

RESUMEN DE LA TESIS DOCTORAL

“ESTUDIO DE FUNCIONALIDADES ÓPTICAS PASIVAS BASADAS EN CRISTALES FOTÓNICOS BIDIMENSIONALES”

Los cristales fotónicos son estructuras artificiales con una modulación periódica del índice de refracción. Tal y como se puede apreciar en la figura 1, según las dimensiones de periodicidad, los cristales fotónicos se clasifican en unidimensionales (a), bidimensionales (b) o tridimensionales (c). Sus propiedades más importantes son: (i) la existencia de una banda fotónica prohibida (*Photonic Band Gap*, PBG), en la que la radiación en el interior del cristal no está permitida, y que permite la existencia de modos localizados al introducir defectos puntuales (cavidades) o lineales (guías); (ii) la propagación de modos de Bloch sin pérdidas con unas condiciones especiales definidas por el diagrama de bandas del cristal. Las excepcionales propiedades electromagnéticas de estos compuestos los convierte en los principales candidatos a servir como soporte tecnológico en el desarrollo futuro de circuitos nanofotónicos que sustituyan a los circuitos microelectrónicos actuales con sus problemas y limitaciones. Las aplicaciones previstas son innumerables, desde el desarrollo de dispositivos pasivos integrados para redes ópticas, tema abordado en la Tesis, hasta el desarrollo de láseres, LEDs, memorias ópticas, conmutadores ópticos o células solares de alta eficiencia.

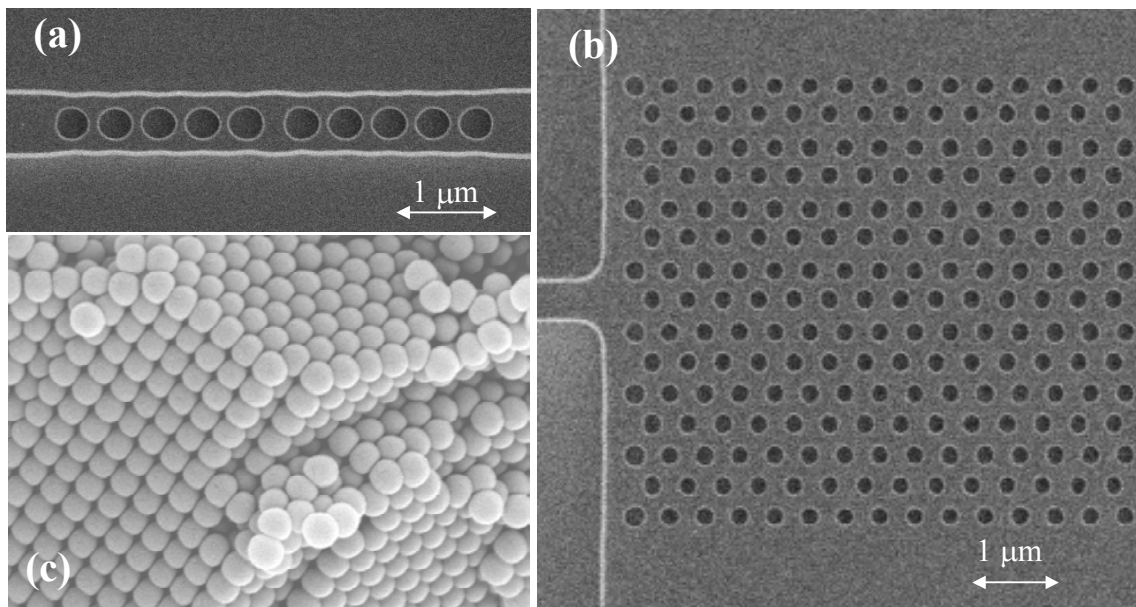


Figura 1. Imágenes de cristales fotónicos (a) 1D, (b) 2D y (c) 3D.

En esta Tesis se llevó a cabo un estudio de diversas propiedades de los cristales fotónicos bidimensionales 2D y de cómo se pueden aplicar dichas propiedades al desarrollo de dispositivos ópticos pasivos (por ejemplo, acopladores direccionales, interferómetros Mach-Zehnder, uniones en Y o líneas de retardo) que puedan ser usados en redes ópticas de comunicaciones. Además, se propuso y analizó un cristal fotónico planar de columnas de Silicio en Sílice como plataforma tecnológica para desarrollo de circuitos nanofotónicos en alternativa a las estructuras convencionales de agujeros en un sustrato semiconductor. Por último, se realizó un estudio preliminar de las propiedades de los cristales fotónicos 2D en bandas de frecuencias elevadas, durante el cual se descubrió la utilidad del cristal fotónico como lente plana por efecto de refracción negativa.

Para la realización de la Tesis se utilizaron:

- cálculos de diagramas de bandas con el simulador gratuito MPB (*MIT Photonic Bands*) que implementa el método de expansión en ondas planas (*Plane Wave Expansion method*). Los diagramas de bandas muestran la relación frecuencia-vector de onda de los modos propios de un cristal fotónico ideal de tamaño infinito y son el primer paso para conocer las propiedades electromagnéticas de estas estructuras. Además, permite obtener los patrones de campo (eléctrico y magnético) de los modos propios.
- simulaciones de estructuras finitas basadas en cristales fotónicos 2D haciendo uso del método de diferencias finitas en el dominio del tiempo (*Finite-Difference Time-Domain*, FDTD) que implementa el simulador *FullWAVE*TM. De este modo es posible obtener espectros de amplitud en transmisión y reflexión de las estructuras reales basadas en cristales fotónicos bajo estudio, así como observar la propagación del campo electromagnético en dichas estructuras (ver figura 2(a)).
- medidas experimentales en el rango de las microondas utilizando un cristal fotónico 2D de barras de alúmina en aire disponible en el laboratorio (ver figura 2(b)). Los resultados experimentales permiten verificar los resultados de simulación y observar las limitaciones que éstos presentan. Además, el uso de un analizador de redes vectorial hace factible la realización de medidas de fase que permiten extraer información añadida del comportamiento de las estructuras bajo estudio. Hay que decir que en el campo de los cristales fotónicos, y debido a las propiedades de escalado de las ecuaciones de Maxwell, la mayoría de funcionalidades y propiedades propuestas han sido demostradas en el rango de las microondas como paso previo a la demostración a frecuencias ópticas.
- expresiones analíticas basadas en el modelo de ligadura fuerte (*Tight Binding*, TB) de la relación de dispersión de una guía de cavidades acopladas (*Coupled-Cavity Waveguide*, CCW), que se usa como componente fundamental de circuitos más complejos.

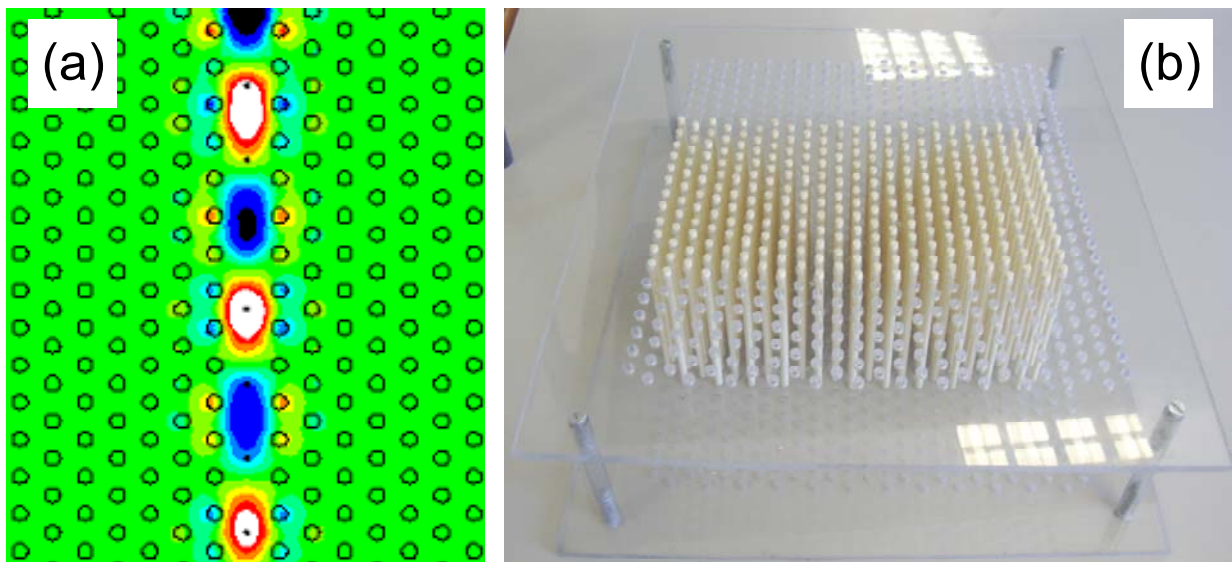


Figura 2. (a) Propagación electromagnética (campo eléctrico) en una guía de cristal fotónico obtenida con FDTD. (b) Cristal fotónico 2D de alúmina disponible en el laboratorio.

A continuación se muestra un resumen de la Tesis según sus capítulos:

Capítulo 1: Cristales fotónicos planares de cilindros de Silicio en Sílice

El cristal fotónico planar de columnas de Silicio sobre Sílice estudiado en el capítulo 1 de la Tesis (ver figura 3(a)) permite la creación de guiaondas monomodo para guiar la luz sin pérdidas teóricas de propagación, incluso a través de curvaturas con radios del orden de la longitud de onda de la señal. Si la guía se crea por reducción del radio de los cilindros en una dirección, aparece un modo guiado (en el interior del PBG y por debajo del cono de luz) de poco ancho de banda y baja velocidad de grupo. Este tipo de guía podría emplearse en aplicaciones relacionadas con la baja velocidad de grupo, por ejemplo, líneas de retardo ópticas o compensación de dispersión. Si la guía se crea por sustitución de una fila de cilindros por una guía *buried-strip* de Silicio, se obtienen dos modos guiados que no se solapan en frecuencia (dos regiones monomodo). Al contrario que para el caso de la guía de radio reducido, en esta ocasión los modos tienen un elevado ancho de banda y una baja dispersión, por lo que este tipo de guía podría emplearse como canal de transporte de información entre componentes ópticos de un mismo circuito. La figura 3(b) muestra la relación de dispersión de los modos guiados obtenida con MPB para el caso de cilindros de radio reducido (línea continua) y de la guía recta de Silicio (línea discontinua). Esta nueva estructura presenta dos ventajas fundamentales con respecto a los cristales fotónicos planares de agujeros en semiconductor: en primer lugar las guías son inherentemente monomodo, ya que son de índice reducido; y en segundo lugar, el grosor óptico del núcleo es del orden de 4-5 veces mayor que en substratos de semiconductor, por lo que el acoplo a guías externas (fibra óptica, guías ópticas integradas) será más eficiente.

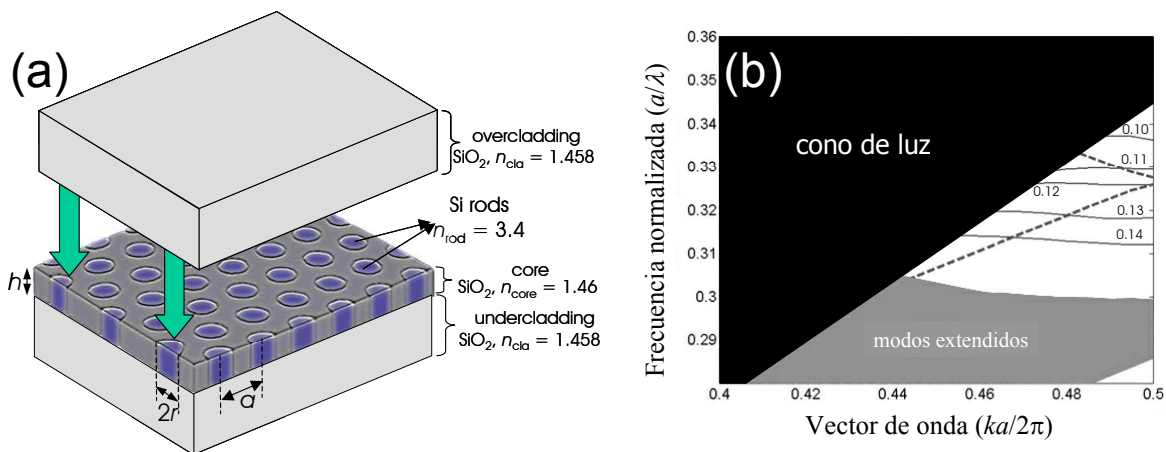


Figura 3. (a) Cristal fotónico planar de columnas de Silicio en Sílice. (b) Diagrama de dispersión de los modos guiados: guía de columnas de radio reducido (línea continua); guía strip de Silicio (línea discontinua).

Capítulo 2: Guías de cavidades acopladas en cristales fotónicos

Las guías de cavidades acopladas (CCWs) se crean en cristales fotónicos mediante la inserción de una cadena de cavidades de alto Q equiespaciadas (ver esquema en figura 4(a)). A partir del formalismo de ligadura fuerte (TB) de física de estado sólido se puede obtener una expresión analítica de la relación de dispersión de los modos guiados en este tipo de guiaondas. Partiendo de esa expresión, en el capítulo 2 de la Tesis se desarrolló un modelo analítico sencillo de los principales parámetros de propagación de una CCW, como la velocidad de grupo, el retardo de grupo, el parámetro de dispersión o la pendiente de la dispersión. Las expresiones teóricas mostraron un buen ajuste a los parámetros obtenidos a partir de diagramas de bandas calculados con MPB. Las características más importantes de una CCW son: una muy baja velocidad de grupo, que alcanza el máximo en el centro de la banda guiada y tiende a cero en los bordes de banda, hecho que puede ser empleado, por ejemplo, para implementar una línea de retardo de tamaño ultra-reducido; y una elevada

dispersión en los bordes de banda, positiva en uno y negativa en el otro, tal y como se observa en la figura 4(b), propiedad que podría ser aprovechable para crear compensadores de dispersión o para aplicaciones de compresión de pulsos, además, en longitudes totales muy reducidas. Por otra parte, la baja velocidad de grupo de los modos guiados contribuye a una baja eficiencia de acoplo a guías o fuentes externas, así como a la existencia de un rizado por resonancias Fabry-Perot que degrada la respuesta de transmisión de la guía. Es, por tanto, necesario el diseño de una estructura eficiente de acoplo que permita reducir la desadaptación modal en los interfaces de entrada/salida.

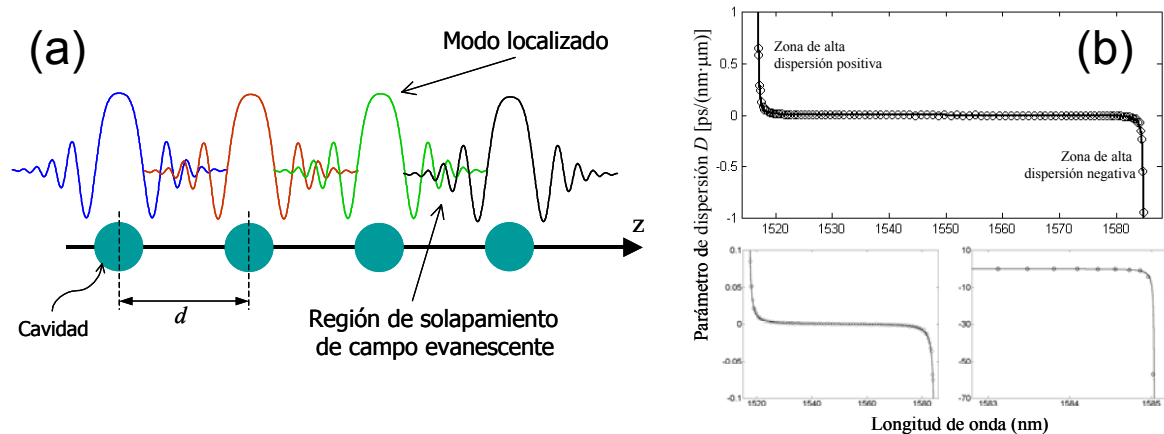


Figura 4. (a) Esquema de propagación electromagnética en una CCW. (b) Dispersión en una CCW: círculos, modelo teórico; línea continua, MPB.

Capítulo 3: Acopladores direccionales en cristales fotónicos

Un acoplador direccional se puede crear en un cristal fotónico 2D mediante la inserción de dos guías paralelas colocadas en proximidad. Debido a que la distancia entre los ejes de las guías puede hacerse del orden de la anchura transversal de los campos guiados, el acoplo es muy fuerte, por lo que se puede reducir considerablemente la longitud requerida para implementar acopladores en tecnología convencionales de fibra óptica o de guías integradas. En el capítulo 3 de la Tesis se estudió un acoplador direccional en un cristal fotónico 2D de columnas de Silicio en Sílice compuesto de guías de índice reducido (monomodo). Los resultados de simulación con MPB y FDTD mostraron que es posible aumentar la fuerza del acoplo si se reduce el volumen de dieléctrico de alto índice entre guías, por ejemplo, reduciendo el radio r_c de la fila de cilindros de Silicio que separa las guías, tal y como se muestra en las figuras 5(a) y 5(b). Este método es también aplicable a cristales fotónicos 2D de agujeros en dieléctrico siempre que las guías sean de índice reducido. Para el caso de guías de índice incrementado el análisis sería más complejo dado su carácter multimodal. Los resultados muestran que este método permite reducir la longitud total de la región de acoplo para aplicaciones tanto independientes de la longitud de onda (divisores de 3 dB de longitudes del orden de la longitud de onda de la señal) como dependientes de la longitud de onda (entrelazador de canales con una separación entre canales de 0.8 nm alrededor de $\lambda = 1550$ nm y una longitud total del acoplador de $L = 152.75$ μm en el rango espectral entre 1541 y 1561.5 nm, tal y como se aprecia en la respuesta de la figura 5(c).) Los principales inconvenientes del método propuesto son que al hacerse más fuerte el acoplo la variación del coeficiente de acoplo con la frecuencia se hace más no lineal, lo que da lugar a un espaciamiento desigual entre canales demultiplexados adyacentes, y que la relación de extinción entre puertos de salida no es demasiado elevada (unos 14 dB según las simulaciones).

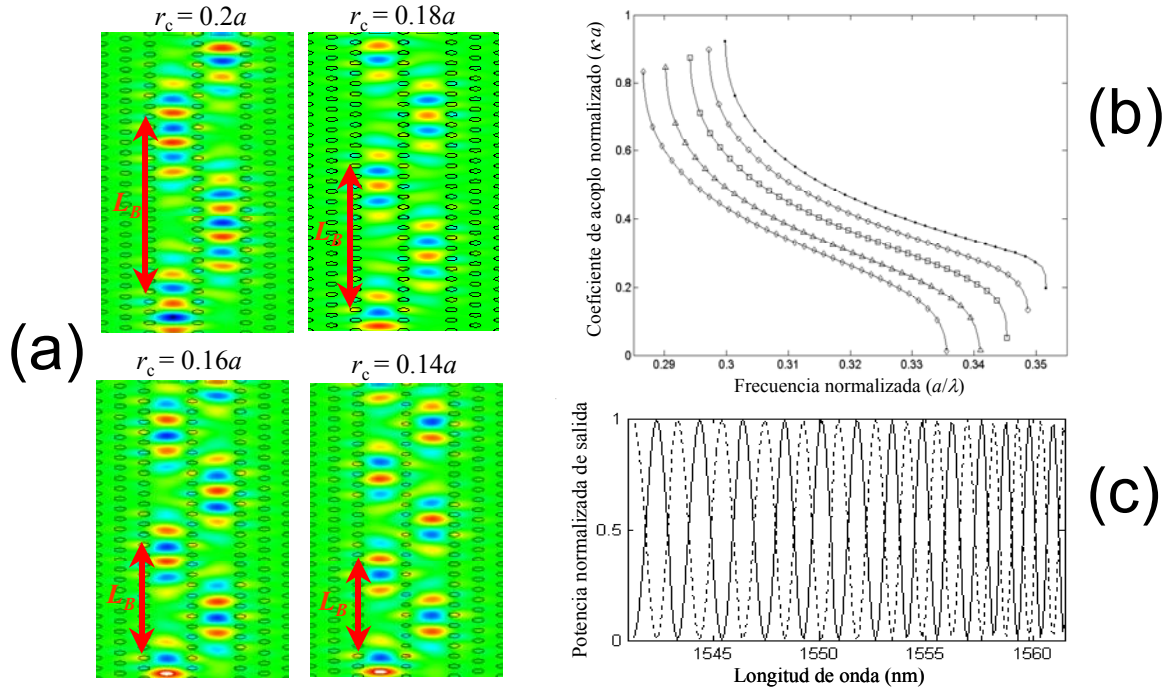


Figura 5. (a) Propagación del campo eléctrico en un acoplador en cristal fotónico donde se observa que la longitud de batido L_B disminuye al disminuir el radio r_c . (b) Coeficiente de acoplo κ vs. frecuencia. (c) Espectro de potencia normalizada para ambas salidas del acoplador (puerto 1, línea continua, puerto 2, línea discontinua). Parámetros de la estructura: $r_c = 0.14a$, $L = 325a$, $a = 470$ nm.

Capítulo 4: Funcionalidades basadas en una unión en Y en cristales fotónicos

Una unión en Y se puede crear en un cristal fotónico 2D mediante la inserción de tres guías que intersecan en un punto. En su uso como divisor, la unión en Y permite dividir equitativamente la potencia de una señal de entrada en dos salidas. El uso de cristales fotónicos 2D permite que el ángulo entre las guías de salida sea elevado (120° en una red hexagonal y 180° en una red cuadrada) manteniendo bajas las pérdidas. En general, las fuentes ópticas tienen simetría par por lo que el modo que se excita a la entrada también es de simetría par y, si las guías de salida son idénticas, las señales a la salida están en fase. En el capítulo 4 de la Tesis se presentaron dos posibles variaciones de la unión en Y convencional que permiten implementar dos aplicaciones de interés.

En primer lugar, se propuso y analizó un demultiplexor 1x2 consistente en una unión en Y en un cristal fotónico 2D hexagonal en la que la guía de entrada se crea eliminando todas las columnas en una dirección espacial mientras que las guías de salida son CCWs diseñadas para transmitir distintos intervalos espectrales no solapados. Para ello, las cavidades se crean reduciendo el radio de un cilindro, parámetro que permite controlar la frecuencia central de la banda guiada. Se hace uso del modelo TB para diseñar las CCWs de salida. La principal ventaja del demultiplexor es una reducida diafonía entre canales de salida (del orden de -55 dB), tal y como se observa en la respuesta espectral de la figura 6(a). El funcionamiento como demultiplexor de señales ópticas de segunda (1300 nm) y tercera (1550 nm) ventanas de comunicaciones ópticas se observa claramente en la figura 6(b). Además, permite la implementación de demultiplexores 1xN colocando varias estructuras 1x2 en cascada.

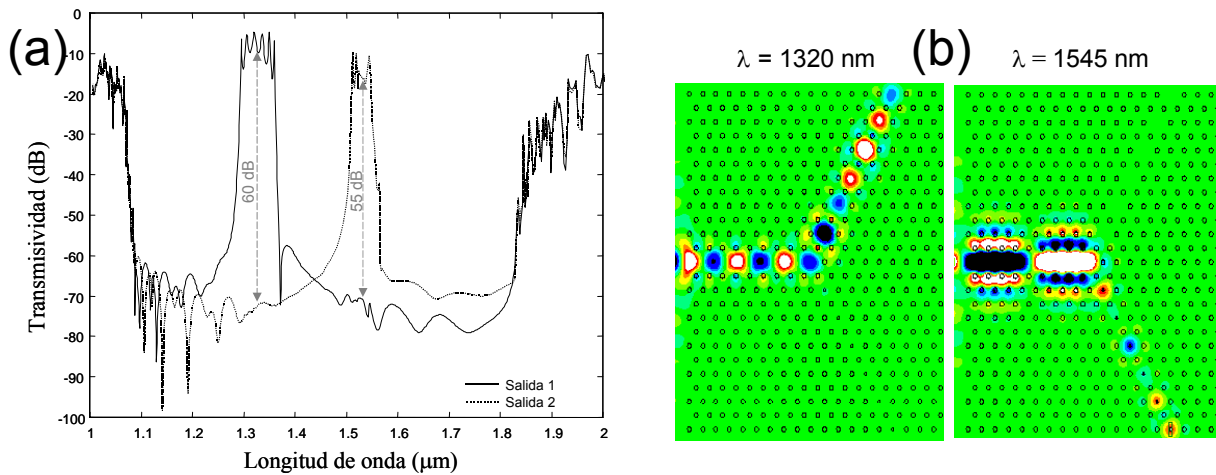


Figura 6. (a) Espectro normalizado de transmisión de potencia para las salidas 1 (línea continua) y 2 (línea discontinua) del demultiplexor 1x2. (b) Distribución de la componente del campo eléctrico a través del demultiplexor 1x2 para dos señales de diferente longitud de onda, 1320 y 1545 nm (simulación FDTD).

En segundo lugar se propone un divisor de potencia que permite que las señales a la salida estén sincronizadas y en contrafase. Para ello se utiliza una unión en Y en la que en la región de bifurcación se inserta un acoplador formado por dos CCWs. Debido al fuerte acoplo, los modos par e impar prácticamente no se solapan en frecuencia por lo que se dispone de un intervalo espectral en el que sólo se puede excitar el modo impar. El hecho de usar CCWs permite introducir curvas cerradas en las guías de salida sin pérdidas significativas. Al inyectar por el puerto de entrada una señal de frecuencia en el intervalo del modo impar, sólo este modo se excita en la región de bifurcación, por lo que hay un desfase de 180° entre salidas. Los resultados experimentales con la estructura de alúmina (ver figura 7(a)) confirmaron las predicciones teóricas y las simulaciones con FDTD, demonstrando el funcionamiento del divisor (ver distribución de campo eléctrico en la figura 7(b)) en un ancho de banda relativo del 3.45 %. Además, la zona de bifurcación tiene una longitud aproximada de $8a$, que con la aproximación a $\approx \lambda/2$, supone una distancia de 4λ , por lo que se obtiene una estructura altamente compacta, apropiada para una alta densidad de integración. Por último, destacar que esta novedosa técnica de división de potencia ha sido objeto de patente.

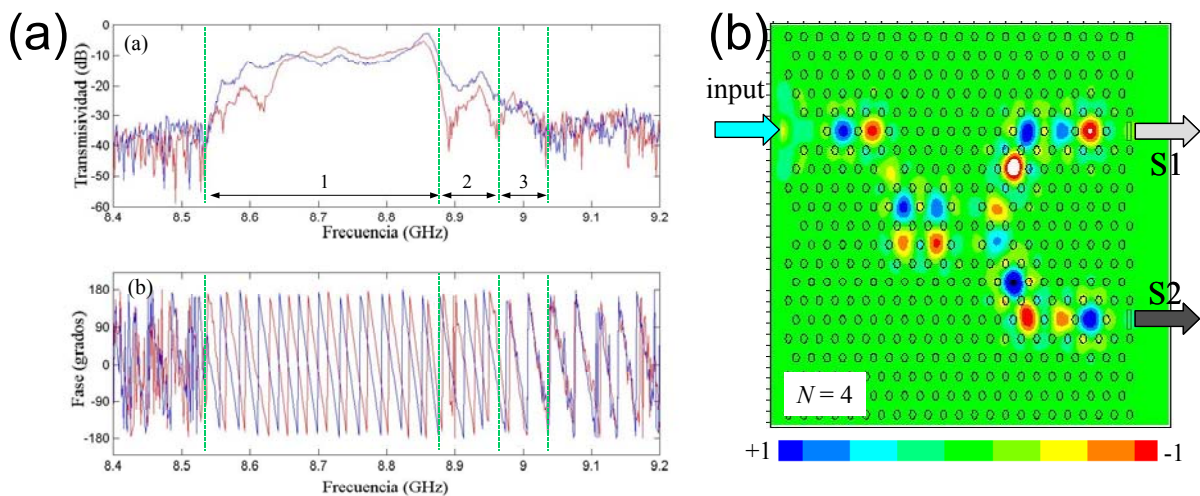


Figura 7. (a) Medidas experimentales de transmisión: (arriba) amplitud; (abajo) fase. Se muestran los resultados para las salidas S1 (rojo) y S2 (azul). (b) Distribución FDTD del campo eléctrico para una longitud de la sección de acoplo de $N = 4$ cavidades.

Capítulo 5. Interferómetros Mach-Zehnder en cristales fotónicos.

También es posible implementar un interferómetro Mach-Zehnder (MZI, *Mach-Zehnder interferometer*) en un cristal fotónico 2D, tal y como se muestra en el capítulo 5 de la Tesis. En concreto, se estudia la aplicación de un MZI implementado a partir de CCWs como demultiplexor de longitud de onda (diferencia de ΔN cavidades entre brazos). El uso de CCWs como brazos del MZI permitió desarrollar un modelo analítico de la función de transferencia del MZI haciendo uso del modelo TB de la CCW. Además, estas guías permiten realizar el divisor de entrada y las curvas de las guías interferentes de forma muy eficiente. Como en las CCWs la velocidad de grupo es muy baja, se puede reducir la longitud total del MZI, ya que se consiguen distancias efectivas muy elevadas en longitudes físicas muy pequeñas. Los resultados experimentales (ver respuesta en transmisión en figuras 8(a) y 8(b)) confirmaron la validez del modelo analítico propuesto y fueron la primera demostración experimental de un MZI en tecnología de cristales fotónicos. Uno de los principales problemas que surgen al implementar un MZI en un cristal fotónico 2D es la dificultad de realización de un combinador de potencia eficiente a la salida del MZI, lo que contrasta claramente con la facilidad con la que se puede crear un divisor de potencia. Las figuras 8(c) y 8(d) muestran la distribución FDTD de campo eléctrico para $\Delta N = 4$ (interferencia destructiva) y $\Delta N = 0$ (interferencia constructiva). Los resultados obtenidos permiten deducir que por medio del uso de un MZI basado en CCWs se podría implementar un entrelazador de canales separados 100 GHz a 1550 nm en para una longitud total de la estructura por debajo de 50 μm .

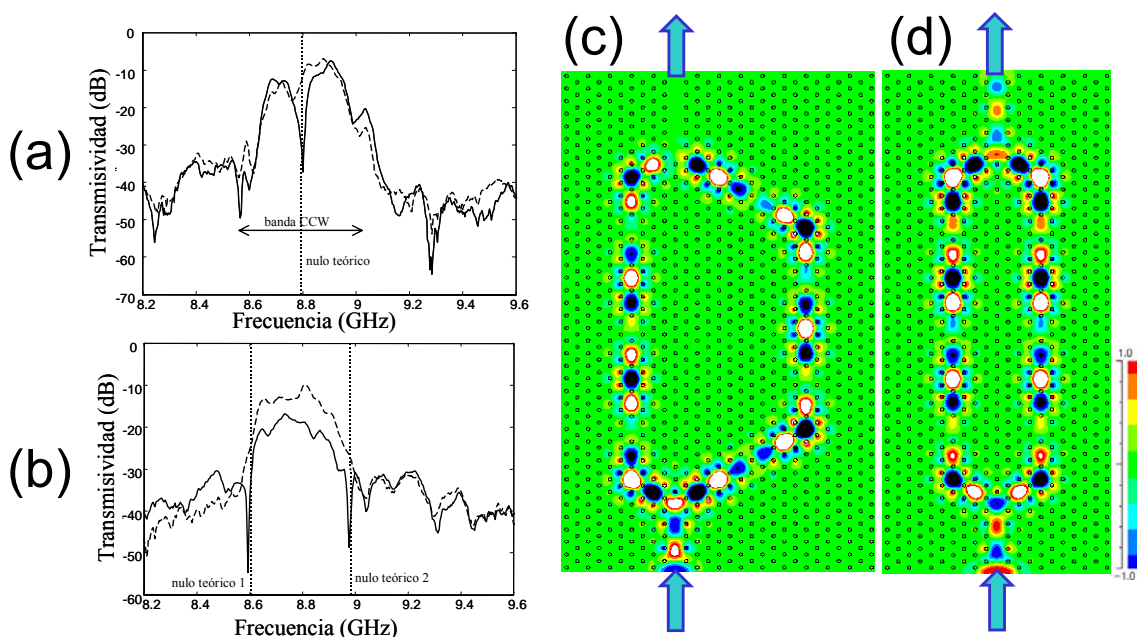


Figura 8. Respuesta experimental de transmisión de un MZI implementado con CCWs para: (a) $\Delta N = 2$ y (b) $\Delta N = 4$. Línea continua: respuesta del MZI; línea discontinua: respuesta de una de las dos guías que componen el MZI. Distribución de la componente de campo eléctrico (simulación FDTD) para un MZI con $\Delta N = 4$ (c) y $\Delta N = 0$ (d).

Capítulo 6. Análisis de propiedades de bandas altas en cristales fotónicos 2D

Las bandas de altas frecuencias presentan interesantes propiedades de transmisión que hasta la fecha han recibido poca atención (ver capítulo 6 de la Tesis). Comparando los resultados de MPB (diagrama de bandas) y la transmisividad medida experimentalmente (ver figura 9) se observó un buen ajuste entre ellos, aunque hubo que tener en cuenta un incremento del índice de refracción de la alúmina con la frecuencia. En el espectro de

transmisión se observaron regiones de alta transmisividad que se correspondían a modos permitidos con simetría par. Las regiones de transmisividad más baja se correspondían con el PBG entre las dos primeras bandas, con pseudo-PBGs que aparecían a frecuencias superiores para cada dirección de incidencia, con modos de simetría impar o con regiones de baja velocidad de grupo (principalmente en los bordes de banda), donde debido a la desadaptación modal en los interfaces, la eficiencia de excitación de los modos es muy baja. Sin embargo, se encontró también una región para transmisión en la dirección ΓK donde la eficiencia de transmisión era muy alta pese a que el modo tenía simetría impar.

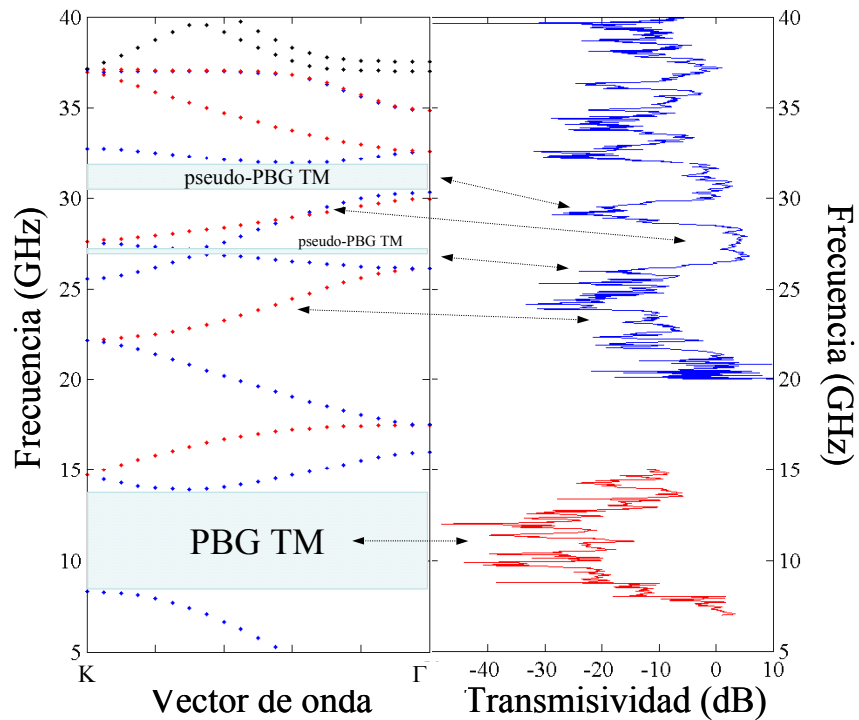


Figura 9. Transmisión en la dirección ΓK : diagrama de bandas (izquierda) y resultados experimentales (derecha): en rojo, las medidas con antenas de baja frecuencia y, en azul, las medidas con las antenas de alta frecuencia.

Un resultado muy interesante que se observó a partir de los resultados experimentales fue la existencia de regiones espectrales con transmisividad normalizada mayor que 1 (ver figura 10(a)), de donde se dedujo que el cristal fotónico con forma rectangular focalizaba el haz generado por la antena transmisora hacia la antena receptora. En particular, para incidencia ΓM en frecuencias alrededor de 22 GHz, se obtenía un incremento de potencia recibida de hasta 10 dB. Esto ocurre porque en esa región el cristal fotónico se comporta como un medio refractivo con un índice de refracción efectivo negativo independientemente de la dirección de incidencia. Además, este tipo de lente puede conseguir focalización por debajo de la longitud de onda (es decir, supera el límite de difracción) ya que permite la amplificación de las ondas evanescentes en el interior del cristal. Sin embargo, se observó que al contrario de lo que ocurre en un medio homogéneo, en este caso la dirección de incidencia es importante aunque el índice no varía, ya que para incidencia ΓK el modo tiene simetría impar, por lo que no se podía excitar de forma eficiente y no actuaba como focalizador del haz (ver figura 9(b)). Cabe decir que estos resultados se obtuvieron antes de la publicación de este efecto en la revista *Nature* (noviembre 2003), sólo que el proceso de elaboración del artículo propició que nuestros resultados se publicaran después del mencionado artículo. Los efectos de refracción negativa y focalización del haz en cristal fotónico se observan claramente en las distribuciones FDTD de campo eléctrico de la figuras 10(c) y 10(d).

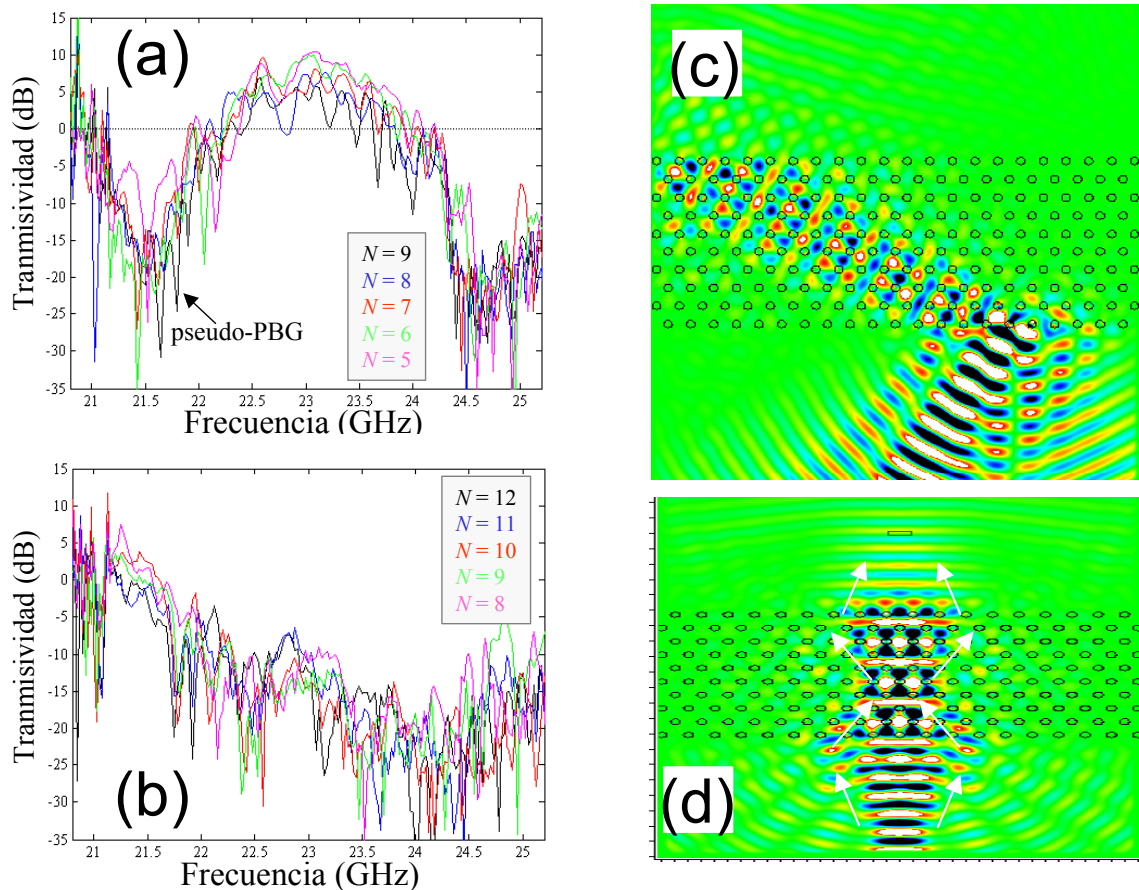


Figura 10. Transmisividad experimental entre 21.8 y 25.2 GHz para diferentes grosores N del cristal: (a) dirección TM ; (b) dirección TK . Distribuciones de campo eléctrico FDTD donde se aprecian los fenómenos de refracción negativa (c) y focalización por una lente plana (d) en un cristal fotónico 2D.

Conclusiones generales de la Tesis

- Los cristales fotónicos poseen propiedades interesantes para implementar dispositivos ópticos pasivos con la principal ventaja de un alto nivel de integración.
- El cristal fotónico planar de columnas de Silicio en Sílice supone una alternativa interesante a los cristales planares de agujeros en semiconductor con dos ventajas fundamentales: las guías son inherentemente monomodo y el grosor es mayor, lo que facilita el acoplamiento a fibra óptica.
- Se pueden implementar curvaturas en guías con radios del orden de la longitud de onda y pérdidas despreciables lo que supone una reducción del tamaño de los circuitos (por ejemplo, el caso de la unión en Y) en comparación a las tecnologías planares de la actualidad.
- La baja velocidad de grupo en las guías permite una reducción del tamaño en dispositivos basados en el desfase creado en la guía, como el caso del interferómetro Mach-Zehnder, o en líneas de retardo.
- En los acopladores direccionales la constante de acoplamiento puede ser muy elevada, con la consiguiente reducción del tamaño para aplicaciones tanto de división-combinación de potencia como de demultiplexación de longitud de onda.

- Las guías de cavidades acopladas soportan modos guiados sin pérdidas (incluso a través de curvas abruptas) y su relación de dispersión se puede modelar analíticamente lo que permite desarrollar también modelos de funcionalidades más complejas.

- Un cristal fotónico en régimen de refracción negativa puede servir como lente plana (con la ventaja de la ausencia de un eje óptico) y puede focalizar tamaños incluso por debajo de la longitud de onda. Sin embargo, la simetría del modo en el interior del cristal debe tenerse en cuenta a la hora de diseñar la lente.

MÉRITOS DE LA TESIS

Es la primera Tesis en el campo de los cristales fotónicos planares y bidimensionales que se hace en España. La Tesis contiene resultados teóricos, de simulación y experimentales que pueden ser de gran importancia para el futuro desarrollo de tecnología nanofotónica basada en cristales fotónicos planares para aplicación en redes de comunicaciones ópticas de alta velocidad. El contenido de la Tesis ha dado lugar a las siguientes **publicaciones** en revistas *peer-review* y congresos:

En revista internacional:

1. A. Martínez, A. García, P. Sanchis, J. Martí, "Group velocity and dispersion model of coupled-cavity waveguides in photonic crystals", J. Opt. Soc. Amer. A, vol. 20, no. 1, pp. 147-150, 2003 (4 citas).
2. A. Martínez, A. Griol, P. Sanchis, J. Martí, "Mach-Zehnder interferometer employing coupled-resonator optical waveguides", Opt. Lett., vol. 28, no. 6, pp. 405-407, 2003 (9 citas).
3. A. Martínez, F. Cuesta, J. Martí, "Ultrashort 2-D photonic crystal directional couplers", IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 15, no. 5, pp. 694-696, 2003 (13 citas).
4. A. Martínez, J. Martí, J. Bravo-Abad, J. Sánchez-Dehesa, "Wavelength Demultiplexing Structure Based on Coupled-Cavity Waveguides in Photonic Crystals", Fiber Integrated Opt., vol. 22, no. 3, pp. 151-160, 2003.
5. A. Martínez, F. Cuesta, A. Griol, D. Mira, J. García, P. Sanchis, R. Llorente, J. Martí, "Photonic-crystal 180° power splitter based on coupled-cavity waveguides", Appl. Phys. Lett., vol. 83, no. 15, pp. 3033-3035, 2003 (1 cita).
6. A. Martínez, J. García, G. Sánchez, J. Martí, "Planar photonic crystal structure with inherently single-mode waveguides", J. Opt. Soc. Amer. A, vol. 20, no. 11, pp. 2131-2136, 2003 (1 cita).
7. A. Martínez, H. Míguez, A. Griol, J. Martí, "Experimental and theoretical study of the self-focusing of light by a photonic crystal lens", Phys. Rev. B, 69, 165119, 2004 (3 citas).
8. A. Martínez, P. Sanchis, J. Martí, "Mach-Zehnder interferometers in photonic crystals", aceptado para publicación en Optical and Quantum Electronics.

En congreso internacional:

9. J. Martí, A. Martínez, A. García, F. Ramos, J. Herrera, J. Bravo-Abad, J. Sánchez-Dehesa, "Transmission Analysis and Applications of Bended

Waveguides in Hexagonal Photonic Crystals”, Proceedings of SPIE, vol. 4655, Photonic Bandgap Materials and Devices, pp. 81-91, 2002.

- 10.A. Martínez, F. Cuesta, J. Martí, “Ultra-short planar photonic crystal couplers”, Workshop and European Optical Society topical meeting on two dimensional photonic crystals, Ascona (Suiza), agosto 2003.
- 11.A. Martínez, A. Griol, D. Mira, F. Cuesta, J. García, P. Sanchis, R. Llorente, J. Martí, “180° power splitting in photonic crystals”, ECOC-IOOC 2003 Proceedings – vol. 5, Symposium Tu1.1.3, pp. 42-43, 2003.
- 12.A. Martínez, H. Míguez, A. Griol, J. Martí, “Self-focusing by a negative effective index of refraction in a two-dimensional photonic crystal”, presentación oral en 27th ESA Antenna Technology Workshop on Innovative Periodic Antennas, Santiago de Compostela, España, 9-11 marzo 2004.

En congreso nacional:

- 13.J. Martí, J. García, A. Martínez, “Single-mode planar photonic crystal waveguides”, 4ª Conferencia de Dispositivos Electrónicos (CDE-2003), Calella (Barcelona), 2003, artículo III-06.
14. F. Cuesta, A. Martínez, J. Martí, “Photonic crystal directional couplers”, 4ª Conferencia de Dispositivos Electrónicos (CDE-2003), Calella (Barcelona), 2003, artículo III-07.

Cabe destacar que pese a que las publicaciones son relativamente “jóvenes” ya han sido citadas hasta un total de 28 ocasiones por otros autores, tal y como se detalla en el listado de publicaciones.

Además, la técnica de división de potencia con desfase de 180° desarrollada en el capítulo 4 ha dado lugar a la siguiente patente:

Título: MÉTODO PARA DIVIDIR UNA SEÑAL ELECTROMAGNÉTICA GUIADA EN DOS SEÑALES CON LA MITAD DE POTENCIA Y UN DESFASE DE 180° ENTRE ELLAS UTILIZANDO CRISTALES FOTÓNICOS

Nº de solicitud: 200302003

Empresas que lo están explotando: Ninguna

País de prioridad y países a los que se ha extendido: España (Se ha solicitado la extensión)

Fecha de prioridad: 14 agosto 2003

Inventores (por orden de firma): Javier Martí Sendra, Alejandro Martínez Abiétar, Pablo Sanchis Kilders, Francisco Cuesta Soto, Jaime García Rupérez

Entidad titular: Universidad Politécnica de Valencia