

Fabricación y caracterización de cristales fotónicos bidimensionales para nuevos dispositivos optoelectrónicos

Fabrication and characterization of 2D photonic crystals for new optoelectronic devices

P. A. Postigo ⁽¹⁾, A. R. Alija ⁽¹⁾, L. J. Martínez ⁽¹⁾ y J. Sánchez-Dehesa ⁽²⁾

1. Departamento de Dispositivos, Sensores y Biosensores, Instituto de Microelectrónica de Madrid (IMM-CNM-CSIC), Isaac Newton 8 –PTM- Tres Cantos 28760 Madrid. Email: aitor@imm.cnm.csic.es
2. Centro de Tecnología Nanofotónica & Dpto. Ingeniería Electrónica, ETSI Telecomunicación, Universidad Politécnica de Valencia, Camino de Vera s/n E-46022 Valencia.

RESUMEN

Los cristales fotónicos fueron planteados a finales de los años ochenta como una posible solución al control de la emisión espontánea y a la localización de la luz. Sin embargo, sólo en los últimos años, con el advenimiento de las tecnologías de nanofabricación, se han conseguido las primeras aplicaciones prácticas de elevado impacto tecnológico, como los láseres de cristal fotónico o las guías de onda nanoestructuradas con *gap* fotónico. En la actualidad se están planteando nuevos dispositivos que permitan la emisión eficiente de un solo fotón o la captura de un átomo en el interior de una nanocavidad de cristal fotónico. En este seminario se mostrará la fabricación y caracterización de nuevos dispositivos con *gap* fotónico, como emisores láser de fase Suzuki o resonadores láser de anillo, y se mostrarán sus propiedades de emisión en el campo lejano y de sintonización mediante el control preciso del proceso de fabricación. Estos nuevos dispositivos pueden ser usados como nuevos sensores ópticos y como eficientes nanoemisores de luz láser.

Palabras clave: Cristales Fotónicos, Nanotecnología, Láseres, Semiconductores.

ABSTRACT

Photonic crystals were discovered in the 80s as a possible solution to the control of the spontaneous emission and localization of light. Nevertheless only in recent years, with the spreading of nanotechnologies, the first applications with high technological impact have been achieved, like planar photonic crystal lasers or the nanostructured photonic crystal waveguides. Nowadays new types of optoelectronic devices like single photon emitters based on photonic crystal nanocavities are being pursued. In this talk we will show the fabrication and characterization of new photonic bandgap devices, like Suzuki-phase laser emitters or ring-like emitters, and we will show their emission properties in the far field and their tuning by the fabrication process. These new devices may be used as new optical sensors and as efficient nanosources of laser light.

Key words: Photonic Crystals, Nanotechnology, Lasers, Semiconductors.

REFERENCIAS Y ENLACES

- [1] E. Yablonovitch, "Inhibited spontaneous emission in solid state physics and electronics", *Phys. Rev. Lett.* **58**, 2059-2062 (1987).
- [2] T. F. Krauss, R. M. De La Rue, S. Brand, "Two-dimensional photonic-bandgap structures operating at near infrared wavelengths", *Nature* **383**, 699-702 (1996).
- [3] O. J. Painter, A. Husain, A. Scherer, J. D. O'Brien, I. Kim, P. D. Dapkus, "Room temperature photonic crystal defect lasers at near-infrared wavelengths in InGaAsP", *J. Lightwave Technol.* **17**, 2082-2088 (1999).

- [4] L. J. Martínez, A. García-Martín, P. A. Postigo, "Photonic band gaps in a two-dimensional hybrid triangular-graphite lattice", *Opt. Express* **12**, 5684-5689 (2004)
- [5] B. Butun, N. Biyikli, O. Aytur, I. Kimukin, E. Ozbay, P.A. Postigo, J. P. Silveira, A. R. Alija, "High-speed 1.55 μm operation of low-temperature grown GaAs based resonant cavity enhanced p-i-n photodiodes", *Appl. Phys. Lett.* **84**, 4185-4187 (2004).
- [6] A. R. Alija, L. J. Martínez, A. García-Martín, M. L. Dotor, D. Golmayo, P. A. Postigo, "Tuning of spontaneous emission of two-dimensional photonic crystal microcavities by accurate control of slab thickness", *Appl. Phys. Lett.* **86**, 1101-1103 (2005).

1. Introducción

La búsqueda de fuentes compactas con emisión láser ha sido una parte central en el campo de investigación de la fotónica y optoelectrónica. Los cristales fotónicos [1] y los cristales fotónicos planares (o bidimensionales -2D-) son candidatos prometedores para la realización de fuentes compactas de luz láser en nanocavidades ópticas y su integración con guías de onda, moduladores y detectores. Hasta el momento se han realizado diferentes tipos de emisores láser a temperatura ambiente basados en nano y microcavidades bidimensionales y más recientemente, nuevos diseños basados en modificaciones de redes bidimensionales de cristales fotónicos han sido propuestos [2,3].

2. Trabajo experimental

La figura 1 muestra el caso más simple de un cristal fotónico: el caso unidimensional (1D). Este cristal fotónico está formado por la disposición secuencial de láminas de dos materiales con dos índices de refracción diferentes. El caso más conocido de estas estructuras lo constituyen los reflectores de Bragg. Sin embargo, el análisis de estos dispositivos desde la perspectiva de sus bandas fotónicas ha permitido descubrir nuevas propiedades y aplicaciones. Por ejemplo, hemos fabricado un cristal fotónico 1D como reflector de alta eficiencia para un fotodetector de ultra-alta-velocidad en 1.5 μm basado en GaAs (Fig.2) El proceso de detección a partir de dos fotones y por tanto poco probable, es incentivado en la longitud de onda deseada mediante la introducción del reflector 1D [4].

La figura 2 muestra el caso bidimensional (2D) de un cristal fotónico. En este caso, una red de agujeros circulares perforada en un material proporciona una estructura de bandas fotónicas. El confinamiento en el plano viene dado por la banda prohibida para fotones mientras que el confinamiento en la dirección perpendicular se realiza mediante reflexión total interna. Como material hemos usado epitaxias de semiconductores

III-V ya que poseen la ventaja de ser materiales activos, generando fotones a partir de una excitación mediante fotones o electrones. Hemos usado principalmente semiconductores basados en InP e InGaAs y sus aleaciones (InGaAsP) en los que se cuenta además con una gran experiencia en su síntesis mediante epitaxia de haces moleculares (*molecular beam epitaxy*, MBE). Las heteroestructuras consisten típicamente en 4 pozos cuánticos de la aleación ternaria InAsP con un espesor de 5nm diseñados para obtener emisión en longitudes de onda $\sim 1.5\mu\text{m}$. Estos pozos cuánticos están separados por barreras de 20nm de espesor. El espesor total de la heteroestructura es de 237 nm. Esta lámina de material epitaxial es pegada a un sustrato de vidrio o de Si con una capa intermedia de adhesión de SiO_2 . Para el procesado de las epitaxias con el fin de fabricar emisores de cristal fotónico, se han depositado primeramente 2700Å de SiO_x mediante el método de *plasma-enhanced chemical vapor deposition* (PECVD). Esta capa es usada como máscara durante el proceso de ataque por haces de iones reactivos posterior. Sobre el SiO_x se deposita por centrifugado una capa de resina (PMMA) sensible a la exposición mediante nanolitografía por haz de electrones. De esta forma se dibujan los diferentes diseños que están comúnmente basados en matrices de círculos con simetría triangular, ya que maximiza el *gap* fotónico para el modo TE. Áreas de un tamaño de unas $100 \times 100 \mu\text{m}$ son cubiertas con diferentes diseños. El parámetro de red a varía entre los 400 y los 500 nm y los radios r de los círculos varían entre los 90 nm y 150 nm con el fin de obtener factores de llenado de alrededor de 40% y un factor $r/a \sim 0.34$ que maximicen el *gap* [5]. Después del revelado la muestra pasa a un ataque anisotrópico mediante haces de iones reactivos para transferir el diseño realizado en el PMMA al material semiconductor. La nanolitografía mediante haz de electrones presenta la ventaja de ser un proceso altamente controlable, permitiendo la fabricación, por ejemplo, de defectos intencionados (ausencia de uno o varios nanoagujeros). Estos defectos actúan a semejanza de los niveles de dopante en las bandas electrónicas de los semiconductores, proporcionando un nivel de

energía accesible para los fotones en el interior del *gap* fotónico. Mediante estos defectos se pueden fabricar nano y microcavidades que permiten aislar o localizar la emisión de luz en regiones específicas y para valores específicos de su frecuencia. Hemos fabricado estas cavidades de cristal fotónico (Fig.4) y hemos estudiado por primera vez la variación de la emisión espontánea en estas cavidades en función del espesor de la membrana de semiconductor en la que han sido fabricadas [6].

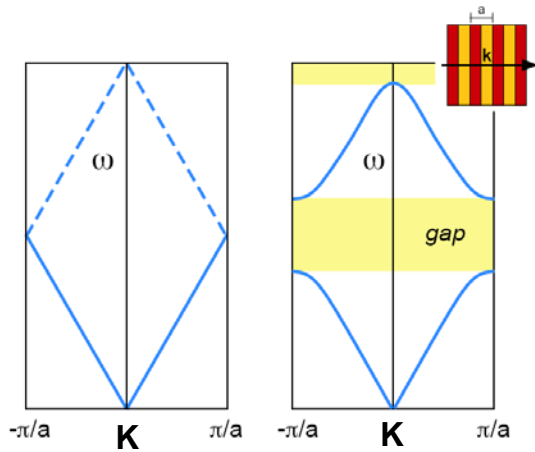


Fig. 1. Izda: relación de dispersión de la luz para un sistema isotrópico. Dcha: cuando el material está compuesto por capas periódicas con diferentes índices de refracción aparece una zona de energías prohibida para fotones en el interior de ese material (*gap* fotónico)

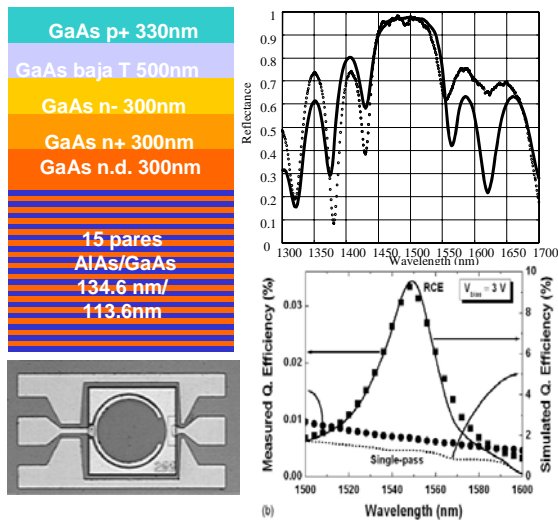


Fig. 2. Sup. izq: Estructura fabricada para un fotodetector de ultra-alta-velocidad sobre GaAs en 1.5 μm . Sup. Dcha: espectro de reflectividad del cristal fotónico 1D. Abajo izda: imagen del detector fabricado. Abajo dcha: eficiencia cuántica del dispositivo con un máximo en la región incentivada por el cristal fotónico.

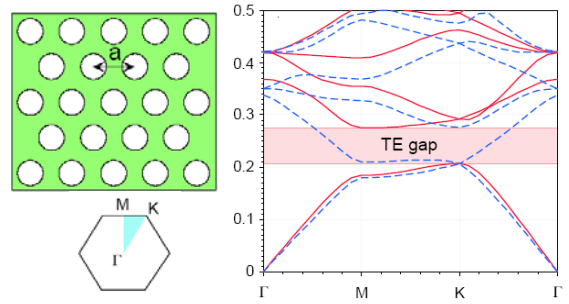


Fig. 3. Izda: Red 2D de simetría triangular de cilindros de aire en dieléctrico y zona de Brillouin. Dcha: diagrama de bandas para fotones en este material, con un ancho *gap* para el modo TE.

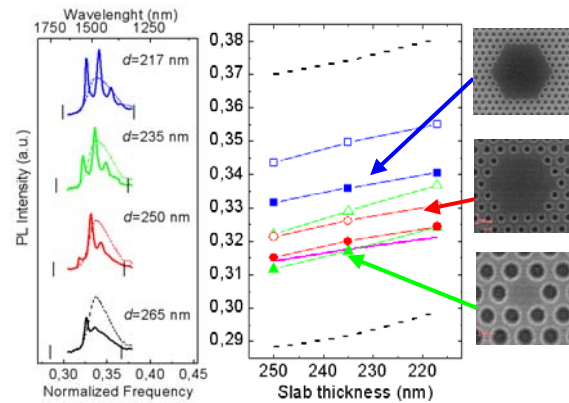


Fig. 4. Efecto de la tercera dimensión en cristales fotónicos 2D. Izda: Espectros de emisión espontánea en una microcavidad fotónica en función del espesor de la membrana en la que está fabricada. Dcha: Variación de los modos de emisión en diferentes nano y microcavidades fotónicas con el espesor de la membrana.

El alto nivel de confinamiento proporciona excelentes cavidades resonantes que permiten la fabricación de emisores láser con tamaños muy pequeños. Se han realizado diversos tipos de emisores láser bidimensionales: emisores basados en nanocavidades (Fig.5), o microcavidades en redes triangulares con simetría de fase Suzuki (Fig.6) y anillos resonadores con nanocavidades en las esquinas (Fig.7). Las redes de fase Suzuki poseen una estructura de bandas fotónicas muy particular [8] que presenta bandas muy planas en el espacio recíproco que favorecen la interacción luz-materia debido a la baja velocidad de grupo en diferentes puntos de la red recíproca. Por otro lado, los resonadores en anillo poseen la particularidad de la emisión estimulada mediante modos de galería. Finalmente, el emisor láser de la Fig.5 emite luz en 1.5 μm desde una región espacial de tamaño muy reducido (unos 450 nm de diámetro) formada por la ausencia de un nanoagujero, formando así un auténtico nanoemisor o nanofuente láser.

La Fig.6 muestra una cavidad creada por la introducción de defectos intencionados en la red de

fase Suzuki de cilindros de aire en dieléctrico. Esta cavidad presenta un factor de calidad $Q_f=3300$ para el modo TE, emitiendo luz láser fuertemente monomodal. Como fuente de excitación óptica se ha utilizado un diodo láser con emisión en 780 nm pulsado a 1 MHz y con ciclos de trabajo entrono al 20%.

La Fig. 7 muestra dos tipos de anillos, uno con nanocavidades en las esquinas y otro sin ellas. La introducción de nanocavidades en las esquinas genera una emisión monomodal con una razón de supresión de modos mayor de 20 dBm.

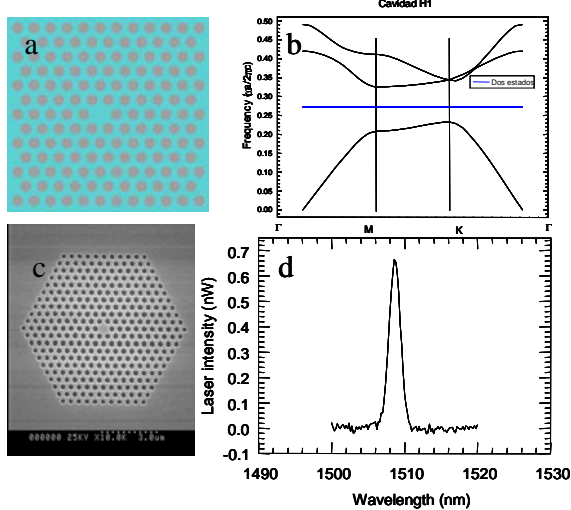


Fig. 5. a) Nanocavidad fotónica formada por la eliminación de un cilindro de aire. b) Diagrama de bandas con el nivel de defecto. c) Imagen SEM de la cavidad fabricada. d) espectro de emisión láser

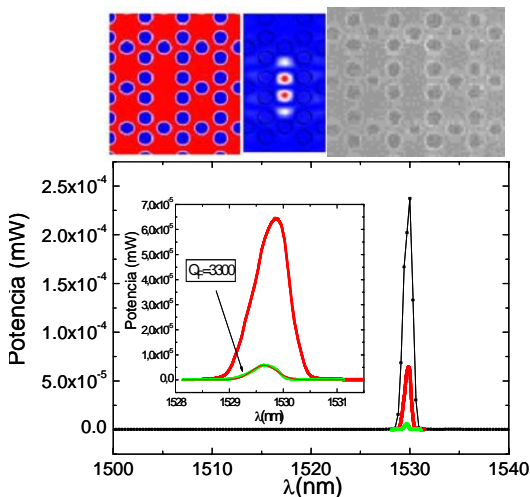


Fig. 6. Emisión láser en una cavidad fotónica en la red con simetría de fase Suzuki. El factor de calidad Q_f es de 3300. En la parte superior se muestra la cavidad, el modo de emisión calculado y una imagen SEM de la cavidad fabricada.

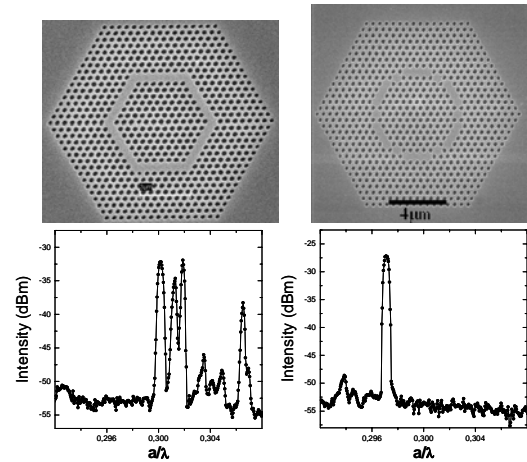


Fig. 7. Espectros de emisión láser de dos estructuras resonantes con forma de anillo. La introducción de nanocavidades en las esquinas de los seis segmentos que forman la guía hexagonal proporciona una emisión láser fuertemente monomodal (>20 dBm).

3. Conclusión

Se han diseñado, fabricado y caracterizado nuevos dispositivos optoelectrónicos basados en cristales fotónicos 1D y 2D, como fotodetectores de alta velocidad y diversos tipos de emisores láser en cristales fotónicos bidimensionales. Estos dispositivos pueden ser usados como futuras nanofuentes de emisión láser para telecomunicaciones ópticas o sensores ópticos.

Agradecimientos

A. R. Alija agradece una beca predoctoral FPU AP2002-0474 del MEC. L. J. Martínez agradece una beca predoctoral I3P-CSIC. P. A. Postigo agradece un contrato “Ramón y Cajal” el proyectos proyectos CAM GR\MAT\0729\2004, CICYT TIC2002-04096-C03-03, la red europea de excelencia PHOREMOST y a C. Seassal y P. Viktorovitch (LEOM) el suministro de parte del material epitaxial.