

Cristian Felipe Cruz García y Luis Rodríguez Fernández

Armonía a escala nanométrica

Desde ondas, rayas o puntos, la formación de patrones superficiales es un fenómeno bastante familiar en el mundo natural a simple vista. ¿Será que este mismo fenómeno ocurre en escalas muy pequeñas, como la nanométrica? La respuesta a esta pregunta es sí. En este trabajo se presenta y describe la formación de nanopatrones superficiales inducidos por irradiación iónica, así como sus posibles aplicaciones dentro de la industria de la nanotecnología.

Introducción

Todos alguna vez hemos visto las dunas que se forman sobre las extensas arenas del desierto. Nos hemos maravillado al observar las manchas o rayas sobre la piel de ciertos animales, como los tigres o jaguares, o nos ha sorprendido la forma hexagonal de los panales de abejas. Estas imágenes, presentes en contextos muy distintos, representan el mismo fenómeno: la formación de patrones en superficies sólidas; patrones que, en contraste con la abrumadora diversidad del mundo natural, toman siempre un limitado número de motivos básicos (ondas, rayas, puntos, hexágonos, etc.), confiriendo armonía y belleza al mundo natural.

Los ejemplos mencionados corresponden a la formación de patrones macroscópicos —es decir, que pueden observarse a simple vista—, pero uno podría preguntarse si este fenómeno también ocurre en escalas mucho más pequeñas, como la **nanométrica**. La respuesta a esta pregunta no sólo es de interés en la investigación científica básica, sino que podría tener gran relevancia en la revolución nanotecnológica de nuestra época. Hoy en día, gracias a la invención de microscopios más potentes que el óptico —de los cuales hablamos más adelante—, se sabe que la respuesta buscada es un rotundo sí. En efecto, se ha encontrado que una gran variedad de superficies sólidas irradiadas con **iones energéticos** exhiben *nanopatrones* muy similares a las dunas del desierto, a los panales de las abejas o a las rayas en la piel de ciertos felinos. Lo cual indica que, incluso en el escenario de lo muy pequeño, donde la naturaleza muchas veces se comporta de manera diferente a la habitual, el mundo natural guarda la misma armonía y belleza que en la escala macroscópica.

Escala nanométrica

Un nanómetro resulta de dividir un milímetro en mil partes iguales y luego tomar una de estas partes para volver a dividirla en mil partes iguales.

Ion energético

Un ion es un átomo cargado eléctricamente que, al desplazarse a altas velocidades, adquiere una elevada energía cinética.



Comencemos por el principio y por partes

Hemos mencionado que el proceso de irradiación iónica conduce a la formación de nanopatrones superficiales; por tanto, para comprender este fenómeno es importante platicar un poco en qué consiste este proceso. La irradiación iónica de una superficie —que puede ser metálica, un cristal, un vidrio, etc.— consiste esencialmente en hacer incidir sobre ella iones de cierto elemento químico (como oro, cobre, xenón, argón, etc.) y con determinada energía (específicamente cinética, que es la energía que tiene un cuerpo en virtud de su movimiento). En la mayoría de los casos, los iones energéticos son producidos por máquinas bastante complejas llamadas aceleradores, que, en esencia, utilizan la carga eléctrica de los iones para acelerarlos; es decir, para darles energía de tipo cinética. Normalmente, la energía alcanzada por los iones es de unos pocos hasta millones de electronvoltios. El

Electronvoltio (eV)

Energía que adquiere un electrón al ser acelerado por una diferencia de potencial igual a 1 V. Para tener una referencia de su valor, nótese que la energía que se libera al caer una moneda de 2 g desde una altura de 1 cm es del orden de 10^{15} (1 seguido de 15 ceros) eV.

electronvoltio (eV) es una unidad de energía usada en física de partículas. En la escala macroscópica, 1 eV es una cantidad de energía extremadamente pequeña. Por su parte, en el **Recuadro 1** se explica un poco más a fondo sobre el funcionamiento de un tipo particular de acelerador conocido con el nombre de Peletrón.

Después de la irradiación iónica, para poder ver los nanopatrones formados en la superficie, no basta con un microscopio óptico, sino que es necesario usar otro tipo de microscopios más potentes, entre ellos el microscopio electrónico de barrido y de fuerza atómica. En un microscopio electrónico de barrido, la superficie se ilumina o barre no con luz visible, como en el microscopio óptico, sino con un haz compuesto de electrones energéticos. Cuando los electrones barren la superficie, algunos rebotan desde ella, perdiendo energía durante el proceso. La información de este cambio de energía, el número de electrones rebotados y su posición son datos recopilados por un detector dentro del microscopio que se envían a una computadora para formar una imagen bidimensional de la superficie. Debido al tamaño muy pequeño de los electrones (del orden atómico), las imágenes obtenidas por este microscopio alcanzan una resolución de entre 2-20 nanó-

metros (la resolución del microscopio óptico es de hasta 200 nm).

Por su parte, en el microscopio de fuerza atómica, la superficie no se barre con un haz de luz o de electrones, sino con una sonda en forma de punta que se pone en contacto con ella. Durante el barrido aparecen fuerzas (electrostáticas, químicas, de tensión superficial, etc.) entre los átomos de la sonda y los de la superficie, que son medidas por un sistema que combina un láser y un detector tipo fotodiodo. El detector fotodiodo convierte la medición de estas fuerzas en una señal eléctrica, la cual es procesada por una computadora para reconstruir la topografía de la superficie a escala nanométrica. A diferencia

Recuadro 1.

El Peletrón es un equipo con el que se pueden acelerar iones de prácticamente cualquier elemento de la tabla periódica a energías mayores a los 2 MeV (dos millones de eV). En este acelerador, en particular, los iones se obtienen a partir de la erosión iónica de un sólido compuesto del elemento que se quiere trabajar. Después de su producción, los iones (que son negativos al hacerlos interactuar con un vapor de cesio) se encaminan al acelerador mediante un electroimán inyector y son acelerados una primera vez en el centro del acelerador por un alto voltaje. En el acelerador Peletrón, este alto voltaje es producido por el transporte de carga eléctrica desde una terminal positiva hacia el centro del acelerador mediante cadenas de metal y plástico. Además de ser acelerados en el centro del acelerador, los iones interactúan con una nube de nitrógeno que arranca electrones de los iones, convirtiéndolos en iones positivos. Gracias a este intercambio de carga negativa a positiva, los iones son ahora empujados por el alto voltaje, dándoles una segunda aceleración y aumentando su energía hasta alcanzar la deseada. Finalmente, los iones son dirigidos hacia la superficie a irradiar mediante el uso de electroimanes selectores de masa, carga y energía iónica.

Microscopios no ópticos

Instrumentos que, a diferencia de los microscopios ópticos convencionales, no utilizan luz visible ni lentes de cristal para formar imágenes amplificadas de un objeto; en su lugar, emplean haces de electrones o sondas con formas de punta para alcanzar resoluciones de hasta unos pocos nanómetros.



del microscopio electrónico de barrido, el microscopio de fuerza atómica nos permite obtener información sobre la altura de la superficie hasta con una resolución de 1 nanómetro.

■ (Nano) ondas, (nano) rayas, (nano) panal...

■ Como dice la famosa frase, “¡Ver para creer!” Pasemos, por tanto, a ilustrar la formación de nanopatrones en casos concretos. En la **Figura 1a**, se muestra una imagen de microscopía de fuerza atómica para una superficie de vidrio irradiada con iones de silicio de energía de 1 MeV (un millón de eV). Como se puede observar, en la superficie se forma un nanopatrón de rayas muy similar al que se observa sobre la piel de ciertos gatos domésticos (**Figura 1b**). La altura del patrón es de hasta 2.16 micrómetros (aprox. 2100 nanómetros). Ahora bien, conforme aumenta la duración del proceso de irradiación iónica –lo cual se traduce en que un mayor número de

iones llegan a la superficie–, la superficie del vidrio exhibe ahora un nanopatrón parecido a un panal de abejas (**Figura 1d**), según observamos en la correspondiente imagen de microscopía electrónica de barrido (**Figura 1c**). El ancho o diámetro de cada celda del panal es de hasta 8000 nanómetros.

Por otro lado, la imagen de microscopía de fuerza atómica en la **Figura 1e** muestra que, sobre la superficie de dióxido de silicio (SiO_2) irradiado con iones de oro de energía igual a 1.8 MeV (un millón ochocientos mil eV), se forma un nanopatrón ondulado similar al de las dunas del desierto (**Figura 1f**). En todos estos casos, ¡los patrones nanométricos superficiales inducidos por irradiación iónica toman las mismas formas que los patrones superficiales macroscópicos! Además, la formación de los nanopatrones superficiales tiene una dependencia tanto de los parámetros de la irradiación iónica (tipo y energía de los iones, duración del proceso de irradiación iónica, etc.) como del tipo de super-

ficie (vidrio o dióxido de silicio). La investigación científica actual sobre este tema busca comprender más profundamente la relación de dependencia anterior.

Los mecanismos físicos detrás de la formación de nanopatrones por irradiación iónica

Pero, ¿cómo es que se forman estos nanopatrones superficiales por irradiación iónica? Pues bien, cuan-

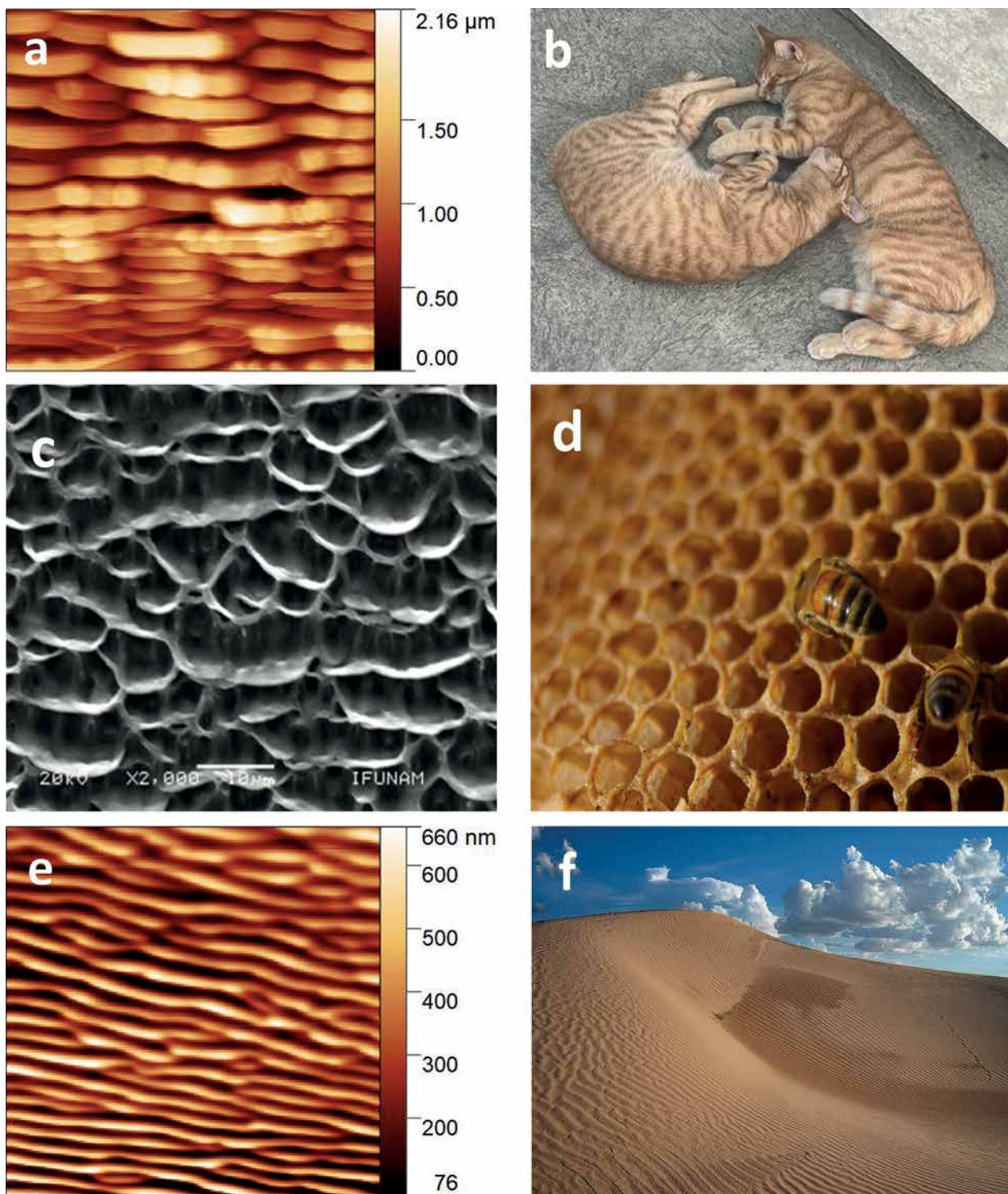


Figura 1. Formación de nanopatrones en superficies de vidrio y dióxido de silicio (SiO_2) irradiadas con iones de silicio y oro, respectivamente (1a, 1c y 1e). Es innegable el parecido con los patrones macroscópicos (1b, 1d y 1f). Créditos: figura 1d, Peter S'hanks; figura 1f, Felix García (ambas imágenes: CC BY 2.0).

do los iones llegan al material objetivo, transfieren gran parte de su energía a los átomos de éste mediante una serie de colisiones. Una imagen bastante conocida que nos puede ayudar a entender lo anterior es la jugada de saque en el billar: la bola blanca que inicia el saque sería el ion incidente, mientras las demás bolas representan los átomos del material objetivo. Por otro lado, debido a que los átomos superficiales están menos enlazados al material que si estuvieran en el interior del mismo –a causa de que arriba de ellos no hay átomo alguno que los enlace–, es posible que, al colisionar con los iones, algunos de ellos sean expulsados desde la superficie del material, es decir, sean erosionados superficialmente. De acuerdo con las teorías físicas más aceptadas, la velocidad con que cierta parte de la superficie es erosionada es proporcional a la energía ahí depositada por todos los iones incidentes.

Ahora bien, ¿qué papel tiene la erosión iónica sobre la forma que toma la superficie? Microscópicamente, todas las superficies son irregulares; es decir, están repletas de depresiones y protuberancias. Durante la irradiación iónica, y por razones meramente geométricas, resulta que la energía depositada por todos los iones es mayor en estas depresiones que en las protuberancias, lo cual implica –de acuerdo con lo dicho arriba– que las primeras se erosionan más rápido que la segundas. Esto significa, en otras palabras, que durante el proceso de irradiación las protuberancias superficiales, en comparación con las depresiones, van a crecer en altura sin parar.

Sin embargo, esto no es lo que pasa realmente porque es *energéticamente costoso*. En el mundo natural todo sistema siempre tomará la configuración que posea la menor energía posible, y una superficie cuyas protuberancias crecen en altura sin parar, sin duda, no cumple con este principio –por esta misma razón los árboles no pueden crecer indefinidamente ni podemos construir rascacielos tan altos como queramos–. Por lo tanto, para que la superficie llegue a un estado energético de mínima energía, debe aparecer un mecanismo que contrarreste el efecto anterior de la erosión superficial; es decir, que limite el crecimiento en altura de las protuberancias superficiales durante la irradiación iónica. Tal mecanismo es el que

corresponde al transporte de materia (masa) desde las protuberancias hacia las depresiones debido al calentamiento de la superficie durante la irradiación iónica (parte de la energía transferida desde los iones hacia los átomos superficiales se da en forma de calor).

Así, mientras el mecanismo de erosión iónica induce el incremento en altura de las protuberancias superficiales, el transporte de masa descrito arriba achataría las protuberancias más altas, manteniendo ambos mecanismos, durante la irradiación iónica, con una especie de equilibrio entre sí. Los nanopatrones superficiales son el resultado de este equilibrio, de esta armonía entre dos mecanismos atómicos que compiten uno con otro para lograr, en última instancia, que la superficie irradiada se encuentre en el estado de menor energía. Y la razón de que los nanopatrones superficiales inducidos por irradiación iónica sean similares a los patrones superficiales macroscópicos es que, en ambos casos, opera el mismo principio de conservación de la energía.

¿Y esto cómo podría aplicarse?

Los nanopatrones superficiales formados por irradiación iónica no sólo son fascinantes por sí mismos, sino que podrían aplicarse para mejorar el rendimiento de ciertos dispositivos que actualmente tienen una gran relevancia tecnológica. Por ejemplo, se ha encontrado que la superficie ondulada que se forma en un vidrio irradiado con argón puede mejorar la eficiencia de conversión de energía luminosa en energía eléctrica, lo cual constituye la principal preocupación en la fabricación de celdas solares. La mejora en la eficiencia de conversión de energía luminosa en energía eléctrica por una superficie ondulada se debe a que la luz solar puede quedar *atrapada* dentro de los valles superficiales de dicha superficie, permitiendo que –en comparación con lo que sucede con una superficie plana– la fracción de luz solar absorbida por la celda (que después se transforma en energía eléctrica) sea mayor.

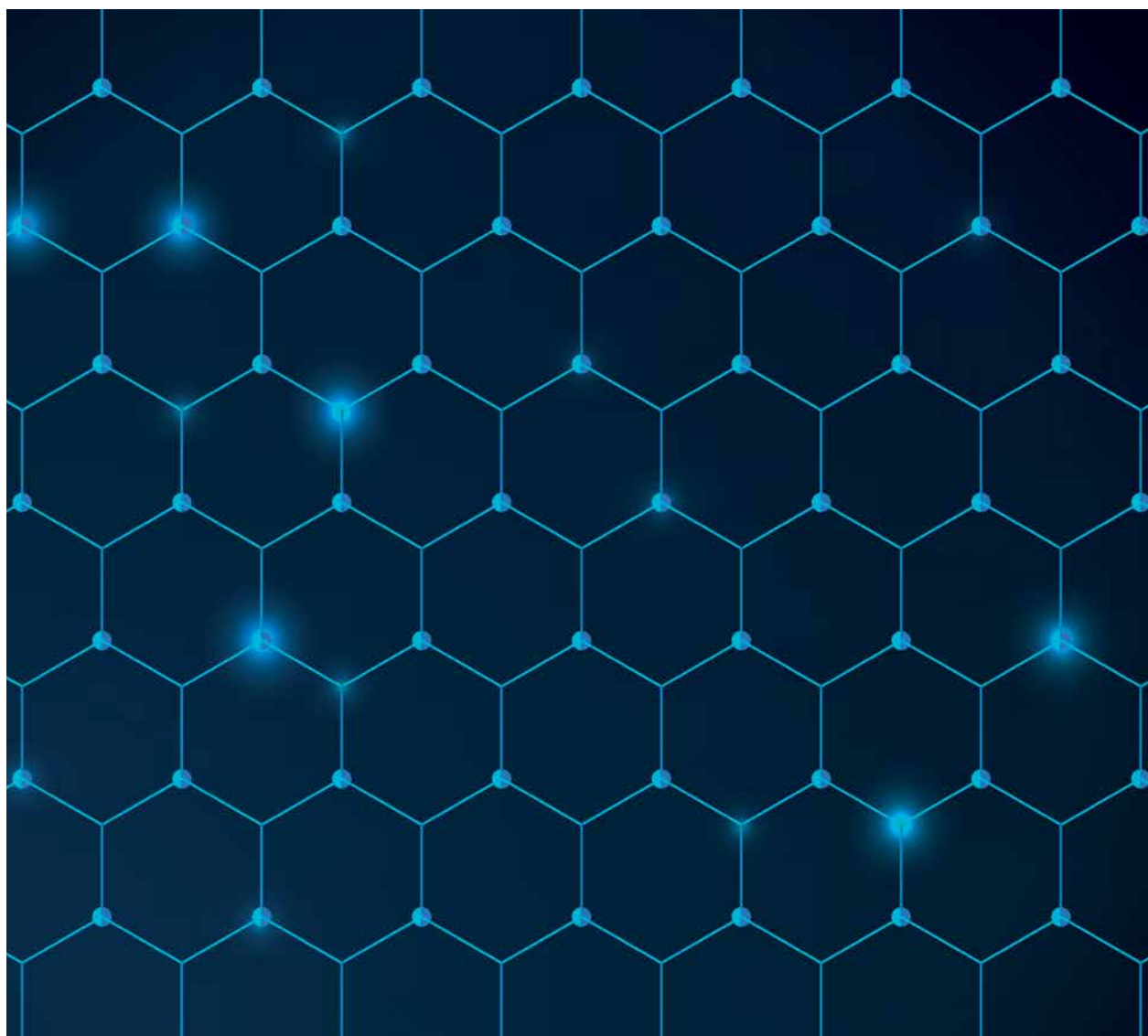
Los nanopatrones superficiales formados por irradiación iónica también podrían aplicarse para alargar la vida útil de los implantes médicos, ya que se ha encontrado que la presencia de un patrón de ondas

o rayas superficiales mejora significativamente las propiedades de osteointegración (proceso biológico donde una superficie sólida se integra al tejido óseo) y anticorrosivas de materiales comúnmente usados para implantes, tales como el acero inoxidable o el titanio. En efecto, en comparación con una superficie plana, la forma ondulada o de rayas de la superficie resulta en un aumento del área efectiva de conexión entre el tejido óseo y el implante, lo que tiene como consecuencia una mejora del proceso de osteointegración.

Además de lo anterior, la irradiación con iones sobre superficies semiconductoras (como la del silicio) puede conducir a la formación de un patrón de nanoagujeros, los cuales se comportan como *puntos*

cuánticos. Específicamente, un punto cuántico se puede entender como un pozo de potencial (con tamaño de pocos nanómetros) donde los electrones del material quedan confinados. Debido a este confinamiento, estas nanoestructuras se rigen por las leyes de la mecánica cuántica, lo que les confiere propiedades optoelectrónicas excepcionales para el desarrollo de sensores de alta precisión y fuentes de luz láser más eficientes. Cabe mencionar que las investigaciones sobre estos puntos cuánticos fueron merecedoras del Premio Nobel de Química en el año 2023.

Finalmente, es posible alinear preferencialmente nanotubos de ADN sobre nanopatrones ondulados en superficies de silicio, lo que permitiría obtener una



disposición ordenada de nanocables funcionales basados en esta biomolécula. Esto último es especialmente relevante para la fabricación de sensores de ADN.

Como es evidente en los ejemplos anteriores, la formación de nanopatrones superficiales por irradiación iónica promete ser una técnica poderosa para la fabricación de superficies funcionales dentro de varias industrias emergentes. ¿En qué otro tipo de aplicaciones se puede pensar? La respuesta depende tanto de nuestra imaginación como de lo bien que sepamos formar patrones superficiales por irradiación iónica. Por lo tanto, es necesario seguir investigando este fenómeno para despertar

nuestra creatividad y enfrentar los desafíos tecnológicos actuales.

Cristian Felipe Cruz García

Instituto de Física de la Universidad Nacional Autónoma de México.

cris-106-fis@ciencias.unam.mx

Luis Rodríguez Fernández

Instituto de Física de la Universidad Nacional Autónoma de México.

luisrf@fisica.unam.mx