



UNIVERSIDAD
POLITECNICA
DE VALENCIA



Máster Universitario
en Tecnologías, Sistemas y
Redes de Comunicaciones

Integración de resonadores de anillo recortado metálicos en guías de silicio

Autor: Erica Sánchez Gomariz

Director: Alejandro José Martínez Abiétar

Fecha de comienzo: 1/03/2017

Lugar de trabajo: Centro de Tecnología Nanofotónica de Valencia (NTC)

Resumen

El resonador metálico de anillo recortado (*Split-Ring Resonator*, por sus siglas en inglés SRR) es un elemento básico en nanofotónica dado que permite conseguir permeabilidades magnéticas negativas a frecuencias ópticas. De esta forma, a partir de arrays de SRRs se pueden conseguir metamateriales con respuestas como refracción negativa o invisibilidad que no son posibles con medios naturales. Sin embargo, los SRRs también tienen propiedades muy interesantes cuando están aislados. De hecho, pueden funcionar como nanoantenas magnéticas o ser usados para biosensado, aunque por sus dimensiones (superficie $< 0.1 \mu\text{m}^2$) son muy difíciles de caracterizar. En este trabajo fin de máster (TFM) se propone integrar un SRR en una guía de silicio de forma que pueda ser excitado y medido de forma individual. Se diseñará – usando el software CST Microwave Studio - el SRR para que resuene a longitudes de onda de telecomunicaciones y se integrará eficientemente en un gap creado en una guía de silicio. Se analizarán sus prestaciones como nanoantena magnética. Finalmente, se planteará como línea futura la fabricación de la estructura diseñada en la sala limpia del Centro de Tecnología Nanofotónica de la Universidad Politécnica de Valencia (UPV) y su caracterización experimentalmente en el laboratorio. Los resultados de este TFM supondrán un avance en el campo de la nanofotónica en general, y de los metamateriales fotónicos en particular.

Abstract

The Split-Ring Resonator (SRR) is a basic element in nanophotonics since it allows to obtain negative magnetic permeabilities at optical frequencies. In this way, from SRR arrays metamaterials with responses such as refraction or invisibility that are not possible with natural Materials can be obtained. However, SRRs also have very interesting properties when they are isolated. In fact, they can function as magnetic nanoparticles or be used for biosensing. Although, because of their dimensions (Surface $< 0.1 \mu\text{m}^2$) they are very difficult to characterize. In this project, it is proposed to integrate an SRR into a silicon guide so that it can be excited and measured individually. Using the CST Microwave Studio software, the SRR will be designed to resonate at telecom wavelengths and efficiently integrate into a gap created in a silicon guide. Its benefits will be analyzed as magnetic nanoantenna. Finally, we will propose as a future work that the designed structure is manufactured in the clean room of the Center of Nanophotonic Technology of the Polytechnic University of Valencia and experimentally characterized in the laboratory. The results of this project will be an advance in the field of nanophotonics in general, and of photonic metamaterials in particular.

ÍNDICE

Resumen	2
Abstract	2
Índice de figuras	4
I. Introducción.....	5
I.1. Presentación.....	5
I.2. Objetivos	5
I.3. Estructura	5
II. Metamateriales, Plasmonica y Fotónica de silicio	6
II.1. Plasmonica	6
II.2. Metamateriales	7
II.3. Fotónica de silicio	10
II.4. SRRs.....	10
III. Diseño de la estructura.....	11
III.1. Estructura I	12
III.2. Estructura II.....	13
III.3. Estructura III.....	14
III.4. Estructura IV	14
III.5. Estructura V.....	15
IV. Resultado de las simulaciones	17
IV.1. Estructura I	18
IV.2. Estructura II.....	20
IV.3. Estructura III.....	23
IV.4. Estructura IV	26
IV.5. Estructura V.....	28
V. Conclusiones y Líneas futuras.....	34
V.1. Conclusiones	34
V.2. Líneas futuras	35
V.2.1. Proceso de fabricación.....	35
V.2.2. Resultados experimentales	36
Agradecimientos	38
Lista de acrónimos	38
Bibliografía	39

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1. Plasmón de superficie propagándose a lo largo de la interfaz metal-dieléctrico. Tomado de Zhang, J., & Zhang, L., <i>Nanostructures for surface plasmons. Advances in Optics and Photonics, 2012</i> ² y A. Martínez, <i>Metamateriales fotónicos</i> ⁸	6
Fig. 2. Comparativa de un medio natural y un metamaterial a nivel atómico. Tomada de A. Martínez, <i>Metamateriales fotónicos</i> ⁸	7
Fig. 3. Propagación de los campos electromagnéticos en un material diestro. Tomada de A. Martínez, <i>Metamateriales fotónicos</i> ⁸	9
Fig. 4. Propagación de los campos electromagnéticos en un material zurdo. Tomada de A. Martínez, <i>Metamateriales fotónicos</i> ⁸	9
Fig. 5. Clasificación de los materiales en función de los valores de ϵ y μ . Tomada de A. Martínez, <i>Metamateriales fotónicos</i> ⁸	10
Fig. 6. Estructura de un SRR. Modificada de S. Linden et al., <i>Magnetic Response of Metamaterials at 100 THz</i> ¹⁹	10
Fig. 7. Dimensiones del SRR óptimo integrado en el gap.....	13
Fig. 8. Estructura inicial compuesta por un SRR óptimo integrado en un gap.....	13
Fig. 9. Estructura II compuesta por un SRR óptimo rotado 90° integrado en un gap.....	13
Fig. 10. Estructura III compuesta por un SRR óptimo rotado 180° integrado en un gap.....	14
Fig. 11. Dimensiones del SRR integrado en el gap.....	14
Fig. 12. Estructura IV compuesta por un SRR cerrado integrado en un gap.....	15
Fig. 13. Estructura V compuesta por SRR acoplados entre sí.....	15
Fig. 14. Dimensiones de los SRR de la estructura V.....	16
Fig. 15. Estructura V compuesta por SRR, algunos rotados 180°, acoplados entre sí.....	16
Fig. 16. Estructura V compuesta por tres SRR acoplados entre sí.....	17
Fig. 17. Momento eléctrico (rojo) y magnético (azul) que se esperan medir si el anillo resuena a la frecuencia de diseño. Modificada de Hein, S. M., & Giessen, H., <i>Tailoring magnetic dipole emission with plasmonic split-ring resonators</i> ²²	17
Fig. 18. Componentes fundamentales de campo para cada modo guiado (TE y TM en este caso).....	18
Fig. 19. Campo H en módulo (normalizado con respecto a la estructura sin el elemento resonante) medido en el centro del anillo de la estructura I.....	18
Fig. 20. Campo E en módulo (normalizado con respecto a la estructura sin el SRR) medido en el gap del anillo de la estructura I.....	19
Fig. 21. Vista superior del mapa del campo H (izq.) y E (dcha.) en módulo cuando se excita la resonancia del SRR de la estructura I.....	19
Fig. 22. <i>Scattering</i> radiado por el anillo (normalizado con respecto a la estructura sin el SRR).....	20
Fig. 23. Parámetros S del puerto 3 colocado sobre el SRR de la estructura I para medir el <i>scattering</i>	20
Fig. 24. Campo H en módulo (normalizado con respecto a la estructura sin el SRR) medido en el centro del anillo de la estructura II.....	21
Fig. 25. Campo E en módulo (normalizado con respecto a la estructura sin el SRR) medido en el gap del anillo de la estructura II.....	21
Fig. 26. Vista superior del mapa del campo H (izq.) y E (dcha.) en módulo cuando se excita la resonancia del SRR de la estructura II.....	22
Fig. 27. <i>Scattering</i> radiado por el anillo de la estructura II (normalizado con respecto a la estructura sin el SRR).....	22
Fig. 28. Parámetros S del puerto 3 colocado sobre el SRR de la estructura II.....	22
Fig. 29. Campo H en módulo (normalizado con respecto a la estructura sin anillo) medido en el centro del anillo de la estructura III.....	23
Fig. 30. Campo E en módulo (normalizado con respecto a la estructura sin el elemento resonante) medido en el gap del anillo de la estructura III.....	23
Fig. 31. Vista superior del mapa del campo H (izq.) y E (dcha.) en módulo cuando se excita la resonancia del SRR de la estructura III.....	24
Fig. 32. <i>Scattering</i> radiado por el anillo de la estructura III (normalizado con respecto a la estructura sin el SRR).....	24
Fig. 33. Parámetros S del puerto 3 colocado sobre el SRR de la estructura III para medir el <i>scattering</i>	25
Fig. 34. Gráfica comparativa del campo H en módulo medido en el centro del anillo de las estructuras I, II y III (normalizado con respecto a la estructura sin el SRR).....	25
Fig. 35. Gráfica comparativa del campo E en módulo medido en el gap del anillo de las estructuras I, II y III (normalizado con respecto a la estructura sin anillo).....	25
Fig. 36. Campo H medido en el centro del anillo de la estructura IV (normalizado respecto al caso sin SRR).....	26
Fig. 37. Campo E medido en el gap del anillo de la estructura IV (normalizado respecto al caso sin SRR).....	26
Fig. 38. Vista superior del mapa del campo H (izq.) y E (dcha.) en módulo cuando se excita la resonancia del SRR de la estructura IV.....	27
Fig. 39. Gráfica comparativa del campo H en módulo medido en el centro del anillo de las estructuras I, II, III y IV (normalizado con respecto a la estructura sin anillo).....	27
Fig. 40. Gráfica comparativa del campo E en módulo medido en el gap del anillo de las estructuras I, II, III y IV (normalizado con respecto a la estructura sin el elemento resonante).....	27
Fig. 41. <i>Scattering</i> radiado por el anillo (normalizado con respecto a la estructura sin anillo).....	28
Fig. 42. Parámetros S del puerto 3 colocado sobre el SRR de la estructura VI para medir el <i>scattering</i>	28
Fig. 43. Campo E recibido tras el acoplo de 5 anillos separados $d = 40$ nm (normalizado con respecto a la estructura sin anillos).....	29
Fig. 44. Vista superior del mapa del campo H (izq.) y E (dcha.) en módulo cuando se excita la resonancia del SRR de la estructura V.....	29
Fig. 45. Campo E recibido tras el acoplo de 5 anillos (2 de ellos rotados 180°) separados $d = 40$ nm (normalizado con respecto a la estructura sin SRRs).....	30
Fig. 46. Vista superior del mapa del campo H (izq.) y E (dcha.) en módulo cuando se excita la resonancia del SRR de la estructura V con 2 anillos rotados 180°.....	30
Fig. 47. Campo E recibido tras el acoplo de los anillos separados $d = 65$ nm (normalizado con respecto a la estructura sin anillos).....	31
Fig. 48. Vista superior del mapa del campo H (izq.) y E (dcha.) en módulo cuando se excita la resonancia del SRR de la estructura V con 5 anillos separados $d = 65$ nm.....	31
Fig. 49. Campo E recibido tras el acoplo de los anillos separados $d = 100$ nm (normalizado con respecto a la estructura sin anillos).....	31
Fig. 50. Vista superior del mapa del campo H (izq.) y E (dcha.) en módulo cuando se excita la resonancia del SRR de la estructura V con 5 anillos separados $d = 100$ nm.....	32
Fig. 51. Comparativo campo E recibido de los casos anteriores (normalizado con respecto a la estructura sin SRRs).....	32
Fig. 52. Campo E recibido tras el acoplo de 3 anillos separados $d = 40$ nm (normalizado con respecto a la estructura sin elementos resonantes).....	33
Fig. 53. Vista superior del mapa del campo H (izq.) y E (dcha.) en módulo cuando se excita la resonancia del SRR de la estructura V con 3 anillos separados $d = 40$ nm.....	33
Fig. 54. Comparativo campo E recibido de todos los casos (normalizado con respecto a la estructura sin anillos).....	33
Fig. 55. Cargador inalámbrico mediante tecnología de anillos resonantes acoplados. Modificada de <i>The Future Of Mobile Charging, 2014</i> ²⁷	34
Fig. 56. Máquina Raith150 utilizada para la litografía por electrones. Tomada de J. Martí, <i>Nanofabricación</i> ²⁸	35
Fig. 57. Esquema de la configuración óptica que se utilizará en las mediciones experimentales. Modificado de Espinosa-Soria, A., Griol, A., & Martínez, A., <i>Experimental measurement of plasmonic nanostructures embedded in silicon waveguide gaps</i> ²⁹	36

I. INTRODUCCIÓN

I.1. PRESENTACIÓN

En los últimos años, han surgido nuevos tipos de medios artificiales llamados metamateriales que tienen propiedades electromagnéticas singulares que no poseen los materiales naturales. Hay determinados elementos a partir de los cuales se pueden conseguir estos metamateriales con respuestas como la refracción negativa o la invisibilidad, respuestas que no serían posibles con medios convencionales. El resonador metálico de anillo recortado es uno de los elementos que permite conseguir permeabilidades magnéticas negativas a frecuencias ópticas, así que creando arrays de dichos dispositivos se pueden conseguir metamateriales con respuesta magnética [1]. Pero su caracterización como elemento aislado no es trivial, ya que sus dimensiones son menores a la longitud de onda que los ilumina. Inicialmente se solían medir los arrays iluminando varios de los elementos simultáneamente y se aproximaba la respuesta de un solo elemento aislado promediando las de todas las estructuras iluminadas, suponiendo que estas eran idénticas con el error de aproximación que esto conllevaba. La solución a este problema es la posibilidad de excitar un solo SRR con una única guía de onda que confine la luz lo suficiente como para iluminar la nanoestructura y recoger su respuesta a la salida posteriormente. [2,3]

I.2. OBJETIVOS

Los objetivos que se persiguen con el desarrollo de este proyecto son el diseño y la caracterización de un SRR aislado integrado en una guía de silicio a frecuencias del infrarrojo cercano. Por un lado, se intentará diseñar un anillo que sea capaz de resonar y emitir radiación como si de una nanoantena se tratara a la frecuencia deseada, en este caso en torno a 200 THz (1550 nm de longitud de onda). Por otro lado, se pretenderá caracterizar el anillo aislado integrándolo en una brecha de una guía de silicio para que pueda ser excitado y medido de forma individual, ya que habitualmente este suele ser un proceso bastante complicado. Además, dicho elemento también se integrará en otra serie de estructuras para observar y medir su comportamiento.

I.3. ESTRUCTURA

En primer lugar, se hará una breve introducción a los metamateriales, a la plásmonica y fotónica de silicio para así partir de ciertos conocimientos básicos.

Posteriormente, se diseñará – usando el software CST Microwave Studio – un SRR que resuene a longitudes de onda de telecomunicaciones y se integrará eficientemente en una estructura con un gap creado en una guía de silicio. Además, también se diseñarán y simularán variantes de dicha estructura para definir su comportamiento en cada caso.

A continuación, se realizará un análisis de los resultados obtenidos tras el diseño y simulación de las diversas estructuras para la caracterización de sus prestaciones como nanoantena magnética.

Finalmente, se extraerán las conclusiones de este trabajo y las posibles líneas futuras que puede seguir, por ello se expondrá brevemente el proceso de fabricación de la estructura diseñada en la sala limpia del Centro de Tecnología Nanofotónica de la UPV y su posible caracterización experimentalmente en el laboratorio.

II. METAMATERIALES, PLASMÓNICA Y FOTÓNICA DE SILICIO

II.1. PLASMÓNICA

Se podría decir que el arranque de la plasmónica tuvo lugar en torno a 1998 con la publicación de un artículo del grupo de Thomas Ebbesen [4]. Sin embargo, este es un campo que está teniendo una gran importancia científico-tecnológica hoy en día y se puede definir como la unión de los plasmones y la fotónica. Pero, ¿Qué son realmente los plasmones de superficie?

Los plasmones de superficie (*Surface Plasmons*, por sus siglas en inglés SP) son ondas electromagnéticas que se propagan sobre la superficie de un conductor. Dichos SPs aparecen en las interfaces donde la parte real de la permitividad cambia de signo (interfaces metal-dieléctrico p.e). Además, tienen un carácter híbrido ya que están formados por una onda electromagnética (fotón) más una carga superficial (electrón) y solo existen para los modos transversales magnéticos (*Transverse Magnetic*, por sus siglas en inglés TM). [5,6]

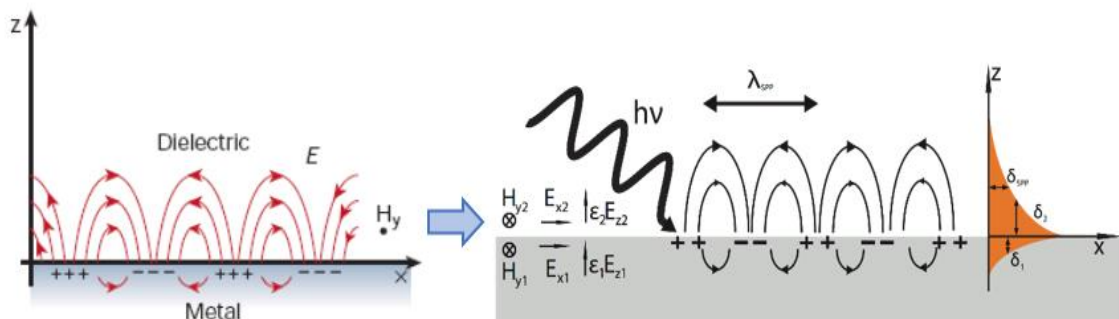


Fig. 1. Plasmón de superficie propagándose a lo largo de la interfaz metal-dieléctrico. Tomado de Zhang, J., & Zhang, L., *Nanostructures for surface plasmons. Advances in Optics and Photonics*, 2012⁷ y A. Martínez, *Metamateriales fotónicos*⁸.

En la Fig. 1 se puede observar la intensidad de los campos evanescentes en cada capa, la dirección de los plasmones de superficie y los campos que se ven implicados. En concreto, a la izquierda se pueden visualizar las ondas electromagnéticas y las cargas superficiales existentes en la interfase entre el metal y el material dieléctrico. En la imagen de la derecha se representa una onda de densidad electrónica que se propaga por una interfaz metal-dieléctrico. Además, se puede apreciar que aparecen oscilaciones de la densidad de carga y de los campos electromagnéticos asociados que se llaman ondas de SP.

También, existe una dependencia exponencial de la intensidad del campo EM (Electromagnético) con respecto a la distancia tal y como se observa en la gráfica de la derecha de la Fig. 1. Por lo tanto, el componente de campo eléctrico $|E_z|$ mejora cerca de la superficie y decae exponencialmente en una dirección normal a la interfaz al alejarse [7].

II.2. METAMATERIALES

Se puede definir como metamaterial a un medio artificial estructurado y periódico, el cual tiene propiedades electromagnéticas que no dependen de los átomos que forman sus materiales, sino de cómo los “meta-átomos” que lo componen responden al campo electromagnético. Igualmente, hay que tener en cuenta que el tamaño de los meta-átomos debe ser mucho más pequeño que la longitud de onda a la que se va a trabajar. Por lo tanto, dichos metamateriales poseen propiedades que no se podrían encontrar de forma natural en los materiales que ya existen. Las ventajas que presentan son la posibilidad de diseño para cualquier rango espectral y la obtención teórica de cualquier valor de ϵ y μ . Además, disminuyendo el tamaño de los meta-átomos se consiguen metamateriales fotónicos, es decir a frecuencias ópticas. Sin embargo, surge un problema, pues al aumentar la frecuencia los metales dejan de comportarse como conductores perfectos y su respuesta al campo electromagnético se condiciona por los plasmones de superficie que provocan pérdidas de absorción que aumentan con la frecuencia [8].

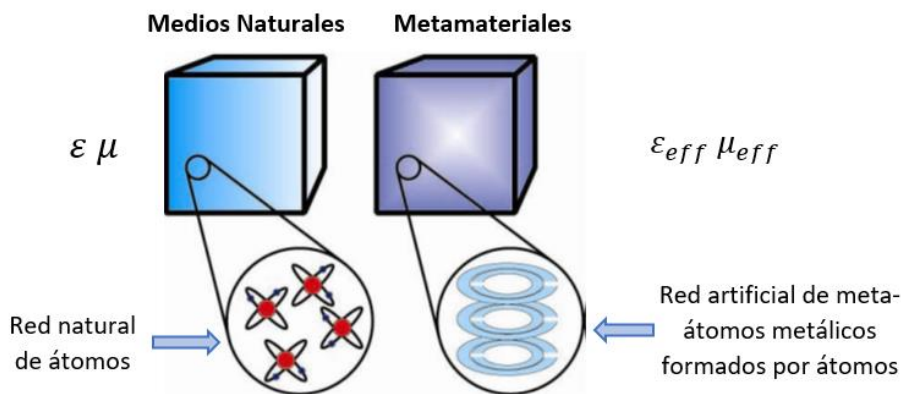


Fig. 2. Comparativa de un medio natural y un metamaterial a nivel atómico. Tomada de A. Martínez, *Metamateriales fotónicos*⁸.

Basándonos en la electrodinámica clásica se puede explicar la aparición de estos nuevos materiales ya que se puede modelar la interacción de los campos electromagnéticos (a cualquier frecuencia) con materiales mediante la permitividad eléctrica, ecuación (1), y la permeabilidad magnética, ecuación (2).

$$\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0 = \epsilon' + \epsilon''i \quad (1)$$

$$\mu = \mu_r \mu_0 = \mu' + \mu''i \quad (2)$$

Asimismo, partiendo de las ecuaciones de Maxwell, la ecuación de onda en un medio lineal, isótropo y homogéneo alejado de fuentes se define como (3):

$$\nabla^2 \vec{E} - \mu\epsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0 \quad (3)$$

La solución a esta ecuación es una onda plana (4) con un vector de onda \vec{k} (5).

$$\left. \begin{aligned} \vec{E} &= \vec{E}_0 \cos(\vec{k}\vec{r} - \omega t) \\ \vec{H} &= \frac{\hat{k}}{\eta} \times \vec{E} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$\vec{k} = k\hat{k} \quad (5)$$

Dónde \hat{k} es la dirección del vector de onda y k (6):

$$k = \frac{\omega}{c} \quad (6)$$

Además, se caracteriza por la impedancia de onda (7):

$$\eta = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} = \sqrt{\frac{\mu_r \mu_0}{\epsilon_r \epsilon_0}} = \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \eta_0 \quad (7)$$

Por lo tanto, se cumple la relación de dispersión entre el número de onda y la frecuencia (8):

$$k = \frac{\omega}{c} n \quad (8)$$

dónde n es el índice de refracción que viene definido como (9):

$$n^2 = \epsilon_r \mu_r \quad \Rightarrow \quad n = \sqrt{\epsilon_r \mu_r} \quad (9)$$

Es por ello que las propiedades ópticas de los materiales electromagnéticos vienen definidas por el índice de refracción n y la impedancia de onda η . Pero a frecuencias ópticas los medios naturales presentan una respuesta prácticamente nula al campo magnético ($\mu_r = 1$). Por lo tanto, para implementar dispositivos fotónicos se suelen usar dieléctricos con bajas pérdidas ($\epsilon_r'' = 0$) los cuales se caracterizan por tener una respuesta al campo eléctrico definida por $\epsilon_r' > 1$. Así que, el único parámetro de diseño es (10):

$$n = \sqrt{\epsilon_r'} > 1 \quad (10)$$

Cabe añadir que debido a estos parámetros surgen limitaciones en el diseño de las estructuras fotónicas ya que solo se pueden usar valores entre $1 < n < 6$ y esto deja muy poca flexibilidad en el diseño. No obstante, ¿Se podría ampliar este rango de valores? ¿Se podría conseguir una $\mu_r \neq 1$ a frecuencias ópticas? La respuesta es sí, porque si se evalúan las dos soluciones que la expresión (9) tiene, esta quedaría de la siguiente forma (11):

$$n^2 = \epsilon_r \mu_r \quad \Rightarrow \quad n = \pm \sqrt{\epsilon_r \mu_r} \quad (11)$$

Obteniendo así, dos soluciones para n al considerar la raíz positiva y negativa de la ecuación, ya que como Victor Veselago demostró, la solución positiva ($n > 0$), no siempre era la adecuada [9].

	ϵ	μ	\vec{k}
Medios Naturales o Diestros	> 0	> 0	Positivo
Metamateriales o Medios Zurdos	< 0	< 0	Negativo
No hay propagación	< 0	> 0	Imaginario
No hay propagación	> 0	< 0	Imaginario

Tabla 1. Casos posibles en función de los valores de ϵ y μ .

Como se puede observar en la tabla 1, las soluciones de los campos eléctrico y magnético y del vector de Poynting \vec{S} si $\epsilon, \mu < 0$ son idénticas al caso en el que $\epsilon, \mu > 0$ pero la dirección de propagación definida por \vec{k} será negativa, es decir, será opuesta a la propagación de la energía, fenómeno que se puede ver también en las Fig. 3 y 4.

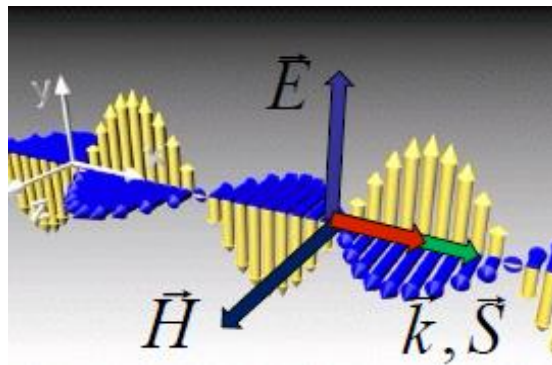


Fig. 3. Propagación de los campos electromagnéticos en un material diestro. Tomada de A. Martínez, *Metamateriales fotónicos*⁸.

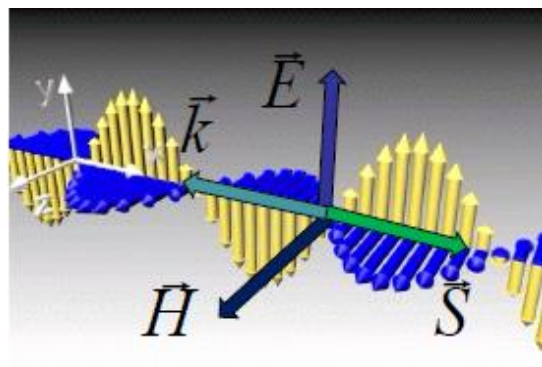


Fig. 4. Propagación de los campos electromagnéticos en un material zurdo. Tomada de A. Martínez, *Metamateriales fotónicos*⁸.

Por lo tanto, los materiales se pueden caracterizar y clasificar en función de sus valores de permitividad eléctrica y permeabilidad magnética tal y como muestra la Fig. 5 [10, 11].

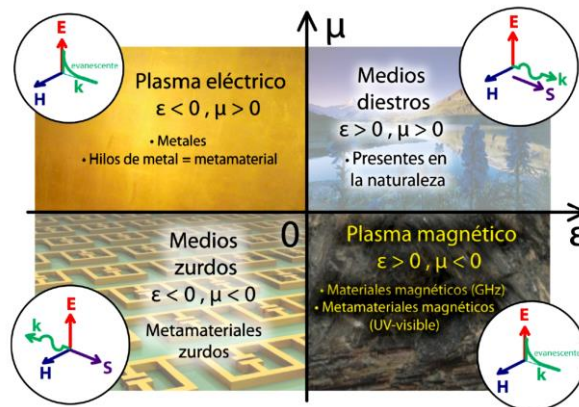


Fig. 5. Clasificación de los materiales en función de los valores de ϵ y μ . Tomada de A. Martínez, *Metamateriales fotónicos*⁸.

II.3. FOTÓNICA DE SILICIO

Se puede definir como fotónica de silicio la tecnología de integración fotónica que utiliza el silicio como medio óptico. Entre las plataformas tecnológicas disponibles para la óptica integrada, la utilización de este tipo de sistemas fotónicos ofrece diversas ventajas como una fabricación más sencilla, reduciendo así el coste de la producción de grandes volúmenes [12, 13, 14]. Por otra parte, mientras que el silicio puede ser utilizado como elemento de guiado para dispositivos de infrarrojo cercano, también se pueden producir guías de onda de nitruro de silicio que permiten guiar la luz visible [15, 16].

II.4. SRRs

Se puede definir un SRR como una estructura producida artificialmente, la cual tiene permeabilidad negativa en un cierto rango de frecuencias, cuando se encuentra en un array 3D. En cambio, cuando se encuentra aislado, tiene una resonancia con un momento magnético perpendicular al plano del SRR. Asimismo, como es relativamente fácil conseguir un $\epsilon < 0$ a frecuencias ópticas pero muy difícil obtener un $\mu < 0$ a dichas frecuencias, se miniaturizan los SRR hasta lograr las dimensiones que nos aporten la respuesta deseada tal y como veremos en los siguientes apartados [17,18, 19].

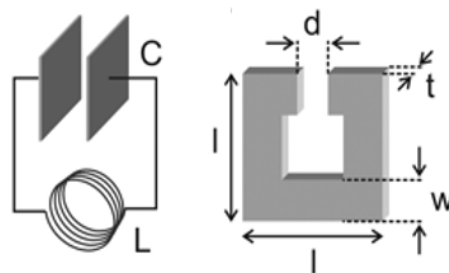


Fig. 6. Estructura de un SRR. Modificada de S. Linden et al, *Magnetic Response of Metamaterials at 100 THz*¹⁹.

Además, en la Fig. 6 se observa que el SRR se puede modelar como un circuito LC suponiendo un condensador de placas paralelas y una bobina de un solo arrollamiento. Esto nos puede servir de ayuda a la hora de diseñar las dimensiones del anillo, ya que podemos basarnos en un circuito LC para encontrar las dimensiones óptimas del dispositivo de la siguiente forma:

Sabiendo que el condensador C se puede definir como (12):

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_c \frac{wt}{d} \quad (12)$$

Y la ecuación de la bobina L es (13):

$$L = \frac{\mu_0 l^2}{t} \quad (13)$$

A partir de las ecuaciones anteriores, se puede diseñar la frecuencia de resonancia del anillo como (14):

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{c}{l\sqrt{\varepsilon_c}} \sqrt{\frac{d}{w}} \quad (14)$$

Siendo en este caso (14), c la velocidad de la luz y l, d y w parámetros de diseño de las dimensiones del anillo [20].

III. DISEÑO DE LA ESTRUCTURA

En este capítulo del trabajo se han diseñado cuatro estructuras diferentes formadas por un SRR, en diversas posiciones y formas, que sea capaz de resonar a longitudes de onda en torno a 1550 nm e integrarlo en una brecha creada en una guía de silicio. Asimismo, se planteará una última estructura dónde los SRR se acoplen unos a otros.

Todas las simulaciones se han realizado utilizando el software comercial CST Microwave Studio que implementa la técnica de integración finita, la cual se va a utilizar para obtener las soluciones de los campos electromagnéticos en cada estructura. Cabe resaltar que como las estructuras tiene una geometría relativamente sencilla, constando de paralelepípedos, el tipo de mallado hexaédrico que utiliza el programa por defecto funcionará perfectamente. Por consiguiente, se ha dejado el mallado en 10 celdas por longitud de onda en todas las estructuras excepto en las zonas más críticas de estas, como es el caso del SRR, en el que se ha definido un mallado más fino de 2x2x2 nm en cada dirección. Así, se consigue un mallado más preciso en las zonas más importantes y no se sobrecarga al programa con un mayado excesivamente grande en el resto de la estructura, lo que no mejoraría los resultados de la simulación. Además, se eligen las condiciones de límite abierto en todas las caras para conseguir de esta forma que

las capas estén perfectamente adaptadas y el sustrato se ha ampliado para que absorba los campos que no se quedan confinados en la guía [21].

De igual modo, se ha considerado que las guías de onda tengan unas dimensiones de $w = 450$ nm y $t = 220$ nm en todos los casos, porque experimentalmente se han obtenido mejores resultados que con las guías de $w = 400$ nm y $t = 250$ nm. Se excitarán los dos primeros modos TE y TM de las guías de ondas, pero será el modo fundamental TE, el cual tiene la componente de campo eléctrico paralela al plano del SRR, el que utilizaremos para incidir y excitar el anillo. Todas las guías están hechas de silicio y rodeadas de dióxido de silicio en las estructuras I, II, III, IV y rodeadas de aire en la estructura V.

Por otro lado, el resonador de anillo recortado que se utilizará en todas las estructuras está fabricado de oro, cuyas constantes ópticas se obtuvieron a partir de mediciones de elipsometría de películas finas evaluando el cambio de polarización en la reflexión o en la transmisión y comparándolo con un modelo. Dichos anillos sufrieron un proceso de optimización de sus dimensiones para conseguir que resonaran a las longitudes de onda de diseño o que se acoplara a las estructuras contiguas como podremos observar en la estructura V.

Cabe mencionar que, previo al análisis de las estructuras completas, se consideraron primero las guías de ondas sin el elemento resonante en el hueco, para conocer así la influencia de dicha brecha en el comportamiento de la guía de ondas y evitar la aparición de fuertes campos longitudinales en el hueco que puedan causar variaciones. Como ocurre con las técnicas que se utilizan normalmente para excitar las nanoestructuras plasmónicas como pueden ser las ondas planas en espacio libre dónde la componente dominante es la transversal.

Finalmente, se considerará el sistema completo (el SRR dentro del hueco) como se podrá observar en los siguientes apartados. Además, para conseguir una máxima interacción los anillos estarán alineados con los ejes ópticos de las guías de ondas.

III.1. *ESTRUCTURA I*

Se va a partir de una estructura inicial formada por un anillo SRR en forma de “U”. Se adoptará esta forma para aumentar la frecuencia de resonancia y simplificar la nanofabricación eliminando los pequeños brazos superiores del SRR [22, 23, 24, 25 26]. El anillo tendrá las dimensiones previamente optimizadas para que resuene a una longitud de onda de 1550 nm, pues se ha comprobado que disminuyendo el área del anillo (es decir, las dimensiones d y L_1) aumenta la frecuencia de resonancia de este. No obstante, estas dimensiones óptimas del SRR serán las que se utilicen también para los anillos de las estructuras I, II y III.

Dichas dimensiones, pueden observarse en la Fig. 7 dónde $d = 90$ nm, $g = 20$ nm, $L_1 = 90$ nm, $W = 35$ nm, $L_2 = 55$ nm y $h = 35$ nm (30 nm de Oro y 5 nm de Titanio para así mejorar la adhesión del oro y disminuir los efectos de carga durante la exposición).

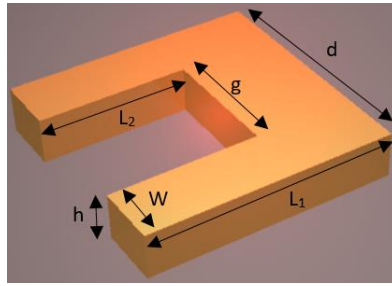


Fig. 7. Dimensiones del SRR óptimo integrado en el gap.

Una vez diseñado el anillo, se ha integrado en una estructura con un gap de 300 nm creado en una guía de silicio (de dimensiones $w = 450$ nm y $t = 220$ nm mencionadas anteriormente), tal y como se puede observar en la Fig. 8 para su posterior simulación.

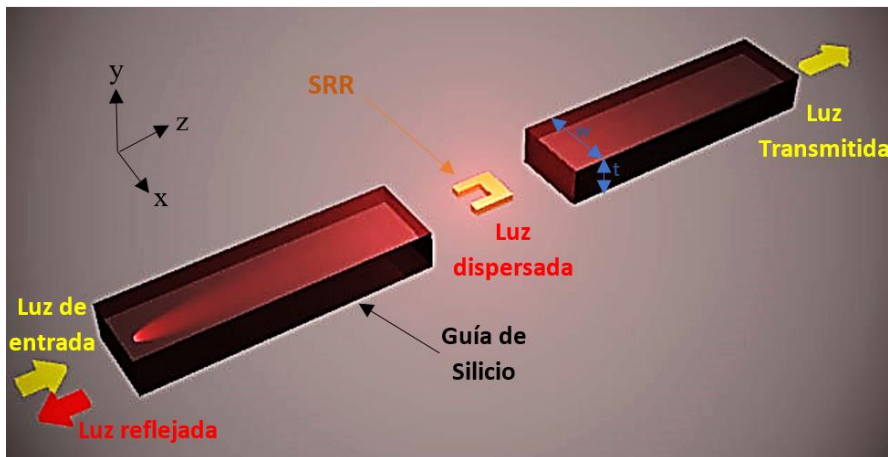


Fig. 8. Estructura inicial compuesta por un SRR óptimo integrado en un gap.

III.2. ESTRUCTURA II

La estructura II se construyó basándonos en la I, ya que estará formada por el anillo pero esta vez su posición variará puesto que este estará rotado 90° con respecto a la posición del anillo en la estructura I.

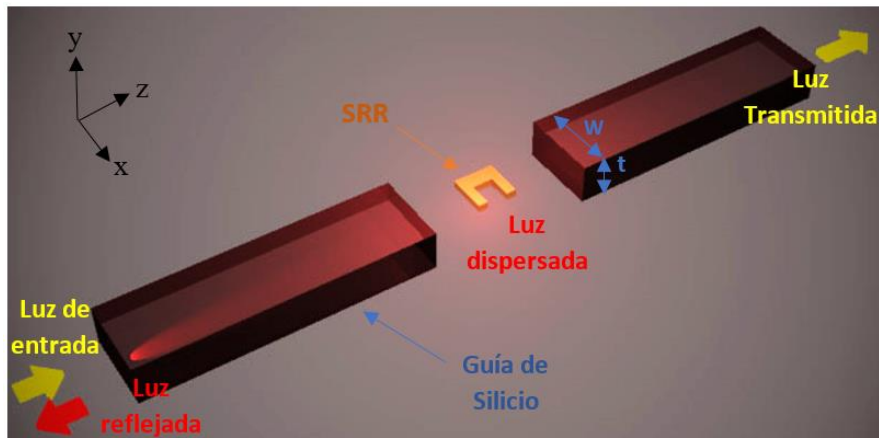


Fig. 9. Estructura II compuesta por un SRR óptimo rotado 90° integrado en un gap.

Además, tal y como se ha mencionado antes el anillo tendrá las mismas dimensiones y las guías de silicio también serán idénticas a las utilizadas en la estructura I, como se muestra en la Fig. 9.

III.3. ESTRUCTURA III

La tercera estructura tendrá el anillo rotado 180° con respecto a la posición inicial del anillo en la estructura I. Por lo tanto comparado con la estructura II, el anillo estará rotado 90° con respecto a la posición de este en dicha estructura.

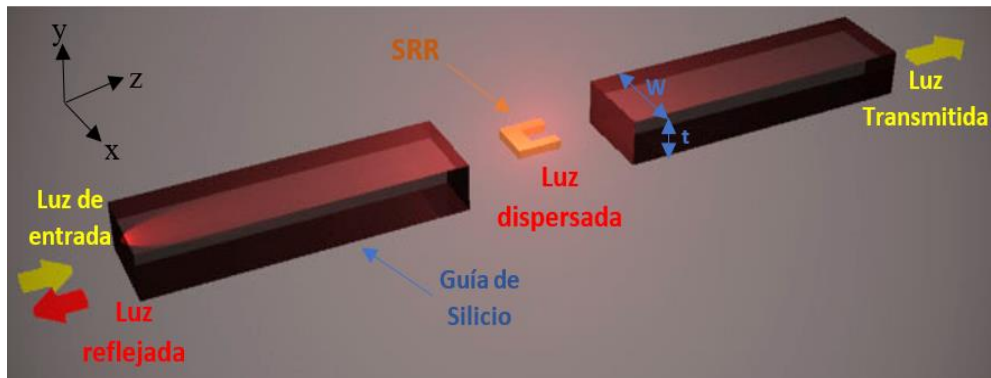


Fig. 10. Estructura III compuesta por un SRR óptimo rotado 180° integrado en un gap.

Igualmente, el anillo tendrá las mismas dimensiones que en la estructura I y II, y las guías también como se puede observar en la Fig. 10.

III.4. ESTRUCTURA IV

En este caso, se quiere diseñar un anillo totalmente diferente al de las estructuras anteriores porque el SRR estará enteramente cerrado. Observando así su comportamiento al tratar de excitarlo con el modo TE de la guía de ondas. Su geometría y sus dimensiones variaran como se muestra en la Fig. 11.

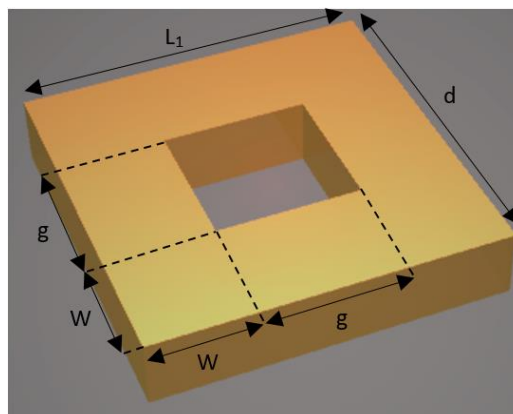


Fig. 11. Dimensiones del SRR integrado en el gap.

Por ello, ahora las dimensiones del SRR serán: $d = 90 \text{ nm}$, $g = 20 \text{ nm}$, $L_1 = 90 \text{ nm}$, $W = 35 \text{ nm}$, y su altura $h = 35 \text{ nm}$ (30 nm de Oro y 5 nm de Titanio).

Dicho SRR, se integrará en un gap de 300 nm creado en una guía de silicio, tal y como se ha colocado en las estructuras anteriores. Tras colocarlo en el gap de las guías la estructura tendrá la disposición que se observa en la Fig. 12 y estará lista para la simulación.

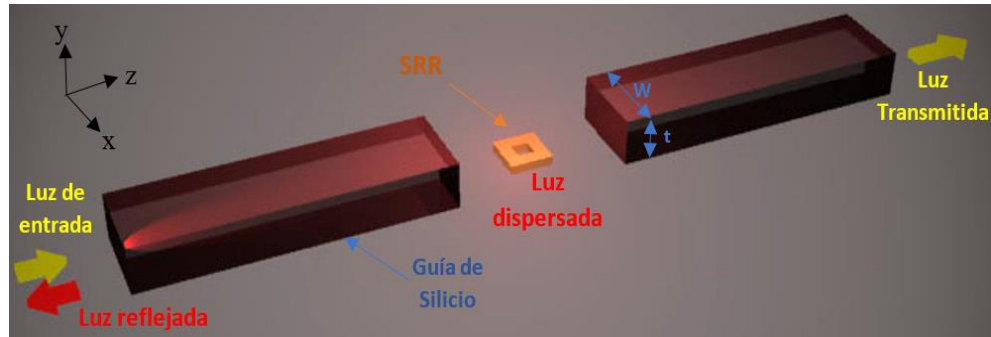


Fig. 12. Estructura IV compuesta por un SRR cerrado integrado en un gap.

III.5. ESTRUCTURA V

Esta estructura es ligeramente distinta a las diseñadas anteriormente, ya que se pretende acoplar de forma magnética cinco anillos entre ellos. Es decir, se va a incidir con el modo TE desde la guía de entrada al primer anillo. Este SRR se excitará y radiará de forma que se acoplará al siguiente, produciendo que este segundo anillo resuene también. Se procederá así sucesivamente hasta llegar al último anillo sobre el que mediremos los parámetros recibidos mediante la guía de salida tal y como se ve en la Fig. 13.

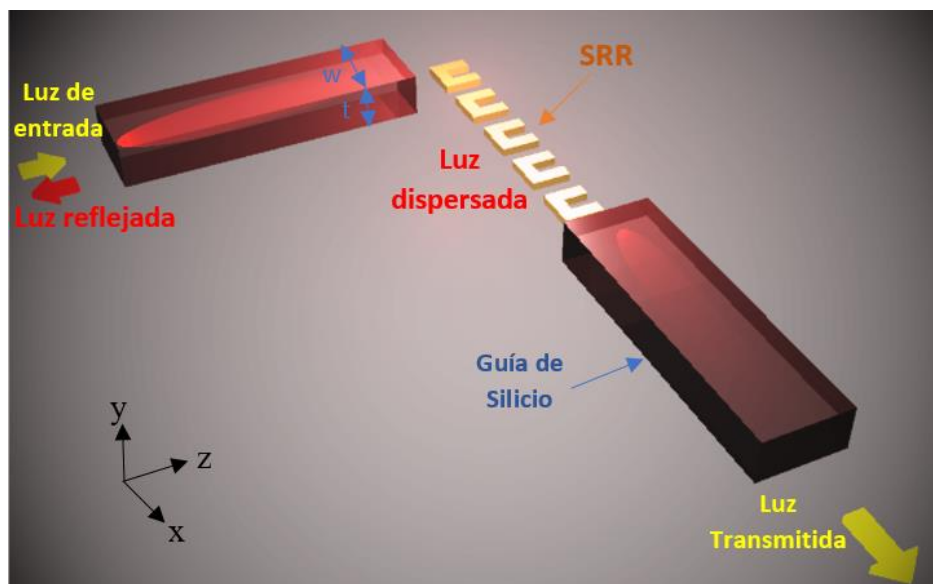


Fig. 13. Estructura V compuesta por SRR acoplados entre sí.

En este caso, los anillos recortados metálicos estarán separados 40 nm y como se indica en la Fig. 14 sus dimensiones serán de: $d = 120$ nm, $g = 50$ nm, $L_1 = 120$ nm, $W = 35$ nm, $L_2 = 80$ nm y $h = 35$ nm (30 nm de Oro y 5 nm de Titanio).

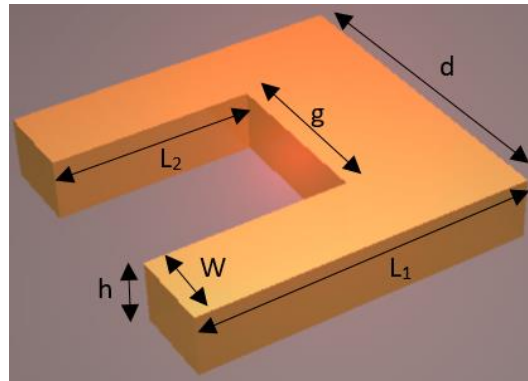


Fig. 14. Dimensiones de los SRR de la estructura V.

Se observa que las dimensiones de los anillos empleados en esta estructura son más grandes que los utilizados en los casos anteriores. Esto se debe a que la simulación se va a realizar en aire y como consecuencia de ello la frecuencia de resonancia aumenta por lo que para mantener la frecuencia en torno a los 200 THz deseados y que los anillos se acoplen entre sí se debe aumentar el tamaño del anillo.

Además, se van a realizar variantes de la estructura V variando la distancia entre los anillos. Se estudiarán los casos en los que la distancia pasará de ser 40 nm a 65 y 100 nm, manteniendo la misma configuración y dimensiones que en la estructura de la Fig. 13 y 14 respectivamente.

También se va a estudiar el caso en el que cambie la posición de los anillos de la estructura V (Fig.15), rotando el segundo y el cuarto anillo 180° aunque la distancia entre ellos seguirá siendo 40 nm. Las dimensiones de los SRR y de las guías seguirán siendo las mismas expuestas anteriormente.

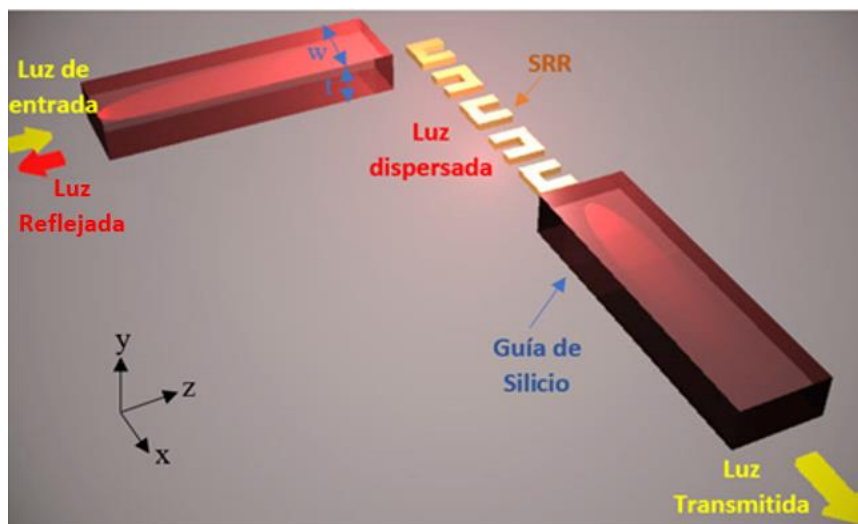


Fig. 15. Estructura V compuesta por SRR, algunos rotados 180° , acoplados entre sí.

Por último, se va a realizar una estructura que tenga tres anillos que se acoplen entre sí separados 40 nm como se observa en la Fig.16. Se mantendrán las dimensiones de las guías y de los SRR de la estructura V inicial.

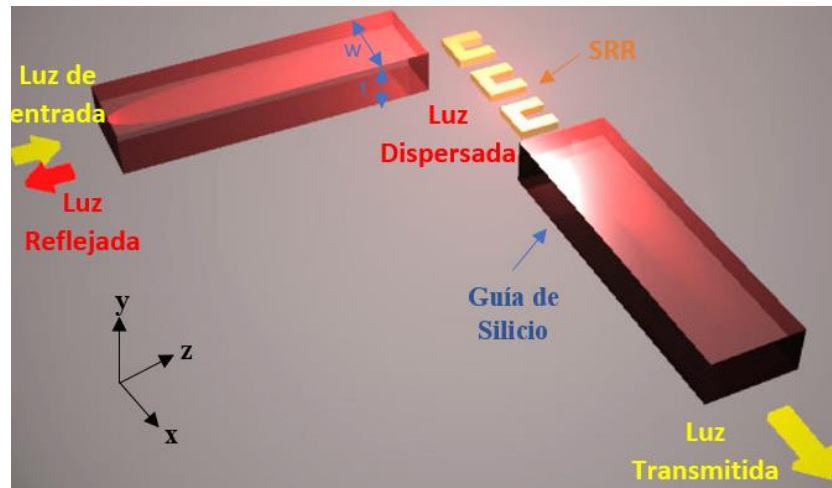


Fig. 16. Estructura V compuesta por tres SRR acoplados entre sí.

IV. RESULTADO DE LAS SIMULACIONES

Posteriormente, se han simulado las estructuras con el software CST Microwave Studio y se van a analizar los resultados obtenidos. Se pretende que los anillos recortados diseñados anteriormente resuenen a una longitud de onda de 1550 nm. Como la resonancia plasmónica fundamental de los SRR genera un momento dipolar magnético en el centro y un momento dipolar eléctrico en el gap de este, como se indica en la Fig. 17, se comprobará si el diseño realizado anteriormente cumple con las especificaciones dadas [22, 23, 24, 25 26].

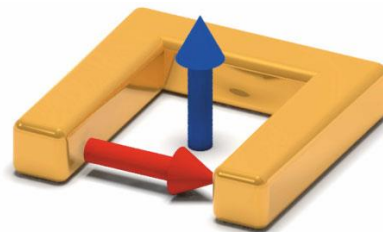


Fig. 17. Momento eléctrico (rojo) y magnético (azul) que se esperan medir si el anillo resuena a la frecuencia de diseño. *Modificada de Hein, S. M., & Giessen, H., Tailoring magnetic dipole emission with plasmonic split-ring resonators*²².

Además, se analizará el *scattering*, es decir si el SRR radia, puesto que se debería comportar como una antena emitiendo a la frecuencia de diseño. Como se ha mencionado antes, las gráficas se mostrarán normalizadas con respecto a la misma estructura pero sin el componente resonante, para así poder observar sin distorsiones o acoplos el valor del parámetro medido. Asimismo, en la Fig. 18 se pueden observar las componentes de campo para cada modo que se va a guiar, ya que por la guía de silicio se propagarán dos modos fundamentales (TE y TM). Será con el TE con el modo que se incidirá y excitarán los anillos, ya que la luz de entrada excitará la resonancia dipolar del anillo (si este tiene gap y componente de campo eléctrico en la dirección del gap).

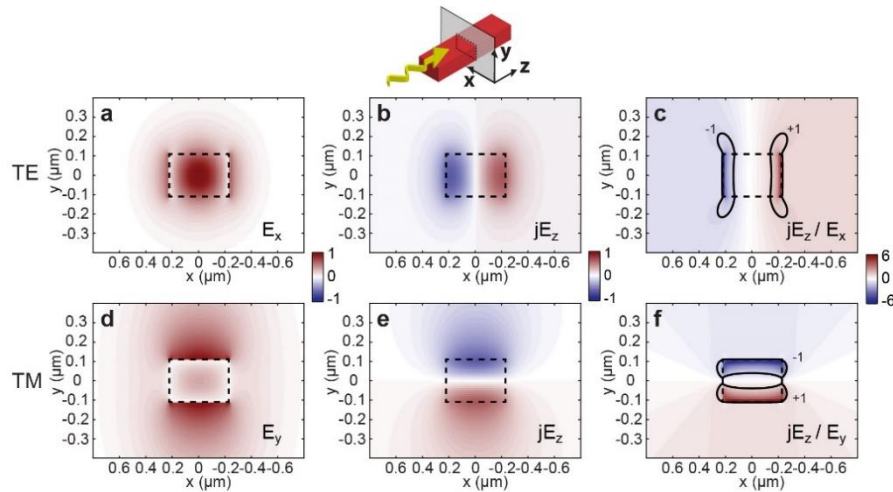


Fig. 18. Componentes fundamentales de campo para cada modo guiado (TE y TM en este caso)

IV.1. ESTRUCTURA I

La simulación de esta estructura se ha realizado en SiO_2 para conseguir que el anillo radiara de forma uniforme, ya que si se realizara en aire, se conseguiría más fácilmente llegar a la frecuencia de resonancia deseada con unas dimensiones del anillo mayores pero la estructura no radiaría de forma uniforme. De esta forma, se va a incidir a la estructura con el modo uno de la guía, es decir con el modo TE (*Transverse Electric*, por sus siglas en inglés TE) para conseguir excitar el anillo. Una vez realizada la simulación de la estructura I se obtienen las siguientes gráficas.

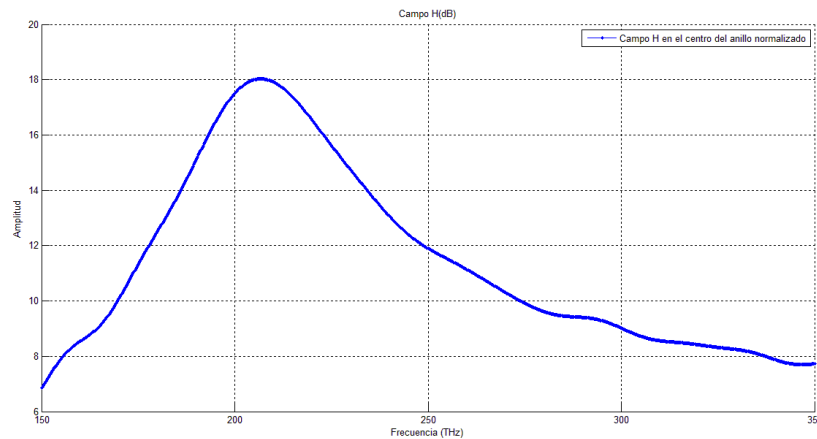


Fig. 19. Campo H en módulo (normalizado con respecto a la estructura sin el elemento resonante) medido en el centro del anillo de la estructura I.

En la Fig. 19, se ha representado el módulo de las componentes del campo magnético H en el centro del anillo en dB y se puede observar que existe un momento dipolar magnético generado a la frecuencia de diseño de la estructura. Por otra parte, se mide el campo eléctrico también en dB en el gap del anillo, y se obtiene la gráfica de la Fig. 20. Cabe recordar que las gráficas se muestran en dB porque se han normalizado con respecto a los resultados de la estructura obtenidos sin el elemento resonante.

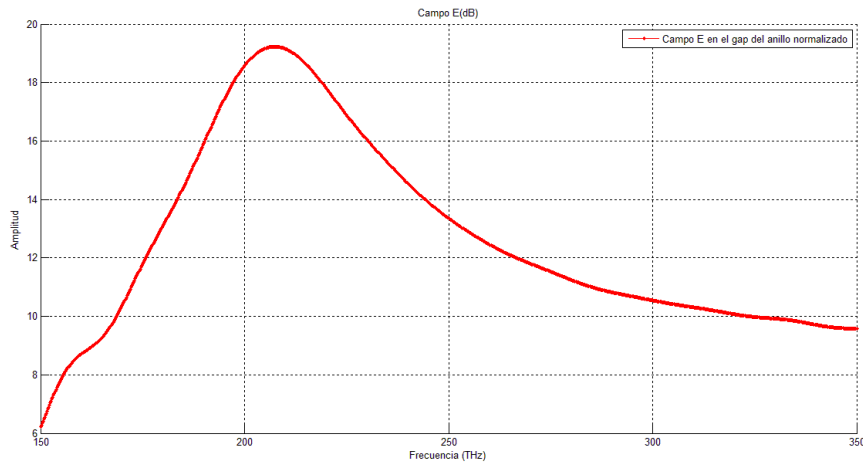


Fig. 20. Campo E en módulo (normalizado con respecto a la estructura sin el SRR) medido en el gap del anillo de la estructura I.

No hay duda de que también existe un momento dipolar eléctrico a una frecuencia de entorno 207 THz al igual que sucedía con el campo eléctrico en el centro del anillo. Por ello, se puede afirmar que el anillo tiene dos resonancias, eléctrica y magnética, superpuestas a la misma frecuencia. La eléctrica (en el gap) activa la magnética (circulación de corrientes por el anillo) como se puede observar en la Fig.21.

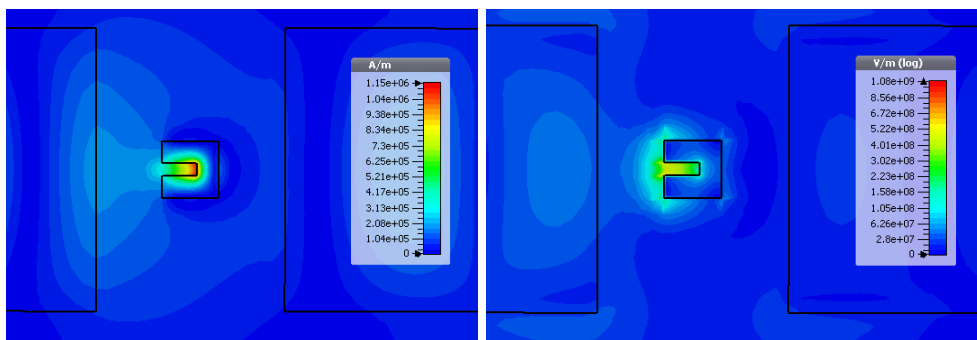


Fig. 21. Vista superior del mapa del campo H (izq.) y E (dcha.) en módulo cuando se excita la resonancia del SRR de la estructura I.

Para finalizar, se mide el *scattering* que la estructura radia en la dirección y (perpendicular al plano del SRR y a la dirección de propagación) en dB (normalizado con respecto a la estructura sin elementos resonantes) colocando un puerto a 1500 nm de distancia sobre el anillo y se obtienen los resultados de la gráfica de la Fig. 22.

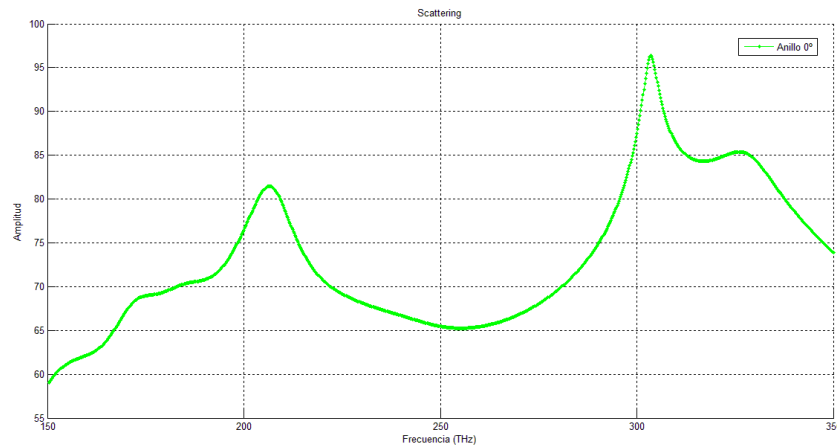


Fig. 22. *Scattering* radiado por el anillo (normalizado con respecto a la estructura sin el SRR).

Es evidente que la estructura radia potencia en torno a 200 THz debido a que el anillo recortado se comporta como una antena al resonar. A más, como se observa en la Fig.23, si analizan los parámetros S del puerto colocado sobre el SRR se observa que la componente de campo eléctrico detectada es la x (coincidiendo así con la dirección del dipolo eléctrico que se ha excitado) lo que significa que el modo se ha rotado de polarización al ser radiado por el anillo. Debido a que excitábamos el SRR con el modo TE (modo paralelo al plano del SRR) pero la estructura radia con el modo TM (modo perpendicular al plano del SRR).

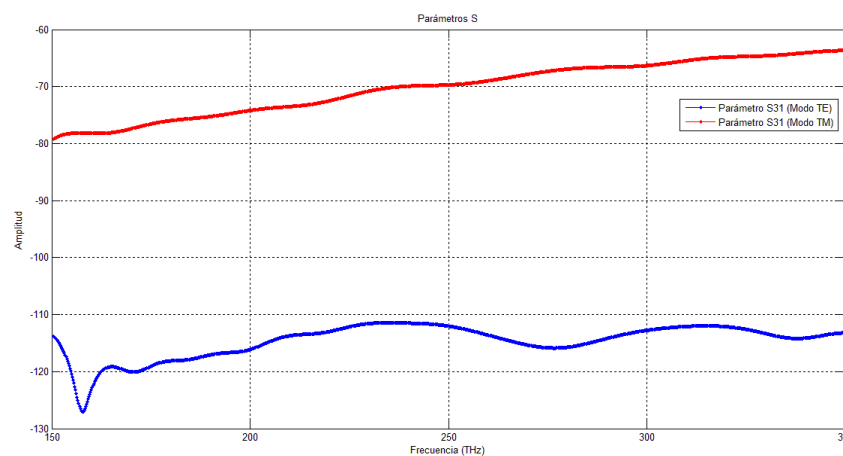


Fig. 23. Parámetros S del puerto 3 colocado sobre el SRR de la estructura I para medir el *scattering*.

IV.2. ESTRUCTURA II

De nuevo, se realizará la simulación con la estructura rodeada de SiO_2 y se incidirá con el modo uno de la guía, es decir con el modo TE para conseguir excitar el anillo, tal y como se ha realizado en la estructura I. Es importante recordar que el SRR está girado 90° con respecto a la posición de dicho elemento en la estructura I. Tras, la simulación de la estructura II se obtienen las gráficas de las Fig. 24, 25 y 27 en dB.

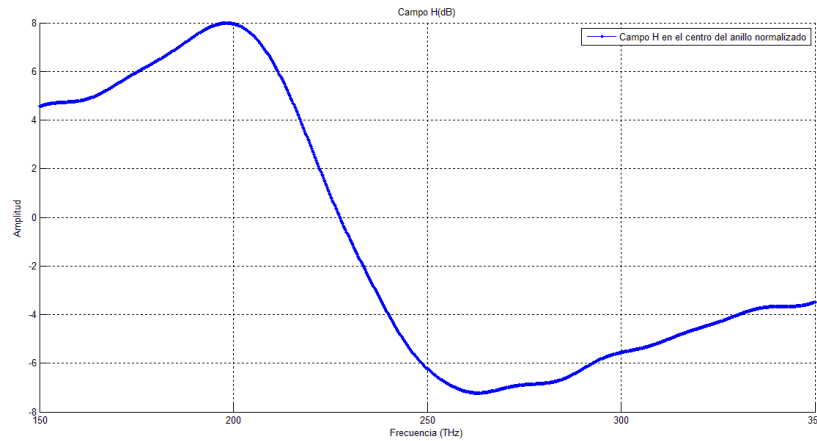


Fig. 24. Campo H en módulo (normalizado con respecto a la estructura sin el SRR) medido en el centro del anillo de la estructura II.

Se puede observar en la Fig. 24 que existe un momento dipolar magnético H en el centro del SRR en torno a 200 THz aun estando la estructura girada 90° con respecto al caso anterior. Aunque se puede ver que la resonancia ha bajado un poco en frecuencia y en amplitud debido al cambio de posición de la estructura, prácticamente sigue dentro de nuestro margen de diseño inicial de 1550 nm de longitud de onda. Por otro lado, se mide el campo eléctrico en el gap que existe en el anillo normalizado con respecto al campo eléctrico existente en la estructura cuando no hay elemento resonante, obteniendo la gráfica de la Fig. 26 en dB (normalizada con respecto a la estructura sin el anillo metálico).

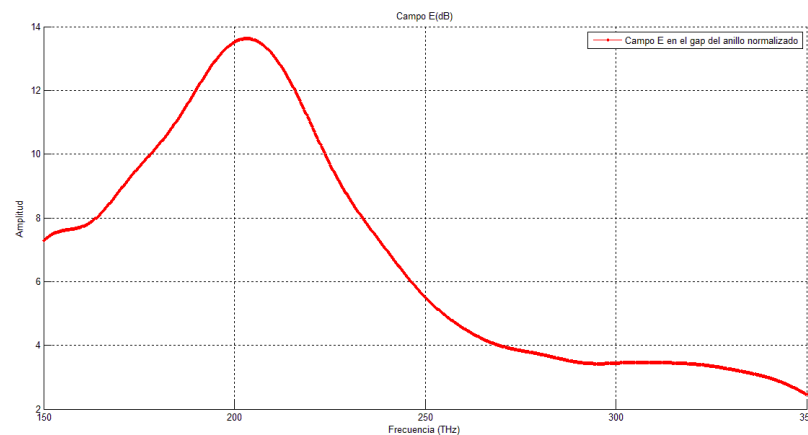


Fig. 25. Campo E en módulo (normalizado con respecto a la estructura sin el SRR) medido en el gap del anillo de la estructura II.

Basándonos en la Fig. 25, se puede afirmar que existe un momento dipolar eléctrico E en el gap del anillo a una frecuencia de entorno 200 THz al igual que sucedía con el campo magnético en el centro del anillo. Sin embargo, el dipolo eléctrico generado tiene una intensidad menor (debido a la rotación del SRR) que el que se generaba en el anillo de la estructura I. En la Fig. 26 se puede observar como se han generado un campo H en el centro del anillo y un campo E en el gap de este a la frecuencia de resonancia.

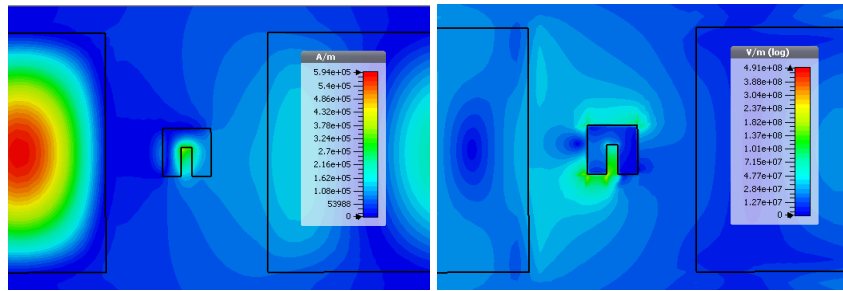


Fig. 26. Vista superior del mapa del campo H (izq.) y E (dcha.) en módulo cuando se excita la resonancia del SRR de la estructura II.

Finalmente, se mide el *scattering* que la estructura radia al resonar en dB (normalizado con respecto a la estructura sin elementos resonantes) mediante un puerto colocado a 1500 nm obteniendo los resultados de la gráfica de la Fig. 27.

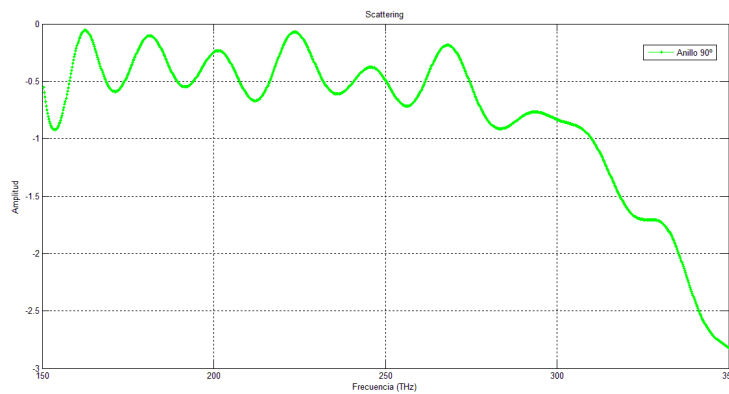


Fig. 27. *Scattering* radiado por el anillo de la estructura II (normalizado con respecto a la estructura sin el SRR).

En la Fig. 27 se observa que la estructura tampoco emite prácticamente radiación debido a que la posición del anillo en este caso (rotado 90° con respecto a la posición de este en la estructura I) hace que la intensidad del dipolo eléctrico que se genera en el gap del SRR sea menor y por lo tanto esta genere una radiación muy baja. Además, si interpretamos los parámetros S del puerto colocado sobre el anillo se obtienen los resultados de la gráfica de la Fig.28.

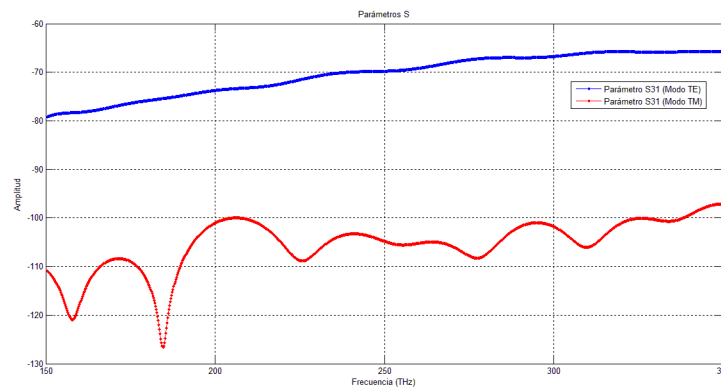


Fig. 28. Parámetros S del puerto 3 colocado sobre el SRR de la estructura II.

Se puede ver en la Fig.28 que al estar excitando el dipolo eléctrico en la dirección z (la del gap pero en este caso el anillo esta rotado 90° con respecto a la posición de la estructura I) la componente de campo eléctrico dominante es la x, (no coincidiendo así con la dirección del dipolo eléctrico que se ha excitado). Dicho de otro modo, debido a la posición en la que está colocado el anillo recortado no hay presencia de *scattering* tal y como hemos observado anteriormente también.

IV.3. ESTRUCTURA III

Para dicha estructura, se han realizado las simulaciones para observar qué ocurría si el anillo estuviera girado 180° con respecto al primer caso. De nuevo, se ha realizado la simulación en SiO_2 obteniendo las gráficas de las Fig. 29, 30 y 32 normalizadas respecto a la estructura sin el anillo en dB.

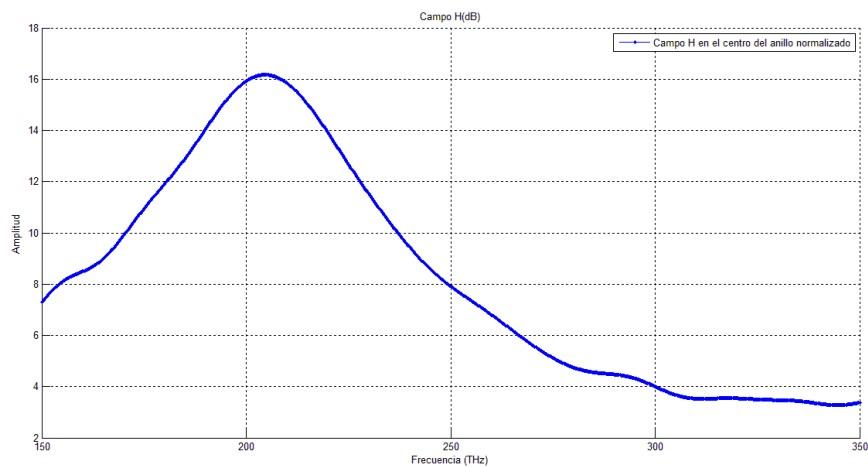


Fig. 29. Campo H en módulo (normalizado con respecto a la estructura sin anillo) medido en el centro del anillo de la estructura III.

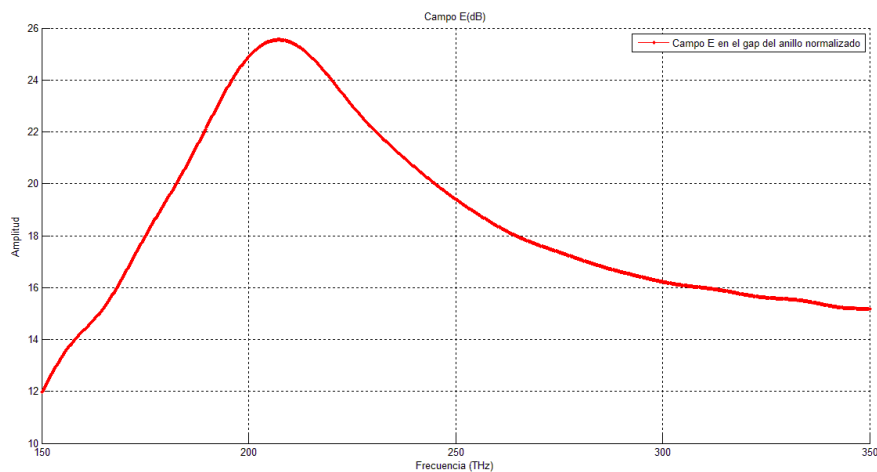


Fig. 30. Campo E en módulo (normalizado con respecto a la estructura sin el elemento resonante) medido en el gap del anillo de la estructura III.

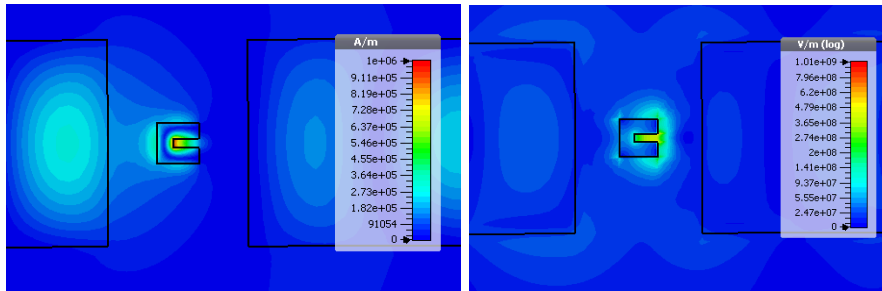


Fig. 31. Vista superior del mapa del campo H (izq.) y E (dcha.) en módulo cuando se excita la resonancia del SRR de la estructura III.

Asimismo, en las Fig. 29, 30 y 31 se percibe la existencia de un momento dipolar magnético en el centro del anillo y un momento eléctrico en el gap alrededor de 205 THz, lo que nos hace llegar a la conclusión de que existe una resonancia plásmónica fundamental del SRR a esa frecuencia.

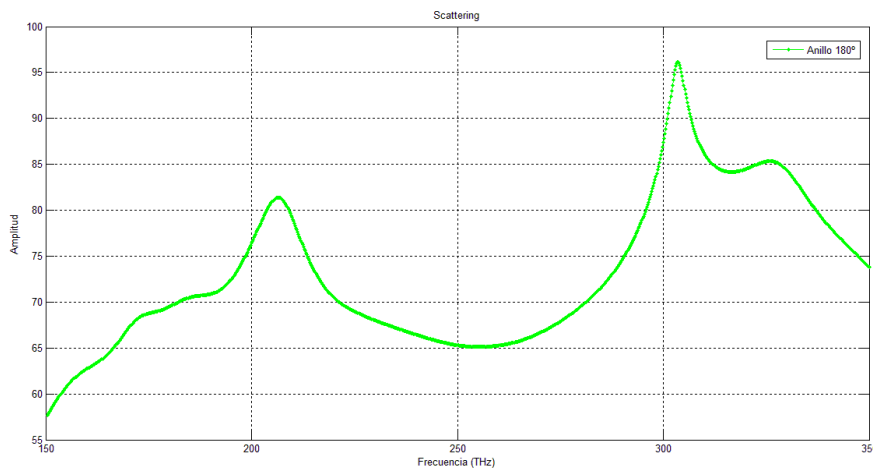


Fig. 32. *Scattering* radiado por el anillo de la estructura III (normalizado con respecto a la estructura sin el SRR).

De nuevo, se observa en la Fig. 32 la presencia de *scattering* tal y como ocurría en la estructura I. En conclusión, en este caso el hecho de que el anillo este rotado 180° no afecta a la intensidad del dipolo eléctrico generado en él y por lo tanto tampoco a la amplitud del campo radiado que sigue siendo bastante grande. Asimismo, si se representan la Fig. 33 los parámetros S del puerto que se ha colocado sobre el anillo, se observa que la componente de campo eléctrico dominante es la x (coincidiendo así con la dirección del dipolo eléctrico que se ha excitado). Por lo que el modo se ha rotado de polarización de nuevo tal y como ocurría en la estructura I. Ahora el modo radiado es el TM (modo perpendicular al plano del anillo) mientras que se incidía y excitaba el anillo con el modo TE (modo paralelo al plano del SRR).

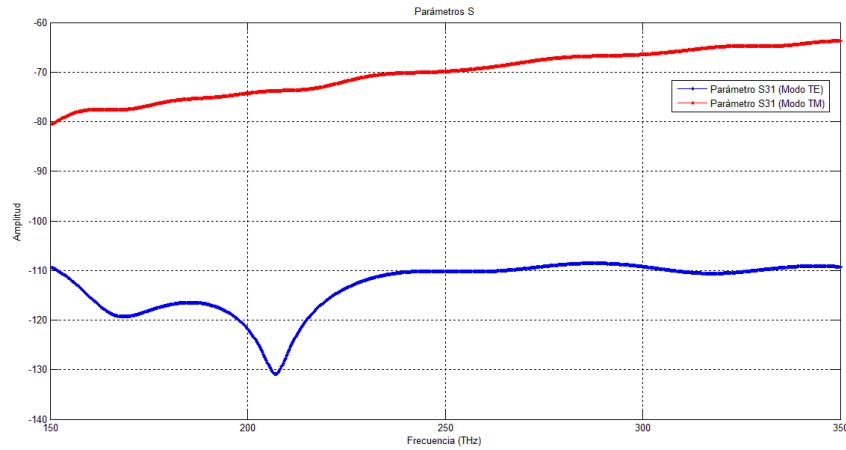


Fig. 33. Parámetros S del puerto 3 colocado sobre el SRR de la estructura III para medir el *scattering*.

Por último, para ver más claramente la variación que han sufrido los campos E en el gap del anillo y H en el centro del SRR en función de la posición de este, se han realizado unas gráficas comparativas de dichos campos en las estructuras I, II y III (Fig. 34 y 35).

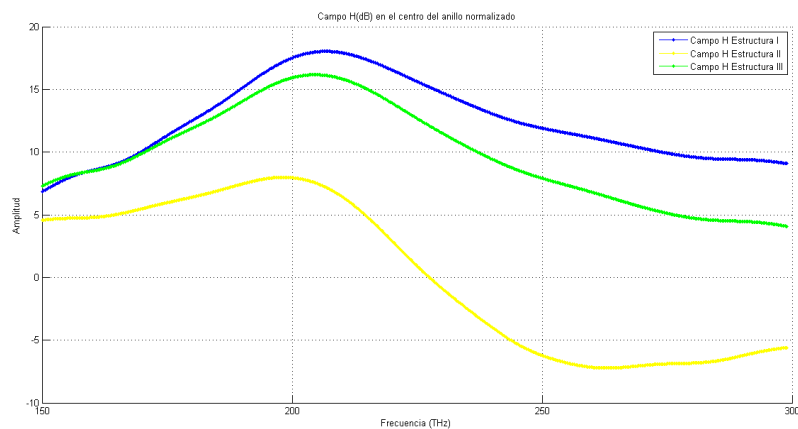


Fig. 34. Gráfica comparativa del campo H en módulo medido en el centro del anillo de las estructuras I, II y III (normalizado con respecto a la estructura sin el SRR)..

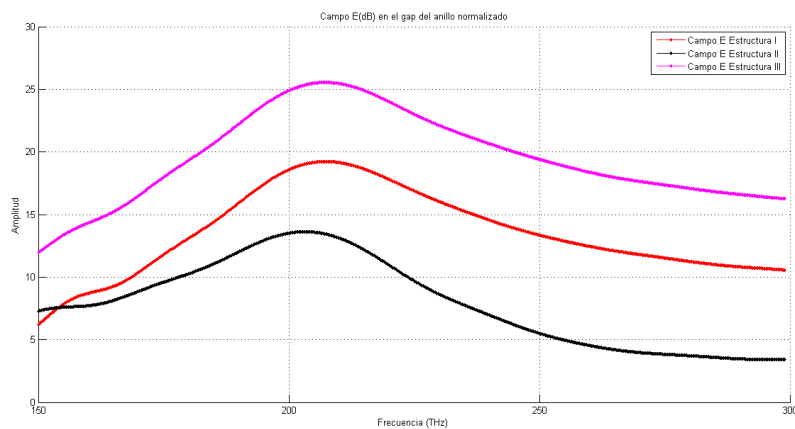


Fig. 35. Gráfica comparativa del campo E en módulo medido en el gap del anillo de las estructuras I, II y III (normalizado con respecto a la estructura sin anillo).

En las Fig. 34 y 35, se observa que la estructura II tiene una menor intensidad tanto de campo eléctrico en el gap del anillo como de campo magnético en el centro de este. Esto es algo que se esperaba debido a la posición que el SRR tiene al ser excitado, ya que el anillo se encuentra rotado 90° con respecto a la posición de la estructura I y como consecuencia radia menos como se ha comentado anteriormente. Por otro lado, las estructuras I y III tienen una amplitud de campo eléctrico y magnético mayor porque en estas estructuras el anillo tiene una posición más óptima para ser excitado y por lo tanto radiar en la dirección perpendicular a la de propagación.

IV.4. ESTRUCTURA IV

En este caso, se cuenta con una estructura que tiene una peculiaridad al encontrarse el anillo totalmente cerrado. Con este diseño se pretende comprobar si se sigue generando un momento dipolar magnético en el centro del SRR y un momento dipolar eléctrico asociado a este. Para ello se mide el campo magnético en el centro del anillo en dB, obteniendo el resultado observado en la Fig. 36.

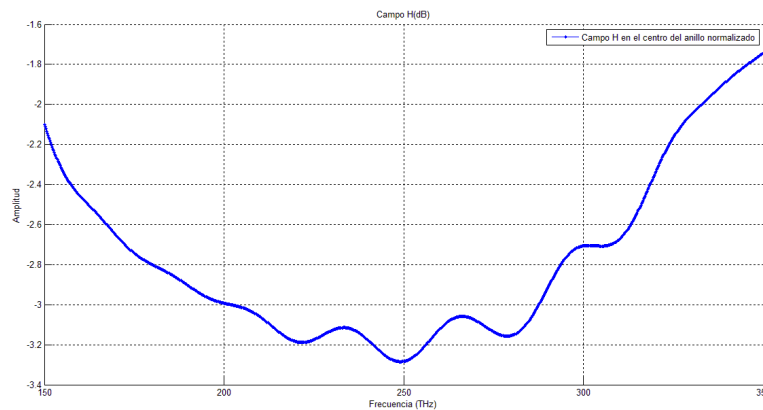


Fig. 36. Campo H medido en el centro del anillo de la estructura IV (normalizado respecto al caso sin SRR).

Como se muestra en la Fig. 36, no se genera ningún momento dipolar magnético en el centro del SRR, ya que el campo incidente no es capaz de excitar la estructura con este tipo de diseño y por lo tanto no se induce ninguna corriente circular por este.

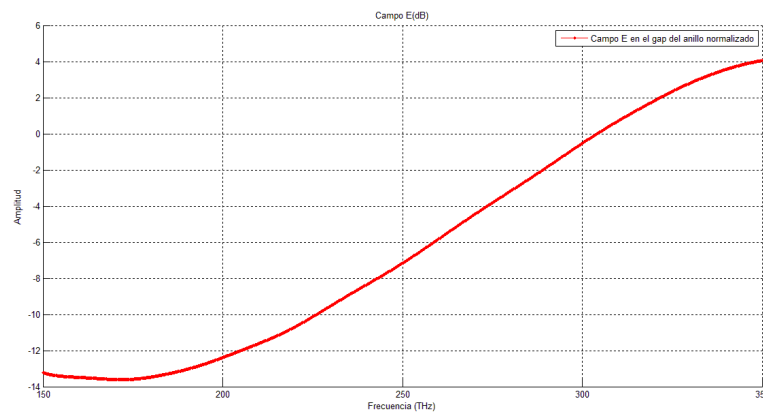


Fig. 37. Campo E medido en el gap del anillo de la estructura IV (normalizado respecto al caso sin SRR).

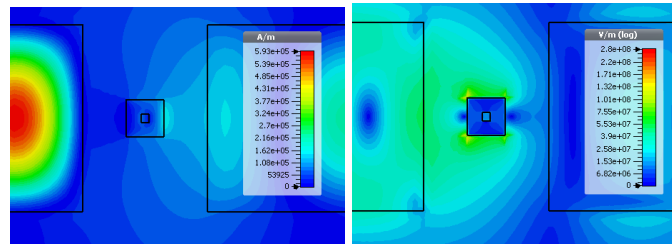


Fig. 38. Vista superior del mapa del campo H (izq.) y E (dcha.) en módulo cuando se excita la resonancia del SRR de la estructura IV.

De la Fig. 38 se deduce que tampoco se genera ningún momento dipolar eléctrico en el anillo, ya que al no ser recortado, no tiene ningún gap que la genere. En conclusión, si analizamos la Fig.37 se puede afirmar que existe resonancia magnética en el centro del anillo pero se acopla de forma muy débil a la luz de entrada, ya que al no existir gap en el anillo la resonancia eléctrica desaparece y por lo tanto no excita la magnética.

A continuación, se han hecho unas gráficas comparativas para observar la ausencia de campos eléctrico y magnético en la estructura cuatro con respecto a las estructuras I, II y III (Fig.39 y 40).

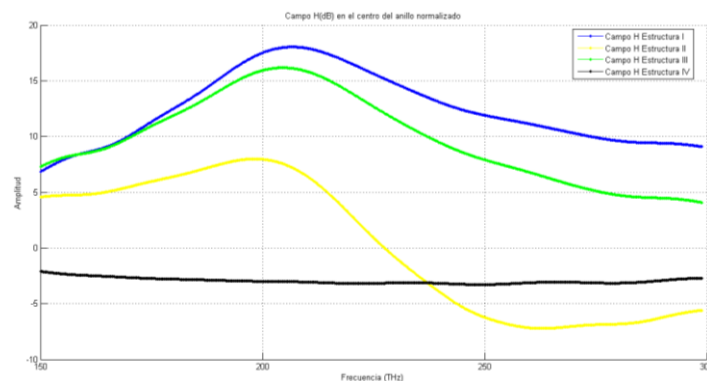


Fig. 39. Gráfica comparativa del campo H en módulo medido en el centro del anillo de las estructuras I, II, III y IV (normalizado con respecto a la estructura sin anillo).

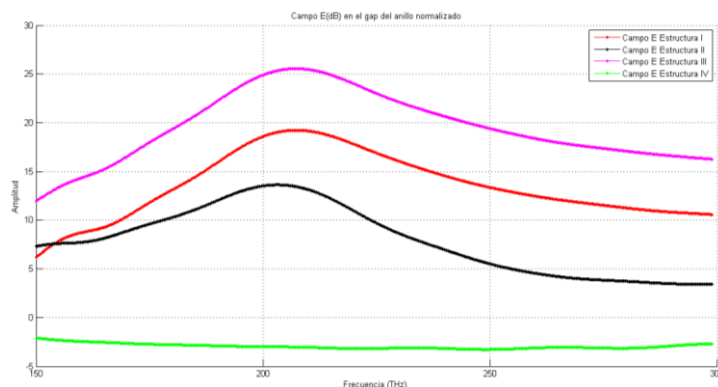


Fig. 40. Gráfica comparativa del campo E en módulo medido en el gap del anillo de las estructuras I, II, III y IV (normalizado con respecto a la estructura sin el elemento resonante).

Como se puede ver en las Fig. 39 y 40, los campos E y H de la estructura IV son inexistentes comparados con los que se han generado tras excitar el anillo recortado de las estructuras I, II y III.

En lo que *scattering* se refiere podemos observar en la Fig. 41 que la estructura no radia debido a que no tiene resonancia plásmónica fundamental a la frecuencia de diseño (no se genera ningún momento dipolar eléctrico en el anillo debido a que este no tiene gap al estar totalmente cerrado) tal y como se ha explicado anteriormente.

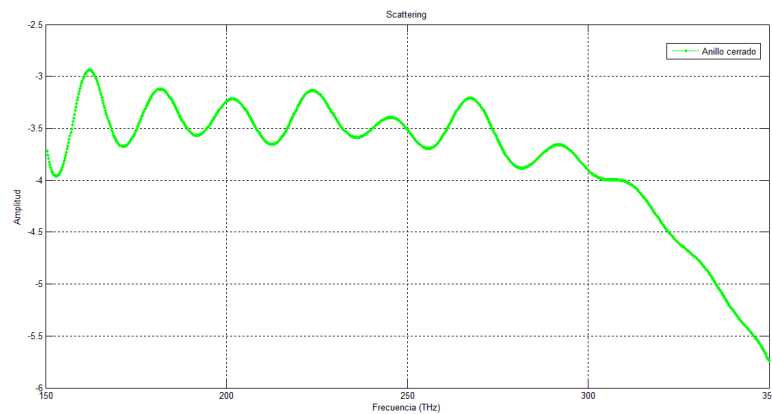


Fig. 41. *Scattering* radiado por el anillo (normalizado con respecto a la estructura sin anillo).

Además, si se analizan los parámetros S del puerto colocado a 1500 nm sobre el SRR se puede ver en la Fig. 42 que el *scattering* en módulo es igual para las dos polarizaciones que se han medido, es decir, no existe desfase entre los modos radiados.

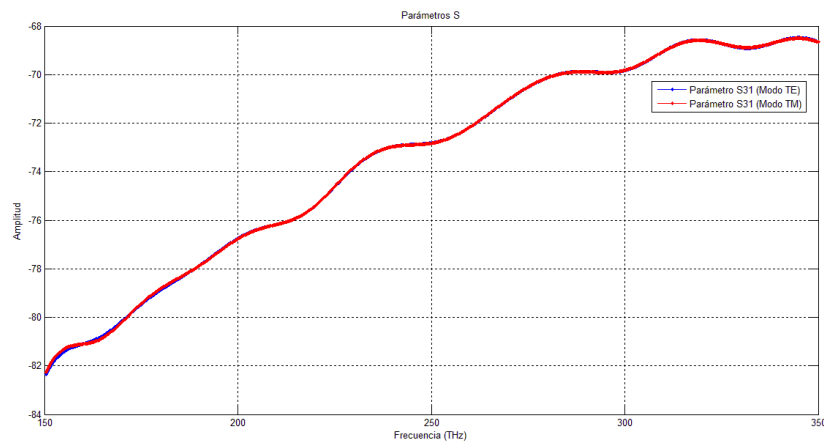


Fig. 42. Parámetros S del puerto 3 colocado sobre el SRR de la estructura VI para medir el *scattering*.

IV.5. ESTRUCTURA V

En esta última estructura, se pretende acoplar cinco anillos que resuenan a la frecuencia de diseño y observar si se ha transmitido la señal hasta el último. En este caso, la simulación se realizará en aire para conseguir las resonancias con unas dimensiones mayores de los anillos.

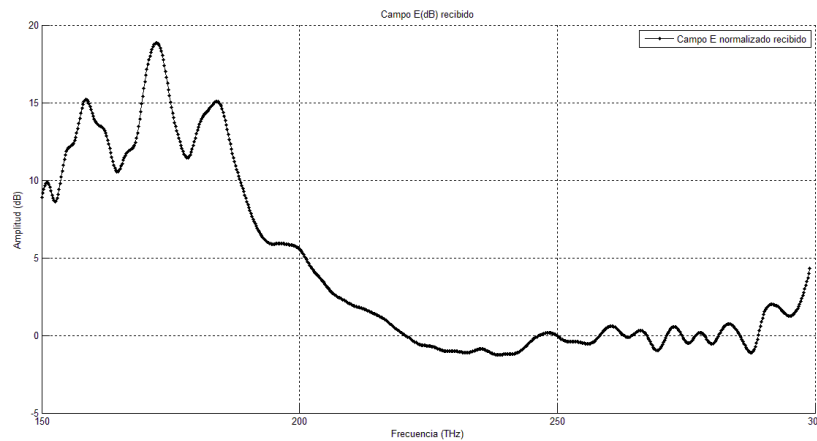


Fig. 43. Campo E recibido tras el acoplo de 5 anillos separados $d = 40$ nm (normalizado con respecto a la estructura sin anillos).

En la Fig. 43 se ha medido el campo eléctrico en dB (normalizado con respecto a la estructura sin los elementos resonantes) que se ha recibido en el quinto y último de los anillos acoplados (separados una distancia de 40 nm). Se puede considerar que cerca de la frecuencia de resonancia de los anillos (alrededor de 200 THz) se recibe una señal que se ha ido transmitiendo debido al acoplo mutuo de los anillos. Es decir, se recibe un nivel de campo eléctrico suficiente para afirmar que ha habido acoplo y transmisión entre los anillos. Además, en la Fig.44 se puede observar la existencia de un campo magnético en el centro de los anillos y un campo eléctrico en los gaps de estos (generados al resonar a la frecuencia de diseño) que son los causantes del acoplo mutuo de los anillos.

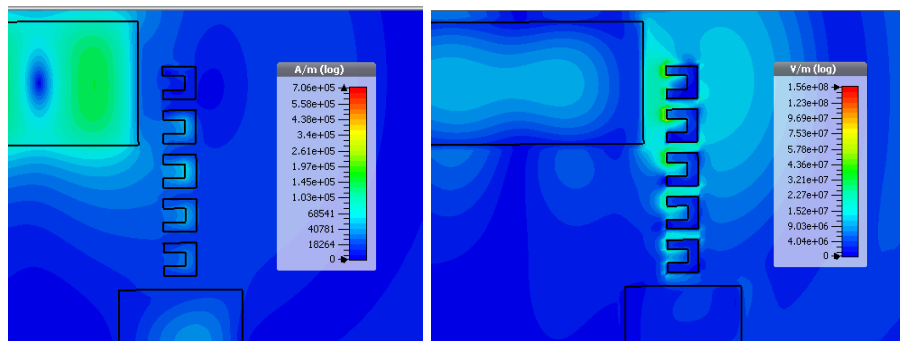


Fig. 44. Vista superior del mapa del campo H (izq.) y E (dcha.) en módulo cuando se excita la resonancia del SRR de la estructura V.

A continuación, se va a analizar el caso en el que el segundo y el cuarto anillo de la estructura V se encuentran girados 180° .

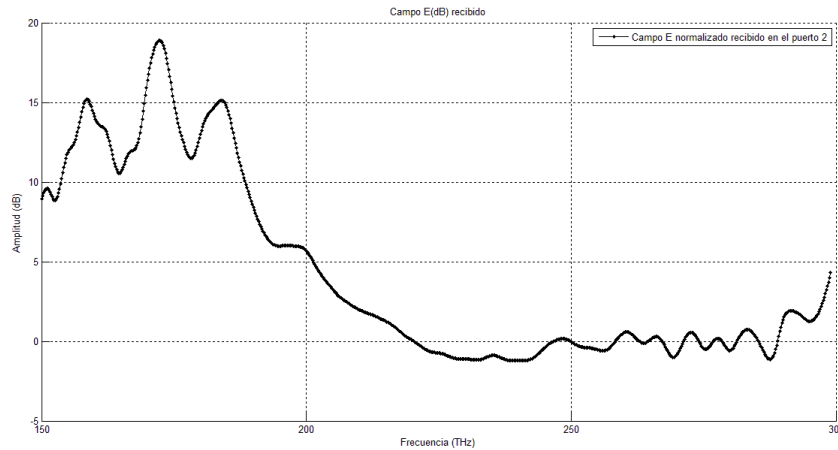


Fig. 45. Campo E recibido tras el acoplo de 5 anillos (2 de ellos rotados 180°) separados $d = 40$ nm (normalizado con respecto a la estructura sin SRRs).

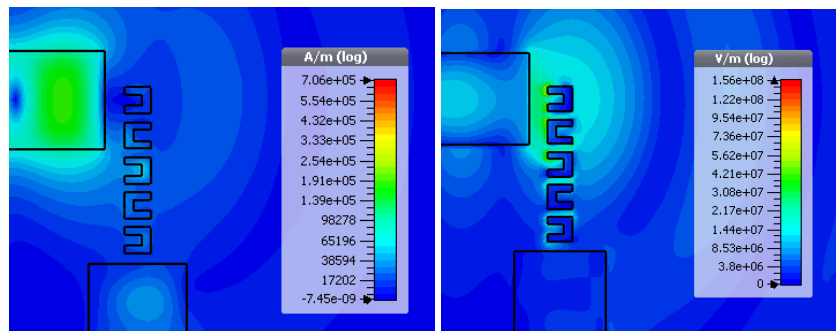


Fig. 46. Vista superior del mapa del campo H (izq.) y E (dcha.) en módulo cuando se excita la resonancia del SRR de la estructura V con 2 anillos rotados 180° .

Se puede ver en la Fig.45 que también existe un campo eléctrico (representado en dB y normalizado con respecto a la estructura sin los anillos) que se ha guiado debido al acoplo entre los anillos. Es por esto por lo que se puede afirmar que la amplitud de dicho campo es prácticamente la misma que en el caso en el que los anillos no estaban rotados. Por lo tanto, el giro de dos de los SRR no ha afectado al acoplo y la transmisión de la señal ni al acoplo de los anillos entre sí como se puede observar en la Fig.46.

Si se estudia el caso en el que los anillos tienen una separación mayor, se observa que el campo eléctrico recibido en dB (normalizado con respecto a la estructura sin los elementos resonantes) que se representa en las gráficas de la Fig. 47 y 49 disminuye su amplitud a medida que aumenta la distancia entre los anillos. Este fenómeno es lógico debido a que cuanto mayor sea la separación entre anillos menor será el acoplo que estos sufran y por ello menor será el campo eléctrico que se vaya transmitiendo y finalmente se reciba (Fig. 48 y 50).

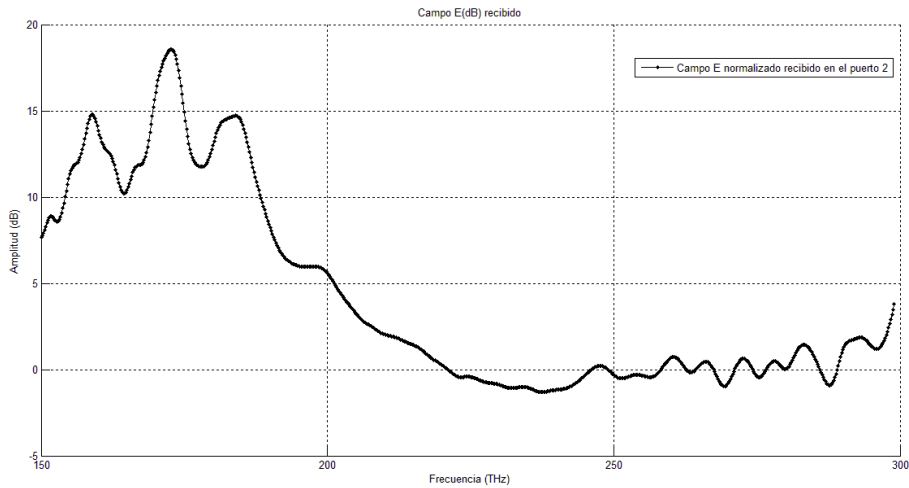


Fig. 47. Campo E recibido tras el acoplo de los anillos separados $d = 65$ nm (normalizado con respecto a la estructura sin anillos).

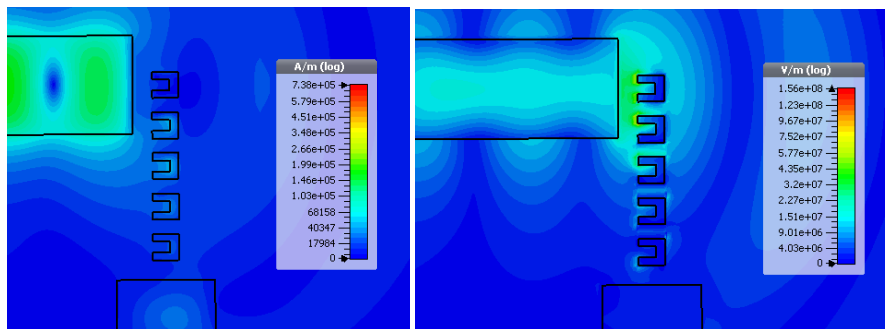


Fig. 48. Vista superior del mapa del campo H (izq.) y E (dcha.) en módulo cuando se excita la resonancia del SRR de la estructura V con 5 anillos separados $d = 65$ nm.

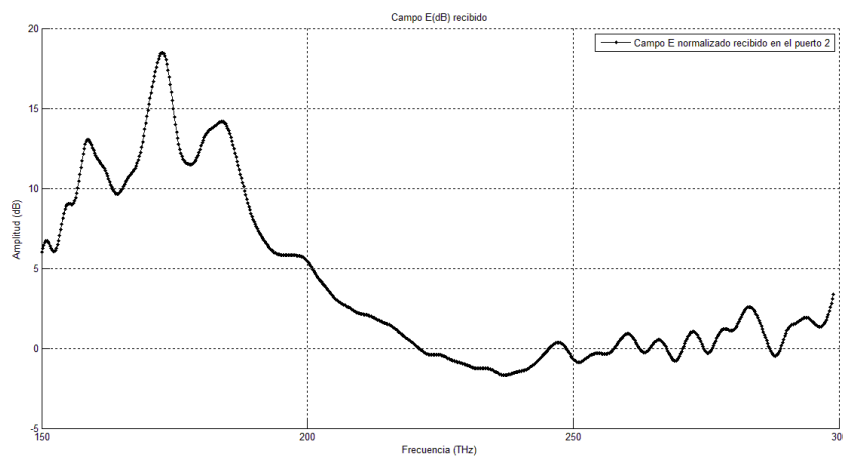


Fig. 49. Campo E recibido tras el acoplo de los anillos separados $d = 100$ nm (normalizado con respecto a la estructura sin anillos).

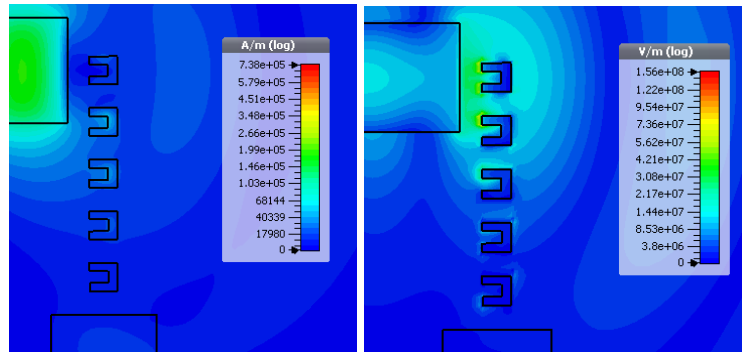


Fig. 50. Vista superior del mapa del campo H (izq.) y E (dcha.) en módulo cuando se excita la resonancia del SRR de la estructura V con 5 anillos separados $d = 100$ nm.

A continuación, en la Fig.51 se puede ver una gráfica comparativa de los casos mencionados para así contrastar las diferencias existentes entre ellos. Se puede observar que tal y como se ha mencionado con anterioridad, la intensidad del campo eléctrico recibido (en dB) va disminuyendo a medida que la distancia entre los anillos aumenta. Cabe destacar que la gráfica de color rojo y rosa tienen prácticamente la misma amplitud de campo debido a que la rotación de los anillos no afecta al acoplo entre ellos mientras que las gráficas de color azul y verde tienen una amplitud ligeramente menor debido al aumento de la separación entre los SRR. Hay que tener en cuenta que las variaciones comentadas anteriormente son sutiles debido a que el campo que finalmente se consigue acoplar tiene una intensidad baja.

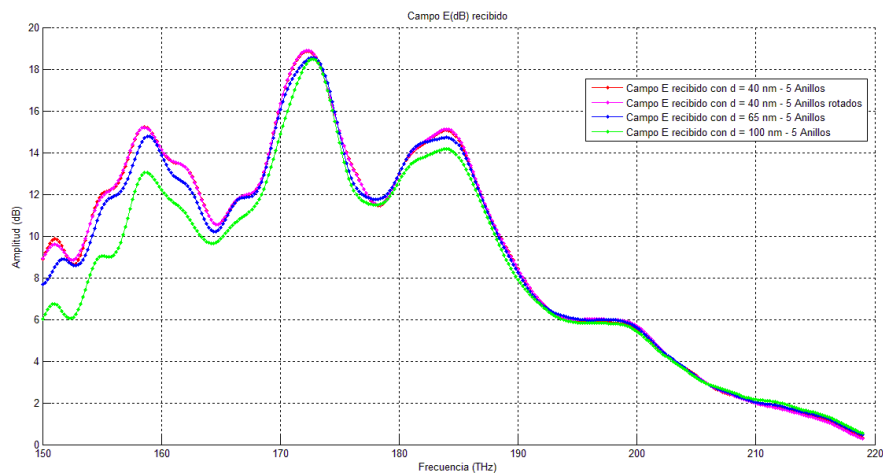


Fig. 51. Comparativo campo E recibido de los casos anteriores (normalizado con respecto a la estructura sin SRRs).

Finalmente, se ha reducido el número de anillos de 5 a 3 (aunque la distancia entre ellos se ha mantenido en 40 nm) para ver si el campo que se recibe debido al acoplo mutuo entre ellos varía.

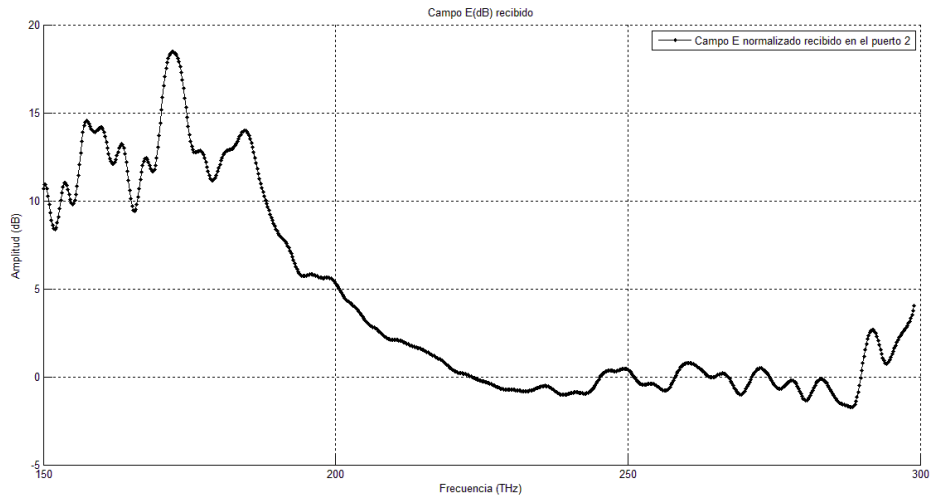


Fig. 52. Campo E recibido tras el acoplamiento de 3 anillos separados $d = 40$ nm (normalizado con respecto a la estructura sin elementos resonantes).

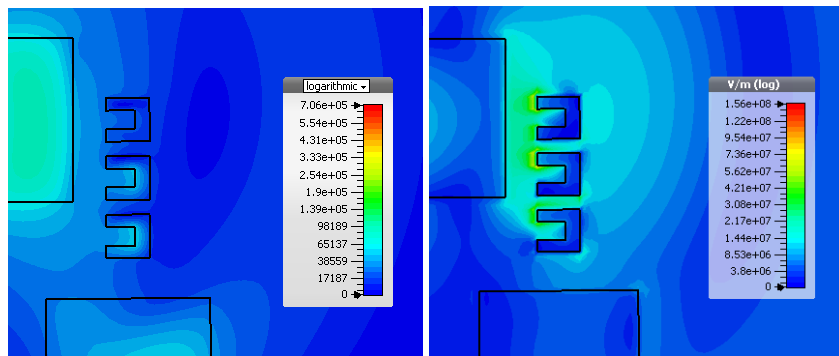


Fig. 53. Vista superior del mapa del campo H (izq.) y E (dcha.) en módulo cuando se excita la resonancia del SRR de la estructura V con 3 anillos separados $d = 40$ nm.

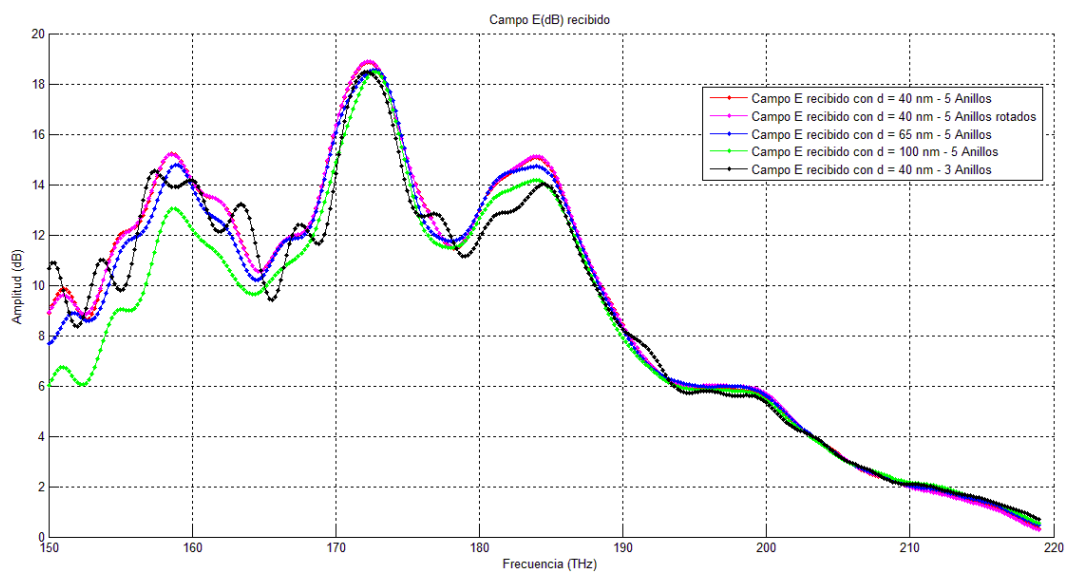


Fig. 54. Comparativo campo E recibido de todos los casos (normalizado con respecto a la estructura sin anillos).

Se puede intuir en la Fig. 52 y 54 que la amplitud del campo eléctrico en dB (normalizado con respecto a la estructura sin los elementos resonantes) que se recibe al acoplar 3 anillos no ha sufrido ninguna mejora con respecto a la amplitud de dicho campo que se había estudiado en los casos anteriores. Esto se debe a que el acoplo que se genera entre los anillos es el mismo independientemente del número de SRR que se tengan (Fig. 53).

Finalmente es importante resaltar que, este tipo de estructuras en las cuales un anillo se puede acoplar a otro sin necesidad de que estén en contacto directo, son de gran utilidad hoy en día debido a que son la base de aplicaciones innovadoras como los cargadores inalámbricos de inducción con un tamaño reducido de la Fig. 55 [27].

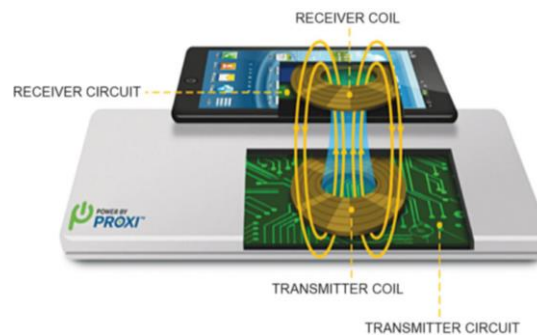


Fig. 55. Cargador inalámbrico mediante tecnología de anillos resonantes acoplados. *Modificada de The Future Of Mobile Charging, 2014*^[27].

V. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

V.1. CONCLUSIONES

En conclusión, con el desarrollo de este proyecto se ha conseguido diseñar y caracterizar mediante el software CST Studio Suite un anillo recortado metálico aislado integrado en una guía de silicio a frecuencias de infrarrojo cercano. Se ha logrado así que este resonara a una longitud de onda de en torno a 1550 nm y como novedad se ha podido caracterizar de forma individual. Además, este elemento se ha integrado en otras estructuras y se ha podido observar el comportamiento que presentaba demostrándose así que se pueden excitar anillos aislados utilizando guías de silicio. También se ha podido medir el Scattering generado hacia arriba, es decir en dirección perpendicular a la de propagación y se han obtenido los resultados que se esperaban. Por ello, las propiedades que han mostrado estos SRR cuando están aislados son muy interesantes, ya que estos tipos de elementos pueden funcionar como nanoantenas magnéticas o ser usados para biosensado.

Por otra parte, se ha conseguido guiar un campo eléctrico entre dos guías perpendiculares mediante el acoplo entre anillos recortados metálicos, por lo que se ha comprobado que se pueden utilizar este tipo de estructuras para conseguir aplicaciones muy novedosas hoy en día como cargadores inalámbricos de inducción.

V.2. LÍNEAS FUTURAS

Para continuar con el desarrollo de este proyecto, se deberán fabricar las estructuras diseñadas en la sala limpia del Centro de Tecnología Nanofotónica de la Universidad Politécnica de Valencia (UPV) y posteriormente caracterizarlas experimentalmente en el laboratorio tal y como se explica teóricamente en los siguientes apartados.

V.2.1. PROCESO DE FABRICACIÓN

El proceso de nanofabricación surge de la necesidad de aumentar la resolución en la fabricación de materiales o estructuras con un tamaño muy reducido. Tras el avance tecnológico de los métodos de caracterización e imagen, se puede conocer la distribución de la materia y fabricar de una manera mejorada nuevas estructuras. En este caso, se va a detallar el proceso que se deberá seguir en un futuro para incrustar el anillo resonante de oro en el gap de la guía de ondas de silicio.

Por un lado, la guía de ondas se fabricará sobre muestras de silicio estándar sobre aislante (*Silicon-on-Insulator*, por sus siglas en inglés SOI) adquiridas de obleas *SOITEC*. La fabricación de estas guías se basará en un proceso de escritura directa de haz de electrones. Es decir, se trata de enfocar un haz para dibujar sobre una superficie cubierta con una capa fina de un polímero químico conocido como resistencia. En nuestro caso, se realizará en una película de resina de silsesquioxano (*Hydrogen Silsesquioxane*, por sus siglas en inglés HSQ) recubierta de 100 nm de hidrógeno. Dicho haz de electrones cambiará las propiedades de la capa de HSQ, lo que permitirá posteriormente la eliminación selectiva de las regiones expuestas o no expuestas. Dicha exposición al haz se realizará con la herramienta Raith150 que se puede ver en la Fig. 56.



Fig. 56. Máquina Raith150 utilizada para la litografía por electrones. Tomada de J. Martí, *Nanofabricación*²⁸.

Después de realizar la capa de resistencia con el HSQ (utilizando hidróxido de tetrametilamonio), se transferirán los patrones de la resistencia a las muestras de SOI haciendo un ataque químico de grabado de iones reactivos con plasma inducido por inducción optimizado con gases de fluoruro para eliminar el material depositado sobre las obleas. Normalmente, dicho plasma se genera en condiciones de baja presión mediante un campo electromagnético.

A continuación, se depositará una capa de dióxido de silicio sobre la muestra SOI utilizando un sistema de deposición de vapor químico (*Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition*, por sus siglas en inglés PECVD) mejorado por plasma de *Applied Materials* con la finalidad de centrar el SRR con el eje óptico de la guía de ondas, asegurando así una máxima interacción con el campo dentro del gap. Se ha de puntualizar que se realizará una segunda exposición al haz de electrones previamente a los procesos de evaporación y separación de metal para delimitar el SRR de oro dentro del gap de la guía de ondas. También, se evaporará una capa de titanio de 5 nm para mejorar la adhesión del oro.

Finalmente, se depositará un recubrimiento superior de dióxido de silicio sobre la muestra SOI utilizando de nuevo PECVD para asegurar la homogeneidad en el entorno de la nanoestructura metálica. Además, se realizará una imagen SEM (*Scanning Electron Microscope*, por sus siglas en inglés SEM) de las muestras fabricadas para así observar si tienen desviaciones, principalmente en la posición de la nanoestructura dentro de la brecha, ya que esto podría producir resultados diferentes al medir el sistema en direcciones opuestas. Para tenerlo en cuenta, se deberá caracterizar la estructura fabricada en ambas direcciones de transmisión (de izquierda a derecha y viceversa) y también para ambos modos guiados (TE y TM), dando un conjunto de cuatro mediciones posibles [28, 29].

V.2.2. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Para realizar la caracterización de la estructura, se utilizará un sistema estándar de acoplamiento tal y como se puede observar en la Fig. 57, debido a que este tipo de sistemas se emplean normalmente para medir espectros de transmisión en chips fotónicos. Como fuente de luz, se utilizará un láser sintonizable que cubrirá el rango entre 1260 y 1630 nm. Cabe añadir que se deberá utilizar un controlador de polarización para elegir el modo que se pretenda propagar a lo largo de las guías de onda y una fibra lensed para acoplar la luz a la muestra.

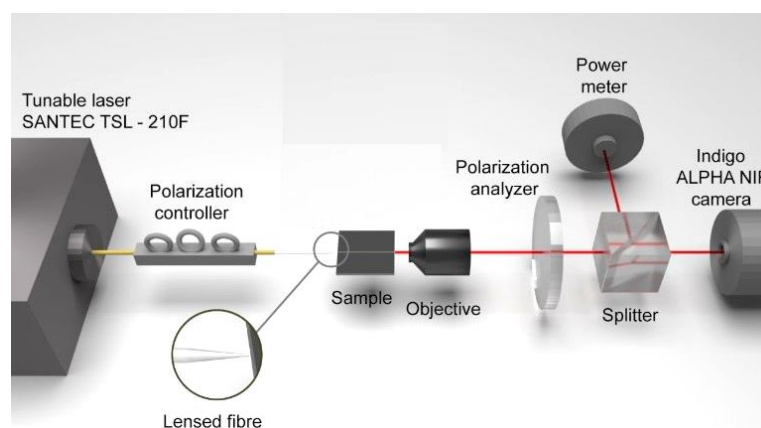


Fig. 57. Esquema de la configuración óptica que se utilizará en las mediciones experimentales. *Modificado de Espinosa-Soria, A., Griol, A., & Martínez, A., Experimental measurement of plasmonic nanostructures embedded in silicon waveguide gaps²⁹.*

Por último, a la salida de la muestra se debe colocar un objetivo, un filtro de polarización y un divisor para dividir el haz de luz en dos trayectorias: una a la cámara infrarroja para localizar el punto luminoso de salida y otra a un medidor de potencia. La fibra lensed y la muestra se colocarán sobre nanopositionadores que permitan alinear la fibra de entrada con cada guía de ondas de la muestra. En la salida de la muestra, se tendrá un objetivo, un filtro de polarización y un divisor, que será utilizado para dividir el haz de luz en dos trayectorias ortogonales: una dirigida a una cámara infrarroja cercana para localizar el punto luminoso de salida y la otra dirigida a un medidor de potencia. La fibra con lentes y la muestra se situarán sobre nanopositionadores (no mostrados en la Fig. 36 por razones de claridad) que permitan alinear la fibra de entrada con cada guía de ondas incluida en la muestra [29].

AGRADECIMIENTOS

Llegado este momento quisiera agradecer a mis padres el apoyo que siempre me dan, el cual me hace alcanzar mis objetivos tanto profesionales como personales. A mis amigas Sarai Martínez y Youmana Botella por soportarme y ayudarme en todo lo que he necesitado tanto en este proyecto como en la vida.

Además, no quiero olvidarme de agradecerles a Javier Losada y Alba Espinosa los conocimientos que me han transmitido porque sin ellos no hubiera aprendido ni avanzado tanto durante todo este tiempo.

También quiero agradecer a todo el personal del Centro de Tecnología Nanofotónica (NTC) de la Universidad Politécnica de Valencia (UPV) y demás profesores la ayuda que me han ofrecido durante todo este proceso, ya que me han tratado como una más de su equipo.

Por último pero no menos importante, quiero agradecerle a mi tutor Alejandro Martínez la ayuda, paciencia, apoyo y dedicación que me ha brindado durante el desarrollo de este proyecto, ya que sin sus consejos no habría logrado llegar hasta aquí.

Gracias.

LISTA DE ACRÓNIMOS

CST	Computer Simulation Technology
EM	Electromagnético
HSQ	Hydrogen SilsesQuioxane
NTC	Centro de Tecnología Nanofotónica
PECVD	Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition
SEM	Scanning Electron Microscope
SiO ₂	Dióxido de Silicio
SOI	Silicon On Insulator
SP	Surface Plasmons
SRR	Split Ring Resonator
TE	Transversal Eléctrico
TFM	Trabajo Final Máster
TM	Transversal Magnético
UPV	Universidad Politécnica de Valencia

BIBLIOGRAFÍA

- [1] R. A. Shelby, D. R. Smith, S. Schultz, *Experimental verification of a negative index of refraction*, *Science*, 2001, 296, 77-79.
- [2] P. Fan, Z. Yu, S. Fan, and M. L. Brongersma, *Optical Fano resonance of an individual semiconductor nanostructure*, *Nat. Mater.*, 2014, 13(5), 471–475.
- [3] H. Aouani, M. Rahmani, M. Navarro-Cía, and S. A. Maier, *Third-harmonic-upconversion enhancement from a single semiconductor nanoparticle coupled to a plasmonic antenna*, *Nat. Nanotechnol.*, 2014, 9(4), 290–294.
- [4] Ebbesen, T. W., Lezec, H. J., Ghaemi, H. F., Thio, T., & Wolff, P. A., *Extraordinary optical transmission through sub-wavelength hole arrays*, *Nature*, 1998, 391(6668), 667.
- [5] A. V. Zayats and I. I. Smolyaninov, *Near-field photonics: surface plasmon polaritons and localised surface plasmons*, 2003, *J. Opt. A, Pure Appl. Opt.* 5(4), S16–S50.
- [6] Petryayeva, E., & Krull, U. J., *Localized surface plasmon resonance: nanostructures, bioassays and biosensing—a review*, *Analytica chimica acta*, 2011, 706(1), 8-24.
- [7] Zhang, J., & Zhang, L., *Nanostructures for surface plasmons. Advances in Optics and Photonics*, 2012, 4(2), 157-321.
- [8] A. Martínez, *Metamateriales fotónicos*, Nanofotonica Universidad Politécnica de Valencia, 2017, T5, 9-12
- [9] V. G. Veselago, *Soviet Physics Uspekhi*, 1968, vol 10, 4, 509
- [10] A. Pimenov et al., *Negative Refraction Observed in a Metallic Ferromagnet in the Gigahertz Frequency Range*, 2007, *Phys. Rev. Lett.* 98, 197401
- [11] L.-H. Wu et al., *Experimental observation of light refraction going from negative to positive in the visible region at the pure air/Au interface*, 2008, *Phys. Rev. B* 77, 035134.
- [12] M. Lipson, *Guiding, modulating, and emitting light on silicon - Challenges and opportunities*, *J. Lightwave Technol.*, 2005, 23(12), 4222–4238.
- [13] M. Hochberg and T. Baehr-Jones, *Toward fabless silicon photonics*, *Nat. Photonics*, 2010, 4(8), 492–494.
- [14] A. Rickman, *The commercialization of silicon photonics*, *Nat. Photonics*, 2014, 8(8), 579–582.
- [15] N. Daldosso, M. Melchiorri, F. Riboli, F. Sbrana, L. Pavesi, G. Pucker, C. Kompocholis, M. Crivellari, P. Belluti, and A. Lui, *Fabrication and optical characterization of thin two-dimensional Si₃N₄ waveguides*, 2004, *Mater. Sci. Semicond. Process.* 7(4-6), 453–458.

- [16] S. Romero-García, F. Merget, F. Zhong, H. Finkelstein, and J. Witzens, *Silicon nitride CMOS-compatible platform for integrated photonics applications at visible wavelengths*, 2013, Opt. Express 21(12), 14036–14046 (2013).
- [17] Pendry, J. B., Holden, A. J., Robbins, D. J., & Stewart, W. J., *Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena*, *IEEE transactions on microwave theory and techniques*, 1999, 47(11), 2075-2084.
- [18] T. J. Yen et al, *Terahertz Magnetic Response from Artificial Materials*, *Science* 303, 2004, 1494.
- [19] S. Linden et al, *Magnetic Response of Metamaterials at 100 THz*, *Science* 306, 2006, 1351.
- [20] Pulido-Mancera, L. M., & Baena, J. D., *Equivalent circuit model for thick split ring resonators and thick spiral resonators*, *In Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI)*, 2014, IEEE (pp. 2084-2085). IEEE.
- [21] CST Studio Suite™, *CST Getting Started manual*, 2014
- [22] Hein, S. M., & Giessen, H., *Tailoring magnetic dipole emission with plasmonic split-ring resonators*, *Physical review letters*, 2013, 111(2), 026803.
- [23] Sersic, I., Frimmer, M., Verhagen, E., & Koenderink, A. F., *Electric and magnetic dipole coupling in near-infrared split-ring metamaterial arrays*, *Physical review letters*, 2009, 103(21), 213902.
- [24] Enkrich, C., Wegener, M., Linden, S., Burger, S., Zschiedrich, L., Schmidt, F., ... & Soukoulis, C. M., *Magnetic metamaterials at telecommunication and visible frequencies*, *Physical review letters*, 2005, 95(20), 203901.
- [25] Rockstuhl, C., Zentgraf, T., Guo, H., Liu, N., Etrich, C., Loa, I., ... & Giessen, H., *Resonances of split-ring resonator metamaterials in the near infrared*, *Applied Physics B: Lasers and Optics*, 2006, 84(1), 219-227.
- [26] Rodríguez-Fortuño, F. J., Espinosa-Soria, A., & Martínez, A., *Exploiting metamaterials, plasmonics and nanoantennas concepts in silicon photonics*, *Journal of Optics*, 2016, 18(12), 123001.
- [27] *The Future Of Mobile Charging*, 2014, Recuperado de <https://mechtechbreakdown.wordpress.com>
- [28] J. Martí, *Nanofabricación*, Nanofotonica Universidad Politécnica de Valencia, 2017, T7.
- [29] Espinosa-Soria, A., Griol, A., & Martínez, A., *Experimental measurement of plasmonic nanostructures embedded in silicon waveguide gaps*, *Optics express*, 2016, 24(9), 9592-9601.