

Campo electromagnético amplificado con nanoestructuras de geometría estelar

Ivan Alberto Cruz García¹, Ramón Díaz de León-Zapata^{1*}, Ariel B. de la Rosa Zapata¹,
Efrén Flores García¹, José Vulfrano Gonzalez Fernández², Francisco Javier González³

¹ Tecnológico Nacional de México/I.T. San Luis Potosí, Av. Tecnológico s/n, Soledad de
Graciano Sánchez, San Luis Potosí, México.

² Tecnológico Nacional de México/I.T. La Laguna, Blvd. Revolución y Calzada
Cuauhtémoc s/n, CP 27000, Torreón, Coahuila, México.

³ Coordinación para la Innovación y Aplicación de la Ciencia y la Tecnología
(CIACyT), CIACyT—UASLP, Álvaro Obregón 64, San Luis Potosí, S. L. P., México.

*e-mail: ramon.diazdeleon@tec.itslp.edu.mx

Resumen

Se presenta el estudio de nanoantenas de geometría estelar como elementos plasmónicos amplificadores y direccionales del campo electromagnético. El estudio se llevó a cabo con análisis numérico basado en la técnica del elemento finito. Fueron analizados varios materiales, dimensiones arreglos geométricos y frecuencias para la simulación y el análisis de datos. La geometría estelar fue elegida con base en la propiedad de autoensamblado de los materiales de plata-óxido de zinc (Ag-ZnO). La direccionalidad y la amplificación del campo eléctrico fueron simulados tanto en campo cercano como en campo lejano.

Adicionalmente se discuten algunas aplicaciones de estas nanoestructuras.

Palabras clave: Nanoestructura, Resonancia Plasmónica, Nanoantenas.

Abstract

A study of star shaped nanoantennas as directional and enhancer electric field is presented. It is based on a numerical simulation technique using the Finite Element Method (FEM). Multiple materials, sizes, arrangements and frequencies are used for simulation and data analysis. The star shaped geometry is selected based on the natural auto assembled property of Ag-ZnO materials. Directionality and enhancement of electric field are tested in both, near and far field. In addition, some applications for those nanostructures are discussed.

Key Words: Nanostructure, Plasmonic Resonance, Nanoantennas.

1. Método

Aplicando la técnica del elemento finito [1] a la geometría y asumiendo el modelo de Drude-Lorentz [2] para el comportamiento de las ondas electromagnéticas que inciden sobre la estructura, se resuelve por cálculo numérico la ecuación (1).

$$\nabla \times \mu_r^{-1}(\nabla \times \mathbf{E}) - k_0^2(\epsilon_r - \frac{j\sigma}{\omega\epsilon_0})\mathbf{E} = \mathbf{0} \quad (1)$$

Dado que el rango de frecuencias de interés (régimen óptico) abarca el rango infrarrojo y el segmento de los terahertz, así como las dimensiones y características de los brazos de la geometría, el tamaño del elemento finito mínimo necesario para asegurar la calidad de la simulación se ha estimado en 3 nm, y un máximo de 70 nm, dando un mallado total 393,138 elementos.

2. Materiales y técnicas de fabricación

Los nanoalambres de crecimiento autoensamblado de ZnO sobre plata (Ag) pueden ser fabricados con precisión y fácilmente [3]. Algunos estudios realizados sobre estas estructuras se han llevado a cabo como en [3, 4]. Dado que la geometría estelar muestra interacciones interesantes con el campo electromagnético en el régimen óptico, se propone en el presente trabajo, adaptar la geometría autoensamblada para analizarla numéricamente con el fin de corroborar sus propiedades plasmónicas de interés y optimizar su ulterior proceso de fabricación por el método de litografía por haz de electrones [5], método que resulta más conveniente para generar nanoantenas superficiales que es una de las posibles aplicaciones (aunque no limitada a ella) y que será discutida más adelante en este trabajo. Recubriendo la estructura original autoensamblada de Ag-ZnO (fig. 1a) con oro (Au) (fig. 1c) es posible cambiar y ajustar la interacción del campo electromagnético permitiendo manipular a discreción su amplificación y direccionalidad como se demuestra más adelante.

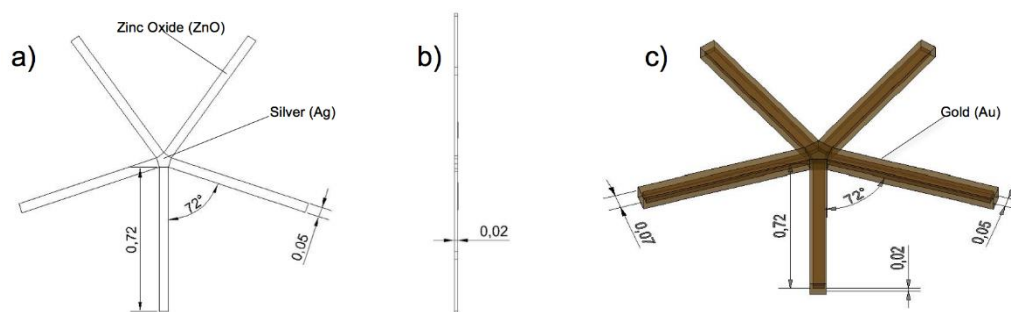


Figura 1. Tres diferentes vistas de la estructura plasmónica propuesta y sus materiales: (a) Vista superior, (b) Vista lateral, y (c) Vista isométrica transparente con recubrimiento de oro (nótese la estructura original en el centro). Las dimensiones están en micras (μm).

3. Resultados

Como se sugiere en [3], esta geometría presenta un comportamiento tipo Yagi-Uda

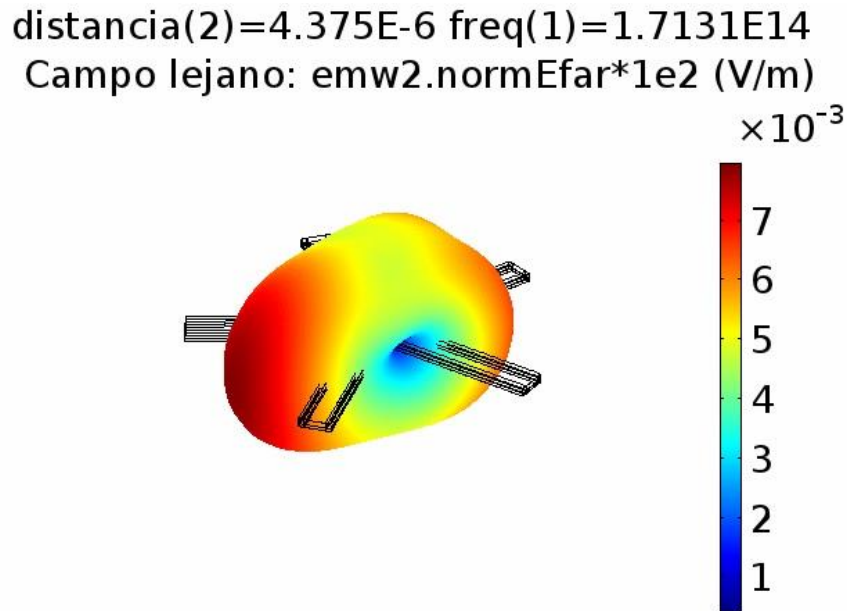


Figura 2. Comportamiento Yagi-Uda de la nanoestructura de geometría estelar en su campo electromagnético lejano.

La figura 3 muestra el campo cercano, donde puede apreciarse que los brazos proporcionan la direccionalidad respectiva. Nótese que los brazos que presentan la menor concentración de campo eléctrico ayudan a impulsar el campo hacia la izquierda. Los dos brazos de la izquierda ayudan a concentrar y direccionar el campo eléctrico.

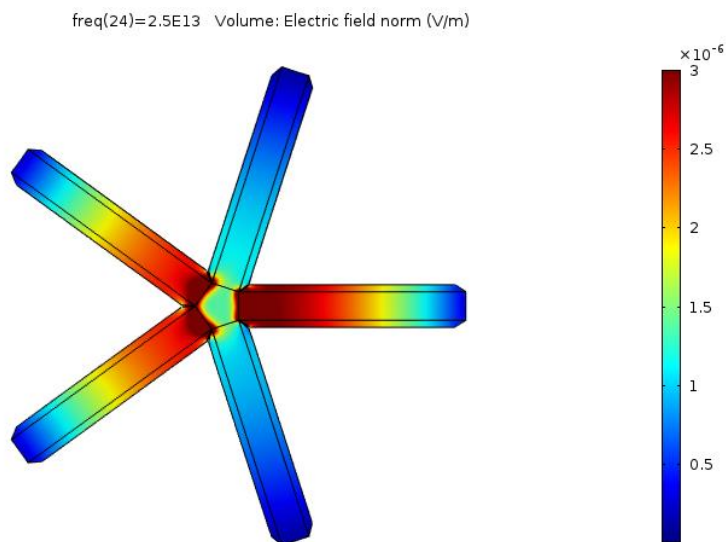


Figura 3. Comportamiento direccional de la nanoestructura de geometría estelar en su campo electromagnético cercano.

La figura 4 muestra el barrido en frecuencias al que fue sometida la estructura. En la gráfica se observa que la máxima resonancia se encuentra en 25 THz.

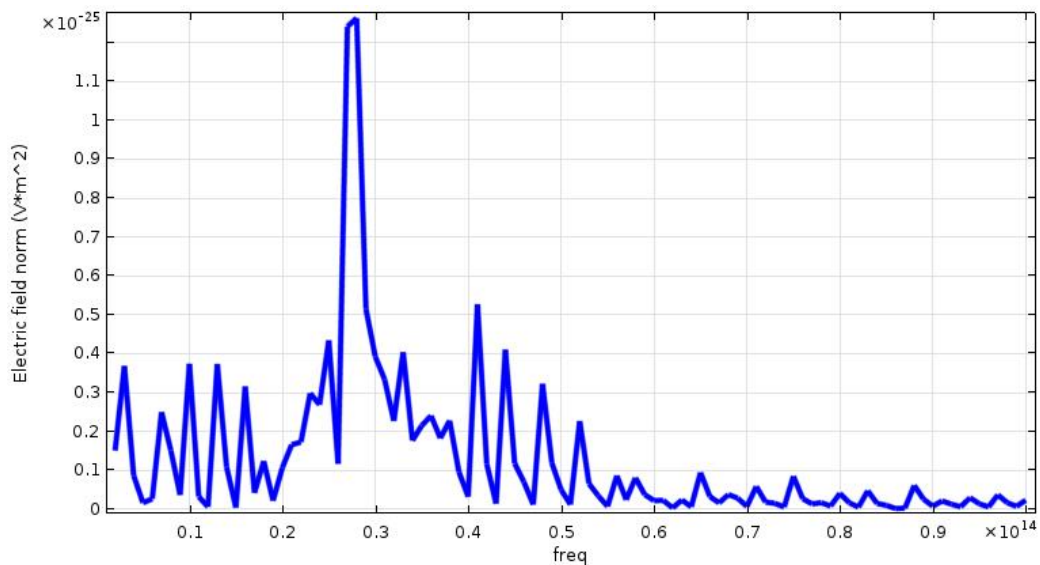


Figura 4 Comportamiento direccional de la nanoestructura de geometría estelar en su campo electromagnético cercano.

4. Discusión

La fabricación de nanoestructuras de geometría estelar con cubierta final de oro, tanto tridimensionales (por autoensamble) como bidimensionales (por litografía) resulta relativamente sencilla y su análisis electromagnético en el rango óptico revela un comportamiento plasmónico (amplificación y direccionalidad) que es posible controlar según el grosor de la capa de oro depositada.

El comportamiento observado encuentra una prometedora aplicación en interruptores ópticos [6] ya que la polarización del campo electromagnético es dirigido hacia un par de brazos en particular y alejándolo de los adyacentes, por lo que es posible permitir o inhibir el flujo de otros campos electromagnéticos que se encuentren en la ruta de al menos dos de estas estructuras ubicadas en contraposición una de la otra. El control del interruptor quedaría definido por la polaridad de incidencia normal sobre la estructura.

Otra aplicación prometedora aprovecharía la combinación de materiales y la distribución pentagonal de los brazos para generar, por efecto Seebeck [7] una diferencia de temperatura que a su vez causaría una diferencia de potencial, provocando una corriente eléctrica útil para alimentar compactos circuitos electrónicos capaces de funcionar con fuentes de calor sin necesidad de baterías convencionales.

La disposición de los brazos (ángulo) y su cantidad (pentágono) no es posible modificarlo en el caso de la estructura autoensamblada, sin embargo, por métodos litográficos es posible reajustar libremente la geometría, por lo que el estudio de nuevas geometrías que se ajusten con mejor precisión a los requerimientos o aplicaciones

propuestas es un trabajo futuro que llevará a cabo el presente grupo de investigación, en particular geometrías estelares de tres brazos.

Referencias

- [1] E. Süli, "Lecture Notes on Finite Element Methods for Partial Differential Equations," ed. United Kingdom: University of Oxford, 2012.
- [2] S.-Y. Ding *et al.*, "Nanostructure-based plasmon-enhanced Raman spectroscopy for surface analysis of materials," *Nature Materials*, vol. 1, no. 16021, 2016.
- [3] J. E. Sanchez *et al.*, "Electric radiation mapping of silver/zinc oxide nanoantennas by using electron holography," *Journal of Applied Physics*, vol. 117, no. 034306, 2015.
- [4] J. E. Sanchez *et al.*, "Resonance properties of Ag-ZnO nanostructures at terahertz frequencies," *Optics Express*, vol. 23, no. 19, 2015.
- [5] C. Vieu, "Electron beam lithography: resolution limits and applications," *Applied surface science*, vol. 164, no. 1-4, pp. 111-117, 2000.
- [6] G. Zhanzhi, L. Liangjun, Z. Linjie, S. Lin, and C. Jianping, "16 x 16 Silicon Optical Switch Based on Dual-Ring-Assisted Mach-Zehnder Interferometers," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 36, no. 2, p. 8, 2018.
- [7] E. Briones *et al.*, "Seebeck Nanoantennas for Solar Energy Harvesting," *Applied Physics Letters*, vol. 105, 2014.