

# Carbono amorfo y cuasidiamante

Sandra Rodil, Instituto de Investigaciones  
en Materiales, UNAM.

[srodil@unam.mx](mailto:srodil@unam.mx)

## Introducción

El carbono es el elemento número seis de la tabla periódica; es decir, su número atómico es seis y su masa atómica es 12; esta posición en la tabla periódica no le confiere ninguna característica especial. Sin embargo, todos sabemos que es el elemento básico para la vida, es el sexto elemento más abundante del universo y forma un gran número de compuestos, mayor que la suma total de todos los otros elementos.

Para lograr esta gran cantidad de compuestos forma enlaces químicos en tres hibridaciones diferentes. La hibridación es el proceso por el cual se acomodan los electrones externos o de valencia de los átomos para formar enlaces con otros átomos.

El carbono tiene una distribución electrónica fundamental  $1s^2 2s^2 2p^2$ , de modo que se diría que solo puede enlazarse con otros dos elementos, es decir, tendría una valencia de 2. Sin embargo, sabemos que al contrario, el carbono tiene normalmente una valencia de 4. Lo que

sucede es que para formar enlaces promueve electrones a un orbital superior formando orbitales atómicos híbridos:  $sp^1$ ,  $sp^2$  y  $sp^3$ . El término  $sp$  se refiere a la combinación de electrones de los orbitales  $s$  y  $p$ , mientras que el número indica el número de enlaces equivalentes que forma.

En la hibridación  $sp^1$  forma un solo enlace con otro átomo. La hibridación  $sp^1$  es más común entre  $CH$ ,  $CN$  y otros elementos, pero no entre átomos de carbono, aunque en el espacio se han detectado señales que indican la presencia de carbenos, que son sólidos compuestos de átomos

de carbono enlazados en forma  $sp^1$  e incluso hay reportes de su obtención en laboratorios. Las otras dos hibridaciones son más conocidas, tanto en los hidrocarburos como en sólidos de carbono.

**El carbono elemental se conoce en dos formas alotrópicas: diamante y grafito**

El carbono elemental se conoce en dos formas alotrópicas: el diamante y el grafito. En el grafito, los átomos tienen una hibridación  $sp^2$  formando tres enlaces entre sí a  $120^\circ$  en una estructura plana, siendo ésta la estructura de equilibrio a

31

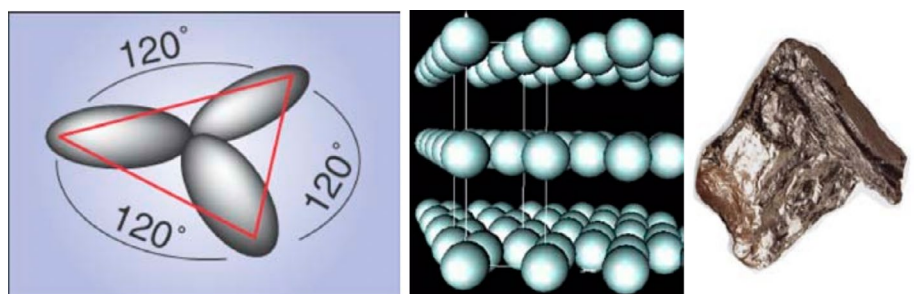


Figura 1. Enlace  $sp^2$  y estructura de los átomos de carbono en el grafito.

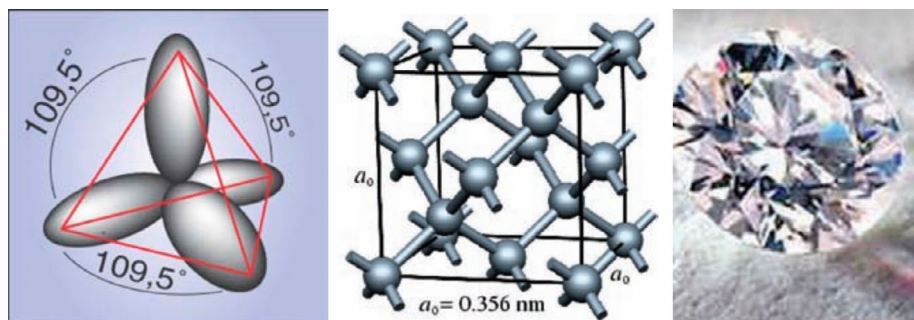


Figura 2. Enlace  $sp^3$  y estructura de los átomos de carbono en el diamante.

presión y temperatura ambiente (figura 1). En el diamante, los átomos forman enlaces con hibridación  $sp^3$  con cuatro vecinos a  $109.5^\circ$ , lo que da lugar a una estructura tridimensional tetraédral (figura 2).

Además de los ejemplos mencionados anteriormente, en los últimos años se han encontrado estructuras minúsculas que muestran un ordenamiento diferente de los átomos; éstas son los famosos fullerenos y nanotubos de carbono; ambos exhiben hibridación  $sp^2$  con algunas variaciones. Los fullerenos contienen anillos de 5 y 6 átomos, lo que permite que la estructura se

cierre como los domos geodésicos (figura 3a). Por otro lado, los nanotubos tienen la misma estructura que un plano del grafito (grafeno), el cual se cierra sobre sí mismo dando lugar a un tubo de 1 nanómetro de diámetro (figura 3b). Además hay otras formas conocidas del carbono, que son menos cristalinas, aunque a escalas micrométricas se asemejan a un grafito desordenado. Estas son el carbón vegetal, el coque, el negro de humo, hulla, brea y las fibras de carbono (figura 4). La lista no termina aquí: las estructuras descritas anteriormente son todas estructuras ordenadas,

en las que las posiciones de los átomos están perfectamente determinadas. En el laboratorio además se ha logrado producir películas delgadas de carbono en una fase totalmente desordenada, que serán el objeto de estudio en el resto de este artículo.

## Procesos de formación

Empecemos por una breve definición de películas o capas delgadas y el porqué producimos el carbono amorfo sólo en forma de películas. Una película delgada es un recubrimiento formado por la agregación de átomos o moléculas

32

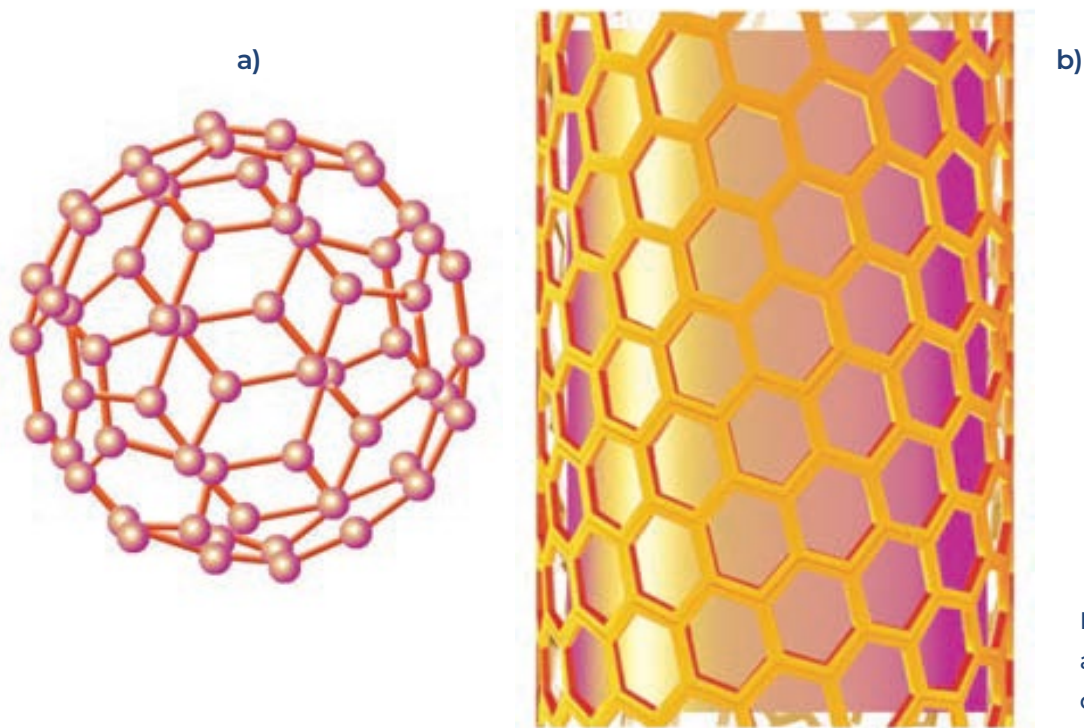


Figura 3.  
a) fullereno; b) nanotubo de carbono.

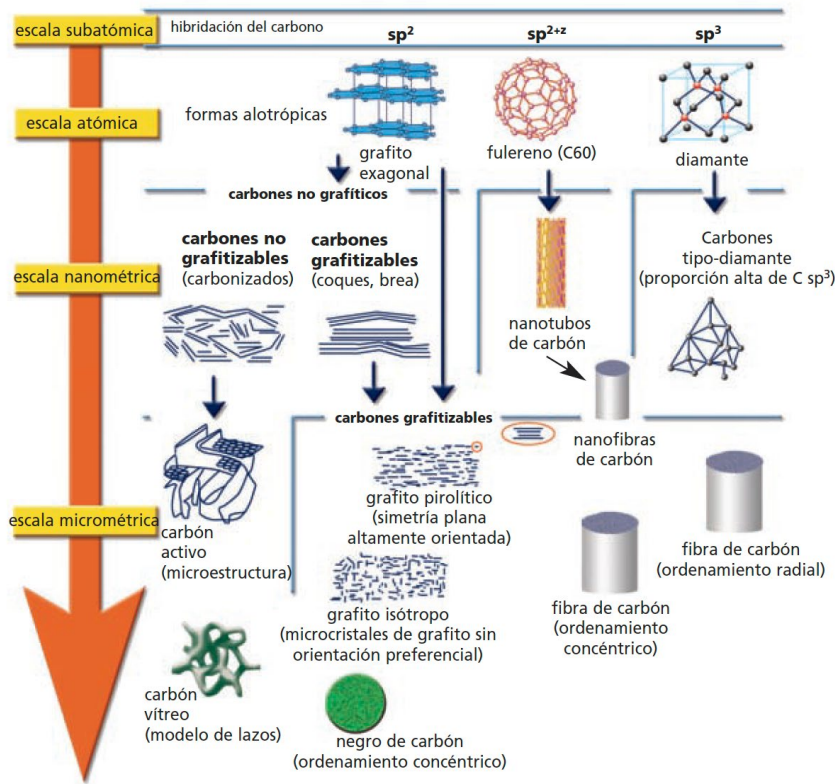


Figura 4. Diferentes tipos de carbonos organizados según su estructura atómica y tamaño de la microestructura.

(radicales); dichos átomos o moléculas se obtienen por medio de la descomposición de un gas en una descarga eléctrica o la evaporación de un sólido. Una vez separados los átomos, estos son guiados hacia un sustrato donde se condensan, formando un recubrimiento cuyo espesor puede variar desde unos cuantos nanómetros hasta varias micras y cuya microestructura depende de las condiciones de formación.

La manera más fácil de formar un material desordenado es enfriando un líquido lo suficientemente

rápido para evitar que ocurra la cristalización; así es como se forman los vidrios, que son materiales amorfos. Este procedimiento no es adecuado para la formación de carbono amorfo, porque la temperatura de fusión del carbono sólido en cualquiera de sus fases cristalinas es muy alta ( $\sim 3500^\circ C$ ), lo cual es consecuencia de los fuertes enlaces covalentes. Sin embargo, por medio de la descomposición de un gas hidrocarburo, tal como acetileno ( $C_2H_2$ ) o metano ( $CH_4$ ), o la evaporación física de un blanco

de grafito (por bombardeo con átomos más pesados o electrones energéticos) es posible tener una fuente de átomos de carbono, que al condensarse rápidamente sobre un sustrato dan lugar a una película de carbono y dadas las condiciones metaestables de este proceso, puede formarse la fase amorfa.

Existe una gran variedad de técnicas de depósito que permiten producir carbono amorfo; la mayoría utiliza la asistencia de un plasma (gas ionizado cuyos componentes actúan de manera colectiva) para hacer efectivo el proceso de evaporación y condensación de los radicales. En un plasma se tienen no sólo radicales neutros, sino que se cuenta también con especies ionizadas, las cuales son susceptibles de acelerarse bajo la acción de un campo eléctrico, lo que permite crecer las películas bajo la acción del bombardeo iónico, dándole a las especies que conforman la película energía extra. Dicha energía extra se utiliza para inducir la formación de enlaces tipo diamante, que no se formarían en condiciones de baja energía. El uso efectivo de estos plasmas impone condiciones de trabajo de alto vacío para asegurar que los iones formados en el

plasma lleguen al sustrato. Entre las técnicas más utilizadas para la formación de películas de carbono amorfo se encuentran: haz de iones, evaporación física o pulverización catódica (*sputtering*), arco catódico, ablación láser y descargas gaseosas capacitivas o inductivas.

## Clasificación del carbono Amorfo

Como se mencionó anteriormente, para formar el carbono amorfo puede utilizarse como fuente de átomos de carbono a los hidrocarburos o al grafito y una gran variedad de técnicas, por lo que hay diferencias importantes entre las películas producidas.

Al utilizar una fuente de carbono en forma gaseosa, también se incorpora un cierto porcentaje de hidrógeno en el material, por lo que es llamado carbono amorfo hidrogenado (a-C:H), mientras que partiendo del grafito se puede obtener una fase pura de carbono amorfo.

En ambos casos, el material no tiene orden de largo alcance, no tiene una estructura definida, los átomos de carbono se encuentran enlazados a otros átomos de carbono (o de hidrógeno) en forma aleatoria, tanto en

lo que respecta al acomodo atómico como al tipo de enlace que se forma entre los átomos<sup>1</sup>. Existen átomos de carbono formando enlaces tipo  $sp^2$  y  $sp^3$ , y en el caso de las películas hidrogenadas se han detectado también enlaces  $sp^1$  entre C e H. La figura 5, que es resultado de simulaciones de dinámica molecular<sup>2</sup>, muestra de manera esquemática la estructura de las películas de carbono amorfo con diferentes fracciones de  $sp^2/sp^3$ . Los átomos en rojo representan enlaces  $sp^3$ , los azules son carbonos con enlaces tipo  $sp^2$  y los grises tienen hibridación  $sp^1$ .

### *Partiendo del grafito, se puede obtener una fase pura de carbono amorfo*

Debido a que en el carbono amorfo coexisten enlaces  $sp^2$  y  $sp^3$ , se pueden lograr películas con propiedades físicas intermedias entre diamante y grafito, dependiendo de la cantidad relativa que haya de uno u otro tipo de enlace. Es esta característica la que ofrece una amplia gama de aplicaciones posibles para dichas películas. Sin embargo, las aplicaciones no serían posibles sin tener un mecanismo de control sobre el tipo

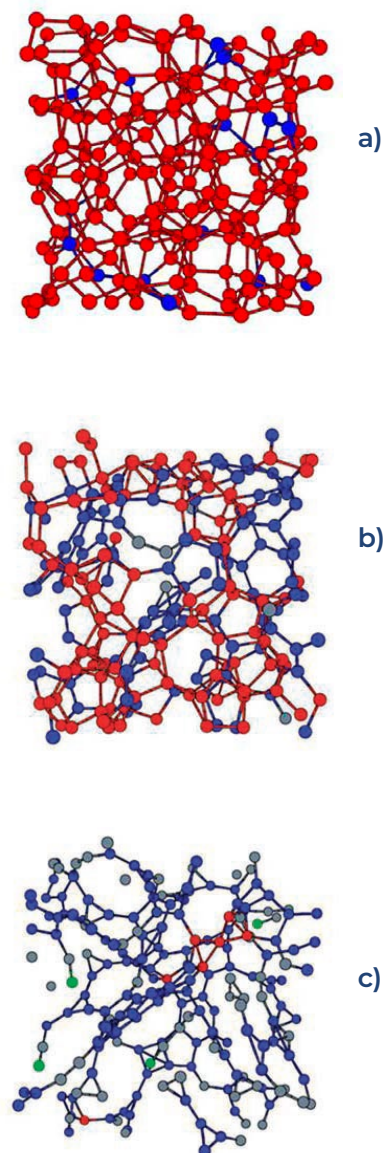


Figura 5. Estructura de carbono amorfo determinada por simulación. Los átomos en rojo tienen coordinación cuatro ( $sp^3$ ), los átomos en azul tienen coordinación 3 ( $sp^2$ ) y los átomos en gris tienen coordinación 2 ( $sp^1$ ). (a) alto contenido de enlaces  $sp^3$ , (b) contenido medio de  $sp^3$ , (c) bajo contenido de enlaces  $sp^3$ . Note cómo varía la densidad del material en función del porcentaje de enlaces  $sp^3$ , átomos en verde son hidrógenos.

de enlaces predominantes al formar las películas. El estudio de los procesos de formación de películas de carbono amorfo ha permitido que en la actualidad se pueda lograr casi cualquier combinación posible de fracciones  $sp^2/sp^3$  y también puede variarse el contenido de hidrógeno, dando lugar a una mayor diversidad <sup>34</sup>.

Las películas producidas se clasifican en dos grandes grupos: carbono amorfo hidrogenado, a-C:H y carbono amorfo no-hidrogenado. Dentro del grupo de a-C:H se reclasifican de acuerdo a su contenido de hidrógeno y al tipo de enlaces predominantes, que en este caso pueden ser  $CC\ sp^3$ ,  $CH\ sp^3$ ,  $CC\ sp^2$ ,  $CH\ sp^2$  y  $CH\ sp^1$ . Sin embargo, basta con estimar el contenido de hidrógeno y el porcentaje total de enlaces  $sp^3$  para clasificar a las películas en los siguientes grupos: Gráficas (GLC, Graphite-Like Carbon), Poliméricas (PLC, PolymerLike Carbon) y Cuasidiamante (DLC, Diamond-Like Carbon). Como veremos más adelante, los nombres se refieren más a un grupo de propiedades físicas comunes a cada grupo, que al tipo de enlaces y composición, pero son estos últimos factores los que podemos controlar experimentalmente.

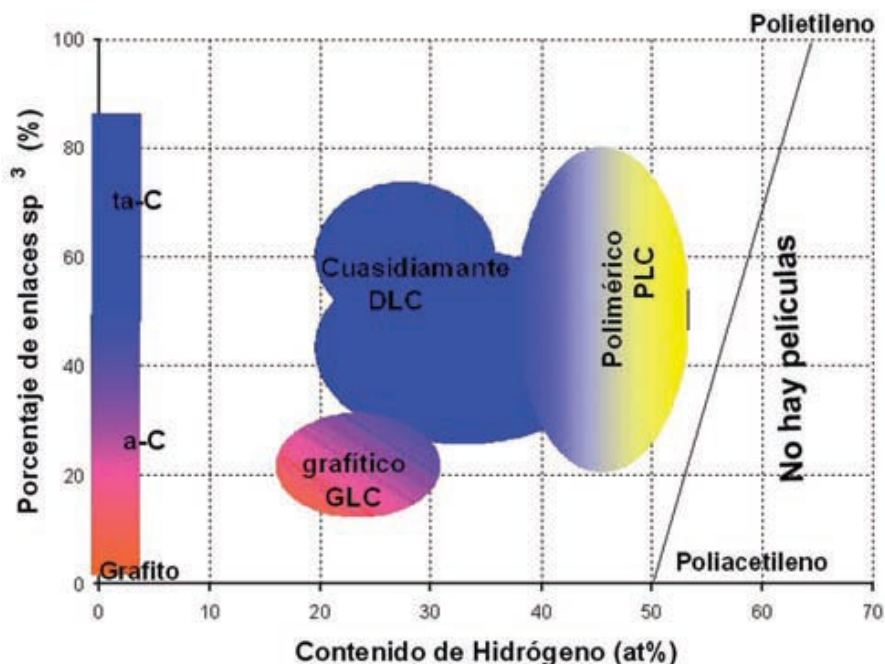


Figura 6. Gráfica que representa los diferentes tipos de películas de carbono amorfo en términos del porcentaje total de enlaces  $sp^3$  ( $CC\ sp^3 + CH\ sp^3$ ) y el contenido total de hidrógeno.

Entre las películas no hidrogenadas, solo tenemos dos categorías: Gráfica, a-C y Cuasidiamante, también llamado ta-C, para distinguirlo del cuasidiamante hidrogenado. Los límites entre cada grupo no están perfectamente definidos, como puede observarse en las figuras 6 y 7.

La figura 6 muestra el porcentaje total de enlaces  $sp^3$  en función del contenido de hidrógeno y vemos cómo quedan clasificados los grupos en comparación con los alótropos del carbono elemental y los polímeros. En la figura 7, por otro lado, se muestra la variación de la densidad del material en

función del porcentaje total de enlaces  $sp^3$ . Una lista de algunas de las propiedades físicas medidas para cada tipo de material se encuentra en la tabla 1. Vale la pena destacar dos propiedades intrínsecas de estos recubrimientos: el coeficiente de fricción es extremadamente bajo, menor a 0.15 y en condiciones óptimas de humedad o de contenido de hidrógeno puede alcanzar valores del orden de  $10^{-2}$ .

**La rugosidad inherente al crecimiento del material amorfo es muy baja**

La rugosidad inherente al crecimiento del material

amorfo es muy baja, por lo que utilizando substratos de silicio de alta calidad y la técnica adecuada pueden producirse películas con rugosidades del orden de 0.1 nm.

El grupo más conocido es el Cuasidiamante; debido a que es un recubrimiento ultraduro, puede alcanzar una dureza alrededor de los 80 GPa, valor muy superior a los otros materiales catalogados como ultraduros; el nitruro de boro (60 GPa) y el nitruro de silicio (40 GPa) —los cuales son también materiales que sólo se producen en el laboratorio—<sup>5</sup>, pero aún por debajo del diamante (100 GPa).

La alta dureza es sólo una de las propiedades que son explotadas en las aplicaciones del carbono amorfo, ya que su mayor ventaja es la posibilidad de variar o ajustar las propiedades físicas dentro de intervalos bastante amplios, que difícilmente se puede lograr en materiales en bulto.

## Propiedades y nanoestructura

La diversidad en las propiedades del carbono amorfo no es solamente consecuencia de la fracción de enlaces  $sp^2/sp^3$  y de la concentración de hidróge-

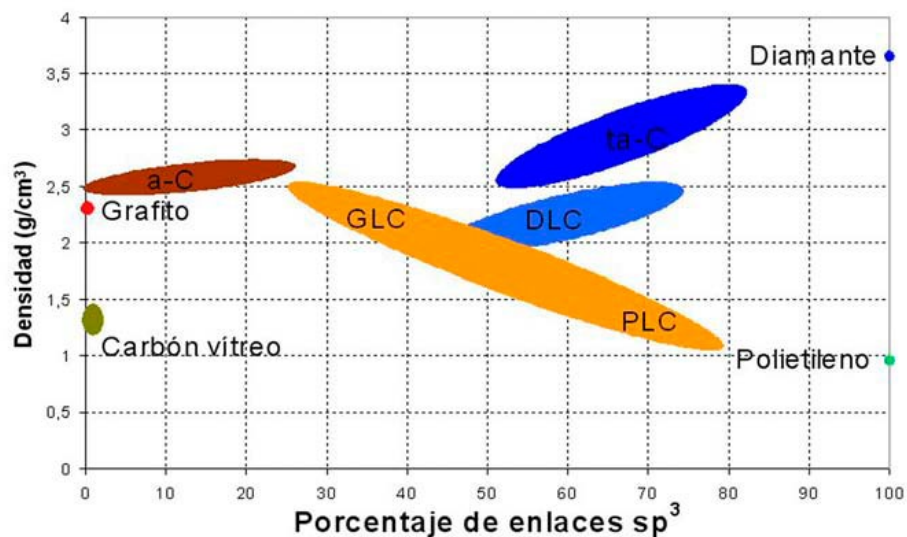


Figura 7. Densidad volumétrica de las películas en función del porcentaje de enlaces  $sp^3$ . Las películas hidrogenadas presentan menor densidad, de aquí la importancia de distinguir entre cuasidiamante (DLC) y ta-C.

no, sino también de lo que se conoce como el ordenamiento de los sitios  $sp^2$ .

Estudiando con detalle la estructura de las películas de carbono amorfo se ha encontrado que los átomos de carbono enlazados en sitios  $sp^2$  tienden a aglomerarse, es decir, a formar sistemas conjugados, principalmente anillos aromáticos, debido a que hay una disminución en la energía total del sistema al formarse los sistemas conjugados<sup>6</sup>. De modo que, a escala nanométrica, el carbono amorfo presenta cierta estructura, la cual puede visualizarse como cúmulos de sitios  $sp^2$  embebidos en una matriz de átomos enlazados en hibridación  $sp^3$ . Los cúmulos de  $sp^2$  varían

de tamaño, desde una cadena de dos átomos hasta anillos aromáticos de 6, 8 o más átomos o cúmulos de varios anillos unidos entre sí. El papel que juega el hidrógeno es el de limitar el tamaño de los cúmulos, ya que satura los enlaces alrededor, limitando así su crecimiento.

Las propiedades mecánicas dependen principalmente de la fracción de enlaces CC  $sp^3$ ; mientras mayor sea, mayor será la dureza. Por otro lado, las propiedades ópticas y electrónicas están controladas por la distribución y el tamaño de los cúmulos de  $sp^2$ . Una película ultradura, como ta-C, tiene una fracción alta de enlaces  $sp^3$  (80 por ciento) y el 20 por ciento

restante forman enlaces  $sp^2$  que se encuentran distribuidos formando cadenas de dos átomos, pero muy pocos o ningún cúmulo; esto le permite tener una brecha óptica amplia, típica de un semiconductor. Una película de PLC, por otro lado, tiene también un alto contenido de enlaces  $sp^3$ , pero la mayoría de estos son del tipo CH  $sp^3$ ; los sitios  $sp^2$  se encuentran formando pequeñas cadenas o son enlaces CH  $sp^2$ , por lo que el material presenta una brecha óptica muy amplia característica de un dieléctrico, pero a su vez el material presenta una baja dureza y densidad.

La forma en que obtenemos información sobre la distribución de los sitios  $sp^2$  es utilizando la espectroscopia Raman<sup>7</sup>. El efecto Raman es la dispersión de la luz debida al cambio en la polarizabilidad del material como con secuencia de las vibraciones de la red. Cuando es excitado con luz visible (~500 nm),

el diamante tiene un modo activo en  $1332\text{ cm}^{-1}$  y un monocristal de grafito en  $1580\text{ cm}^{-1}$  (modo G), mientras que el grafito policristalino presenta otro modo a  $1350\text{ cm}^{-1}$  (modo D). El espectro visible de Raman de las películas de carbono amorfo presenta sólo los modos G y D, ambos de las vibraciones de átomos formando enlaces  $sp^2$  y nada de la señal de los enlaces  $sp^3$ , independientemente de su contenido porcentual.

La razón por la que el espectro Raman visible está dominado por los sitios  $sp^2$ , es que los electrones que forman enlaces  $\pi$  de los sitios  $sp^2$  son más polarizables, lo que hace que la señal de los sitios  $sp^2$  sea de 50 a 230 veces más intensa que aquella de los sitios  $sp^3$  (que no contienen electrones  $\pi$ ). En la actualidad, se ha identificado que en el carbono amorfo, el modo G se debe a enlaces dobles C=C, ya sea que estos se encuentren formando parte de un anillo o de una cadena, mientras

que el modo D se debe únicamente a los anillos aromáticos (pico D), ya que es una dispersión originada por un modo específico de vibración de los anillos, conocido como modo "breathing" (respiración).

### *Es necesario correlacionar los espectros de Raman con otras propiedades como la conductividad y la brecha óptica*

Las películas de ta-C y PLC, que prácticamente no tienen anillos aromáticos, presentan espectros Raman muy similares, donde sólo se observa un pico G debido a la presencia de enlaces CC  $sp^2$ . Mientras que las películas del tipo gráficas (GLC y a-C) presentan ambos picos D y G, indicando que la acumulación de los sitios  $sp^2$  se da en mayor escala. Estas dos últimas tendrán una brecha óptica y dureza reducidas.

El espectro de una película de cuasidiamante hidrogenada (DLC) se encuentra

Tabla 1 Propiedades físicas de los distintos tipos de películas de carbono amorfo.

	Grafito	Diamante	GLC	PLC	DLC	a-C	ta-C
Coordinación	3	4	~3	2.5	2.8	2.9 - 3.3	3.4 - 3.9
Brecha Óptica (eV)	-0.04	5.45	1.1-1.7	1.7-4	2-2.5	0.4 - 1	1.5 - 3
Dureza (GPa)	-	100	10-20	<10	50	5 - 20	60-80
Módulo Young (Gpa)	686	1144	170	150	300	< 170	760
Conductividad ( $\text{Scm}^{-1}$ )	$1-10^4$	$10^{-16}$	$>10^{-8}$	$10^{-12}$	$< 10^{-8}$	$10^{-1}$	$10^{-8}-10^{-10}$



entre estos dos extremos de PLC a GLC, con intensidades relativas D a G variando de acuerdo a la fracción de hidrógeno, el porcentaje de enlaces  $sp^3$  y el grado de acumulación de los sitios  $sp^2$ . En consecuencia, no puede utilizarse Raman en el espectro visible como una herramienta única para identificar el tipo de película producida en el laboratorio.

Es necesario correlacionar los espectros de Raman con otras propiedades, como la conductividad, la brecha óptica y el contenido de hidrógeno para lograr identificar el tipo de material producido, aun sin medir la fracción de enlaces  $sp^2/sp^3$  de manera directa, lo cual es bastante difícil.

El tipo de enlace se determina por técnicas más sofisticadas, como pérdida de energía de los electrones (EELS, Electron Energy Loss Spectroscopy), resonancia magnética nuclear (Nuclear Magnetic Resonance, NMR) y absorción de rayos-X (XAS, X-ray Absorption).

La primera, EELS, involucra la preparación de las muestras para el microscopio de transmisión electrónico y un análisis del espectro de pérdida de energía de los electrones que atraviesan la muestra y que son recolectados con un medidor es-

pecial que debe acoplarse al microscopio<sup>8</sup>. La segunda técnica, NMR, requiere muestras de unos cuantos décimos de miligramos, lo cual es bastante difícil de lograr con películas de espesores menores a 1 micrómetro, que es lo normal en películas de carbono amorfo. La tercera técnica, XAS, está basada en la absorción de rayos-X por la muestra y si bien no se necesita una preparación especial de las muestras, los rayos-X deben ser producidos en un acelerador tipo ciclotrón, lo que limita la accesibilidad a dicha técnica.

Aun con estas dificultades, en el transcurso de los últimos 35 años, durante los cuales se han estudiado las películas de carbono amorfo, se ha logrado obtener suficiente información sobre sus propiedades, su correlación con los parámetros estructurales y el efecto de las condiciones de depósito en éstas.

## Modelos físicos de crecimiento

Una condición que deben cumplir los sistemas de depósito para efectivamente producir películas de cuasidiamante, con porcentajes de enlaces  $sp^3$  mayores al 50 por ciento, es que el

crecimiento se lleve a cabo con bombardeo iónico moderado. Es decir, gran parte del plasma debe estar ionizado y la energía de dichos iones debe caer dentro de un intervalo óptimo. El intervalo óptimo depende del sistema mismo de depósito, pero en términos generales se encuentra de 10–20 a 200–500 eV. Aún no se ha establecido claramente la razón por la que dichos límites varían de sistema en sistema. Sin embargo, debe ser consecuencia de las diferencias que existen en la densidad de iones y en la distribución de energía de los iones incidentes, ya que la energía total depositada a la película es una combinación de ambos parámetros.

### *Los iones incidentes sobre un sólido pueden ser retrodispersados*

El límite inferior de energía se refiere al valor mínimo necesario para producir una implantación superficial de los iones incidentes, a lo que se denomina subimplantación. Es en esta capa de átomos subimplantados donde se forman los enlaces tipo  $sp^3$ , mientras que aquellos átomos en la capa más superficial mantienen la hibridación de equilibrio,  $sp^2$ . El espesor de dicha capa depende de la energía

incidente a través de la longitud de penetración de los iones incidentes. La capa se hace más gruesa a mayor energía incidente, y de hecho a energías muy altas todo el material se convierte a la hibridación  $sp^2$ , debido al daño producido por los mismos iones en su paso a través del material<sup>9</sup>. Experimentalmente se ha demostrado la existencia de la capa superficial de átomos formando enlaces  $sp^2$  y a su vez se han desarrollado varios modelos analíticos para describir la formación de enlaces  $sp^3$  en la zona de subimplantación. Dichos modelos están basados en los procesos inducidos por el bombardeo iónico.

Los iones incidentes sobre un sólido pueden ser retrodispersados o incorporados al sólido. Aquellos que penetran al sólido desplazan átomos de su posición o los arrancan (sputtering). El ion incidente transfiere su energía a los átomos de la superficie por medio de colisiones inelásticas y cada átomo desplazado puede a su vez producir más colisiones dentro del material, produciéndose una cascada de colisiones. Una vez que los iones incidentes y átomos desplazados ya no son capaces de desplazar más átomos, el resto de su energía

es disipada, predominantemente por vibraciones térmicas de la red (fonones). El efecto de estas vibraciones es importante, ya que puede: a) crear un pequeño volumen de disipación con temperaturas más altas que el resto del sólido, el cual es subsecuentemente enfriado a temperatura ambiente muy rápidamente (quenching, templado) o b) inducir procesos de relajación, como aniquilación de defectos o transformación de enlaces  $sp^3$  a  $sp^2$ . Basados en estos fenómenos se han propuesto varios modelos para explicar la formación de enlaces  $sp^3$  durante el crecimiento de las películas de carbono amorfo. A continuación mencionaremos los más importantes:

### Modelo de templado

Este modelo propone<sup>10</sup> que en el volumen de disipación producido por los iones y átomos al frenar, se alcanzan condiciones de alta presión y temperatura similares a aquellas de la transformación de grafito a diamante. Una vez formados los enlaces  $sp^3$  estos quedan "congelados" debido al enfriamiento rápido. Sin embargo, este modelo predice una transformación de fase

a valores definidos, que no es exactamente lo que se observa experimentalmente.

### Modelo de desplazamiento preferencial

El modelo propone que durante la cascada de colisiones inducidas por los iones incidentes, los átomos con enlaces  $sp^2$  sufren un desplazamiento preferencial<sup>11</sup>, es decir, son destruidos, en comparación con aquellos en  $sp^3$ , debido a que los sitios  $sp^2$  tienen energías de desplazamiento menores. Este modelo depende de que exista una gran diferencia entre las energías de desplazamiento para átomos con enlaces  $sp^2$  y  $sp^3$ , la cual se ha demostrado que no es tan grande.

### Densificación

Considera que la implantación superficial de las especies hipertérmicas ( $> 10$  eV) es la responsable de la formación de enlaces  $sp^3$ , debido a que se forman regiones de alta densidad en las que el enlace  $sp^3$  es energéticamente más favorable, de modo que localmente se da la transformación de  $sp^2$  a  $sp^3$ . Este modelo explica de manera satisfactoria los procesos de relajación que

pueden revertir la formación de enlaces  $sp^3$ , como alta temperatura del sustrato y alta energía de los iones<sup>12</sup>. Modelo de alto esfuerzo residual Al igual que el anterior, supone que es en la zona de subimplantación donde se generan los enlaces  $sp^3$ . Sin embargo, considera que la formación de enlaces  $sp^3$  se debe a los altos esfuerzos residuales que se establecen por la deformación de la red generada por los iones implantados<sup>13</sup>. Cuando el esfuerzo residual alcanza valores que permitan el cambio de fase  $sp^2$  a  $sp^3$  se obtendrán películas de cuasidiamante. Aunque en efecto, la mayor parte de las películas de cuasidiamante tienen altos esfuerzos residuales, no se ha observado que exista un valor crítico por encima del cual se promueve la formación de enlaces  $sp^3$  de manera preferencial. De hecho, estudios más recientes han demostrado experimentalmente que no existe una relación directa entre el esfuerzo residual en las películas y la fracción de enlaces  $sp^3$ .<sup>14</sup>

Aunque aún se sigue buscando un modelo que explique completamente el proceso de formación de películas de cuasidiamante de manera general, independientemente del

sistema utilizado, experimentalmente se ha logrado un control bastante adecuado del proceso de producción, lo que ha permitido el desarrollo de aplicaciones tecnológicas importantes.

## Resumen

Las películas de carbono amorfo consideradas como una fase metaestable del carbono se depositan a través de la descomposición de un gas de hidrocarburos o por la evaporación de grafito con métodos asistidos por plasmas.

El más conocido de esta familia de materiales es el cuasidiamante, ya que es el que exhibe propiedades mecánicas que lo caracterizan como un recubrimiento ultraduro. Sin embargo, la dureza es sólo una de las propiedades atractivas de las películas de carbono, ya que su mayor ventaja es la posibilidad de variar o ajustar las propiedades físicas dentro de intervalos bastante amplios durante el proceso de depósito. Por ejemplo, el índice de refracción puede variar entre 1.5 y 2.5, la brecha óptica entre 0 y 3 eV, el coeficiente de fricción entre  $1 \times 10^{-3}$  y 0.5, por mencionar sólo algunas. Gracias a esta diversidad, las películas tienen una

gran variedad de aplicaciones como recubrimientos protectores en áreas como discos de almacenamiento de información magnética, partes automotrices, recubrimientos biomédicos y como recubrimientos anti-reflejantes o en dispositivos microelectromecánicos.

## Bibliografía

- 1 *Properties and Growth of Amorphous Carbon*, ed. S. R. P. Silva. EMIS Data Review Series No. 29.
- 2 Página del Dr. C. Kelires. [www.kypro.physics.voc.gr](http://www.kypro.physics.voc.gr).
- 3 J. Robertson, "Diamond-like amorphous carbon", *Mat. Sci. Eng. R.*, 37 (2002) 129–281.
- 4 A. Grill, "From Tribological Coatings to low-k dielectrics for ULSI interconnects", *Thin Solid Films*, 398-399 (2001) 527–532.
- 5 J. Musil, "Hard and superhard nanocomposite coatings" *Surf. Coat. Technol.*, 125 (2000) 322-330.
- 6 J. Robertson, E.P. O'Reilly, "Electronic and atomic structure of amorphous carbon", *Phys. Rev. B*, 35 (1987) 2946–2957.
- 7 A.C. Ferrari, "Determination of bonding in diamond-like carbon by Raman spectroscopy", *Diamond and Relat. Mater.*, 11 (2002) 1053-1061.
- 8 A.C. Ferrari, A. Libassi, B.K. Taner, V. Stolojan, L.M. Brown, S.E. Rodil, B. Kleinsorge, J. Robertson, "Density,  $sp^3$  fraction and crosssectional structure of amorphous carbon films determined by x-ray reflectivity and electron energyloss spectroscopy", *Physics Review B*, 62 (2000) 11089–11103.
- 9 Y. Lifshitz, "Diamond like carbon-present status", *Diamond and Relat. Mater.*, 8 (1999) 1659–1676.
- 10 C. Weissmantel, K. Bewilogua, D. Dietrich, H.J. Erler, H.J. Hinneberg, S. Klose, W. Nowick, G. Reisse, "Structure and properties of quasi-amorphous films prepared by ion beam techniques", *Thin Solid Films*, 72 (1980) 19–32.

11 Y. Lifshitz, S.R. Kasi, J.W. Rabalais, W. Eckstein, "Subplantation model for film growth from hyperthermal species", *Phys. Rev. B.*, 41 (1990) 10468-10480.

12 J. Robertson, "Deposition of Diamond-like carbon", *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A*, 342 (1990) 277-286.

13 D.R. McKenzie, W.D. McFall, W.G. Sainty, C.A. Davis, R.E. Collins, "Compressive stress induced formation of cubic boron nitride", *Diamond and Relat. Mater.*, 2 (1993) 970.

14 A.C. Ferrari, S.E. Rodil, J. Robertson, W. Milne, "Is stress necessary to stabilize  $sp^3$  bonding in diamond-like

carbon?", *Diamond and Related Materials*, 11 (2002) 994-999.

[\\*ser42@iim.unam.mx](mailto:ser42@iim.unam.mx)



Naturaleza muerta. Juan Soriano, 1941. Óleo sobre tela (51 x 61 cm). N° 7 MA