los macromateriales, dando lugar a una nueva rama del saber científico, la nanotecnología y la nanotróica [7,8]. El carbono ha focalizado en mayor grado la atención científica [9]. Tiene varias formas alotrópicas (es decir, estructuras moleculares diferentes), las cuales pueden ser tridimensionales-Grafito; bidimensionales-Grafeno; monodimensionales-nanotubos y cero dimensionales-Fulerenos [10]; de las cuales, el Grafeno epitaxial [11] se está convirtiendo en el candidato más fuerte para la electrónica post-CMOS [12,13]. Es interesante observar que la electrónica basada en carbón ha sido reconocida como un reemplazo viable del Silicio [14].

La electrónica molecular [3] fue la primera alternativa a considerarse, pero nunca se desarrolló más allá de prototipos rudimentarios [15]. Uno de los problemas persistentes fue el manejo y la interconexión entre moléculas. Una resistencia eléctrica inaceptable entre la molécula y los contactos metálicos sigue siendo un problema sin resolver. La electrónica de nanotubos de carbono proporciona un importante paso adelante en la

electrónica basada en carbón [16]. Los nanotubos de carbono son básicamente grandes moléculas orgánicas que revelan los efectos cuánticos de confinamiento y conducción balística [17], que son características esenciales en una plataforma electrónica. En ese sentido, la electrónica basada en nanotubos fue de suma importancia, sin embargo, como la electrónica molecular, persiste el problema en la resistencia eléctrica de contacto y tanto los patrones como su arquitectura presentan grandes desafíos.

La electrónica basada en Grafeno promete superar los problemas tanto de la electrónica molecular como de la electrónica de carbono basados en nanotubos, manteniendo sus características esenciales [10]. Específicamente, supera los problemas de patrones, pero lo más importante es que se evitan los problemas de contacto eléctrico. Las cintas de Grafeno son esencialmente similares a los nanotubos de carbono contando con los mismos efectos de confinamiento cuántico [18,19], así como alta conductividad [19], pero su característica más importante es que las estructuras de Grafeno pueden ser perfectamente interconectadas [20]. Mientras tanto el Grafeno ofrece la posibilidad de interconectar estructuras nanoscópicas que mantienen la coherencia de fase, aún a temperatura ambiente, permitiendo así un paradigma completamente nuevo en la nanoelectrónica [10].

2. Grafeno

El Grafeno es un material nanométrico, bidimensional, de átomos de carbono fuertemente cohesionados en una superficie uniforme, ligeramente plana, con ondulaciones, de un átomo de espesor, con una apariencia semejante a una capa de panal de abejas por su configuración atómica hexagonal (figura 1) [21].

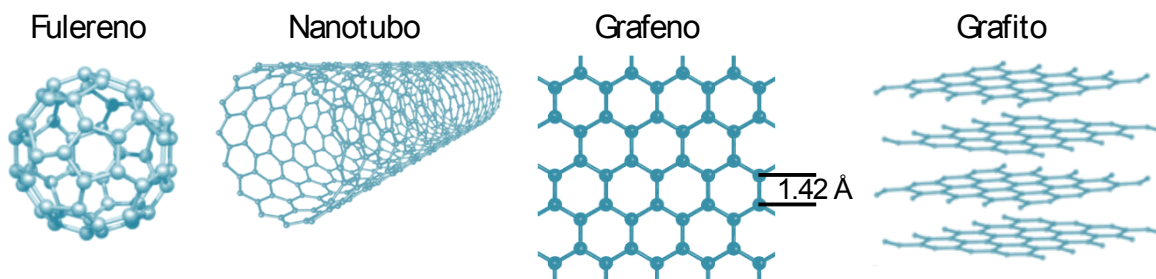


Figura 1. En el Grafeno la longitud de los enlaces carbono-carbono es de aproximadamente 1.42 Å, es el componente estructural básico de todos los demás elementos gráfiticos, incluyendo el Grafito, los nanotubos de Carbono y los Fulerenos.

El Grafeno se le puede considerar como el bloque constructor a partir del cual se forman los materiales gráfiticos [21]. El enlace de 12 pentágonos en la red de Grafeno produce una molécula cerrada, el Fulereno o C_{60} producido experimentalmente en 1985 [22]. Otras estructuras derivadas del Grafeno son los nanotubos, descubiertos y

descritos por científicos rusos en 1952 [23] y más tarde, en 1991, redescubiertos para la ciencia occidental por S. Iijima [24]. Un nanotubo no es más que una lamina fina de Grafeno enrollada sobre sí misma formando un cilindro [25]. Mientras que el Grafito es la estructura derivada del Grafeno conocida desde hace más tiempo, está formado por una multitud de láminas de Grafeno depositadas en forma de capas unas sobre otras (figura 1) [10].

Los enlaces químicos covalentes entre los átomos de carbono en una hoja de Grafeno, conocida como unión sp^2 , se encuentran entre las más fuertes de la naturaleza, incluso más fuerte que las uniones de carbono en el diamante. Los únicos orbitales con los cuales trabaja el Carbono son los orbitales s el cual tiene simetría esférica, mientras la forma geométrica de los orbitales p es la de dos esferas achatadas hacia el punto de contacto y orientadas según el eje de coordenadas.

En 2001 se proponen y desarrollan los métodos de la microelectrónica a patrones en litografía epitaxial. Después de los cálculos preliminares se reveló el potencial del Grafeno [18,26]. En 2002, las capas de Grafeno se cultivaron en un solo cristal de Carburo de Silicio y los métodos de la microelectrónica para el crecimiento Grafeno epitaxial se desarrollaron. La primera patente se publicó en 2006 sobre la base de una solicitud presentada en 2003 [27]. En 2004 se dan los primeros resultados sobre las propiedades del Grafeno en la electrónica [11]. La movilidad μ de los electrones y los huecos de estos prototipos fue mayor que en los típicos dispositivos basados en Silicio, por lo que fue un factor importante de motivación para el campo [10].

$$\sigma = qn\mu, \quad (1)$$

donde, q es la carga del electrón, n concentración de electrones libres y μ movilidad de los electrones. La movilidad en el Grafeno no se ve afectada incluso a bajas temperaturas [19].

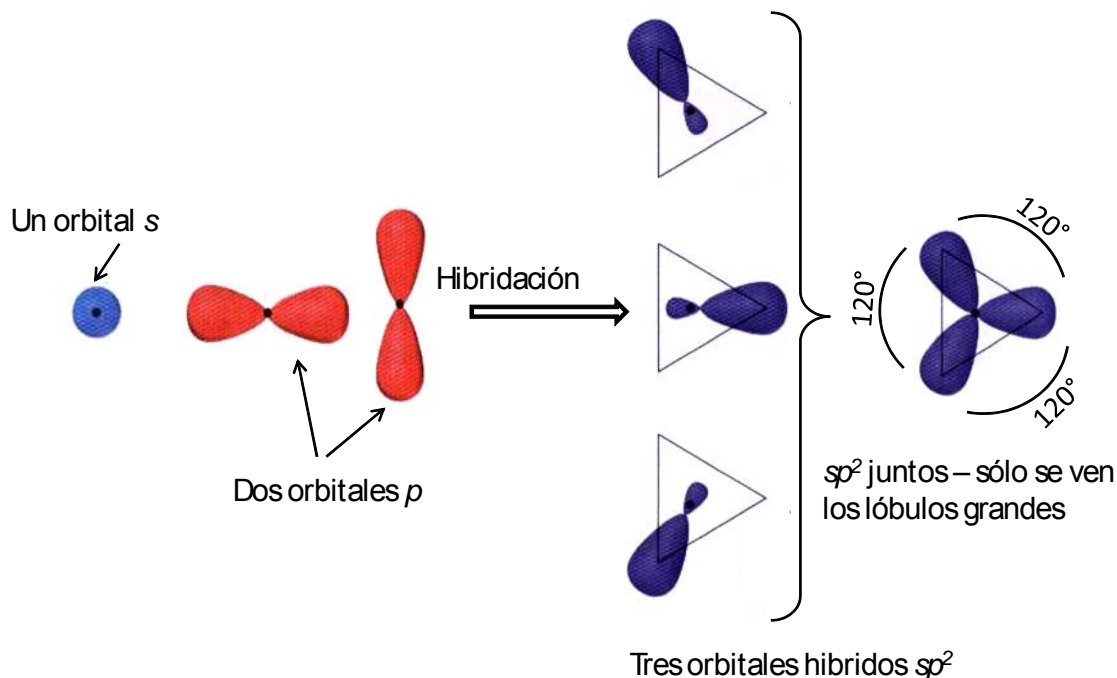


Figura 2. Un orbital s y dos orbitales p pueden hibridarse para formar tres orbitales atómicos híbridos sp^2 equivalentes, los lóbulos grandes de estos orbitales apuntan hacia las esquinas de un triángulo equilátero formando ángulos de 120° . Esta unión sp^2 da lugar a la excepcional estabilidad de los sistemas de grafito, es muy importante para las aplicaciones electrónicas y en especial para la nanoelectrónica en el que las estructuras están sometidas a muy grandes tensiones térmicas y eléctricas [24].

Además, la naturaleza bidimensional de las capas de Grafeno quedó claramente demostrada. Se expuso que estas capas de Grafeno podrían ser cerradas, pronto se encontró que la movilidad del grafeno crecido sobre una capa de Carbono es mayor que en el Grafeno crecido sobre el Silicio [19,28]. La posibilidad real de la electrónica basada en Grafeno fue la motivación más fuerte para la ciencia y la tecnología de Grafeno [29,30].

El Grafeno *epitaxial* fue seleccionado como la plataforma más prometedora para la electrónica basada en Grafeno. Se ha presentado en el Organismo Internacional de Tecnología de Semiconductores (ITSR) [31] como un potencial sucesor del Silicio [12, 32]. En 2004 se desarrolla un método para obtener Grafeno [24], en base a capas delgadas de grafito. Dicho método se le conoce como exfoliación de grafeno. Al presionar la cinta de Grafito contra de la oblea de Silicio oxidado se transfieren algunas laminillas, debido a ello fue posible identificar una monocapa de Grafito (figura 3).

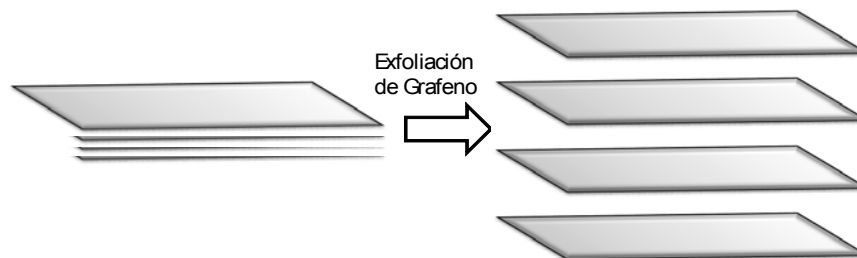


Figura 3. El Grafeno se puede obtener en pequeñas cantidades por el proceso de exfoliación, de esta forma se rompen las interacciones entre láminas mediante la formación del óxido de Grafito.

La primera publicación [33] mostró que los copos de Grafito ultra fino pueden ser cerrados en las superficies oxidadas del Carburo de Silicio. Se demuestra que estos copos de Grafito ultra fino podrían producirse y que cuentan con propiedades electrónicas semi-metálicas de Grafito [34,35]. Sin embargo, se deben tomar en cuenta los factores como método de producción, la variación en el grosor de las capas y las variaciones en el estado de la superficie del sustrato. Las muestras de Grafeno exfoliadas sólo son aptas para fines de investigación sobre las propiedades del Grafeno y Grafito ultra fino [21].

Las propiedades electrónicas del grafeno proporcionan una bonanza para la física experimental y teórica. A partir de la síntesis del mismo la investigación teórica sobre las propiedades del grafeno epitaxial es menos avanzada, en base al sustrato que se use para obtener Grafeno [10].

3. Propiedades físicas y electrónicas del Grafeno

La mayor parte de la investigación experimental en el Grafeno se centra en las propiedades electrónicas respecto a parámetros fisicoquímicos. De éstos la conductividad eléctrica, la resistividad y la estabilidad termodinámica son algunos de los más representativos [36].

Las propiedades electrónicas pueden ser ajustadas por la forma del sistema. Esta propiedad, que se comparte con los nanotubos de Carbono, es probablemente la característica más importante del Grafeno. Sin embargo, a diferencia de los nanotubos de carbón, las capas de Grafeno pueden ser patrones utilizando métodos relativamente estándar de microelectrónica. Esto supera uno de los problemas fundamentales de los nanotubos de carbono, que deben ser correctamente colocados con fines de aplicaciones electrónicas, mientras que las estructuras complejas de Grafeno pueden ser modeladas de diferentes formas para producir dispositivos interconectados, evitando así los problemas de las interfaces y las interconexiones. Esto resuelve un segundo problema importante de la electrónica basada en nanotubo de Carbono [10].

El Grafeno no es un metal: es esencialmente una molécula gigante orgánica y, técnicamente un semi-metal. Los electrones siguen el enlace π (π), donde se conectan los átomos vecinos cuando viajan de un átomo a otro.

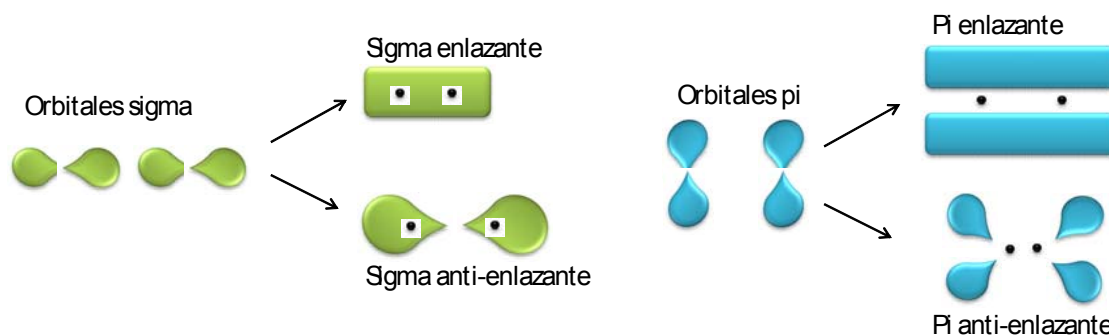


Figura 4. Pueden formarse orbitales sigma a partir de los orbitales s como en el caso de sp^2 , mientras que los orbitales pi tienen su máxima densidad en dos nubes electrónicas.

A diferencia de los metales, la geometría exacta de los átomos de Carbono es esencial. En contraste con los metales, donde los electrones se comportan como si fueran esencialmente electrones (cuasi)libres (es decir, con una carga del electrón y masa efectiva), los electrones en el Grafeno interactúan con la red de tal manera que parecen no tener masa. Por otra parte, los electrones de Grafeno presentan un pseudo-espín, el cual es un número cuántico adicional que caracteriza a los electrones de Grafeno para diferenciar su vinculación; y orbitales que tienen números idénticos de onda y energía, combinación de propiedades que hacen que el Grafeno sea único.

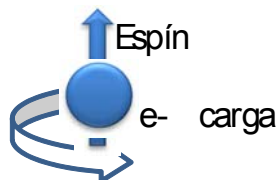


Figura 5. Se puede pensar en el espín como si fuese un eje de rotación capaz de apuntar en cualquier dirección. Aunque los electrones giren a la misma velocidad de rotación, que vale $1/2$, su eje de rotación puede ser distinto, lo que explica que en un campo magnético unos electrones se desvíen hacia un lado y otros hacia el contrario, por lo que debe especificarse esta desviación (estado de spin) para cada electrón en concreto

Los electrones del Grafeno presentan un comportamiento semejante a fermiones (estadística Fermi-Dirac). Un fermión es una partícula subatómica (electrones, protones o neutrones) que tiene un spin de $1/2$ entero y se rige por principios estáticos que establecen que sólo una en un conjunto de partículas idénticas puede ocupar un estado cuántico particular, a no ser que posea un spin distinto. Para los fermiones carentes de masa, el gap es cero y existe una relación estrecha entre el spin y el movimiento de la partícula: el spin sólo puede ser dirigido a lo largo de la dirección de propagación o sólo opuesto a él [21]. Pero, las partículas con masa de $-1/2$ spin pueden tener dos valores de spin proyectados sobre cualquier eje generándose partículas cargadas sin masa. El hecho de que los electrones en el Grafeno se comporten como partículas relativísticas sin masa en reposo y viajen a 10^6 m/s requieren ser descritas como partículas relativísticas llamadas fermiones Dirac carentes de masa. Estas partículas pueden ser

visualizadas como electrones que han perdido su masa en reposo o como neutrinos que adquirieron la carga electrónica elemental.

El origen de estas partículas se debe a la interacción de los electrones de Carbono con el potencial (la energía de una partícula derivada de su posición) periódico dado por la estructura de panal del Grafeno (simetría de cristal) produciendo cuasi-partículas que, a bajas energías, se describen exactamente por la ecuación Dirac, regidas por la siguiente ecuación para la expresión del espectro de energía:

$$E_{v\sigma} = \pm \sqrt{2|e|B\hbar v_f^2 \left(v + \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \right)}, \quad (2)$$

donde v_f es la velocidad del electrón, $v = 0,1,2,\dots$, es el número cuántico y el término con $-\frac{1}{2}$ está relacionado con la quiralidad (proyección del pseudo-espín en dirección al movimiento, siendo positivo para los electrones y negativo para los huecos). El Efecto Hall Cuántico anómalo es la evidencia más directa para asegurar la existencia de los fermiones Dirac carentes de masa en el Grafeno [36,37,38].

La forma de Grafeno más conocido es el nanotubo de carbono [17], el cual presenta un comportamiento de semiconductor, hasta presentar en algunos casos superconductividad (conducción de corriente eléctrica sin resistencia eléctrica).

Los efectos cuánticos también afectan a un régimen de Grafeno, por el cual la conductividad perpendicular a la corriente toma valores discretos, o cuantizados, permitiendo medirla con alta precisión. La cuantización implica que la conductividad del Grafeno nunca sea cero [18,38].

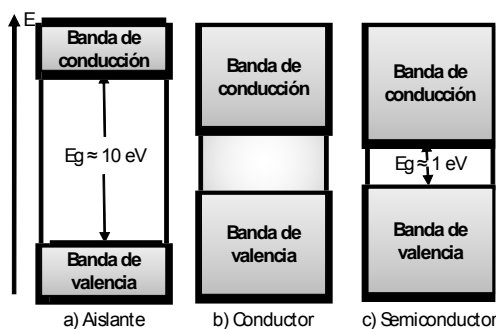


Figura 6. En el caso de los conductores (b), la banda de conducción y de valencia se encuentran superpuestas, por lo que cualquier aporte de energía es suficiente para producir un desplazamiento de los electrones. En el caso de los semiconductores podemos observar que su anchura de la banda prohibida es más pequeña que en el caso de los aislantes.

El Efecto Hall Cuántico se le relaciona con el Efecto may, el cual se establece mediante el siguiente procedimiento: al material a investigar por el cual se hace pasar una corriente eléctrica, se le aplica perpendicularmente un campo magnético provocando que los portadores de carga se acumulen en un determinado sitio, generándose un campo eléctrico. Midiendo la diferencia de potencial en las dos superficies del material

es posible deducir el signo y la densidad de los portadores de carga, presentándose una linealidad entre el campo magnético y la resistencia Hall.

El Efecto Hall Cuántico ofrece, por lo contrario, como característica la no linealidad entre la resistencia Hall y el campo magnético, es decir, que el Efecto Hall Cuántico se presenta mediante una serie de escalones o peldaños al aplicársele campos magnéticos altos y bajas temperaturas (figura 7). La particularidad que muestra el Grafeno es, que al comportarse como fermiones Dirac carentes de masa es la existencia de estados de energía cero lo cual conduce a un Efecto Hall Cuántico anómalo con una cuantización de medio entero de la conductividad Hall en lugar de una de un entero [36]. La resistencia Hall, definida por $R_H = V_H/I$, sólo puede tomar los valores:

$$R_H = \frac{V_H}{I} = \frac{R_K}{n}, \quad n = 1, 2, 3, \dots, \quad (3)$$

en donde n es un número entero y R_K la llamada constante de Von Klitzing, relacionada con la carga electrónica fundamental e y la constante de Planck h por la expresión

$$R_K = \frac{h}{e^2}. \quad (4)$$

El Efecto Hall Cuántico se utiliza para definir el patrón de resistencia, el Ohm se define de modo que R_{K-90} tiene exactamente el valor de

$$R_{K-90} = 25812.807 \, \Omega \quad (5)$$

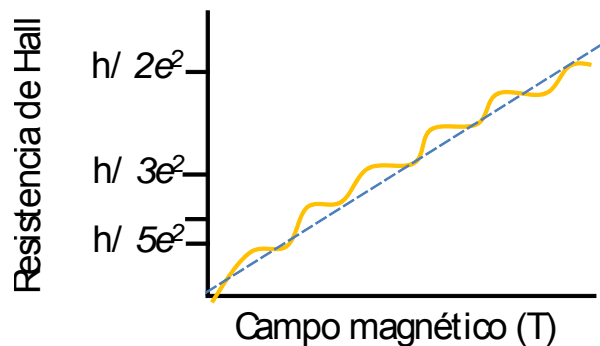


Figura 7. Efecto Hall Cuántico. La línea punteada muestra el comportamiento Hall clásico esperado, y la línea escalonada muestra el comportamiento Hall Cuántico. Tanto a bajas como a altas temperaturas se puede observar el efecto Hall Cuántico para electrones y huecos [40,41]

El Grafeno no tiene banda prohibida y en consecuencia los cambios de resistividad eléctrica son pequeños. Por lo tanto, un transistor de Grafeno por su propia naturaleza tiene una baja relación de encendido/apagado, sin embargo, una manera de evitar esta limitación es obtener Grafeno en tiras estrechas. Al reducir el tamaño, el impulso de

portadores de carga en el sentido transversal se convierte en cuantizada que da lugar a la apertura del gap [42]. Este efecto se manifiesta en los nanotubos de carbono, donde un nanotubo tiene una brecha de banda proporcional a su diámetro. La apertura de una brecha de banda en cintas de Grafeno se ha observado recientemente en la gama de dispositivos de capas litográficas de Grafeno [43] y en síntesis química [44].

5. Técnicas de fabricación

El Grafeno se ha crecido en sustratos metálicos (metales de transición y carburos) por vaporación térmica, dado que es el método físico más sencillo para la producción de capas en vacío. El material es vaporizado mediante el calentamiento de filamentos o resistencias. Normalmente el cambio de material sólido a gaseoso no ocurre de manera directa, sino a través de la etapa intermedia de la fase líquida. Habiendo una distancia suficientemente grande entre la fuente de vaporización y el sustrato, la fuente aparece como puntual. La velocidad a la que las partículas son vaporizadas de la superficie del cuerpo sólido aumenta aproximadamente de manera exponencial con la temperatura. La energía cinética de los átomos vaporizados o de las moléculas está entre 0.1 a 0.2 eV a temperaturas de 1500-2000 K [13,45].

Un método para producir láminas individuales de Grafeno consiste en dispersar Grafito por exfoliación mecánica en un disolvente como es el diclorobenceno aplicando ultrasonidos durante algunos minutos. Este procedimiento lleva a generar láminas de Grafeno dispersadas por la acción de ultrasonidos [46]. Recientemente una técnica similar fue empleada para la obtención de cintas de Grafeno con espesores en la escala nanométrica [44]. El principal inconveniente radica en la necesidad de utilizar tiempos largos de ultrasonidos, que conducen a la formación de láminas individuales de bajas dimensiones laterales, a la vez que se generan defectos estructurales.

Una técnica que parece tener gran potencial con vistas a una producción masiva de Grafeno es el crecimiento epitaxial directo de grafeno sobre un sustrato aislante. Consiste en el calentamiento de sólidos de Carburo de Silicio (SiC), lo que produce una grafitización parcial de la lámina superior [11]. Sin embargo, el control sobre el número de láminas dificulta esta técnica [19]. También se está aplicando con éxito la técnica descomposición de hidrocarburos en CVD para el crecimiento de láminas de Grafeno [47].

La motivación de distintas técnicas de estudio, se debe al hecho que una capa de Grafito es incapaz de reacción con la mayoría de los materiales químicos. En algunos casos (por ejemplo, en Ni (111) o Ru (0001), el carbono crece epitaxialmente, lo que significa que los registros de grafeno crecen con la red cristalina del sustrato [48,49].

Para el crecimiento de sólidos en tres dimensiones es la Epitaxia por Haces Moleculares (MBE, del inglés Molecular Beam Epitaxy (figura 8)) [12] una técnica de crecimiento de capas cristalinas, que comprende la reacción controlada de uno o más haces térmicos de moléculas o átomos de diferente naturaleza con un sustrato caliente bajo condiciones de ultra-alto vacío [50]. La razón de crecimiento de una capa epitaxial se puede controlar mediante la densidad de flujo de los haces moleculares hasta el orden de una capa atómica. Dichas razones de crecimiento considerablemente

más pequeñas (o también mayores) se ajustan mediante el ajuste de la temperatura de las celdas Knudsen [51].

Los haces moleculares son generados por evaporación térmica de la fuente material en celdas tipo Knudsen convencional. Partiendo de un sistema cerrado, isotérmico, que contiene un material, se conforma entonces mediante éste una presión de vapor en equilibrio $P(T)$. Para sistemas reales se emplea la relación:

$$P(T) = 10^{(A/T)+B \log T - C} \quad (6)$$

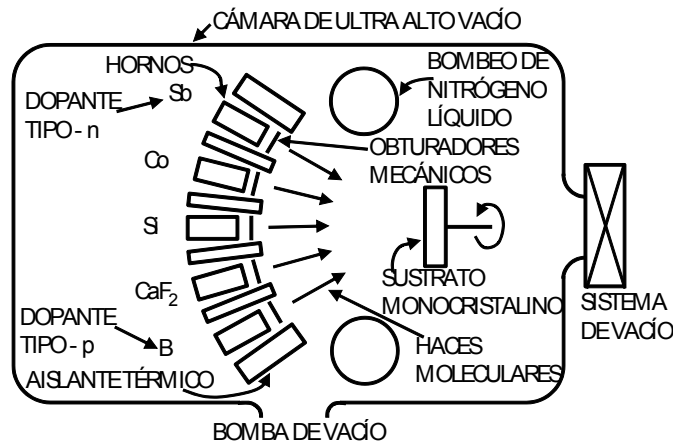


Figura 8. Configuración de la cámara MBE. Esquema de la cámara de vacío para el proceso de crecimiento epitaxial mediante haces moleculares.

Utilizando la técnica MBE, se pueden dar tres pasos básicos de crecimiento: La adsorción de átomos que llegan a la superficie, la migración y disociación de estos átomos adsorbidos y la incorporación de los átomos en el cristal o la capa bajo crecimiento [52].

Las propiedades de estas películas epitaxiales han sido extensamente estudiadas, sin embargo, estas películas tienen pocas posibilidades de uso en la electrónica dado que se requiere otro tipo de sustratos. Por consiguiente, el trabajo con Grafeno sigue siendo relativamente desconocido para la ciencia de superficies [53].

El Carburo de Silicio es un semiconductor con la composición química SiC. Se forma en una amplia variedad de estructuras cristalinas. Nos concentraremos en dos de tipo hexagonal 4H y 6H (figura 9). El 4 y 6 se refieren al número de bi-capas Carburo de Silicio que componen una celda (unidad del cristal), ubicadas en las caras [0001] y [000-1]. La cara 0001 es donde la superficie presenta átomos de Silicio, mientras que la cara [000-1] (al otro lado del cristal) presenta átomos de carbono.

Materiales ultra finos de Grafeno pueden ser cultivadas en cristales de Carburo de Silicio simplemente calentando el material en el vacío a altas temperaturas ($> 1100^\circ \text{C}$). El proceso consiste en la evaporación del Silicio de la superficie rica en Carbón. El

Carbono se reordena para formar capas de Grafeno. Las capas epitaxiales se forman en la superficie de carburo de Silicio. Sin embargo, el proceso es relativamente simple y se conoce desde hace muchos años [49,54]. También se sabía que el crecimiento en Si y en C es diferente. En la cara C el material por lo general consiste de varias capas de Grafeno mientras que el crecimiento en la cara Si tiene unas cuantas e incluso una sola capa [55].

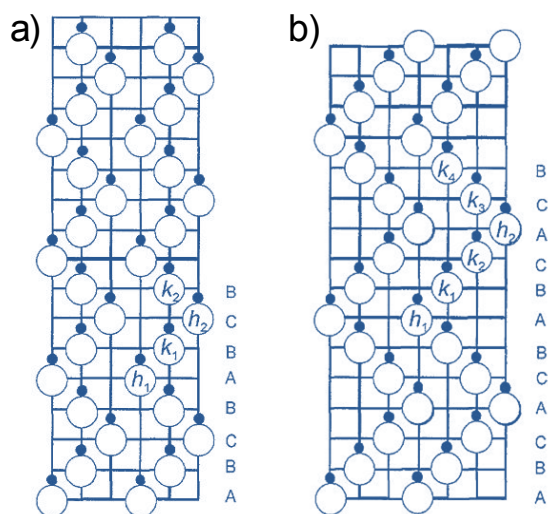


Figura 9. a) 4H-SiC formado por enlaces tipo cúbico (k_1 y k_2) y hexagonal (h_1 y h_2).
b) 6H-SiC con dos tercios de enlaces tipo cúbico (k_1 , k_2 , k_3 y k_4) y un tercio tipo hexagonal (h_1 y h_2).

Sin embargo, hay varios aspectos que no eran conocidos y descubiertos [19,56]. El Grafeno crece en la superficie de manera escalonada para producir películas continuas. Además, se descubrió que la capa de interfaz se carga eléctricamente debido a la barrera Schottky para producir densidades de carga del orden de $n = 10^{12}$ electrones por cm^2 en la capa de Grafeno [57,58]. Las otras capas son esencialmente sin carga. Esta carga intrínseca es ventajosa para algunas aplicaciones, ya que aumenta la conductividad eléctrica [59,60].

El Grafeno epitaxial crecido en la cara Si suele ser de una hasta 5 capas. Al igual que el Grafito las capas se apilan. La interfaz de la capa está cargada [57, 58]: $n \approx 5 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ de manera que la energía de Fermi $E_F \approx 0,3 \text{ eV}$.

La interacción con el sustrato se encuentra en un intervalo de energía aproximadamente de 0,3 eV en la interfaz, mientras que esta brecha se cierra rápidamente a medida que más capas se agregan [61]. La interfaz Grafeno a SiC resulta ser compleja y compuesta por varias capas [56]. Es posible el cultivo de las monocapas de Grafeno sobre la cara de Si [61], aunque hasta ahora, la movilidad electrónica resulta ser relativamente baja (es decir, comparables a Silicio: $\mu \leq 1000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ a temperatura ambiente). La baja movilidad, que parece estar relacionado con defectos en la estructura, habrá que superarse antes de crecer Grafeno en la cara de Si [10].

El Grafeno epitaxial crecido en la cara de C tiene propiedades físicas excepcionales. En dicha cara el grafeno típicamente se presenta en múltiples capas, alrededor de 5 hasta 100 capas. Al igual que en la cara de Si, la capa de interfaz de Grafeno se carga con una densidad de carga similar $5 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2} \approx n$. Las medidas eléctricas de transporte revelan que la capa de interfaz domina el transporte electrónico, al menos para cintas relativamente estrechas (ancho $< 1 \text{ } \mu\text{m}$) y que la movilidad de la capa excede $10^4 \text{ cm}^2/\text{Vs}$. Por otra parte, la coherencia cuántica se ha establecido a una distancia cerca del micrón en cintas estrechas. Estas dos propiedades son muy importantes para las aplicaciones. En particular, el material de alta movilidad es ventajoso para la alta velocidad, y la electrónica de baja disipación, mientras que longitudes de coherencia de fase indican que los dispositivos cuánticos coherentes se pueden realizar en los dispositivos de Grafeno epitaxial [19].

El material se comporta como una pila de capas de Grafeno independientes, que exhiben las propiedades del Grafito. Este material es de varias capas de Grafeno epitaxial, y no una capa delgada de grafito. Esto conducirá a nuevos avances muy importantes tanto en la física fundamental y en arquitecturas para nuevos dispositivos. La primera capa se encuentra sin dopar. De hecho las medidas de absorción de infrarrojos en un campo magnético revelan que por estas capas $n \leq 5 \times 10^9/\text{cm}^2$ para que el punto de Dirac está sólo unos pocos meV por debajo del nivel de Fermi. Por lo tanto, para estas capas de Fermi la longitud de onda se encuentra en un orden de $1 \text{ } \mu\text{m}$, en comparación con la primera capa en la longitud de onda de Fermi es del orden de 10 nm . Esto es muy importante, especialmente para los dispositivos nano estructurados [59,60].

6. Aplicaciones potenciales

El Grafeno epitaxial deberá estar completamente desarrollado como material de la electrónica, antes de llegar a fabricarse dispositivos comercialmente viables, por lo que, los primeros dispositivos comerciales de Grafeno epitaxial están en el horizonte.

Al inyectar electrones en un nanotubo se genera un calentamiento significativo del contacto. Esto se debe a la naturaleza del contacto entre un metal y un nanotubo de carbono, lo que lleva a cabo en virtud de sus bandas de electrones. Este calentamiento no sólo consume energía, también causa grandes tensiones eléctricas en el contacto dando lugar a la electromigración [62,63] de los átomos de metal que en última instancia harán que el contacto falle. El Grafeno entramado no sufre de estos problemas, debido al patrón que presenta el problema de colocación no existe. Por otra parte, cintas estrechas de grafeno pueden ser perfectamente conectados con el Grafeno para conducir. En ese caso, el sistema de electrones de los conductores continúa en la cinta y esencialmente elimina calentamiento por contacto. Lo que implica un uso en contactos para comunicación [64,65], aprovechando la ventaja de que los canales de comunicación, puntos cuánticos, barreras e intercomunicadores pueden ser trazados en una hoja de grafeno [21].

Una de las características más notables de nanotubos de Carbono y Grafeno es que los electrones pueden viajar grandes distancias sin dispersión, teniendo consecuencias

importantes para la electrónica. Esto no sólo establece eficientes (bajo consumo) los dispositivos electrónicos, sino que también es una característica importante para mejorar la velocidad electrónica en el orden de (THz). De hecho se prevé que la electrónica de ultra alta velocidad será una de las aplicaciones más importantes de la electrónica de Grafeno, al menos inicialmente [66].

Es posible cambiar de forma controlada el número de electrones en una hoja de grafeno por puerta de dopaje. Una puerta se produce al cubrir la hoja con una capa aislante con recubrimiento metálico. La aplicación de un potencial eléctrico entre el Grafeno y el metal induce cargas en el Grafeno [34,35]. Si los electrones se añaden, los estados superiores serán ocupados, de modo que la energía de Fermi se eleva. Si los electrones se eliminan, estos se mandan a la zona más baja y la energía de Fermi se reduce. Esto, a su vez afecta a la conductividad σ , ya que:

$$\sigma = n | e \mu |. \quad (7)$$

donde n es el número adicional de electrones por unidad de superficie (la densidad de dopaje), e es la carga del electrón y μ es la movilidad. Además, la longitud de onda electrónica tiene una dependencia

$$\lambda_F = \sqrt{(4\pi/n)}, \quad (8)$$

de modo que esta longitud de onda se puede ajustar, y

$$\lambda = h/p, \quad (9)$$

donde h es la constante de Planck y p el momento de movimiento.

El dopaje de la puerta se ha demostrado en prototipos de transistores de efecto de campo y dispositivos de puntos cuánticos [3,10,66,67]

Hay ejemplos de prototipos de transistores de Grafeno epitaxial [67,68]. Estos primeros resultados muestran que la electrónica de Grafeno epitaxial está en buen camino para una nueva electrónica basada en el Carbono. Es evidente que las características de dichos transistores están lejos de ser ideales y que no se pueden comparar con FET's CMOS todavía. La razón principal es que el Grafeno en 2-D no tiene una banda prohibida, de modo que el efecto de campo está dominado por la modulación de la densidad de carga por los potenciales puerta,

$$\lambda = Q/L, \quad (10)$$

donde Q es la carga del cuerpo y L es la longitud. Además, la movilidad es aproximadamente inversamente proporcional a la densidad de carga y depende de la conductividad de forma lineal en el campo aplicado con una conductividad mínima de alrededor de 0,1 mS.

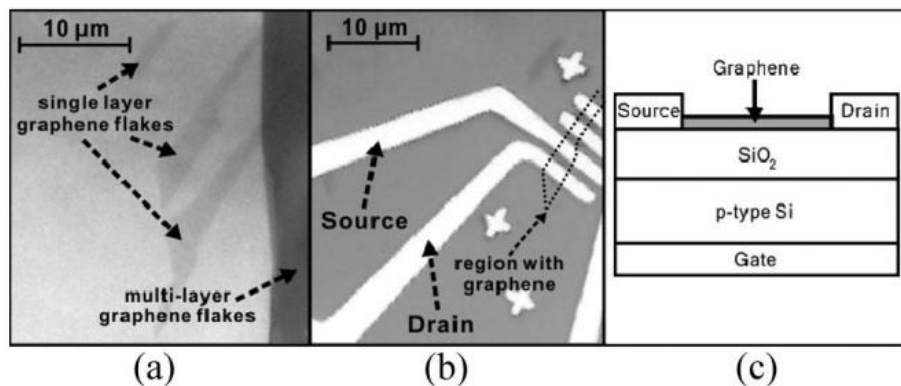


Figura 10. Transistor a base de Grafeno. a) Micrografía óptica que muestra una sola capa de Grafeno, b) micrografía de la estructura del dispositivo funcional, c) esquema de la estructura vertical del dispositivo [70].

Mejorar el factor de resistencia eléctrica requiere de una banda prohibida. Hay dos maneras de lograr esto. Una de ellas es la fabricación de cintas de Grafeno que son más estrechas de 10 nm (para producir un gap > 100 meV), y el otro es convertir químicamente el grafeno a una forma semiconductor con una banda prohibida.

El primer método requiere técnicas de litografía fina [69] que son potencialmente perjudiciales, y el efecto sobre la movilidad de las cintas todavía no se determina. Y en el segundo la conversión química también puede afectar seriamente la movilidad. En cualquier caso, está claro que la electrónica basada en Grafeno en la actualidad no está preparada para sustituir CMOS. Sin embargo, no se espera que compita con la electrónica de Silicio [13], sino que lo complemente.

Avances significativos se han hecho para demostrar las capacidades de alta velocidad de la electrónica basada en Grafeno. Los resultados recientes de los laboratorios HRL [71] e IBM [72] han mostrado monocapas de FET analógico epitaxial Si-cara con Grafeno más grande que la ganancia unitaria a una velocidad de trabajo superior a 10 GHz. Por otra parte velocidades de más de un THz que se prevé que sea factible.

Una aplicación del Grafeno bicapa en este momento consiste en utilizar su capacidad para absorber moléculas de gas de la atmósfera (sensores de gas de estado sólido) lo cual resulta en el dopaje con electrones o huecos dependiendo de la naturaleza del gas absorbido. Monitoreando los cambios en la resistividad, se puede determinar con exactitud las concentraciones de ciertos gases presentes en la atmósfera, con expectativas muy grandes en el área de control de la contaminación [10]

Otra aplicación es mezclar polvo de Grafeno obtenido de cristales micrométricos con plástico produciendo materiales conductores de electricidad a bajos costos y con una variedad muy grande de usos, o el uso de polvo de Grafeno en baterías eléctricas derivado de su alta conductividad y una relación grande superficie-volumen que conduce a una mejor eficacia de las baterías.

Hay avances notables en la síntesis de hojas de óxido de Grafeno que ofrecen posibilidades de uso en la confección de membranas para desarrollar superconductores y materiales para almacenaje molecular, entre otros muchos usos [21].

La química modificable del Grafeno, su área de superficie, el espesor, su estructura estable, lo hacen candidato para hacer dispositivos en base a hojas de Grafeno de detección microbiana y dispositivos de diagnóstico [73].

Conclusión

Aunque se conocía teóricamente la existencia del Grafeno, las propiedades que presenta despiertan un gran entusiasmo para su estudio, dada las potenciales aplicaciones. Su eficiencia, economía y algunas aplicaciones han sido probadas a nivel laboratorio y han demostrado excelente desempeño.

Bibliografía

- [1] Zehe, A.: "Quantenfeinstrukturen und Mikroelektronik" *Wissenschaftliche Zeitschrift TU Dresden* 37, 179 (1988);
- [2] Zehe, A.: "Quantum microstructures and Molecular Beam Epitaxy", *ADW-Series "Aus Plenum und Klassen (APK)"*, pp 66-150. *Academy of Sciences, Berlin*, (1989)
- [3] Zehe A.: "Moletrónica" (Documentos Adobe Acrobat).
<http://www.moletronica.buap.mx/> (Revisado Junio 2010) (2002).
- [4] Zehe A.: "Nanociencia y Nanoelectrónica a Escala Molecular: La Ley de MOORE mas alla de la Microelectrónica convencional", *Internet Electrón. J. Nanocs. Moletrón*. Vol.1, N°1, 1-9 (2003).
- [5] Patiño A., Ramírez A., Salmeron A., Zehe A., "Alambres Nanométricos Y Conductores Moleculares en Aplicaciones de Nanoelectrónica Integrada". *Internet Electrón. J. Nanocs. Moletrón*, Vol. 2, N°1, 152-162 (2004).
- [6] Zehe A.: "La Sociedad del Conocimiento y los Retos de la Nanotecnología en la Investigación Internet". *Internet Electron J. Nanoc. Moletrón*, Vol. 7, N°2, 1403-1432. (2009).
- [7] Zehe A.: "La Nanotecnología como Fuerza Económica: Aplicaciones y Productos Mercantiles al año 2007". *Internet Electron. J. Nanocs. Moletrón*. Vol.5, N°2, 1015-1034 (2007).
- [8] Centro de Investigación en Materiales Avanzados S.C.: "Diagnóstico y Prospectiva de la Nanotecnología en México". www.nanored.org.mx (Revisado Mayo 2010) (2009).
- [9] Zehe A.: "Nanociencia y Nanotecnología "más allá y más acá"-Un breve repaso en tiempo". *Internet Electrón. J. Nanocs. Moletrón*. Vol.4, N°3. 873-888 (2006).
- [10] Katsnelson M. I.: "Graphene:carbon in two dimentions" *Material today*. Vol. 10, N°1-2. 20-27 (2007)
- [11] Berger C. y Cols.: "Ultrathin Epitaxial Graphite: 2D Electron Gas Properties and a Route Toward Graphene-based Nanoelectronics". *Journal of Physical Chemistry*. B 108, 19912 (2004).
- [12] Zehe. A., Microelectrónica – Meteriales y tecnologías – Diseño de circuitos integrados. Textos científicos BUAP. Primera edición. México. (1999).
- [13] Zehe A., Tomas A., Tecnología epitaxial de silicio. Intercon Verlagsgruppe. Primera edición. Norderstedt Alemania. (2000).
- [14] Lu W., Lieber C.: "Nanoelectronics from the bottom up". *Nature Materials*. 6, 841-850 (2007).
- [15] Heath J. R.: "Molecular electronics". *Annual Review of Materials Research*. Vol. 39, 1-23 (2009).
- [16] Avouris R.: "Molecular Electronics with Carbon Nanotubes". *Accounts of Chemical Research*. 35, 1026-1034 (2002).
- [17] Frank S., y Cols.: "Carbon Nanotube Quantum Resistors". *Science*. Vol.280, N° 5370, 1744-46 (1998).
- [18] Nakada K, y Cols.: "Edge state in grapheme ribbons: Nanometer size effect and edge shape dependence". *Physical Review B*. 54, 24, 17954-17961 (1996).

- [19] Berger C., y Cols.: "Electronic confinement and coherence in patterned epitaxial grapheme". *Science Express*. Vol.312, 5777, 1191-1196 (2006).
- [20] Wakabayashi K., Sigrist M.: " Electronic transport through nanographite ribbon junctions". *Physics B: Condensed Matter*. Vol. 284, 1750-1751 (2000).
- [21] Geim A., Novoselov K.: "The Rise of Grapheme". *Nature materials*. Vol.6, 183-191 (2007).
- [22] Kroto H. W., y Cols.: "C₆₀: Buckminsterfullerene". *Nature*. 318, 162-163 (1985).
- [23] Radushkevich L., Lukyanovich V.: "O structure ugleroda, obrazujucesja pri termiceskom razlozenii okisi ugleroda na zeleznom kontakte". *Zurn Fisic Chim*. 26:88-95 (1952).
- [24] Lijima S.: "Helical microtubules of graphitic carbon". *Nature*. 354, 56-58 (1991).
- [25] Luque A. y Cols.: "Propiedades termo-elásticas y de fractura de diversas estructuras de carbono simuladas mediante dinámica molecular". *Anales de Mecánica de la fractura*. 25, 2, 474-479 (2008).
- [26] Wakabayashi K., Fujita M., Ajiki H.: "Electronic and magnetic properties of nanographite ribbons". *Physical Review B*. Vol. 59, 8271-8282 (1999).
- [27] Heer W., Berger C., First P.: *US patent 7015142*, (2006).
- [28] Heer W., y Cols.: "Epitaxial grapheme". *Solid State Communications*. 143 (1-2). 92-100 (2007).
- [29] Emtsev K., y Cols.: "Towards wafer-size grapheme layers by atmospheric pressure graphitization of silicon carbide". *Nature Materials*, 8. 203-207 (2009).
- [30] Virojanadara C.: "Homogeneous large-area grapheme layer growth on 6H-SiC(001)". *Physical Review B*. 78, 245403 (2008).
- [31] The International Technology Roadmap for Semiconductors
http://www.itrs.net/links/2007itrs/2007_chapters/2007_ERD.pdf (Revisado Junio 2010) (2007)
- [32] Sumary.: *International Technology Roadmap for Semiconductors* (2007).
- [33] Novoselov K., y Cols.: "Electric field effect in atomically thin carbon films", *Science*. 306, 5696. 666-669 (2004).
- [34] Novoselov K., y Cols.: "Two-dimensional gas of massless Dirac fermions in Graphene". *Nature* 438, 197-200 (2005).
- [35] Zhang Y., Tan Y., Stormer H., Kim P.: "Experimental observation of the quantum Hall effect and Berry's phase in Graphene". *Nature*. 438, 201-204 (2005).
- [36] Rodriguez C., (2008) "Propiedades y aplicaciones del grafeno", *Ingenierias*. Vol.11, N°38.pp. 17-23.
- [37] Geim A.: "Electrons lose their mass in carbon sheets". *Nature Materials UK*. Vol. 438, 165-167 (2005)
- [38] Wakabayashi K., Fujita M., Ajiki H.: "Electronic and magnetic properties of nanographite ribbons". *Physical Review*. B 59, 8271-8282 (1999).
- [39] Novoselov K. : "Room-temperature quantum Hall effect in grapheme". *Science*. 315 (5871), 1379 (2007)
- [40] Novoselov, K.: "Two-dimensional atomic crystals". *Proc. Nat. Acad. of Sci. Am*. 102 (30), 10451-10453 (2005).
- [41] Zhang, Y., Small J., Pontius W., Kim P.: "Fabrication and electric-field-dependent transport measurements of mesoscopic graphite devices". *Applied Physics Letters* 86(7): 073104 (2005).
- [42] Novoselov, K., Geim a.: "Two-dimensional gas of massless Dirac fermions in grapheme" *Nature*. 438(7065): 197-200 (2005).
- [43] Han, M., Ozyilmaz B., Zhang Y., Kim P.: "Energy Band-Gap Engineering of Graphene Nanoribbons". *Physical Review Letters*. 98(20): 206805 (2007).
- [44] Li, X., Wang X., Li Z., Lee S., Dai H.: "Chemically Derived, Ultrasoft Graphene Nanoribbon Semiconductors". *Science*. 319(5867). 1229-1232 (2008).
- [45] Zehe, A., Petzke W.: "Variation of Cathodoluminescence with Growth Conditions of Pyrolytic Deposited GaN". *Physica Status solid (a)* 25, K 159 (1974).
- [46] Bunch J., Yaish Y., Brink M., Bolotin K., McEuen P.: "Coulomb oscillations and Hall effect in quasi-2D graphite quantum dots". *Nano Letter*. 5, 287-290 (2005).
- [47] Kim K., y Cols.: "Large scale pattern growth of grapheme films for stretchable transparent electrodes". *Nature*. 457, 706 (2009).
- [48] Aizawa T., Souda R., Otani S., Ishizawa Y.: "Anomalous bond of monolayer graphite on transition metal carbide surfaces". *Phys Rev Lett*. 64,768-771 (1990).
- [49] Van A., Crombeen J., Tooren A.: "LEED and Auger electron observations of the SiC (0001) surface". *Surface Science*. 48 (2), 463-472 (1975).

- [50] Zehe A., Ramírez A., *Heterosistemas epitaxiales en la nanoelectrónica – Volumen 5*. Tecnoplus. Primera edición. México-Alemania. 52-56 (1998).
- [51] Zehe A., (1996) *Tecnologías y sistemas en alto vacío – Volumen 3*. Tecnoplus. Primera edición. México-Alemania. 16-17, 54, 59-63,
- [52] Zehe A., Ramírez A., (2000) "Homogeneity optimized layer deposition on large substrates in the molecular beam regime of Knudsen-type effusion source". *Superficies y Vacío* N°11, pp. 44-46.
- [53] Zehe A.: *Herramientas analíticas de interfaces sólidas*. Intercon Verlagsgruppe. Primera edición. Norderstedt Alemania 141-144 (2002).
- [54] Forbeaux I., Themlin J., Debever J.: "Heteroepitaxial graphite on 6H-SiC(0001): Interface formation through conduction-band electronic structure". *Physical Review B*. 58, 16396-16406 (1998).
- [55] Charrier A., y Cols.: "Solid state decomposition of silicon carbide for growing ultra-thin heteroepitaxial graphite films". *Journal of Applied Physics*. 92 (5), 2479 (2002).
- [56] Hass J., Heer W., Conrad E.: "The growth and morphology of epitaxial multilayer grapheme". *Journal of Physics: Condensed Matter*. 20 (32) (2008).
- [57] Rollings E., y Cols.: "Synthesis and characterization of atomically thin graphite films on a silicon carbide substrate". *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, Sol 67, 2172-2177 (2006).
- [58] Ohta T., Bostwick A., Seyller T., Horn K., Rotenberg E.: "Controlling the Electronic Structure of Bilayer Graphene" *Science*. 313, 951-954 (2006).
- [59] Sadowski M., Martínez G., Potemski M.: "Ladau level spectroscopy of ultrathin graphite layers". *Phys Rev Lett*. 97, 266405 (2006).
- [60] Orlita M., Faugeras C., Martínez G., Maude D., Sadowski J., Schneider J., Potemski M.: *Journal of Physics: Condensed Mater*. 20, 454223 (2008).
- [61] Zhou S., y Cols.: "Substrate-induced bandgap opening in epitaxial grapheme". *Nature Materials*. 6, 770-775 (2007).
- [62] Zehe, A., Roepke, G.: "in: Rules of Thumb for Physical Scientist", (ed. D.J. Fisher) p. 236, Trans. Tech. Publications, Switzerland, UK, (1988).
- [63] Neidhardt, A., Reinhold, U., Krauthem, G., Zehe, A. "Electromigration of Sn in Cu" *Crystal Research and Technology* 14, 179 (1979)
- [64] Heersche H., y Cols.: "Bipolar supercurrent in grapheme". *Nature*. 446, 56-59 (2007).
- [65] Tombros N., Jozsa C., Popinciuc M., Jonkman H., Bart J., Wees V.: "Electronic spin transport as spin precession in single grapheme layers at room temperature". *Nature*. 448, 571-574 (2007).
- [66] Ponomarenko L. y Cols.: "Chaotic Dirac Billiard in Graphene Quantum Dots". *Science*. 320 (5874). 356-258 (2008).
- [67] Kedzierski J. y Cols.: "Epitaxial Graphene Electron Devices on SiC Substrates". *IEEE Transactions on Electron Devices*. 55,2078 (2008).
- [68] Li X., Wu X., Sprinkle M., Ming F., Ruan M., Hu Y., Berger C., Heer W.: "Top and side gated epitaxial grapheme field effect transistors". *Phys. Status Solidi A*. 207 (2), 286-290 (2010).
- [69] Ramírez, A., Zehe, A. "Procedimiento de estructuración fina de fluoruros Alcalinotérreos", *IMPI Inst. Mex. Prop. Industrial* 970932/04136, México (1998).
- [70] Wang H., Nezich D., Kong J., Palacios T.: "[Graphene Frequency Multipliers](#)," *IEEE Electron Device Letters*. 30: 547-549, (2009).
- [71] Moon J.: "Epitaxial grapheme RF field effect transistors on Si-face 6H-SiC substrates" *IEEE Electron Device Letters*. 30, 650-652 (2009).
- [72] Lin Y., Dimitrakopoulos C., Jenkins K., Farmer D., Chiu H., Grill A.: "100-GHz Transistor from Wafer-Scale Epitaxial Graphene". *Science*. 327 (5966), 662 (2010).
- [73] Mohanty N., Berry V.: "Graphene-based single-bacterium resolution biodevice and DNA transistor: Interfacing Graphene derivatives with nanoscale and microscale biocomponents". *Nano Lett*. 8(12), 4469-4476 (2008).

