



Cristales fotónicos

C. Sifuentes, J. M. Ontiveros, E. García Domínguez, A. Moreno Báez

Photonic crystals

Recibido: abril 1, 2009

Aceptado: abril 22, 2009

Palabras clave: cristal fotónico; capacidad de transmisión; telecomunicaciones

Abstract:

In the long run, the transmission of information through electrical signals will become increasingly slow, limiting the ability of telecommunications, so investigate other ways to convey information is a priority. The photonic crystals according to its characteristics could be one solution to this problem

Keywords: Photonics crystals; transmission capacity; telecommunications

...mita cada vez más por medio de luz en específico por medio de fibra óptica, la cual han representado una revolución en las telecomunicaciones. Sin embargo la información llega al usuario final todavía por medios eléctricos lo cual produce problemas en los nodos debido a que no hay, aún, dispositivos totalmente ópticos, esto trae como consecuencia que el servicio sea más costoso en tiempo y energía.

Introducción

A largo plazo, la transmisión de información mediante señales eléctricas será cada vez más lenta, limitando la capacidad en las telecomunicaciones, por lo que investigar otras vías para transportar la información es prioritario. Los cristales fotónicos, según sus características podrían ser una de las soluciones a este problema. La nanofotónica es la disciplina científica técnica que tiene por objeto el estudio de la generación, control y detección de luz en escalas similares o menores que su propia longitud de onda y el estudio de la interacción con la materia a escala nanométrica [1]. En particular sus objetivos tienen que ver con los fenómenos en que la radiación electromagnética o la materia están confinadas en tamaños del rango nanométrico. En este campo



A creciente demanda en el intercambio de información por la red (datos, audio, video e internet) ha hecho que la información se trans-

han surgido varias áreas de investigación cuyo objetivo principal es explicar, predecir y aplicar dichos fenómenos y de ellos se destacan los cristales fotónicos [2]. Este tipo de cristales podrían usarse para fabricar procesadores de enrutamiento totalmente ópticos. Por otro lado y dado que los cristales fotónicos son más pequeños que los componentes electrónicos que se usan en la actualidad, los nuevos equipos serían más pequeños, resistentes y menos vulnerables a la interferencia electromagnética [3].

**La nanofotónica es la disciplina
científica técnica que tiene por
objeto el estudio de la
generación, control y detección
de luz**

CRISTALES FOTÓNICOS

Los cristales con características de los fotónicos han sido estudiados desde 1887, pero el término cristal fotónico se originó en 1987 por Ely Yablonovich al trabajar en el confinamiento de la luz y la inhibición de la emisión espontánea [4]. Se demostró que en arreglos periódicos de materiales dieléctricos (idealmente sin pérdidas), la propagación de la luz puede ser totalmente suprimida para ciertas longitudes de onda, sin tomar en cuenta la polarización ni la dirección de propagación. Esta inhibición no se debe a la absorción del material sino a la periodicidad del arreglo y lo que es absolutamente fundamental: en el rango de frecuencias que no se pueden propagar (banda prohibida fotónica), la densidad de estados permitidos para la luz, se desvanecen, así, la emisión espontánea es imposible [5].

Cabe hacer notar que el término cristal fotónico se introdujo originalmente para referirse a materiales con bandas prohibidas fotónicas. Ahora es más frecuente el uso de éste término para referirse a cualquier arreglo periódico de un material dieléctrico o un metal, con o sin bandas prohibidas fotónicas. La última generalización del término considera que en la física del estado sólido, un cristal puede ser llamado así tomando en cuenta la periodicidad de la red, con bandas prohibidas las cuales aparecen en determinados casos. Por lo anterior el término material con bandas prohibidas fotónicas se reserva para un cristal fotónico el

cual siempre tenga bandas prohibidas fotónicas. Para evitar cualquier tipo de confusión se hablará de nanoestructuras dieléctricas ó o metálicas periódicas, debido a que algunas veces las estructuras dieléctricas no siempre son periódicas [4].

Así, pues Los cristales fotónicos [] son nanoestructuras ópticas periódicas que están diseñadas para afectar el movimiento de los fotones de un modo similar al que la periodicidad de un cristal semiconductor afecta al movimiento de los electrones. Los cristales fotónicos aparecen en la naturaleza de forma natural y también se pueden fabricar en el laboratorio. Han sido estudiados por los científicos con diversos intereses y se les han dado diversas aplicaciones [6].

TIPOS DE CRISTALES FOTÓNICOS

Unidimensionales: Espejos de Bragg

El dispositivo más simple que usa el principio de los cristales fotónicos es el cristal fotónico unidimensional, mejor conocido como espejo de Bragg o reflector multicapa. Consiste de dos capas dieléctricas alternadas apiladas de forma periódica, como se puede ver en la figura 1. La luz se propaga en dirección normal a las capas sufriendo reflexiones y transmisiones sucesivas en cada interface adyacente a las capas. Al escoger de forma apropiada el grueso de las capas y el índice de refracción, las ondas reflejadas de cada interface están en fase, mientras que las ondas transmitidas están fuera de fase. En ese caso, los componentes de las ondas transmitidas se cancelan y solo la interferencia de las ondas reflejadas es constructiva o sea la luz es totalmente reflejada. Esto ocurre en un rango de frecuencias. Los espejos de Bragg han sido usados por décadas, pero recientemente han sido considerados como un caso especial de cristales fotónicos [7]. Los cristales fotónicos unidimensionales son utilizados ampliamente como láminas ópticas delgadas con aplicaciones que van desde recubrimientos de lentes y espejos con baja y alta reflexión hasta pinturas que cambian de color y tintas [7].

Bidimensionales: Fibras Óptica Microestructuradas

Los cristales fotónicos de dos dimensiones se hacen usualmente como arreglos periódicos de barras dieléctricas (o metálicas) paralelas separadas por aire o perforando o grabando huecos en un material dieléctrico, Figura 2. En el campo de la óptica integrada, se ha demostrado exitosamente la aplicación de huecos de fracción de un micrómetro

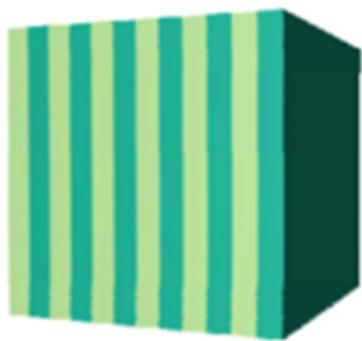


Figura 1. Un cristal fotónico unidimensional (1D) sería el formado por una secuencia de láminas con dos índices de refracción diferentes.

grabados en una guía de onda en forma de lámina, para circuitos y mejorar el procesamiento de comunicación tanto dentro como entre los chips [8, 9]. La fabricación de cristales fotónicos bidimensionales ha aprovechando los métodos empleados en la industria de los semiconductores, esto ha permitido que las aplicaciones de este tipo de cristales fotónicos se comercializaran más rápidamente. Más adelante esas mismas técnicas empezaron a emplear cristales fotónicos planares, cristales fotónico bidimensionales perforados en láminas de semiconductores, la reflexión total interna confina la luz en las laminas y permite los efectos de un cristal fotónico, de esa forma se logra usar la dispersión fotónica en las láminas [8, 9].

Los cristales fotónicos bidimensionales han encontrado su uso más comercial y de aplicación más inmediata en forma de fibras de cristal fotónico (también conocidas como fibras microestructuradas). Las fibras de cristal fotónico pueden diseñarse para obtener propiedades mejoradas sobre una fibra óptica convencional [8, 9].

Tridimensionales: Computadoras Ópticas

Los cristales fotónicos de tres dimensiones son más difíciles de obtener. ya que no ha heredado ni hay ninguna técnica disponible proveniente de la industria de semiconductores para la fabricación de cristales fotónicos tridimensionales. Se ha intentado, de todos modos, adaptar algunas técnicas y se ha llegado a obtener algunos avances¹⁰. Yablonoitch sugiere taladrar un arreglo de huecos a tres diferentes ángulos en un material dieléctrico, Figura 3. Otro método es la llamada estructura “pila de leña” (“wood-



Figura 2. Una distribución periódica de motivos de diferente constante dieléctrica (en este ejemplo cilindros de semiconductor separados por aire) posee una distribución con bandas de energías y zonas donde no existen estados permitidos (energías prohibidas para fotones).

pile”) construidas a base de depositar sucesivas capas de materiales. Otra línea de investigación consiste en fabricar las estructuras fotónicas tridimensionales mediante autoensamblaje, básicamente se trata de permitir que nanoesferas dieléctricas suspendidas en un disolvente se dispongan en estructuras tridimensionales periódicas que posean una banda prohibida fotónica[10, 11].

Las aplicaciones de cristales fotónicos en tres dimensiones están lejos de llegar a comercializarse pero ofrecen características adicionales que pueden dar lugar a un nuevo concepto de tecnología, como por ejemplo la computadora óptica, una vez que se controlen ciertas facetas tecnológicas como su fabricación y los principales problemas como el desorden en las estructuras [?].

La banda prohibida fotónica es básicamente un salto entre la línea del aire y la línea del dieléctrico en la estructura de bandas de energía debido a la dispersión de la luz al difractarse. Al diseñar un cristal fotónico es necesario pronosticar la posición y el tamaño de la banda prohibida, esto se hace usando métodos como el de Diferencias Finitas en el Dominio del Tiempo, el Método espectral de Orden N o Método de Aproximación Escalar, con los que se hacen cálculos de simulación. Básicamente estos métodos calculan las frecuencias (modos) de los cristales fotónicos para cada valor de la dirección de propagación dada por el vector de onda o viceversa, los valores del vector de onda k para cada frecuencia, en el espacio recíproco [13].



Figura 3. Cristal fotónico 3D fabricado capa a capa por litografía. Las capas compuestas por agujeros (menores de una micra en diámetro) separados por brazos en estrella y las capas compuestas por columnas se alternan simulando los enlaces químicos de una red de diamante

CONCLUSIONES

En el mundo actual, los semiconductores son la base para la microelectrónica, las telecomunicaciones y la computación. Se está comenzando a entender el excitante potencial de sus primos electromagnéticos para el mundo del mañana: los cristales fotónicos. Estos tienen una banda prohibida electromagnética, una banda de frecuencias en las cuales las ondas electromagnéticas están prohibidas. Estructuras de 1D, 2D y 3D se han construido para aplicarlas en áreas entre las que figuran las telecomunicaciones, donde se crearán sis-

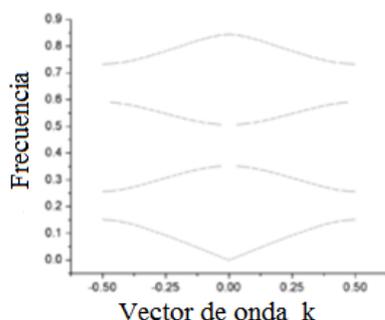


Figura 4. Estructura de bandas de un cristal fotónico unidimensional, espejo de Bragg, calculada usando el método de aproximación escalar.

temas ópticos cientos de veces más eficientes que los existentes, porque las señales podrán transmitirse y procesarse simultáneamente en muchas longitudes de onda, así como circuitos integrados nanofotónicos que podrán ser insertados en los microchips estándar con lo que estará disponible el prototipo de la computadora óptica.

Bibliografía

- [1] López, C. (2003) “Materials aspects of photonic crystals”, *Advanced Materials*, 15, 1679. www.madrimasd.org
- [2] Alvaro Blanco, Cefe López, Gaspar Armelles, F. J. García Vidal, *NanoFotónica: hacia el control sub-micrométrico de la luz*, Madrid, 2006. www.madrimasd.org.
- [3] “Photonics for the 21st century”, <http://web13.vdi.net-build.de/pdf/visionpaperPh21.pdf>.
- [4] E. Yablonovitch. Inhibited spontaneous emission in solid state physics and electronics. *Phys. Rev. Lett*, 58(20), 1987.
- [5] S. John, “Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices” *Phys. Rev. Lett.* 58, 2486–2489 (1987).
- [6] E. Yablonovitch and T.J. Gmitter, “Photonic Band Structure: The face-centered-cubic case”, *Phys. Rev. Lett.* vol. 63, 1950-1953 (1989).
- [7] S. John. Electromagnetic absorption in a disordered medium near a photon mobility edge. *Phys Rev Lett*, 53:2169-2172, 1994.
- [8] “Foundations of Photonic Crystal Fibres” Frederic Zolla, Gilles Renversez, Andre Nicolet, Boris Kuhlmeij, Sebastien Guenneau, Didier Felbacq, Imperial College Press, 2005.
- [9] F. Poli A. Cucinotta S. Selleri, *Photonic Crystal Fibers: Properties and Applications*, Springer, 2007
- [10] E. Yablonovitch, *Photonic Crystal, Physics and Technology Frontiers*, pp.6, 2002
- [11] Eli Yablonovitch, *Photonic Crystals: What’s in a Name?*, *Optics—Light Touch*, pp.12-13, 2007.

- [12] “Photonic Crystals: Physics and Technology”, C. Sibia · T.M. Benson · M. Marciniak · T. Szoplik, Springer-Verlag, 2008.
- [13] E. Yablonovitch, T.J. Gmitter, K.M. Leung (1991), Photonic band structure: the face-centered-cubic case employing nonspherical atoms (PDF), Physical Review Letters 67 (17): 2295–2298, doi:10.1103/PhysRevLett.67.2295, <http://www.ee.ucla.edu/~photon/pubs/ey1991prl6717.pdf>

Acerca del autor o autores

Profesores-investigadores de la Fac. de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Autónoma de Zacatecas, y miembros del Cuerpo Académico de Procesamiento e Instrumentación Óptica.