

Atrapando la luz: micro-dunas plateadas sobre vidrio por implantación iónica

Catching the light: silver micro-dunes on glass by ion implantation

Cristian Felipe Cruz-García^{1*}

¹Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)

*Autor de correspondencia:
cris-106-fis@ciencias.unam.mx

Recibido: 16-06-2025 Aceptado: 29-04-2026 (Artículo Arbitrado)

Resumen

La formación de patrones superficiales es un fenómeno bastante habitual en el mundo natural. ¿Es posible imitar a la naturaleza y formar, de manera artificial, nanopatrones sobre la superficie de los materiales? Entre las diferentes técnicas para lograr esto se encuentra la implantación iónica, que consiste básicamente en la irradiación iónica de la superficie de los materiales. En este artículo presentamos el estudio de la formación de patrones sobre una superficie de vidrio de sílice implantada con iones de plata de 1.2 MeV. Se observa, mediante microscopía electrónica y de fuerza atómica, la formación de un patrón ondulado (parecido a las dunas del desierto) sobre la superficie del vidrio implantado. Sin embargo, un análisis más cuidadoso mediante microscopía electrónica, junto con estudios de absorción óptica, revela la síntesis de nanopartículas con propiedades plasmónicas sobre las crestas de las ondas. Por lo tanto, la implantación iónica puede utilizarse para la formación de nanoestructuras periódicas superficiales plasmónicas con aplicaciones en fotónica.

Palabras clave: Implantación iónica, patrones superficiales, resonancia de plasmón superficial localizada, nanopartículas de plata, rejilla de nanopartículas.

Abstract

The formation of surface patterns is a common phenomenon in the natural world. Is it possible to imitate nature and artificially form nanopatterns on the surfaces of materials? Among the different techniques to achieve this is ion implantation, which basically consists of ionic irradiation of the surface of materials. In this article, we present the study of pattern formation on the surface of silica glass implanted with 1.2 MeV silver ions. Using electronic and atomic force microscopy, the formation of a ripple pattern (like to desert dunes) is observed on the surface of the implanted glass. However, a more careful analysis using electron microscopy, together with optical absorption studies, reveals the synthesis of nanoparticles with plasmonic properties along the ripple crests. Therefore, ion implantation can be used to form periodic plasmonic surface nanostructures with applications in photonics.

Keywords: Ion implantation, surface patterns, localized surface plasmon resonance, silver nanoparticles, nanoparticle grating.

Introducción

La formación de patrones superficiales es un fenómeno bastante habitual en el mundo natural. Piénsese, por ejemplo, en la formación de dunas sobre el desierto, las manchas en la piel de ciertos animales, como gatos o cebras, o la formación de colmenas con estructura hexagonal por parte de las abejas. ¿Es posible imitar a la naturaleza y formar, de manera artificial, nanopatrones sobre la superficie de los materiales? La respuesta corta es sí. Entre

las diferentes técnicas para lograr esto, se encuentra la implantación iónica, la cual consiste básicamente en la irradiación con iones energéticos sobre la superficie de los materiales. En comparación con otras técnicas afines, de las cuales podemos mencionar aquellas que se basan en el uso de láseres potentes o máscaras litográficas, la implantación iónica tiene las siguientes ventajas. Primero, su gran versatilidad. En efecto, esta técnica puede formar nanopatrones de

ondas, rayas, puntos u hoyos sobre la superficie de una amplia variedad de materiales, como metales, aislantes, semiconductores y polímeros. Segundo, la implantación iónica es una técnica con un alto grado de control y reproducibilidad. Tercero, esta técnica puede formar patrones sobre áreas superficiales relativamente largas (unos cuantos cm^2). Y, cuarto, las muestras del material a implantar no necesitan una preparación especial anterior, lo cual ahorra tiempo y recursos valiosos. Gracias a estas ventajas, actualmente, la formación de patrones superficiales por implantación iónica ha encontrado aplicaciones en células solares, nanofotónica y sensores SERS (Cuerno et al., 2020), ya que la presencia de un patrón superficial puede mejorar la respuesta de ciertas propiedades optoelectrónicas de la superficie, como veremos más adelante.

Desde el punto de vista de la investigación básica, la mayoría de los estudios en este campo se han enfocado en la formación de patrones superficiales usando iones de baja-media energía (0.1-200 KeV) (Chan et al., 2007). Esto ha proporcionado una comprensión casi completa de los procesos físicos fundamentales que rigen la formación de los patrones superficiales, y se entiende bien la dependencia de las características de estos (como su altura o amplitud, su longitud de onda, la rugosidad superficial) con los parámetros de la implantación iónica (tipo y energía de iones, flujo de iones, dosis de iones, etc.). En cambio, los estudios en este campo con iones de alta energía (200 keV - varios MeV) son relativamente escasos (C. F. Cruz-García et al., 2023). Por lo tanto, la formación de patrones superficiales y su evolución se entienden poco para este caso.

Este breve ensayo tiene como objetivo explorar el terreno poco conocido de la formación de patrones superficiales por implantación con iones de alta energía. Para esto, presentamos los resultados de un estudio donde una superficie de vidrio de sílice (SiO_2 en estado amorfo) se implantó con un haz de iones de plata de 1.2 MeV (1 MeV es igual a un millón de eV). Sin embargo, antes se habla con más detalle del proceso de implantación iónica en general. Veremos, además, como los resultados obtenidos podrían tener alguna aplicación en el campo de la nanofotónica plasmónica.

Haciendo ondas superficiales: el proceso de implantación iónica

La formación de nanopatrones superficiales por implantación iónica consta de los siguientes pasos. El primer paso consiste en el proceso mismo de la implantación iónica, el cual consiste (como mencionamos arriba) en la irradiación con iones energéticos de la superficie sobre la cual queremos formar el nanopatrón. Los iones (que recordemos son átomos ionizados, es decir, cargados eléctricamente) son producidos habitualmente por máquinas relativamente complejas llamadas aceleradores. Estos utilizan fuertes campos eléctricos en su interior para acelerar los iones producidos en una fuente externa a ellos. Cuando los iones alcanzan la energía deseada, los aceleradores utilizan los campos magnéticos provenientes de potentes imanes para dirigir estos hacia la superficie a irradiar. La muestra que está siendo irradiada se encuentra dentro de una cámara de implantación que está a una presión muy baja, lo cual significa que hay pocos o nulos contaminantes. Los parámetros de la implantación, como son el tipo y energía de los iones, el flujo iónico (número de iones por unidad de área y tiempo), dosis iónica (número total de iones que llegan a la superficie) y el ángulo de incidencia de los iones, son controlados de manera precisa desde el panel de control del acelerador.

Después de la implantación iónica, el siguiente paso consiste en verificar la formación del patrón superficial. En otras palabras, tenemos que *ver*, en efecto, la formación del patrón sobre la superficie implantada. Para lograr esto no basta con usar microscopios ópticos comunes, sino que es necesario usar microscopios mucho más potentes, con resoluciones de hasta el orden de pocos nanómetros. Los microscopios más usados para este fin son el microscopio de fuerza atómica y el microscopio electrónico. En el primero de estos, la información de la forma superficial se obtiene de las interacciones entre los átomos de la superficie y los átomos de una sonda (en forma de punta) que barre la superficie a analizar. Estas interacciones, que resultan en fuerzas sonda-superficie, se transforman en señales eléctricas que, después de ser analizadas por una computadora, recrean una imagen tridimensional de la superficie analizada. Una analogía con el funcionamiento del microscopio de fuerza atómica es el caminar de una persona que usa

bastón. En este caso, el bastón es la sonda que barre la superficie y el cerebro de la persona es la computadora que recrea como es el suelo por dónde camina. Respecto al microscopio electrónico, este utiliza un haz de electrones, en vez de un haz de luz (fotones), para observar la superficie de los materiales. Debido a que la longitud de onda de los electrones es mucho menor que la de la luz visible, el microscopio electrónico permite alcanzar ampliaciones mayores que el óptico. Finalmente, las imágenes de la superficie obtenidas mediante microscopía de fuerza atómica o microscopía electrónica pueden ser analizadas por un software adecuado para obtener información importante de los nanopatrones superficiales, como su altura desde el sustrato plano, la longitud de onda de estos o la rugosidad superficial.

Nano-ondas de plata sobre la superficie de vidrio

Ya que hemos hablado del proceso de implantación para la formación de nanopatrones superficiales de manera general, vamos ahora a mostrar los resultados del estudio mencionado arriba donde una superficie de vidrio de sílice fue implantada con iones de plata. Los parámetros de la implantación iónica fueron los siguientes. La energía de los iones de plata fue igual a 1.2 MeV, el ángulo de incidencia de los iones sobre la superficie fue 60° , el flujo iónico fue igual a 10^{16} iones sobre centímetro cuadrado por unidad de tiempo y la dosis fue 10^{17} iones sobre centímetro cuadrado. Como podrán notar, es una cantidad muy grande de iones los que llegaron por cada centímetro cuadrado de la superficie, lo cual requiere largos tiempos (hasta 10 horas) de implantación. Finalizada la implantación, la superficie implantada fue observada mediante microscopía electrónica y de fuerza atómica. Las imágenes obtenidas se muestran en la Figura 1.

Se puede observar que sobre la superficie implantada se ha formado un patrón de ondas cuyo parecido a las dunas del desierto es innegable. Sin embargo, en comparación en el caso de bajas-medias energías, donde los patrones tienen dimensiones nanométricas (Chan et al., 2007), las ondas observadas en la Figura 1 tienen dimensiones micrométricas (1 micrómetro es igual a 1000 nanómetros). En efecto, la altura o amplitud de las ondas es de alrededor de 1 micrómetro, mientras que su longitud de onda (distancia de cresta a cresta) es de alrededor de 2.5 micrómetros. Por lo tanto, las dimensiones físicas de los patrones superficiales incrementan junto con la energía de los iones implantados.

La física detrás de los patrones superficiales por implantación iónica

Cuando los iones llegan a la superficie estos chocan con los átomos del blanco como bolas de billar. En el choque, los iones transfieren parte de su energía a los átomos de los blancos pudiendo suceder dos casos. Si los átomos chocados están cerca de la superficie y reciben suficiente energía por parte de los iones para escapar de esta se dice que fueron erosionados. También es posible que los átomos chocados no escapen de la superficie, sino que se muevan a lo largo de la superficie creando así un transporte de masa superficial. Por otro lado, los iones al chocar sucesivamente con los átomos del material van agotando su energía hasta detenerse completamente a cierta distancia de la superficie. Lo cual produce, al aumentar significativamente el número de iones irradiados, una capa de materia en el interior de la muestra que obliga a la superficie a expandirse hacia arriba, es decir, a hincharse. Durante la implantación iónica, estos tres mecanismos de erosión iónica, transporte masa superficial y de implantación de iones se hacen presentes dentro de la dinámica super-

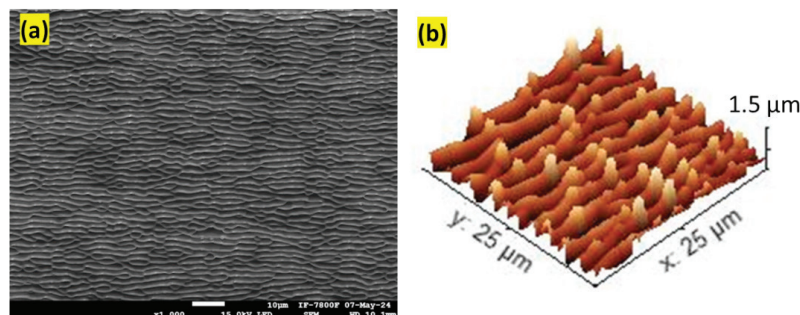


Figura 1. (a) Imagen electrónica y (b) de fuerza atómica (3-D) de la superficie de vidrio sílice implantada con iones de plata.
Fuente: Elaboración propia.

ficial, y compiten entre de si hasta alcanzar un estado de equilibrio, es decir, un estado de mínima energía. La formación de los patrones superficiales son el resultado de este estado de equilibrio, de este estado de armonía entre mecanismos disímiles, donde cada uno actúa por su propio peso.

Actualmente, los anteriores mecanismos han sido incorporados con éxito dentro de un modelo que considera a la superficie como un medio continuo. En este modelo, llamado de Bradley-Harper en honor a sus creadores, la altura de la superficie viene dada por la siguiente función escalar $h(r, t)$, donde $r=(x,y)$ es la posición en un punto de la superficie desde un adecuado sistema de referencia y t es el tiempo de la implantación. De acuerdo con el modelo de Bradley-Harper, la altura h sigue la ecuación diferencial lineal (C. F. Cruz-Garcia et al., 2025) (ver la ecuación (1)).

$$\frac{1}{J} \frac{\partial h}{\partial t} = C_{11} \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + C_{22} \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} \quad (1)$$

Donde J es el flujo iónico y C_{ii} son los llamados coeficientes de curvatura ($i=x,y$) que incorporan el peso de los mecanismos de erosión iónica (ero.), transporte de masa (trans.) e implantación de iones (imp.) como se muestra en la ecuación (2).

$$C_{ii} = C_{ii}^{ero} + C_{ii}^{trans} + C_{ii}^{impl} \quad (2)$$

De este modo, la ecuación (2) integra matemáticamente el peso relativo de estos tres mecanismos en la descripción física del sistema. Dependiendo de cuál de ellos predomine durante el proceso, los coeficientes de curvatura C_{ii} de la ecuación (2) adoptarán valores positivos o negativos en las direcciones x o y .

Cuando alguno de estos coeficientes tome un valor negativo en una dirección específica, se produce una inestabilidad superficial en dicha dirección que da origen a los patrones observados, cuya evolución morfológica estará dictaminada por la ecuación (1).

Ondas plasmónicas

Las ondas superficiales observadas sobre la superficie del vidrio de sílice implantado con iones de plata son de entrada visualmente atractivas (ver Figura 1). Sin embargo, una inspección más cuidadosa nos revela un resultado inesperado. Tal como se puede ver en la Figura 2 (a), a lo largo de las crestas de las ondas, se produce la síntesis de nanopartículas de plata (puntos blancos). Lo cual significa, en términos prácticos, la formación de una rejilla de nanopartículas de plata. El tamaño de las nanopartículas está en el rango de entre 20 y 80 nm.

La relevancia de estas nanopartículas radica en su capacidad de mejorar las propiedades optoelectrónicas de la superficie. Específicamente, las nanopartículas de plata (y realmente de cualquier otro tipo de metal) cerca de la superficie pueden otorgar a esta la capacidad de absorber fuertemente la luz, a través de la llamada resonancia plasmónica superficial localizada (LSPR, por sus siglas en ingles). Cuando la luz incide sobre las nanopartículas de plata, el campo eléctrico de esta induce un movimiento oscilatorio sobre los electrones libres de aquellas. En el caso de que la frecuencia de oscilación de los electrones libres coincide con la de la luz incidente, se produce la LSPR. En una gráfica de absorbancia óptica contra la longitud de onda de la luz incidente, la LSPR se observa como un pico posicionado en la longitud de onda de resonancia. En general, tanto forma del pico LSPR (si es ancho o estrecho) como su posición (lon-

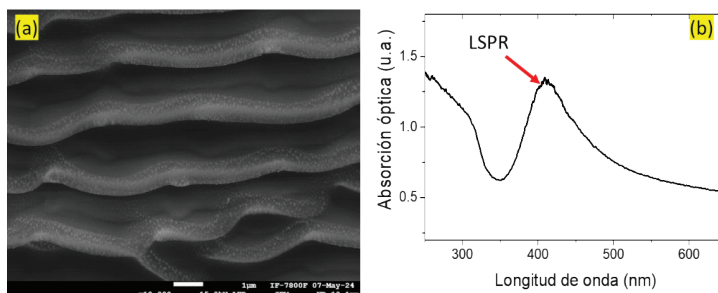


Figura 2. (a) La síntesis de nanopartículas de plata (puntos blancos) se produce a lo largo de las crestas de las ondas, formando una rejilla de nanopartículas. (b) El espectro de absorción de esta rejilla muestra LSPR alrededor de 410 nm.

Fuente: Elaboración propia.

gitud de onda de resonancia) nos dan información sobre el tamaño de las nanopartículas y su composición elemental, respectivamente. Para el caso de nanopartículas con composición de plata, el LSPR se posiciona en la longitud de onda de alrededor de 410 nm (Hao et al., 2004). La Figura 2(b) muestra el espectro de absorción óptica de la rejilla de nanopartículas mostrada en la Figura 2(a). Se puede observar una LSPR posicionada alrededor de 410 nm, lo cual verifica la composición elemental de plata de las nanopartículas. También podemos observar que el pico es relativamente ancho, lo cual está relacionado principalmente con la síntesis de nanopartículas de plata relativamente grandes (tamaño de 80 nm).

Cabe decir, por último, que el análisis de la LSPR es importante pues permite dilucidar las posibles aplicaciones ópticas de nuestra rejilla de nanopartículas. Por ejemplo, un LSPR estrecho podría ser usado en dispositivos optoelectrónicos seleccionadores de determinada longitud de onda. Mientras que un LSPR ancho podría ser utilizado en dispositivos donde se desee absorber la luz en un espectro más amplio de longitud de onda.

Conclusiones

Hemos mostrado, pues, que la implantación con iones de plata de 1.2 MeV sobre vidrio de sílice produce una rejilla superficial de nanopartículas con propiedades plasmónicas. Sin embargo, todavía quedan interrogantes abiertas. Por ejemplo, ¿cuál es la relación de la dosis de irradiación con el tamaño de las nanopartículas de plata? Creemos que si reducimos la dosis de irradiación las nanopartículas serán más pequeñas y con tamaños más uniformes. Si este es el caso, ¿cómo afectará esto a la LSPR de la rejilla de nanopartículas?, ¿el pico LSPR será más estrecho? Etc. Como se puede ya entrever, todavía quedan preguntas abiertas en este campo de investigación. Y si se quiere consolidar a la implantación iónica como una técnica para formar nanopatrones superficiales plasmónicos se debe continuar con el trabajo de investigación básica.

Referencias

- Chan W. L. and Chason E. (2007). Making waves: Kinetic processes controlling surface evolution during low energy ion sputtering. *J. Appl. Phys.* 101 121301.
- Cruz-García C. F., García M. A., Flores-Romero E., Rickards J., de la Vega L. R., Cañetas-Ortega J., Morales-Morales J. G., and Rodríguez-Fernández L. (2025). Self-organized gold nanoparticles on SiO₂ surface nanopatterns induced by MeV ion implantation. (2025). *Superficies Y Vacío*, 38, 250101.
- Cruz-García C. F., Rickards J., García M. A., de la Vega L. R., Cañetas-Ortega J., Morales-Morales J. G., and Rodríguez-Fernández L. (2023). Surface morphology and topography evolution of soda-lime silica glass after 1.0 MeV Si ion bombardment. *Phys. Scr.* 98 105956.
- Cuerno R. and Kim J. S. (2020). A perspective on nanoscale pattern formation at surfaces by ion-beam irradiation. *J. Appl. Phys.* 128 180902.
- Encai Hao, George C. Schatz and Joseph T. Hupp (2004). Synthesis and Optical Properties of Anisotropic Metal Nanoparticles. *Journal of Fluorescence* 14 331.