

Recibido: 30.08.2022 • Aceptado: 04.10.2023

Palabras clave: Cristales, moléculas, crecimiento, nanotecnología, cuántica.

Crecimiento cristalino: un proceso fascinante

VÍCTOR HUGO MÉNDEZ GARCÍA

victor.mendez@uaslp.mx

LETICIA ITHSMEL ESPINOSA

leticia.espinosa@uaslp.mx

IRVING EDUARDO CORTÉS

irving.cortes@uaslp.mx

COORDINACIÓN PARA LA INNOVACIÓN Y APLICACIÓN DE LA CIENCIA Y LA TECNOLOGÍA/FACULTAD DE CIENCIAS, UASLP

El ser humano ha estado fascinado desde siempre por los cristales, que atraen por su singular brillo, intrincadas formas, presentaciones y colores. Frecuentemente materiales como los zafiros, rubíes, gemas y diamantes, entre otros, han sido utilizados con propósitos ornamentales y artísticos, para realzar la belleza de joyas y coronas. Probablemente derivada de esta fascinación, se les han conferido poderes metafísicos o paranormales; por ejemplo, suele decirse que los cristales poseen vida, que ciertos espíritus viven en sus facetas, que pueden transferir pensamientos curativos o que son capaces de activar los centros energéticos del cuerpo humano (chakras).

Algunos cristales y minerales han tenido utilidad menos atractiva pero bastante práctica; por ejemplo, se han creado herramientas con hematita y la malaquita, utilizadas para pigmentar en colores rojo/ocre y verde, respectivamente. Como materiales de construcción se ha utilizado el yeso, la mica mineral y al granito. En nuestro organismo están presentes cristales diminutos, por ejemplo, en los dientes se encuentran cristales de hidroxapatita, los cuales son fundamentales para la reparación de los huesos rotos y se integran con una matriz orgánica de proteína para darle resistencia a la compresión y rigidez. Para darle sabor a nuestras vidas, los cristales se encuentran en la sal, el azúcar y el chocolate.

Pero no menos fascinante, trascendente e importante ha sido la utilización de los cristales para la creación de nuevos dispositivos, los cuales han llevado al desarrollo de tecnologías de vanguardia. El impacto social de sus aplicaciones es enorme, aunque pudieran pasar desapercibidos, se encuentran en un sinnúmero de aparatos de uso diario. Imaginemos un mundo sin teléfonos inteligentes, sin televisión, internet o sin tabletas electrónicas. Pensemos además cuáles áreas se verían perjudicadas si de la noche a la mañana no tuviéramos sistemas de cómputo. Esta ausencia impactaría a las salas de hospital en donde se monitorea el estado de salud de mucha gente, al sistema educativo que por conocidas razones se ha llevado en línea, y hasta un viaje fuera del planeta, en cuya nave existen una gran cantidad de sensores y sistemas de navegación que a una sola persona le sería imposible

procesar la cantidad de información que esto involucra. Nos hemos vuelto dependientes de estas tecnologías.

Los cristales, particularmente los semiconductores, han sido elementos fundamentales para la construcción de nuestra visión actual del mundo. Su aplicación se basa en sus propiedades y pureza, esta última depende mucho del proceso de elaboración o síntesis, frecuentemente denominado crecimiento debido a la gran semejanza que presenta con el crecimiento de una planta u otros seres vivos; por ejemplo, una planta crece de tamaño cuando los nutrientes del subsuelo y su entorno son los adecuados. Asimismo, resulta impresionante cómo con los elementos, moléculas o átomos adecuados y un entorno propicio, los cristales crecen, aumentan su tamaño y adquieren no pocas veces las formas tan visualmente asombrosas como potencialmente útiles.

Crecimiento con estilo

Hacer crecer cristales es simple. Pueden obtenerse “bosques de cristales” en casa al triturar una aspirina, los pequeños elementos que contiene actúan como semilla, enseguida los fragmentos se disuelven en agua y se deja reposar en un frasco. El resultado después de un par de meses es asombroso. Asimismo, un bosque muy atractivo se crece llevando sólo agua a una temperatura muy cercana a su punto de congelación. Si la botella que la contiene se saca de la heladera y se trata de verter, el agua se rompe súbitamente y se convierte en un increíble arreglo de cristales, como un bosque de nieve.

Los cristales se utilizan para la creación de nuevos dispositivos, los cuales han llevado al desarrollo de tecnologías de vanguardia

El crecimiento de cristales para uso científico o industrial, como en circuitos integrados o transistores, necesita combinar átomos diferentes con mucha más precisión. Los bosques anteriores si bien son muy vistosos, no dejan de ser un proceso de evolución al azar, es decir, no tenemos control sobre la dirección en que crecerán. Uno de los métodos más precisos para hacer cristales es una técnica llamada epitaxia por haces moleculares (MBE). El nombre aparentemente es complejo, pero es fácil de entender. ¡Miremos más de cerca!

Haz molecular

Un cristal está hecho de átomos o moléculas; por ejemplo, en el cristal de agua las moléculas de H_2O se enlazan para formar estructuras de hexágonos, los cuales se replican en todas las direcciones, guardando celosamente la distancia entre ellos. Esto define a un cristal: arreglo periódico de átomos o moléculas. Como los tapices antiguos que adornaban las habitaciones de los abuelos, esos arreglos periódicos de patrones o motivos.

A escala mucho más pequeña para conformar al cristal, las moléculas son proporcionadas (refiriéndonos a los ejemplos anteriores) en la misma solución del vaso con la aspirina diluida o son parte misma del agua en estado líquido o desordenado, pero también podemos hacer crecer los cristales “aventándoles” moléculas o átomos. Es decir, creamos un haz de moléculas, tal y como si fuera un “spray”, sí, como ese bote de spray cosmético para fijar el pelo o como el de color para grafitear paredes. El reto sería entonces realizar un spray atómico o molecular. Por cierto, de aquí proviene el concepto de “haces moleculares”, es decir, ese spray sería como un haz o rayo de moléculas. Suena retador realizar un haz de precisión atómica.

En busca de sugerencias, observemos con detenimiento a la naturaleza e indagemos en lo cotidiano. Ponemos agua a calentar, la temperatura como forma de energía rompe la tensión superficial, observamos la sutil transformación de líquido a vapor, vapor de agua en movimiento azaroso, caótico, un baile libre de moléculas que en promedio se elevan hasta cierta altura finita. ¿Por qué no suben más? Hay obstáculos. En las trayectorias de las moléculas de H_2O , la propia atmosfera es la que las obstaculiza o, mejor dicho, por uno de sus constituyentes: el aire. ¿Qué pasaría si me las ingenio para retirar el aire? Podrían viajar libremente y generar un haz molecular.

Pareciera lógico: si se desea que algo transite libremente, en línea recta, entonces deberá desplazarse a los elementos probables de colisión que tenga enfrente. Entonces, si requiero formar un haz molecular, debería retirar al aire. A este proceso se le conoce como evacuar o hacer vacío. Suena exótico, pero la ciencia y tecnología ha avanzado a la par de nuestra capacidad de hacer vacío. Evacuar es equivalente a despresurizar, cosa que hacemos con mucha frecuencia. Al sorber o succionar un popote a fin de elevar un líquido (agua, jugo o michelada), se establece una diferencia de presión entre dos zonas. Mientras más aire yo retire o más baje la presión, más vacío produciré.

Independiente del propósito, el vacío es fascinante. Entre átomo y átomo que conforman a una molécula no cabe ya

nada, entonces hay vacío. O bien, en el espacio interplanetario, interestelar o intergaláctico, no hay nada, o podemos decir que hay mucho vacío, contradicción lingüística. En resumen, crearé vacío para hacer haces moleculares.

Epitaxia por haces moleculares

Algo que no deja de sorprender de la naturaleza es su capacidad de réplica. Por poner un ejemplo, la capacidad de autorreplicarse fue una de las primeras propiedades fundamentales que debieron surgir para asegurar la evolución de las formas de vida primitiva. Sin la capacidad de propagarse, cualquier molécula biológica primitiva estaba destinada a desaparecer. Los portadores tempranos de la información genética fueron quizás las moléculas de ácido ribonucleico (RNA), con capacidad de autorreplicarse. Al evolucionar las moléculas de RNA se reemplazaron por ácido desoxirribonucleico (DNA) como material genético, el proceso de la replicación adquirió complejidad y requirió de un gran número de componentes auxiliares. La capacidad de autoreplicarse en cada contagio del virus COVID-19 es lo que ha puesto en “jaque” a la humanidad entera durante los muy recientes años, asimismo los humanos lo combatimos por ejemplo al ingeniar maneras de inhibir esta misma propiedad.

Si se observa a nivel atómico, el crecimiento de los bosques de cristal no es otra cosa que un fenómeno de autorreplica: cristales propiciando la formación de cristales. Así, al arribar el haz molecular a una superficie cristalina es posible controlar que el nuevo material sea también cristalino. A este proceso se le conoce como epitaxia o cristales sobre cristales o un orden extraordinario, una majestuosa alineación con exigencia militar de átomos en las tres dimensiones espaciales.

Mediante la epitaxia se logra una gran perfección cristalina, con muy alta precisión atómica. Si se desea, podríamos diseñar estructuras muy caprichosas; por ejemplo, una capa de átomos de una especie, luego quizás tres filas atómicas más de algún otro material sólo intercambiando el “spray” y así sucesivamente.

Aplicaciones

Claro, la ciencia y tecnología no han avanzado a través de caprichos, no muchos, sino que esta ventaja de controlar a nivel extremo la formación de los cristales ha conducido a avances extraordinarios. Además, esta



Imagen 1.
Naica, Chihuahua. Los cristales, bajo condiciones adecuadas crecen tanto como el entorno se los permita.
Cortesía de: topadventure.

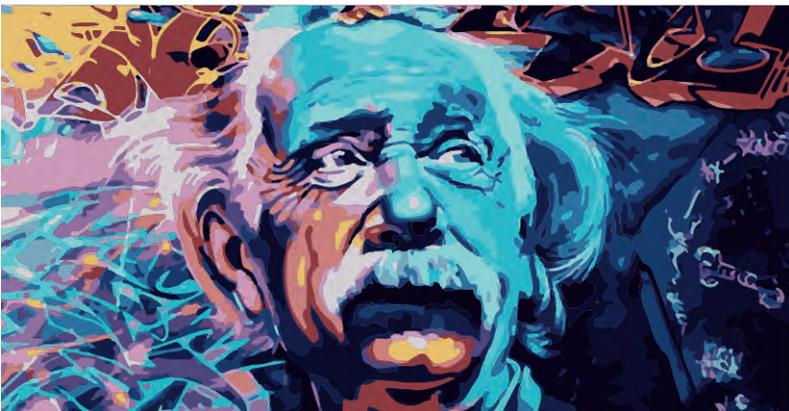


Imagen 2.
Un grafiti es un método de deposición del haz proveniente de un spray. A nivel nanoscópico podemos cubrir una superficie mediante haces moleculares, propiciando el crecimiento de cristales de muy alta calidad.

Crecimiento cristalino



Los cristales y minerales tienen usos prácticos como la creación de herramientas, pigmentos, o materiales de construcción, incluso pueden estar presentes en productos cotidianos como la sal, el azúcar y el chocolate.



El crecimiento de cristales se basa en combinar átomos diferentes con exactitud. Uno de los métodos más precisos para lograrlo es a través de una técnica llamada epitaxia para haces moleculares (MBE, por sus siglas en inglés).



La técnica MBE implica el crecimiento de "bosques de cristal", que no es más que un fenómeno de autorreplicación, en el cual es posible la formación controlada de nuevo material cristalino.



Gracias al dominio de esta técnica y la nanotecnología existen varias aplicaciones, como el surgimiento del diodo emisor de luz (LED), el desarrollo de computadoras con mayor velocidad o el avance de la comunicación telefónica, gracias a la creación del HEMT.



técnica es idónea para incursionar en la nanotecnología, nueva rama de la física que ha impulsado nuestra visión del mundo hacia nuevos horizontes y que, sin duda, amerita un ensayo aparte.

Vale la pena conectar la comunidad MBE+Nanotecnología con el mundo. ¿Dónde específicamente puedo observar este enlace? Mencionemos tres ejemplos muy trascendentes: iluminación, cómputo, comunicaciones. Aplicaciones tan habituales que por la misma cotidianeidad de



Imagen 3.

Nuestra capacidad para controlar el crecimiento de cristales ha conducido a los avances tecnológicos en las áreas de la comunicación, cómputo y pantallas. La evidencia de esta conjunción muchas veces la tenemos en la palma de la mano, el celular.

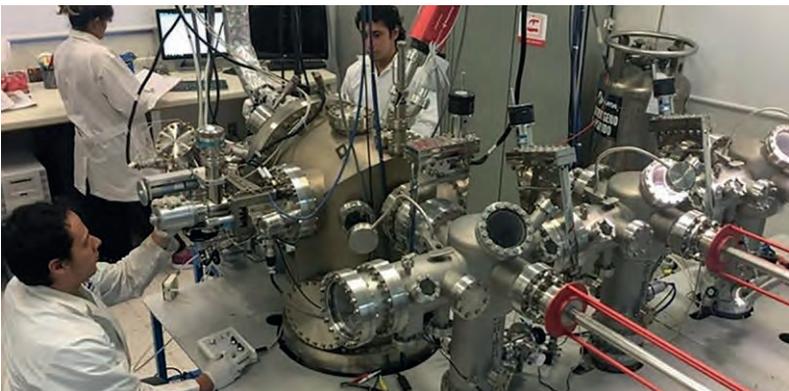


Foto 1.

Cámaras para el crecimiento de cristales mediante haces moleculares. El laboratorio de epitaxia o réplica cristalina más grande de México en el Laboratorio de Nanoestructuras de la UASLP. Cuenta con cámaras de ultra alto vacío para el crecimiento, introducción, desgasado, transferencia. Los haces moleculares son de Ga, Al, In, As, N, Be, Sn y Si, con lo que se desarrollan dispositivos para comunicaciones THz y celdas solares de 3ª generación.

su uso ya pasan desapercibidos, empero los cristales crecidos por MBE de tamaño diminuto están involucrados.

Iluminación. Gracias al dominio de la técnica de crecimiento de cristales y a la nanotecnología surgió el diodo emisor de luz (LED), este método actual de iluminación es cien veces más eficiente que el foco. En términos prácticos, se gasta cien veces menos dinero por iluminación que una década atrás, gracias a esta nueva tecnología. Pero aún más interesante, el área de entretenimiento se vio beneficiado con esta innovación. Es posible realizar LED en varios colores y tamaños muy diminutos por lo que son incorporados como pixeles en las pantallas de tv, monitores de computadoras, tabletas electrónicas, celulares y otros dispositivos. Mayor resolución, mayor área, pero además ¡menor gasto de energía! Justo en este momento puede que estés observando un arreglo de LEDs en alguna de estas aplicaciones. Así de trascendente es.

Cómputo. En China cerca de 100 años a. C. se inventó la primera calculadora, el ábaco, una herramienta para agilizar las cuentas y realizar rápidamente operaciones aritméticas simples como sumar, restar, multiplicar y dividir. La velocidad para realizar estos cálculos dependía de la habilidad y destreza manual de cada usuario. Siglos después, a finales de la década de 1980 aparecen las primeras computadoras personales. Contrastantemente veloces, ¡cinco mil millones de procesos por segundo! Este nivel de avance requirió de dominio en el crecimiento de cristales e incursionar en la manipulación de la materia a nivel nanométrico. Más fascinante es lo que ahora MBE plantea conjuntamente con la nanotecnología del futuro: la computación cuántica. Pronto sabremos de ella.

Comunicaciones. Nuestra capacidad para comunicarnos, sumada al desarrollo de un dedo gordo en la palma de la mano, han sido sin lugar a duda lo que ha hecho al ser humano la especie con el nivel de desarrollo que conocemos ahora. La comunicación acerca a la posibilidad de obtener información y conocimiento, ¡fundamental para el avance de toda civilización! Justo ahora, el desarrollo de la ciencia y la tecnología nos ha acercado a la palma de la mano un aparato de comunicación y con posibilidades de adquirir una gran cantidad de información de manera expedita: sí, el celular o teléfono móvil. El control de la materia a nivel nanométrico mediante el



crecimiento cristales por MBE, condujeron a la creación del un dispositivo llamado HEMT. Éste forma el alma del celular y, de no ser por su invención, estaríamos en la edad de piedra de la telefonía móvil.

Implementación de la técnica

Para realizar el crecimiento de los haces moleculares creamos primero un micro cosmos de orden interplanetario. ¿Cómo es eso? El interior de una cámara de acero semejante en tamaño a una lavadora de ropa se lleva a una presión cercana a la del espacio interplanetario (10-12 Torr). En esta cámara se colocó previamente un substrato cristalino sobre el cual se harán incidir los haces moleculares y éstos procederán a replicar el orden. Crear un haz, como dijimos, es tan sencillo como calentar mucho un material. Así también, dentro de la cámara se encuentran crisoles con metal para evaporar en minihornos. Si calienta mucho el metal, el haz molecular resultante será mas intenso o denso. Este control sobre el flujo del haz permite el dominio del crecimiento a nivel nanométrico y es ayudado gracias a un mecanismo muy simple de obturación. La llegada del haz que formará al cristal sobre el substrato se interrumpe simplemente al tapar la boca del crisol, como retirar el dedo del spray. Si se requiere a partir de ese momento crecer otro material, se destapará el haz correspondiente, así se lograrán realizar estructuras con cambios en composición a nivel atómico, subnanométrico.

Además, si el substrato está muy frío, todo se le pega rápidamente, sin dar tiempo a la réplica, por lo que se formará un cristal de mala calidad. Si está muy caliente ¡todo le rebota! Así que el control sobre la temperatura es crucial.

El ambiente de ultra alto vacío es aprovechado para visualizar el crecimiento del cristal mediante herramientas de investigación y monitoreo ¡y con ello controlar aún más la réplica! Para esto, una técnica de difracción de

electrones llamada RHEED proporciona en tiempo real información acerca de la cinética de crecimiento del cristal, así como información de la velocidad de replica del cristal (en nanómetros por segundo) e indica si el crecimiento es cristalino, amorfo o policristalino. Más aún, la rugosidad, facetas y defectos pueden ser monitoreados con RHEED. Para los cristales, RHEED se asemeja al padre amoroso que sigue su crecimiento, su evolución, aquel que orienta y corrige algunos defectos a tiempo.

Final remarks

Los requerimientos del ser humano han evolucionado. En etapas tempranas de la historia, el objetivo del ser humano era únicamente satisfacer sus necesidades básicas, estableciendo una comunión en armonía y sustentable con la naturaleza. Posteriormente, llegó a comprender y con ello a aprovechar la materia, así que surgieron áreas relacionadas con la ciencia de materiales y, asimismo, nuevas necesidades denominadas secundarias. En pro de satisfacerlas lo ha llevado a desarrollar nuevas tecnologías; así como nuevos métodos para manipular el mundo a través del control de lo más pequeño, lo más básico y no claramente palpable, el mundo submicroscópico, el reino de la nanociencia y la nanotecnología. En su avance hace uso de cristales para muchos fines, con estos se crea nuestra visión actual del mundo; se han construido a través de ellos una infinidad de dispositivos y aparatos que, sin ellos, la sociedad detendría su crecimiento, puesto que ya no se concibe una sociedad moderna sin celulares, computadoras, internet, pantallas inteligentes, iluminación. Y sí, allí hay cristales, pero antes están las tecnologías, para crearlos y hacerlos crecer mediante la epitaxia de haces moleculares.

Este binomio MBE-Nanotecnología, sin duda, seguirá durante muchas décadas, e incluso siglos, hasta donde el ingenio del ser humano alcance. **UP**