

Caracterización Numérica de las Propiedades Electro- Ópticas del Efecto Fano en Nanoantenas

Ramón Díaz de León Zapata

Instituto Tecnológico de San Luis Potosí

ramondz@hotmail.com

Efrén Flores García

Instituto Tecnológico de San Luis Potosí

ramondz@hotmail.com

Ismael Lara Velázquez

Instituto Tecnológico de San Luis Potosí

ramondz@hotmail.com

Francisco Javier González Contreras

Universidad Autónoma de San Luis Potosí

ramondz@hotmail.com

Gabriel González Contreras

Universidad Autónoma de San Luis Potosí

ramondz@hotmail.com

Resumen

Se expone la Simulación Numérica (SN) por el Método del Elemento Finito (MEF) de nanoestructuras estilo dipolo básico sujetas a un incremento del campo electromagnético incidente aprovechando las propiedades del Efecto Fano (EF) para caracterizar sus propiedades electro-ópticas que pueden ser usadas como nanoantenas en el régimen de operación óptico para la captación y

conversión de las ondas electromagnéticas de la luz en corriente directa. Se concluye que con el uso de nanopartículas esféricas dentro de cavidades resonantes, se logra concentrar mayor cantidad de campo electromagnético en el centro de la nanoantena, incrementando así su eficiencia.

Palabras Clave: Efecto Fano, Método del Elemento Finito, Nanoantenas, Simulación Numérica.

1. Introducción

Las antenas han sido usadas por más de una centuria para controlar la emisión y recolección de radiación de ondas y microondas. Las antenas tradicionales han sido diseñadas con dimensiones proporcionales a la longitud de onda de resonancia [1]. Las nanoestructuras con geometrías similares a las de las antenas tradicionales resonarían a frecuencias o longitudes de onda ópticas, haciéndolas efectivas para ser usadas en el control de la absorción y emisión a escala nanométrica [2].

Las nanopartículas metálicas poseen además modos de resonancia plasmónica en longitudes de onda ópticas, por lo que las nanoestructuras fabricadas resultan ser antenas ópticas por naturaleza [3]. Aprovechar estos fenómenos resonantes permiten incrementar significativamente la concentración de campo electromagnético en la nanoantena, en particular si se le fabrica una cavidad de resonancia plasmónica de Efecto Fano [4].

Las aplicaciones de estos dispositivos abarcan desde las telecomunicaciones hasta el diagnóstico médico por termografía, pasando por el aprovechamiento de la energía lumínica y calorífica para ser transformada en energía eléctrica.

2. Método

Usando el programa COMSOL Multiphysics®, se realizan los cálculos por el Método del Elemento Finito (MEF) para dar solución a la caracterización electro-óptica de las nanoestructuras entre las que se incluyen las nanoantenas y las cavidades resonantes.

La intensidad I del campo electromagnético en la estructura tridimensional de la

nanoantena es calculado resolviendo las ecuaciones diferenciales parciales según la ecuación 1.

$$I_{\vec{E}}(x, y, z) = \left(\mu_0 \int_s \left(\vec{J} + \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right) d\vec{a} \right) / \oint (\vec{B} \cdot d\vec{l}) \quad (1)$$

El fenómeno de resonancia Fano se presenta únicamente de manera controlada a escalas nanométricas y al ser un fenómeno óptico, es a través del índice de refracción de los materiales que se posee la capacidad del modelado matemático según la ecuación 2.

$$n(f) = \sqrt{\epsilon \mu_r}$$

En el caso particular del oro, que es el material de la nanoesfera y la nanoantena misma, la ecuación 3 permite modelar el comportamiento del índice de refracción a frecuencias ópticas [5].

$$n(f) = -0.5097680004322286 - \frac{(3.0508946281044503 \times 10^{40})}{(f^3)} + \frac{(8.694327295404505 \times 10^{27})}{(f^2)} + \frac{7.071831942548983 \times 10^{13}}{f} + j(-0.8507140979084992 + \frac{3.494475566745883 \times 10^{39}}{f^3} - \frac{5.767704394113701 \times 10^{27}}{f^2} + \frac{2.209462903239641 \times 10^{15}}{f}) \quad (3)$$

Se ha caracterizado en primer lugar la cavidad resonante con base en una adaptación al trabajo de Zhendong et al [6] para adecuarlo a las dimensiones y resonancia de las nanoantenas de nuestro interés (ver figura 1).

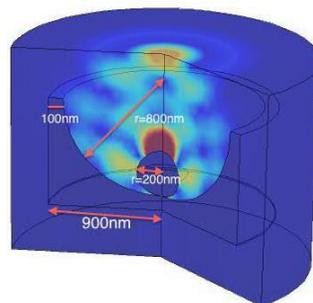


Figura 1 Geometría y dimensiones de la cavidad resonante para explotar las propiedades del Efecto Fano.

El material con la cavidad es un conductor al que se le ha colocado en el centro una nanopartícula esférica de oro que en conjunto proveerán el Efecto Fano. El cilindro que cubre por completo la nanoestructura es únicamente una herramienta necesaria para la simulación que otorga un espacio finito para el cálculo de las soluciones a las ecuaciones diferenciales parciales y la ubicación (en el techo del cilindro en este caso particular) de la fuente de radiación electromagnética.

En la figura 2 se aprecia una comparativa que demuestra cualitativamente la presencia de la resonancia Fano cuando la esfera es colocada dentro de la cavidad. Ambas simulaciones fueron realizadas a la misma frecuencia de la fuente de radiación electromagnética (500THz, frecuencia de resonancia).

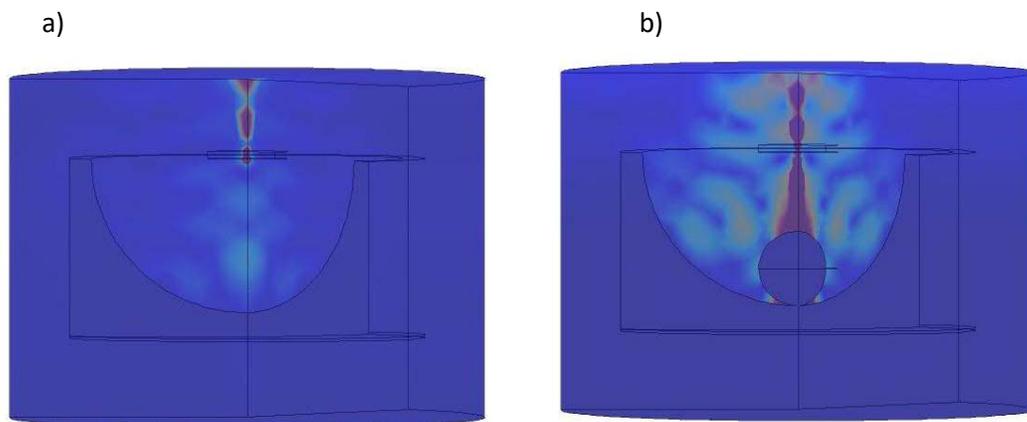


Figura 2 (a) Cavidad resonante sin la presencia de la esfera donde no se aprecia el Efecto Fano. (b) Cavidad resonante con la nanoesfera de oro que Provoca la resonancia Fano. Ambas simulaciones llevadas a cabo con la misma frecuencia de 500THz (frecuencia de resonancia).

También en la figura 2 puede notarse que se ha colocado una nanoestructura de oro justo en la superficie donde inicia la cavidad y que, con respecto a la figura 1, el campo electromagnético es distorsionado dirigiéndolo a la base de la nanoantena, siendo entonces alimentada tanto por la fuente de radiación ubicada en el techo del cilindro, como por la resonancia producida por el Efecto Fano dentro de la cavidad. La figura 3 ilustra esta comparativa, además de incluir

el dipolo sin ninguna nanoestructura adicional.

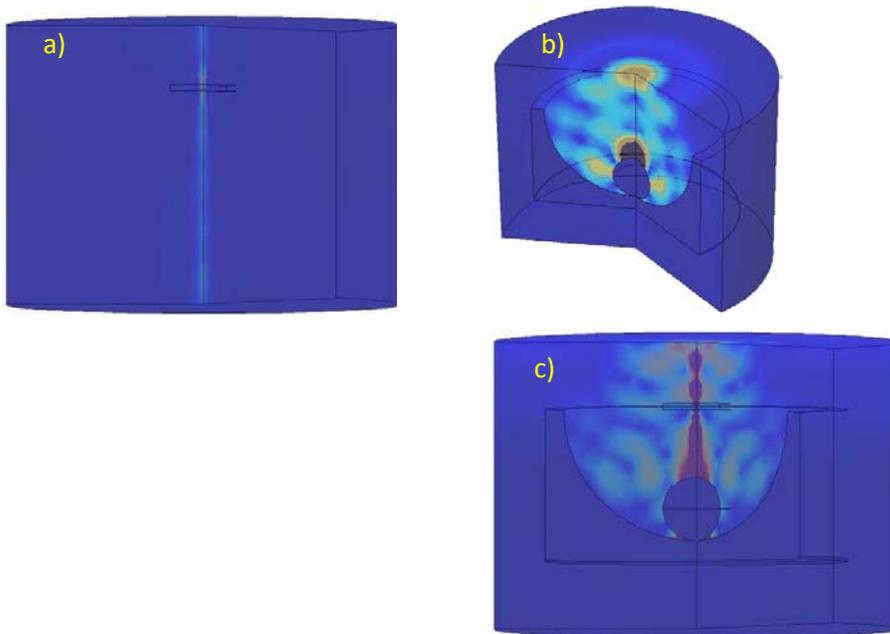


Figura 3 (a) Nanoantena sin ninguna estructura adicional, (b) Cavidad resonante sin la presencia de la nanoantena donde se aprecia que la resonancia Fano se concentra alrededor de la nanoesfera, (b) Cavidad resonante con la nanoantena donde se aprecia que el campo electromagnético generado por el Efecto Fano se dirige y concentra en la parte inferior de la nanoantena.

La nanoantena colocada al centro y al comienzo de la cavidad, es entonces expuesta a tres procesos que coadyuvan a incrementar el campo electromagnético incidente, por un lado la fuente natural de radiación proveniente del exterior de la cavidad, por otro lado la fuente de radiación redirigida hacia la nanoantena por efecto parabólico de la geometría de la cavidad y finalmente por el Efecto Fano que provoca la adición de la nanoesfera de oro dentro de la cavidad. Lograr la máxima concentración de campo electromagnético en la nanoantena tiene utilidad, entre otras cosas, para la generación de corriente directa a través de la conversión de energía electromagnética en el régimen óptico de los Terahertz al aprovecharse el efecto Seebeck si la nanoantena es construida como un dipolo bimetalico con materiales que tengan coeficientes Seebeck de signo opuesto [3, 7, 8].

3. Resultados

La figura 4 muestra la gráfica comparativa de la intensidad de campo electromagnético (normalizado) sobre la nanoantena en tres escenarios posibles: En línea verde (con marcas triangulares), la nanoantena sin ningún método que provea un incremento en el campo electromagnético incidente; en línea azul (marcas rómbicas), con la cavidad resonante sin la esfera que provee el Efecto Fano y en línea roja (marcas cuadradas) con la cavidad resonante y la nanoesfera de oro que provoca el Efecto Fano. Nótese en la gráfica que la frecuencia de resonancia Fano se encuentra en los 500 THz; la frecuencia de resonancia de las otras combinaciones se desplazan hasta los 600 THz como consecuencia de haber retirado la esfera y la cavidad.

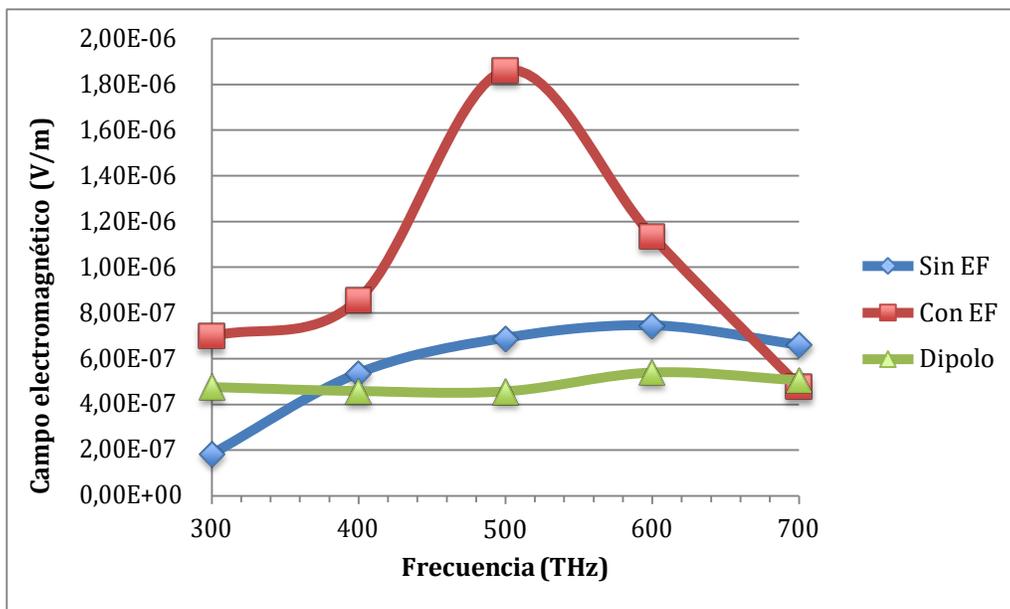


Figura 4. Intensidad del campo electromagnético (normalizado) para los distintos casos en que se llevaron a cabo las simulaciones. En línea verde (marca triangular) nanoantena sin estructuras adicionales. En línea azul (marca rómbica) nanoantena sin resonancia Fano. En línea roja (marca cuadrada) nanoantena con resonancia Fano.

De la figura 4 se puede apreciar que, gracias a la adición de la nanoestructura resonante que provoca el Efecto Fano, la concentración de campo electromagnético es la máxima y se demuestra que la influencia de la geometría

parabólica por sí sola no lo logra, situación que además no es posible trasladar a escalas macroscópicas en antenas convencionales de radio frecuencia, pues el fenómeno se produce sólo a niveles nanoscópicos a frecuencias ópticas del campo electromagnético.

4. Discusión

Las antenas por sí mismas, son estructuras que captan o emiten radiación electromagnética con eficiencia óptima en su frecuencia de resonancia. Para el caso particular de la radiación electromagnética en régimen considerado óptico, las geometrías de las antenas deben tener dimensiones nanométricas (de ahí su denominación como nanoantenas) lo que hace necesario incluir en el análisis numérico, fenómenos físicos como la resonancia de plasmones y la resonancia Fano entre otras (que no es posible observar en antenas convencionales para radio frecuencia) y que ofrecen la ventaja de incrementar hasta en un orden de magnitud la concentración del campo electromagnético en la nanoantena como lo han demostrado las simulaciones. Tal incremento en la concentración del campo electromagnético también genera una distorsión en él y permite proponer aplicaciones tan variadas como la fabricación de dispositivos que aprovechen la luz y/o el calor para co-generar corriente eléctrica, modular señales útiles en telecomunicaciones a frecuencias de Tera Bits por segundo (TB/s), detección de las variaciones del patrón de radiación en frecuencias de Terahertz como consecuencia de enfermedades en humanos, animales y plantas sin la necesidad de usar radiación ionizante como los rayos X, etc. Con los resultados obtenidos por simulación numérica en la presente investigación, se pretende contribuir en el entendimiento de la física asociada a los fenómenos ópticos de resonancia Fano y plasmónica, así como las técnicas y geometrías necesarias para su posterior fabricación y utilización.

5. Referencias

- [1] Taminiu T H, Stefani F D, Segerink F B and Van Hulst N F 2008 Optical Antennas direct single- molecule emission *Nature Photonics*.

- [2] González F J and Boreman G D 2004 Comparison of dipole, bowtie, spiral and log-periodic IR antennas *Infrared Physics & Technology* 46 11
- [3] Briones E, Cuadrado A, Briones J, Díaz de León R, Martínez-Antón C, McMurty S, Hehn M, Montaigne F, Alda J and González F J 2014 Seebeck nanoantennas for the detection and characterization of infrared radiation *Optics Express* 22 9
- [4] AB C 2014 Introduction to Comsol Multiphysics. (United States of America: COMSOL AB) p 116
- [5] Gonzalez F J, Alda J, Simón J, Ginn J and Boreman G 2009 The effect of metal dispersion on the resonance of antennas at infrared frequencies *Infrared Physics & Technology* 4
- [6] Zhendong Z, Benfeng B, Oubo Y, Qunqing L and Shoushan F 2015 Fano resonance boosted cascaded optical field enhancement in a plasmonic nanoparticle-in-cavity nanoantenna array and its SERS application *Light: Science & Applications* 4
- [7] Díaz de León R 2015 Análisis Electromagnético de Nanoestructuras a Frecuencias de Terahertz. In: CIACyT-UASLP, (San Luis Potosí, México: Universidad Autónoma de San Luis Potosí)
- [8] Díaz de León-Zapata R 2014 Patrón de Radiación y Propiedades Ópticas de Emisión de nanoantenas de Ag-ZnO. In: CONCURSO DE EXHIBICIÓN DE CARTELES DE PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN, de los ESTUDIANTES DE POSGRADO de la UASLP, ed U A d S L Potosí (México: UASLP).

Autores

Dr. Ramón Díaz de León Zapata. Maestro en Ciencias con especialidad en Ciencias de la Computación por el Instituto Tecnológico de San Luis Potosí. Doctor en Ciencias Aplicadas con especialidad en Nanomateriales por la Universidad Autónoma de S. L. P. Miembro del Cuerpo Académico “Calidad de la Energía” del ITS LP. Jefe de Proyectos de Investigación de la carrera de Ingeniería Electrónica del ITS LP.

Dr. Francisco Javier González Contreras, Profesor investigador en la Universidad Autónoma de S.L.P. Miembro del Sistema Nacional de Investigadores nivel III, Director del Centro de Ciencia y Tecnología de Terahertz (CIACyT-UASLP) y del Laboratorio Nacional de Ciencia y Tecnología de Terahertz (UASLP-CIO), Miembro del Cuerpo Académico Materiales y Dispositivos Optoelectrónicos de la UASLP.

Dr. Gabriel González Contreras, Profesor investigador en la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, miembro del Sistema Nacional de Investigadores nivel I, Doctor en física por la Universidad Central de Florida.

Dr. Efrén Flores García, Doctor en Ciencias en Ingeniería Electrónica por el Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET) Catedrático del Instituto Tecnológico de San Luis Potosí. Miembro del Cuerpo Académico “Calidad de la Energía” del ITSLP.

Dr. Ismael Lara Velázquez, Doctor en Ingeniería Eléctrica por la Universidad Autónoma de S. L. P. Catedrático del Instituto Tecnológico de San Luis Potosí. Miembro del Cuerpo Académico “Calidad de la Energía” del ITSLP. Jefe de Proyectos de Investigación de la carrera de Ingeniería Eléctrica.

Financiamiento

Artículo generado como parte de los convenios de colaboración entre los Cuerpos Académicos de “Materiales y Dispositivos Optoelectrónicos” de la UASLP y “Calidad de la Energía” del ITSLP.