

# ANÁLISIS COMPARATIVO DEL ACOPLAMIENTO DE CAVIDADES L3 CRISTAL FOTÓNICAS EN 2 DIMENSIONES

## COMPARATIVE ANALYSIS OF 2D COUPLED L3 PHOTONIC CRYSTAL CAVITIES

**Cristian Mora-Montaño, Herbert Vinck-Posada**

Grupo de Óptica e Información Cuántica, Universidad Nacional de Colombia,  
Departamento de Física, Bogotá, Colombia

(Recibido: Octubre/2014. Aceptado: Enero/2015)

### Resumen

Investigamos las propiedades del modo fundamental en cristales fotónicos 2D-L3 acoplados, tales como el factor de calidad, separación de energía y polarización para tres orientaciones relativas entre las cavidades. Además se hace un seguimiento de la separación de energía como función del contraste de la permitividad relativa para cavidades paralelas. El acoplamiento de cavidades tiene una gran utilidad para aumentar la resonancia simultánea de dos transistores, en la realización de interruptores ópticos y en general en la transferencia de información entre cavidades.

**Palabras clave:** Fotónica, acoplamiento, cavidades L3, cristal fotónico, FDTD.

### Abstract

We investigate the properties of the fundamental mode of coupled L3 photonic crystal cavities like quality factor, energy splitting and polarization for three different relative orientations of the cavities as well as a monitoring of the energy splitting as a function of relative permittivity

contrast in parallel cavities. The splitting control of the coupled states is potentially useful for applications that require simultaneous resonant enhancement of two transitions, in the production of optical switches and in general in the information transfer between cavities

**Keywords:** Photonics, coupling, L3 cavities, photonic crystal, FDTD.

## Introducción

Un cristal fotónico es una estructura en la cual el índice de refracción cambia de manera periódica al interior de éste, en general puede presentar periodicidad en cada dirección (ejes cartesianos). Se sabe que en este tipo de estructuras aparece una región de frecuencias prohibidas (GAP), en la cual cualquier onda electromagnética que incida sobre el material con dichas frecuencias es reflejada en principio. Cuando se rompe la periodicidad en la permitividad eléctrica del cristal (defecto) se evidencia confinamiento de la onda electromagnética dentro del defecto y la frecuencia de este modo corresponde a la frecuencia que aparece en el GAP. [1][2]

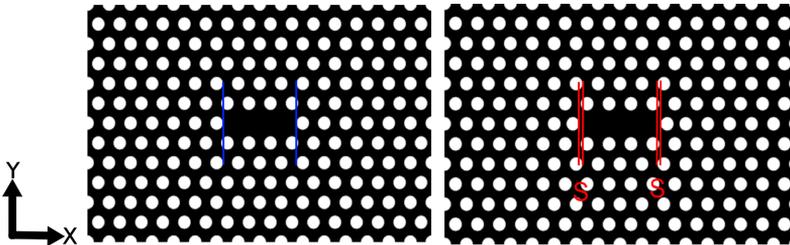


FIGURA 1. (a) Cavidad L3. (b) Cavidad L3 con desplazamiento lateral

Los modos confinados en el cristal debidos a los distintos defectos suelen caracterizarse por el factor de calidad (Q) debido a que brinda información sobre el tiempo de vida de la luz atrapada al interior del cristal. En particular, el defecto “L3” fue el primer tipo de cavidad en un cristal fotónico en el que un factor de calidad por encima de  $10^4$  fue obtenido experimentalmente [3][4]. Esta cavidad consiste en un bloque dieléctrico en el cual faltan 3 huecos en línea recta dentro de una red hexagonal, como se muestra en la

Fig. 1-a. Adicionalmente, para obtener un mayor factor de calidad (Q) se realiza un desplazamiento (s) de los huecos al final de la cavidad (Fig. 1-b) [5] [3].

En este artículo se estudia el acoplamiento entre este tipo de cavidades variando la orientación relativa entre ellas, esto permite tener control sobre la sintonización de la separación de energía [6], así, el acoplamiento de cavidades tiene una gran utilidad para aumentar la resonancia simultánea de dos transistores, en la realización de switches ópticos y en general en la transferencia de información entre cavidades [7] [8].

El artículo está organizado de la siguiente manera: comienza con la descripción del método utilizado, después se presentan los resultados obtenidos para tres geometrías diferentes y finalmente se exponen las conclusiones.

## Modelo

Se estudia el acoplamiento entre cavidades para orientaciones relativas de  $0^\circ$ ,  $60^\circ$  y  $120^\circ$  (Fig. 3-Arriba). La estructura considerada fue un cristal de AsGa con huecos de aire cuya constante de red es de  $a = 270nm$ , radio de los huecos  $r = 0,29a$  y desplazamiento de los huecos al final de la cavidad  $s = 0,15a$ . como lo indica la Fig. 1-b.

La separación de energía del modo fundamental se determina de la estructura de bandas del cristal, sin embargo, debido a que la energía de los modos confinados dentro del GAP es independiente del punto sobre el barrido de la zona de Brillouin en la red recíproca, sólo se calcularon las frecuencias para un punto sobre el barrido [9]. El cálculo de las frecuencias se realizó con el software MPB [10] (MIT Photonic-Bands), basado en un método de ondas planas, replicando una supercelda computacional en una red cuadrada e infinita en la dirección z (Fig. 1-b).

Para calcular el factor de calidad (Q) de los modos confinados se usó el método de diferencias finitas en el dominio del tiempo (FDTD -

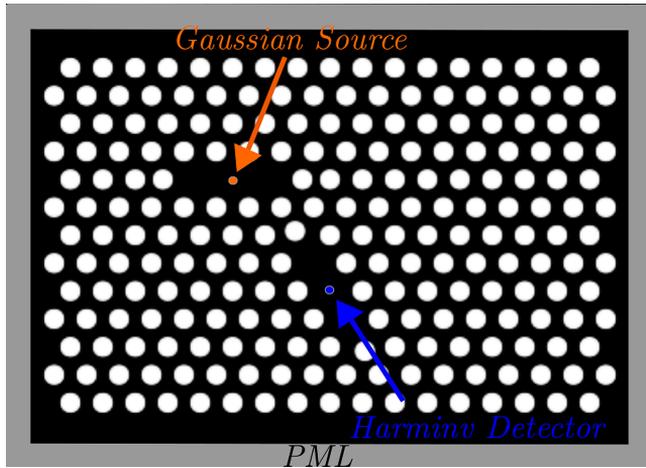


FIGURA 2. Estructura simulada en MEEP

Finite Difference Time Domain). Los resultados mostrados en este artículo fueron calculados usando el software de FDTD Meep [11]. A diferencia de MPB, considerar un cristal finito en el plano x-y conlleva a reflexiones de la radiación emitida por la cavidad, por eso, se incorporó PML (Perfectly Matched Layers) en los bordes de la celda computacional a razón de absorber la radiación emitida y garantizar la condición de periodicidad de Bloch.

En este orden de ideas, el mecanismo para detectar los modos confinados al interior del defecto fue colocar una fuente gaussiana en el centro de una de las cavidades y un detector en el centro de la cavidad vecina. Meep cuenta con un software auxiliar (Harminv) capaz de reconocer las frecuencias de resonancia sobrevivientes en la cavidad un tiempo después de apagar la fuente. La Fig. 2-b ilustra la ubicación de la fuente, del detector y la PML de la estructura.

## Resultados

La Fig. 3 muestra la densidad de energía del modo fundamental calculada para cada una de las tres orientaciones trabajadas. La Fig. 4 muestra el comportamiento de la separación de energía de cada una de las orientaciones en función de la distancia entre los centros de las cavidades. El desplazamiento de las cavidades se hizo en la dirección

x en todos los casos y adicionalmente a todas las cavidades se aplicó desplazamiento de los huecos finales independientemente de la orientación relativa de esta. Dado que la polarización dominante para cavidades aisladas es  $E_y$ , siguiendo la convención usada en la referencia [3], se han etiquetado los modos como “acoplados” para aquellos en el cual el campo  $E_y$  tiene el mismo signo en el centro de las cavidades y como “no-acoplados” aquellos en los cuales el campo es de signo contrario.

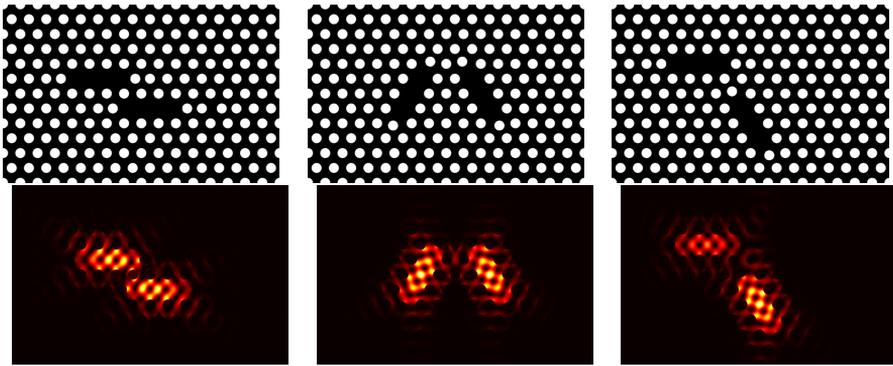


FIGURA 3. (Arriba) Orientación relativa entre cavidades de  $0^\circ$ ,  $60^\circ$  y  $120^\circ$  respectivamente. (Abajo) Densidad de energía del modo fundamental

De la Fig. 4 se observa que el mayor acoplamiento se da cuando las cavidades están paralelas. Por otro lado cuando la orientación es de  $60^\circ$  prácticamente no hay acoplamiento entre las cavidades y un acoplamiento muy bajo para cavidades orientadas a  $120^\circ$ . Como es de esperar, la separación de energía se reduce conforme se alejan las cavidades.

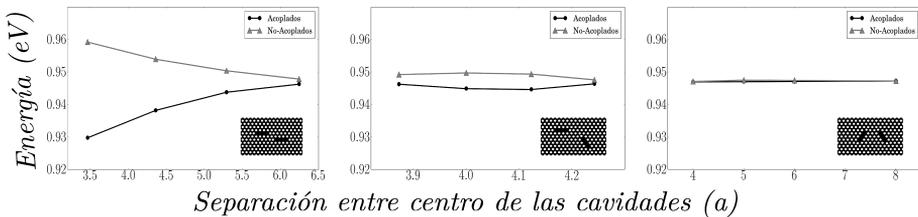


FIGURA 4. Separación de energía en función de la distancia entre el centro de las cavidades

Por otra parte la Fig. 5 muestra el comportamiento del factor de calidad ( $Q$ ) de  $E_y$  para cada una de las configuraciones, en función de la distancia entre el centro de las cavidades. Se observa un  $Q$  mucho mayor para cavidades paralelas debido a que se mantiene la simetría del modo, caso diferente a cuando las cavidades se inclinan, dada la reducción de la componente dominante del modo.

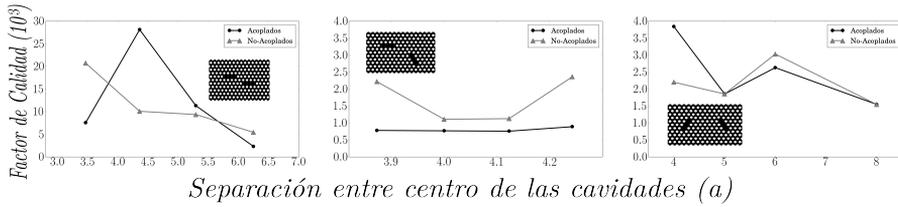


FIGURA 5. Factor de calidad ( $Q$ ) en función de la separación entre el centro de las cavidades

Adicionalmente se hizo un estudio del comportamiento del factor de calidad para algunos de los modos excitados. Debido a que la polarización dominante de éstos es ahora en la dirección  $x$ , el factor de calidad aumenta cuando se cambia la orientación relativa entre las cavidades. Es decir, la rotación de las cavidades aumenta el factor de calidad de los modos excitados cuya polarización es en la dirección  $x$ .

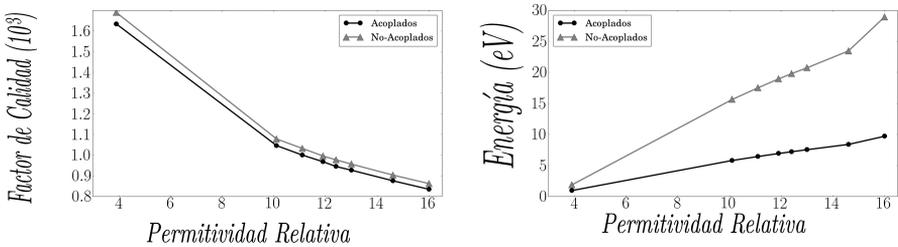


FIGURA 6. Factor de calidad y separación de energía del modo fundamental como función del contraste respectivamente.

Finalmente la Fig. 6 muestra el comportamiento de la separación de energía del modo fundamental y del factor de calidad como función del contraste entre la permitividad relativa de la estructura y los huecos de aire. Los resultados fueron obtenidos para el caso

de cavidades paralelas con separación entre centros de  $l = \sqrt{12}a$ , estos muestran como cambiando el material del cristal es posible sintonizar la separación de energía que se mantiene constante, así mismo manipular el tiempo de vida de los modos confinados al interior del defecto.

## Conclusiones

Las propiedades de los modos confinados dentro del cristal pueden ser controladas variando la geometría del sistema. Se mostró como el factor de calidad y la separación de energía pueden ser sintonizadas de varias maneras; una de ellas es cambiando la orientación entre las cavidades, otra es variando la separación entre estas o con cambios del contraste de la permitividad de la estructura. Esto muestra control del acoplamiento de las cavidades para aplicaciones en la transmisión de información.

## Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por Colciencias dentro del proyecto con código 110156933525, contrato número 026-2013 y código HERMES 17432. Por otra parte, reconocemos el apoyo técnico y computacional del Grupo de Óptica e Información Cuántica de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá

## Referencias

- [1] J. Joannopoulos, S. Johnson, J. Winn, and E. Meade, *Photonic Crystals, Modeling the Flow of Light* (Princeton University pressy, 2008) ISBN 978-0-691-12456-8, <http://ab-initio.mit.edu/book/photonic-crystals-book.pdf>
- [2] E. Yablonovitch, Phys. Rev. Lett. **58**, 2059 (Mayo 1987), <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.58.2059>
- [3] A. R. A. Chalcraft, S. Lam, B. D. Jones, D. Szymanski, R. Oulton, A. C. T. Thijssen, M. S. Skolnick, D. M. Whittaker, T. F. Krauss, and A. Fox, Opt. Express **19**, 25670 (Marzo 2011)

- [4] Y. Akahane, T. Asano, B. S. Song, and S. Noda, *Nature* **425**, 944 (Oct 2003), <http://www.nature.com/nature/journal/v425/n6961/pdf/nature02063.pdf>
- [5] A. R. A. Chalcraft, S. Lam, D. O'Brien, T. F. Krauss, M. Sahin, D. Szymanski, D. Sanvitto, R. Oulton, M. S. Skolnick, A. M. Fox, D. M. Whittaker, H.-Y. Liu, and M. Hopkinson, *Appl. Phys. Lett.* **90**, 241117 (Junio 2007)
- [6] P. R. Villeneuve, S. Fan, and J. D. Joannopoulos, *Phys. Rev. B* **54**, 7837 (Sep 1996), <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevB.54.7837>
- [7] A. Dousse, J. Suffczynski, O. Krebs, A. Beveratos, A. Lemaitre, I. Sagnes, J. Bloch, P. Voisin, and P. Senellart, *Nature* **466**, 217 (Jul 2010), <http://www.nature.com/nature/journal/v466/n7303/full/nature09148.html>
- [8] A. Dousse, J. Suffczynski, A. Beveratos, O. Krebs, A. Lemaître, I. Sagnes, J. Bloch, P. Voisin, and P. Senellart, *Appl. Phys. Lett.* **97**, 081104 (2010)
- [9] O. Painter, J. Vuckovic, and A. Scherer, *JOSA B* **16**, 275 (Feb 1999)
- [10] S. G. Johnson and J. D. Joannopoulos, *Opt. Express* **8**, 173 (2001), <http://www.opticsexpress.org/abstract.cfm?URI=OPEX-8-3-173>
- [11] A. F. Oskooi, D. Roundy, M. Ibanescu, P. Bermel, J. D. Joannopoulos, and S. G. Johnson, *Computer Physics Communications* **181**, 687 (Enero 2010)