

Nuevas tecnologías que surgen del desorden:

LOS MATERIALES AMORFOS



Los materiales amorfos, ni tan ordenados como los cristales ni tan desordenados como los líquidos, están dando origen a nuevos avances tecnológicos. Su aplicación permitirá que la energía solar sea por primera vez una alternativa viable.

Gerardo García Naumis

Los sistemas físicos tienden a adoptar el estado de menor energía posible. Un ejemplo son los sólidos que existen porque su formación minimiza la energía de un conjunto de átomos o moléculas que interactúan entre sí. Esta regla fundamental de la naturaleza explica en gran medida la estructura del mundo que nos rodea, lo cual no deja de ser sorprendente si tomamos en cuenta que los núcleos atómicos tienden a repelerse, debido a sus cargas eléctricas del mismo signo.

Desde fines del siglo XIX se pensaba que los electrones, con sus cargas opuestas a los núcleos, deberían tener el papel de estabilizar los sólidos, actuando como el “pegamento” que une a los átomos. Estas ideas fueron desarrolladas posteriormente —usando la mecánica cuántica, que estaba en plena fase de construcción— y ya para 1930 existía una teoría del estado sólido que explicaba diversos fenó-

menos con gran éxito. Esta teoría partía del hecho de que los materiales sólidos con energías más bajas son siempre cristalinos. Al decir cristalinos nos referimos a que la estructura total consiste en la repetición, sobre las tres direcciones del espacio, de una “celda” o motivo básico atómico (véase figura 1), de manera análoga a la cual una pared se forma al poner un ladrillo sobre otro.

Mientras la teoría de materiales ganaba respetabilidad, al mismo tiempo iba quedando claro que no todos sus fundamentos eran tan sólidos como el sujeto de su estudio. En 1932 ya se sabía con certeza que los vidrios comunes no son cristales, aunque mucha gente al oír la palabra cristal piense en un vidrio. Esto es incorrecto (muchos comerciantes se aprovechan de la confusión, y venden vidrio común en lugar de cuarzo, al cual los esotéricos le atribuyen diversas propiedades curativas). La estructura de un vidrio es desordenada o amorfa, tal como se muestra en la figura 2, donde puede notarse que existe un orden parecido al de un cristal alrededor de cada átomo y sin embargo la estructura no es periódica (repetitiva) a largo alcance, debido a que los ángulos de los enlaces entre átomos tienen pequeñas variaciones. Estas

variaciones se van acumulando a grandes distancias, produciendo desorden estructural.

Después de los primeros estudios en vidrios, se han encontrado muchos tipos de desorden en materiales. Por ejemplo, si tenemos dos tipos diferentes de átomos, éstos pueden ordenarse entre sí de manera aleatoria, aun si las posiciones que ocupan ambos en el espacio forman una red regular. En ese caso se habla de una aleación desordenada. Muchos materiales caen en la categoría de desordenados; entre ellos, los plásticos (los cuales superan en volumen de producción anual a cualquier aleación metálica). Existen otras clases de materiales amorfos, como los vidrios metálicos, los vidrios de espín, los vidrios calcogenoides, los cristales líquidos y los semiconductores amorfos. En general, para un físico la palabra “vidrio” denota a una estructura desordenada, formada al enfriar una mezcla líquida, y en este texto usaremos esa convención, aunque existen algunas excepciones que pasaremos por alto. Debemos agregar que en 1984 fue descubierta otra clase de sólidos, cuya estructura no es ni de tipo cristalino ni tampoco desordenada, sino que constituye por sí misma una nueva clase. A estos materiales se les llamó “cuasicristales”. Su orden interno es de largo alcance pero casi-periódico, el cual les permite tener simetrías prohibidas para un cristal (la periodicidad de un cristal sólo le permite tener simetrías de rotación de 60, 90, 120 y 180 grados. Los cuasicristales pueden tener simetrías exóticas, como la de invariancia ante rotaciones de 72 grados, correspondientes a la simetría de un pentágono).

Desde tiempos muy remotos, los materiales desordenados han tenido un impacto muy importante en dos áreas clave para el desarrollo de la civilización: la economía y la energía. Un ejemplo muy interesante de ello proviene de la civilización teotihuacana. Este imperio tuvo como pilar fundamental su dominio de las minas de obsidiana, material vítreo de origen volcánico cuyo uso en conflictos bélicos le confería un papel estratégico. Recientemente las fibras ópticas, hechas a base de los mismos vidrios que descubrieron los fenicios, han producido una revolución en la transmisión de información debido a su costo, capacidad y mínimas pérdidas energéticas. Algunas personas piensan que esta revolución tecnológica nos conduce a la llamada era de la información. Si alguna moraleja podemos sacar de la fibra óptica es que no siempre un material tiene que ser novedoso para tener una aplicación tecnológica

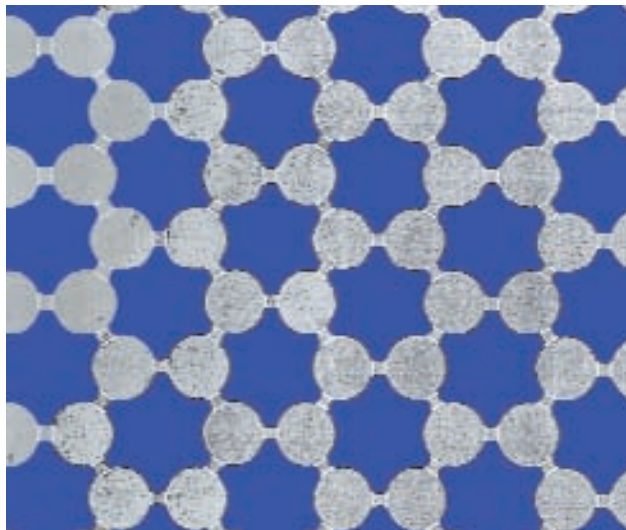
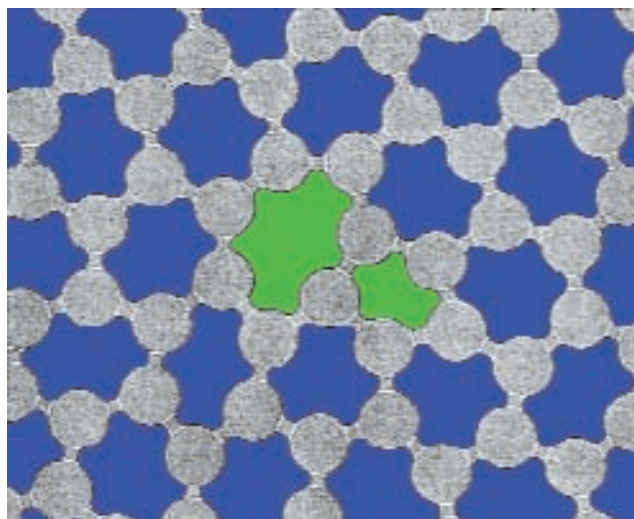


Figura 1. Estructura típica de un cristal. En el caso que se muestra, los ángulos entre los átomos tienen 120 grados. La estructura resultante consiste en la repetición de celdas formadas por hexágonos regulares de seis átomos. La estructura tiene orden a gran escala.

Figura 2. Sólido desordenado que tiene el mismo tipo de átomos que los representados en la figura anterior, pero con pequeñas variaciones en los ángulos de enlace. Como resultado, los hexágonos se distorsionan y aparecen anillos de átomos pentagonales y heptagonales (anillos en verde). Aunque el sólido presenta orden a pequeña escala, no hay orden de largo alcance.



revolucionaria; a veces basta con aplicar de manera ingeniosa algún principio físico. Por esta razón, es de vital importancia entender los mecanismos físicos y químicos que ocurren en los sólidos no cristalinos. Sin embargo, este avance ha sido muy lento, y sólo en las últimas cuatro décadas se han podido llegar a entender, muchas veces de manera parcial, los diversos procesos que regulan sus propiedades. Más aún, el origen de la formación de los vidrios todavía no ha podido ser resuelta de manera satisfactoria y, en palabras de P. W. Anderson, premio Nobel de física, es uno de los dos problemas más importantes de la teoría de sólidos que quedan por resolver (el otro es la explicación satisfactoria de la superconductividad de alta temperatura). La razón de la complejidad del problema es que los vidrios violan la regla fundamental que se menciona en la primera frase de este texto: los materiales vítreos no están en una configuración de mínima energía; si fuera así, su estructura sería cristalina. Por esta razón, se dice que no están en un estado de equilibrio termodinámico.

Los vidrios se forman al enfriar de manera rápida a una mezcla líquida. Al realizar el enfriamiento, la viscosidad del líquido aumenta hasta cierta temperatura en que deja de fluir. A este proceso se le llama “transición vítrea”,

Existen diversas controversias acerca de si los vidrios son realmente sólidos, o tan sólo líquidos sobre-enfriados

y tiene en sí mismo una gran aplicación industrial, dado que puede moldearse el material con la forma deseada, tal y como se observa en los talleres artesanales de vidrio, donde los maestros producen formas como botellas y vasos mientras soplan para enfriar a la mezcla. La velocidad de enfriamiento es un parámetro crítico en esta transición. En general, los sistemas pasan por diversas configuraciones estructurales que eventualmente los llevan a minimizar su energía. Al enfriar rápidamente al vidrio, se evita que el sistema tenga tiempo para formar el cristal correspondiente que haría mínima su energía. El vidrio queda “atrapado” en una configuración de la que no puede salir porque se requeriría demasiado tiempo o energía.

Existen diversas controversias acerca de si los vidrios son realmente sólidos, o tan sólo líquidos sobre-enfriados, debido a que en el equilibrio termodinámico deberían ser sólidos. Es sabido que los líquidos fluyen, y de hecho puede medirse su viscosidad, aunque resulte muy alta. Para todo fin práctico, un vidrio puede considerarse como sólido. Esta discusión ha producido un mito muy difundido dentro de la comunidad científica. En diversos libros y cursos se afirma que los vitrales de las catedrales góticas se han ido adelgazando en sus partes superiores porque lentamente fluyen hacia su base. Diversos estudios han mostrado que esto en realidad se debe al proceso utilizado para hacer las láminas de vidrio durante la Edad Media, y no al carácter “líquido” de los vidrios.

¿Qué ventajas tiene utilizar un material desordenado? La primera es que puede diseñarse el orden atómico local sin las restricciones debidas a la simetría que existe en un cristal. Esto permite obtener nuevas configuraciones de enlaces químicos y órdenes locales; así se pueden crear nuevos materiales con propiedades químicas y electrónicas convenientes a una aplicación dada. La segunda ventaja fundamental es de carácter económico: para hacer crecer cristales, normalmente se requiere mucho tiempo y ambientes muy controlados, por lo que el costo es muy alto. Los materiales desordenados se producen de manera muy sencilla y no requieren tanto control durante su manufactura.

Estas ventajas se han traducido en la idea de usar materiales vítreos, como los semiconductores amorfos, para construir circuitos para computadoras y celdas solares mucho más baratas. Éste ha sido un sueño recurrente desde principios de 1970. El desarrollo de estas ideas no había sido posible porque faltaba un adecuado entendimiento teórico. Hoy en día se acepta que el concepto más importante que ha surgido en este campo es la idea de que las propiedades electrónicas están controladas por

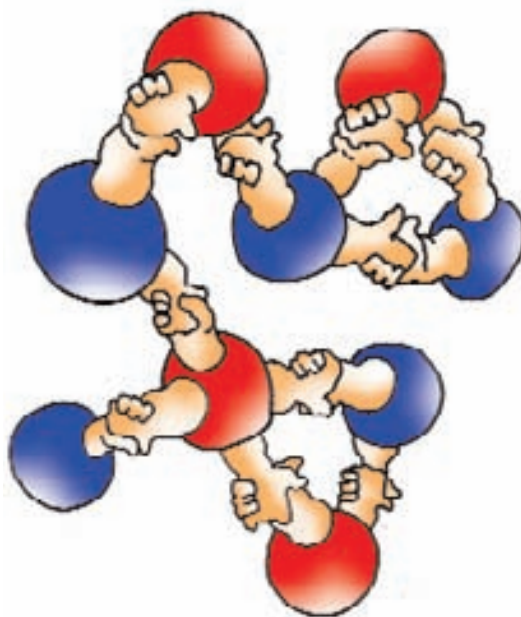
centros o regiones activas del material, ocupadas por átomos en niveles de energía poco usuales. En otras palabras, la clave del entendimiento radica en la naturaleza de los enlaces químicos y no en la simetría de la red, a diferencia de los materiales periódicos. Más adelante tendremos oportunidad de analizar con un poco más de detalle el estado actual y el futuro en el siglo XXI de las aplicaciones de los semiconductores amorfos.

Más allá del simple uso de los materiales vítreos como plásticos o vidrios para fabricar artículos de uso común, existen otras aplicaciones menos conocidas que también han tenido un impacto relevante. Un ejemplo de ello son las fotocopiadoras, desarrolladas en la década de los sesenta por la compañía Xerox. Estas máquinas se basan en la propiedad de foto-conductividad de los llamados vidrios calcogenoides (en particular de selenio y compuestos de selenio y arsénico), que consiste en que, al someterlo a la luz y a un campo eléctrico, en la superficie del vidrio aparece una carga eléctrica. De este modo, las regiones oscuras quedan sin carga eléctrica, mientras que las iluminadas quedan cargadas, produciéndose una imagen eléctrica del papel a copiar. Posteriormente, esta imagen se usa para fijar el pigmento sobre el papel. Los vidrios metálicos se utilizan como núcleos de transformadores eléctricos, debido a que su falta de simetría interna reduce las pérdidas por corrientes parásitas. Otra aplicación muy reciente y de uso cotidiano son los discos compactos regrabables. En ellos se utiliza directamente una transición entre la fase amorfa y la cristalina del material, producida por un pulso de láser. Debido a que en este proceso no ocurre ninguna difusión, el desgaste de estos discos es insignificante; su vida sólo está limitada por el sustrato sobre el cual se deposita el vidrio calcogenoide. Además, a diferencia de otros medios de grabación, el disco no necesita ser borrado previamente para ser grabado.

Es muy difícil predecir cuáles serán los usos de los materiales desordenados y su impacto en la tecnología durante el siglo XXI. Hace cien años hubiese sido casi imposible realizar tal pronóstico. Tal vez podríamos señalar dos escenarios: uno predecible a corto plazo, digamos unos veinte años, y más allá podríamos especular un poco acerca de las tendencias generales.

A corto plazo, habrá dos presiones que producirán un fuerte impulso en el desarrollo de materiales vítreos. Por un lado, la inevitable subida de precio de los combustibles fósiles y los costos ecológicos asociados a ellos (calentamiento global, lluvia ácida, etcétera), harán que se busquen nuevas fuentes de energía y maneras para almacenarla. Por otra parte, la constante elevación en las prestaciones de los equipos de cómputo y la necesidad de aumentar la capacidad de transmisión de informa-

Otra aplicación muy reciente
y de uso cotidiano
son los discos compactos
regrabables





Las aplicaciones en cómputo
de los materiales
desordenados serán muchas

ción hará que se busquen materiales adecuados a la tarea. En el campo de la energía, el avance más importante será la introducción masiva de celdas solares de silicio amorfo. Aunque, como se dijo previamente, estas celdas empezaron a desarrollarse en los años setenta, su baja eficiencia de conversión de luz a energía eléctrica y sus altos costos de producción las hacían incoasteables. En los últimos dos años, se logró aumentar la eficiencia de las celdas (hoy cercana a 15 por ciento) utilizando capas sucesivas de materiales amorfos con propiedades ópticas diferentes, de modo que se aprovecha mejor la energía aportada por la radiación solar. Recientemente, la compañía estadounidense ECD/United Solar ha puesto a punto una nueva línea de producción continua que rebaja dramáticamente los costos; ya se está muy cerca de la barrera del costo de producción de un dólar por watt, que hace comercialmente competitiva la energía solar.

Estos avances permitirán que la energía solar sea por primera vez una alternativa viable desde el punto de vista económico. Creemos que estas nuevas tecnologías deberían tener un impacto mucho mayor en la discusión reciente sobre la planeación y política energéticas, debido a las condiciones naturales de México y a la baja inversión requerida (aun en países con baja insolación como Alemania, las celdas de silicio amorfo permiten pagar su costo en un año y medio).

El agotamiento de los combustibles fósiles también plantea problemas sobre almacenamiento de energía. Se vislumbran dos soluciones posibles: una es el perfeccionamiento de las baterías recargables, y la otra consiste en usar hidrógeno. En ambas, los materiales desordenados tendrán un papel relevante. Las propiedades únicas de difusión iónica en los vidrios adicionados con impurezas los hacen candidatos a ser utilizados en baterías de estado sólido con gran capacidad de almacenamiento y bajo peso. En las llamadas celdas de hidrógeno, que combinan aire con hidrógeno para producir energía eléctrica, pueden alcanzarse eficiencias de 50 por ciento, muy superiores al 20 por ciento que tienen los automóviles de combustión interna. En la actualidad se piensa que convendría utilizar algún compuesto vítreo de hidrógeno y algún metal como combustible, en lugar del hidrógeno puro, peligroso de almacenar. Aunque el combustible sería más pesado, la ganancia en seguridad hace pensar seriamente en su conveniencia.

Las aplicaciones en cómputo de los materiales desordenados serán muchas. Por ejemplo, las propiedades electrónicas de los vidrios calcogenoides hacen que el material pueda pasar de aislante a metálico cuando se aplica un campo eléctrico que reba-

sa cierta intensidad. La velocidad con que ocurre este cambio es muy alta. Este fenómeno se empieza a utilizar en la construcción de interruptores eléctricos de muy alta velocidad, que podrían tener aplicaciones en circuitos electrónicos, reguladores de voltaje y rectificadores de alta potencia. También se están construyendo memorias de tipo permanente que tienen una alta velocidad de lectura. Más aún, se han podido construir memorias tridimensionales. Estos avances hacen pensar en la posibilidad de construir redes que se auto-programen o interconecten su *hardware* de acuerdo a las necesidades de uso. A largo plazo, podríamos especular acerca de la construcción de computadoras ópticas. Las ventajas de estas máquinas serían muchas: la velocidad de transmisión dentro de los circuitos se haría a la velocidad de la luz, y el consumo de energía sería mucho menor. Tal computadora estaría hecha a base de materiales desordenados como vidrios calcogenoides o silicio poroso (formado al atacar con ácido a un cristal de silicio).

En un plazo mayor, podría especularse sobre la construcción de computadoras cuánticas, que en principio resolverían problemas que resultan intratables en computadoras digitales. Estas computadoras funcionarían utilizando las propiedades cuánticas de la luz, por lo que sería indispensable el uso de elementos ópticos hechos de vidrio. Muy probablemente, las pantallas de estas nuevas computadoras dejarán de ser tubos de rayos catódicos o de cristal líquido; las primeras ocupan un volumen demasiado grande, y las segundas son ineficientes desde un punto de vista energético, además de que tienen una menor definición. Muy probablemente, las nuevas pantallas serán planas pero con una gran definición, y usarán el principio de emisión de campo debido a las propiedades cuánticas de algunos materiales desordenados.

Finalmente, en los últimos años se han hecho descubrimientos muy importantes que harán todavía más eficiente la transmisión de datos; entre ellos están el cambio de la frecuencia de la luz láser mediante efectos no-lineales y el cambio activo del índice de refracción de las fibras ópticas, que permitirán el multiplexado óptico de la información a transmitir; es decir, la transmisión de distintas señales simultáneamente por una misma fibra óptica.

A modo de conclusión, podemos decir que el entendimiento teórico de los mecanismos que operan en los materiales desordenados ha producido un importante impacto en las aplicaciones tecnológicas, aunque la razón de su existencia como materiales aún no ha sido comprendida cabalmente. En este artículo hemos tratado de dar un panorama sobre sus aplicaciones

más recientes, y las ramas en que se vislumbra un mayor desarrollo futuro. Sin embargo, como muestra repetidamente la historia, los avances más importantes son muy difíciles de prever; pero sin duda en el futuro no dejarán de sorprendernos.

Bibliografía

- Boolchand, P. (2000), *Insulating and semiconducting glasses*, Singapur, World Scientific.
- Houde-Walter y S. Y. Green P. (1998), "New Functionality in glass", *MRS Bulletin*, 23, 27-30.
- Tabor D. (1996), *Gases, liquids and solids and other states of matter*, Cambridge, Cambridge University Press.
- Trudeau M. L. (1999), "Advanced materials for energy storage", *MRS Bulletin*, 24, 23-26.
- Zallen (1998), *The physics of amorphous solids*, Nueva York, Wiley.

Se agradece al proyecto DGAPA-UNAM IN108199 por su apoyo financiero.

Gerardo García Naumis estudió la licenciatura, maestría y doctorado en física, en la Facultad de Ciencias de la UNAM. Realizó un posdoctorado en el laboratorio de gravitación y cosmología cuánticas en la Universidad de París VI. Ha sido profesor invitado en universidades de Portugal, Estados Unidos y Francia. Es investigador del Instituto de Física de la UNAM. Ha publicado 25 artículos en revistas internacionales y sus trabajos han sido citados más de cien veces. En el 2002 fue considerado por el periódico *El Universal* como uno de los 104 mexicanos más destacados menores de 35 años. Su área de trabajo son las propiedades de sistemas fuera de equilibrio, cuasicristales, vidrios, sistemas dinámicos y estados sólido y líquido.