

10

RESPUESTA
ELECTRO-
MAGNÉTICA DE
NANOAGREGADOS
DE AG EN EL RANGO
DEL ESPECTRO DE
RADIACIÓN SOLAR

Respuesta electromagnética de nanoagregados de Ag en el rango del espectro de radiación solar

*José Vulfrano González-Fernández¹, Ramón Díaz de León-Zapata²,
Jorge Armando Neri-Gómez¹ y Nouari Kébaïli³*

¹Tecnológico Nacional de México/I.T. La Laguna, Blvd. Revolución y Calzada Cuauhtémoc s/n, CP 27000, Torreón, Coahuila, México.

²Tecnológico Nacional de México/I.T. San Luis Potosí, Av. Tecnológico s/n, CP 78437, Soledad de Graciano Sánchez, San Luis Potosí, México.

³Laboratoire Aimé Cotton, CNRS UPR 3321, Bâtiment 505, Université Paris-Sud, Campus d'Orsay, F-91405 Orsay Cedex, France.

Resumen

En este trabajo se investigó la respuesta electromagnética de nanoagregados de Plata en el rango del espectro de radiación solar, los cuales fueron obtenidos por medio de una fuente de agregación en estado gaseoso. La muestra corresponde a una imagen binarizada de AFM. La respuesta electromagnética se obtuvo por medio de simulación numérica utilizando el método del elemento finito. Se encontró que los nanoagregados de Plata con geometría esférica tienen una respuesta en el rango de interés y estos pueden ser utilizados para la formación de complejas estructuras pseudo-2D autoensambladas cuya disposición geométrica permita una mejor respuesta en el rango del espectro solar.

1.Introducción

La búsqueda constante de opciones que compitan con la tecnología basada en Silicio para el aprovechamiento de la energía solar ha abierto las puertas a la investigación de nuevos tipos de celdas solares que prometen una mejor eficiencia sin olvidar el compromiso permanente de competir económicamente con estos dispositivos para producir energía eléctrica.

En la actualidad, se han propuesto dispositivos con diferentes materiales y con ciertas geometrías para ser utilizados como antenas capaces de detectar radiación electromagnética en el cercano infrarrojo (near infrared, NIR) [1]. El espectro de radiación solar

incluye la región del visible y del NIR, ambas consideradas como parte del espectro óptico electromagnético o luz. La longitud de onda asociada en este rango oscila alrededor de la unidad de micrómetros, esto implica que para que los dispositivos sean capaces de detectar estas longitudes de onda, deben tener dimensiones similares para entrar en resonancia y capturar estas ondas.

Estas estructuras de orden nanométrico, llamadas también nanoantenas, han sido objeto de ingeniería para optimizar su resonancia en los rangos de interés según su aplicación [2]. Su funcionamiento se basa en la obtención de electricidad a partir de la diferencia de temperatura alcanzada en un área central y las dos terminales de conexión. El principio físico que gobierna esta conversión de energía térmica en energía eléctrica es el efecto Seebeck.

La complejidad de los fenómenos electromagnéticos al interactuar entre sí o con la materia obliga a que las ecuaciones que definen estos sistemas sean resueltas por métodos numéricos. Si además se desea estudiar la manera en que la interacción electromagnética causa otras respuestas físicas, como cambios de temperatura o deformaciones mecánicas, se trata de fenómenos

multifísicos que requieren en definitiva de un software especializado que cubra esa característica.

COMSOL Multiphysics es una plataforma que permite llevar a cabo simulaciones considerando diferentes aspectos y variables físicas, que a su vez resulta particularmente conveniente para el estudio electromagnético ya que aplica el método del elemento finito (finite element method, FEM) con lo que, desde el punto de vista computacional, la transformación de las ecuaciones diferenciales a matrices de órdenes proporcionales al número de elementos finitos en que se divide el espacio geométrico del campo electromagnético, resulta en requerimientos de hardware menos exigentes que otros métodos ya que se requiere más cantidad de memoria RAM que de capacidades del microprocesador.

La flexibilidad que proporciona el programa COMSOL Multiphysics, permite agregar y adecuar los más recientes descubrimientos sobre fotónica y nanoarquitecturas a las simulaciones numéricas que se requieren para la presente investigación con lo que se tiene la capacidad para analizar y predecir comportamientos de las geometrías planteadas y con ello optimizar el tiempo

en las etapas de diseño, fabricación y caracterización.

En este trabajo se propone estudiar clústeres nanométricos o nanoagregados de Plata (Ag nanoagregates, AgNAs) por medio de simulación multifísica aplicando el FEM e implementada en COMSOL Multiphysics [3]. El objetivo de estudiar estas estructuras metálicas es que, dependiendo de las condiciones de deposición, estas pueden autoensamblarse y formar estructuras complejas como geometrías fractales con diferentes morfologías, materiales y dimensiones con una alta reproducibilidad [4]. Existe un gran potencial de escalamiento de estas estructuras que permitiría fabricar dispositivos que compitan en el ámbito del aprovechamiento del recurso solar.

2. Metodología

La muestra de los AgNAs utilizada en este trabajo fue producida en una cámara con un alto-vacío de 10^{-9} torr. En estas condiciones, una fuente de agregación en estado gaseoso genera los AgNAs con características específicas y son depositados con una baja energía de impacto de 0.05 eV/átomo. La distribución volumétrica fue controlada utilizando un espectrómetro de masas de tiempo de

vuelo para garantizar el tamaño preciso requerido de los AgNAs. La intensidad del haz de material producido es monitoreada por una microbalanza de cuarzo y el tiempo del experimento típicamente es de entre 4 y 10 minutos dependiendo del flujo del material y de la cobertura del sustrato que se desee obtener.

Los AgNAs fueron observados a través de microscopía de fuerza atómica (atomic force microscopy, AFM) en condiciones controladas en un cuarto limpio. Las imágenes obtenidas fueron binarizadas para contar con un mapeo de los materiales que sirve de entrada para el software de simulación. Se contempló realizar la simulación en 2-dimensiones espaciales por simplicidad. Posteriormente, el software COMSOL Multiphysics realiza un mallado en el que el nivel de detalle está basado en un análisis de prioridad espacial para mejorar la solución de las ecuaciones multifísicas que contiene acopladas internamente para la aplicación del FEM.

3. Resultados

La imagen obtenida por AFM y mostrada en la Fig. 1a) contiene nueve AgNAs con simetría esférica y con dimensiones que van desde 15 hasta 35 nm de radio. La microscopía fue realizada en condiciones

controladas en un cuarto limpio.

Para la obtención de la Fig. 1b), primero se realizó la binarización de la imagen y posteriormente el mallado. Para la simulación se contempló ampliar la distancia entre los AgNAs y la frontera de la imagen, esto con el objetivo de evitar interacciones con los bordes o límites de la imagen.

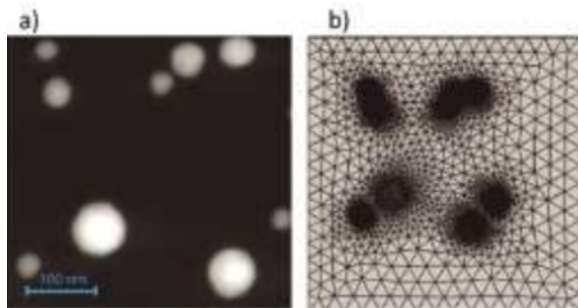


Figura 1. a) Imagen por AFM de nueve AgNAs depositados; b) Mallado para el FEM aplicado a la geometría de los AgNAs en donde se aprecia un mallado más detallado basado en un análisis de prioridad.

En la Fig. 2 se observa la respuesta de la muestra a la radiación correspondiente al rango del espectro solar del cual se seleccionaron cinco longitudes de onda: 500, 1000, 1500, 2000 y 2500 nm.

Se contempló reportar el campo eléctrico normalizado con la intención de observar con más claridad en qué parte de la muestra recaería la mayor interacción de la radiación- materia con los diferentes AgNAs.

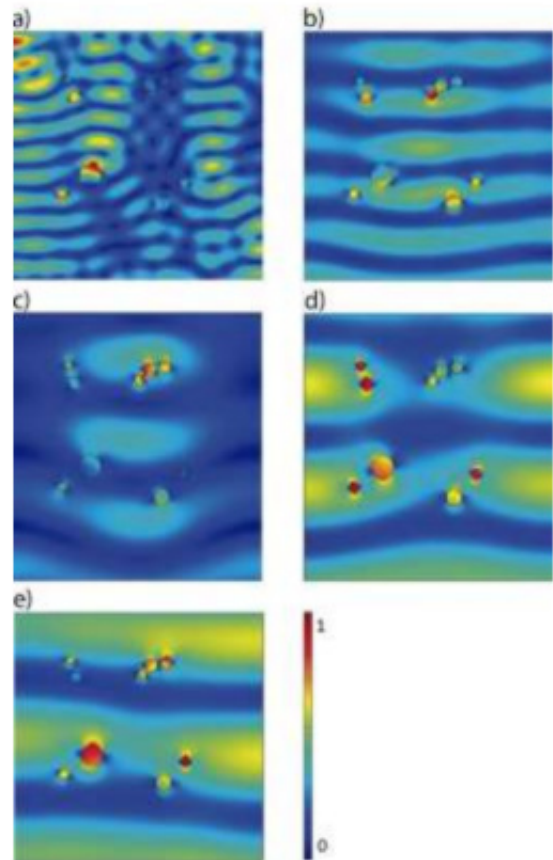


Figura 2. Respuesta de la geometría de la muestra completa de AgNAs al campo eléctrico normalizado para: a) 500 nm, b) 1000 nm, c) 1500 nm, d) 2000 nm y e) 2500 nm, correspondientes a longitudes de onda dentro del espectro de radiación solar.

Adicionalmente, se observan patrones de interferencia inherentes al fenómeno, notoriamente en la Fig. 2 a) y b), debido a que el rango de longitud de onda de la radiación es comparable con las dimensiones de las estructuras.

Típicamente se utilizan nanoagregados con dimensiones menores de 50 nm de radio para formar estructuras por autoensamble, se realizó el estudio de simulación al AgNA señalado en la Fig. 3a) en cuyo caso su radio es de 35 nm. Se tuvo la precaución de colocar la frontera de la simulación alejada del objeto de estudio. El mallado correspondiente se observa en la Fig. 3b) y cuyo nivel de detalle es mucho mayor que el utilizado anteriormente debido a la simplicidad del AgNA en la sección de la muestra.

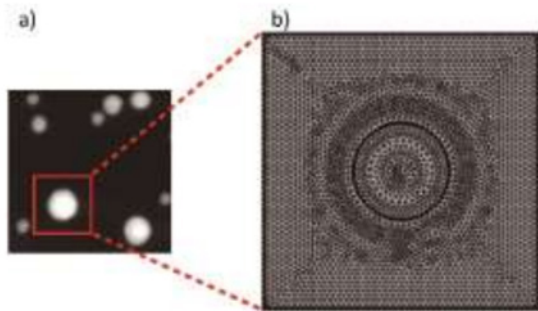


Figura 3.a) Selección de un AgNA cuyo radio es de 35 nm y con simetría circular ajustados a un modelo bidimensional; b) Mallado correspondiente del AgNA seleccionado para aplicar la solución por el FEM.

La simulación individual del AgNA se muestra en la Fig. 4 considerando las mismas longitudes de onda utilizadas anteriormente.

La intensidad del campo eléctrico para estos materiales y geometrías es mayor

para las longitudes de onda de 500, 1000, 2000 y principalmente en 2500 nm. Es notorio que en la Fig. 4c) la intensidad del campo eléctrico es mayor en el sustrato que en el AgNA.

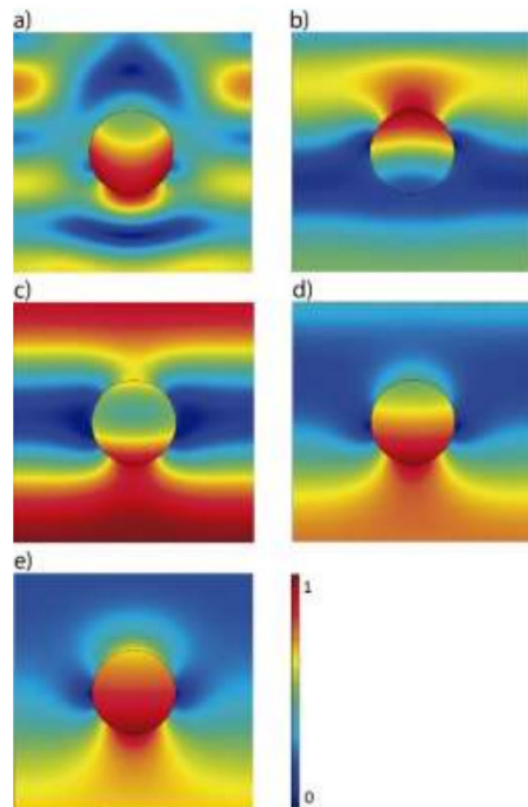


Figura 4. Respuesta detallada del AgNA seleccionado previamente al campo eléctrico normalizado para: a) 500 nm, b) 1000 nm, c) 1500 nm, d) 2000 nm y e) 2500 nm. La barra de colores indica el código de la amplitud relativa normalizada del campo eléctrico.

Derivado de las interacciones observadas tanto en la muestra completa como en el AgNA individual, es posible que, si este conformara una estructura compleja,

entonces contribuiría positivamente en la captación de las longitudes de onda correspondientes al rango del espectro de radiación solar, dando pie al análisis de arquitecturas con potencial de aplicación para el aprovechamiento solar.

4. Conclusiones.

La importancia del análisis de estructuras con potencial de detección de radiación a través de la simulación aplicando el método del elemento finito radica en que se puede anticipar una curva de respuesta favorable en el rango de aprovechamiento solar utilizando nanoagregados de Plata, que conformarían estructuras complejas autoensambladas como los nanofractales, para generar dispositivos como antenas termoeléctricas que permitan coleccionar y aprovechar ese calor para convertirlo en electricidad a través del efecto Seebeck.

Agradecimientos

Se agradece a la Red Temática de Energía Solar de CONACYT por el apoyo económico para la realización de la estancia corta de investigación en el Instituto Tecnológico de San Luis Potosí. JVGF agradece a A. Dena por el apoyo técnico otorgado, a la Unidad Especializada en Energías Renovables (UEER, proyecto 261600) y a la Secretaría de Ciencia, Tecnología e Innovación de la Ciudad de México (SECITI-CDMX).

REFERENCIAS

- [1] E. Briones, J. Briones, A. Cuadrado, J.C. Martínez-Anton, S. McMurtry, M. Hehn, F. Montaigne, J. Alda y F.J. Gonzalez, «Seebeck nanoantennas for solar energy harvesting», *Appl. Phys. Lett.*, 105, 2014.
- [2] L. Novotny y N. Van Hulst, «Antennas for light», *Nature Photonics*, 5, 2011.
- [3] R. Díaz de León-Zapata, J.V. González-Fernández, E. Flores-García, A. B. De la rosa-Zapata y I. Lara-Velázquez, «Multi-objective evolutionary algorithm as a method to obtain optimized nanostructures» *Eur. Phys. J-Appl. Phys.*, 2018, aceptado.
- [4] I.A. Solov'yov, A.V. Solov'yov, N. Kébaïli, A. Masson y C. Bréchigna, «Thermally induced morphological transition of silver fractals», *Phys. Status Solidi B*, 251, 2014.