

Cristales fotónicos empleados en tratamientos médicos

Photonic crystals used in medical treatments

Yina Marcela Porras González¹, Agni Puentes Ossa², Diego Julián Rodríguez Patarroyo³

¹ Licenciada en Física, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, yinampg@gmail.com,

² Licenciada en Física, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, agnipuentesossa@outlook.com

³ Ph.D.(c), Ingeniería, M.Sc. Física, Profesor Universidad Distrital Francisco José de Caldas, djrodriguezfp@gmail.com

Fecha de recepción: 18/08/2015 Fecha de aceptación del artículo: 01/12/2015

Resumen

La fotónica se ha estudiado por más de dos décadas con el fin de trabajar en la construcción, desarrollo y manipulación de la luz especialmente de estructuras cristalinas a escala nanométrica para ser empleadas en las telecomunicaciones, computación, celdas solares hasta biosensores, y demás aplicaciones que han sido de gran utilidad en la actualidad como lo es en la biomédica. Por esta razón, en el presente artículo, expone un estudio retrospectivo de los cristales fotónicos, con el propósito de dejar como precedente un estado del arte que manifieste los fundamentos teóricos, aplicativos de cristales fotónicos en tratamientos médicos. Así mismo, se expone de manera descriptiva y comparativa el estudio de los cristales fotónicos según la física desde la perspectiva electromagnética por medio de las leyes de Maxwell con una visión macroscópica del comportamiento de los cristales fotónicos y desde el punto de vista de la optoelectrónica. Por último, se expresan conclusiones cualitativas de la implementación de cristales fotónicos en tratamiento médicos.

Palabras clave

Fotónica, cristales fotónicos, optoelectrónica, electromagnética y tratamiento médico.

Abstract

Photonics has been studied for more than two decades in order to work in construction, development and manipulation of light especially of crystal structures at the nanoscale to be employed in telecommunications,

computers, solar cells to biosensors, and other applications they have been useful today as it is in biomedical. Therefore, in this article, a retrospective study of photonic crystals, in order to leave as precedent a state of art expressing the theoretical foundations, applications of photonic crystals in medical treatments is presented. It also provides a description of the manner and comparative study of photonic crystals as electromagnetic physics from the perspective through the laws of Maxwell with a macroscopic view of the behavior of photonic crystals and from the point of view of optoelectronics. Finally, qualitative conclusions implementation of photonic crystals is in medical treatment.

Keywords

Photonics, photonic crystals, optoelectronics, electromagnetic and medical treatment.

1. Introducción

Dentro de la investigación en Ciencias Naturales de los últimos tiempos los materiales que presentan una formación periódica en sus estructuras, se han convertido en el centro de interés para la comunidad científica, cabe resaltar que las estructuras que más se destacan son los materiales tanto electromagnéticos como acústicos y los cristales fotónicos como lo menciona Erik P, Navarro-Baron y colaboradores [1]. También se menciona que una de las características más sobresalientes de éstos materiales, es la forma en que controlan el uso de las ondas en su interior en cualquiera de los dos casos (electromagnética o acústica) “En el caso de los cristales fotónicos, destaca su capacidad de

confinar las ondas de luz de ciertas frecuencias, esto debido a que la transmisión de un conjunto de frecuencias dentro del cristal está prohibida” [2]. Así pues, el campo de la nanotecnología ha experimentado un gran auge ya que pone en el mercado materiales y dispositivos formados por objetos pequeñísimos que ofrecen diversas propiedades [3]. Y más importante aún, es el hecho de que éste tipo de materiales tiene entre sus tantas aplicaciones su aporte a la Biomedicina para tratamiento médico, en el caso de los biosensores o detectores químicos como es mencionado en [4-7].

A continuación, se lleva a cabo una revisión sobre algunos de los principales actores implicados en el desarrollo de cristales fotónicos, es decir, estructuras cristalinas a la escala nano que responden a cierta periodicidad según su tipo y son capaces de limitar ondas de luz de cierta frecuencia, esto será explicado en el título 2; luego en el título 3 se habla de las principales aplicaciones de los cristales fotónicos en los que se mencionan las más comunes aplicaciones en la literatura y algunos de los fabricantes de cristales fotónicos; para el título 4 se propone retomar las bases desde la física que son fundamentales para la comprensión teórica de los principios y leyes que rigen el comportamiento de un haz de luz dentro de un cristal fotónico. Finalmente, en el título 5 se presenta información sobre la electrónica y la optoelectrónica que se usa como teoría de aplicación para la comprensión y predicción del comportamiento de un cristal fotónico. Esto a su vez lleva a mostrar algunas de las imágenes más sobresalientes con respecto a las aplicaciones en el área de la biomedicina.

Lo anterior, tiene como finalidad profundizar en el área de los cristales fotónicos para conocer las principales aplicaciones en la ciencia biomédica, sin obviar los principios físicos que rigen el comportamiento de éste tipo de materiales. Siendo la intencionalidad de este trabajo, la realización de un estado del arte sobre los cristales fotónicos para interesados en el área de la Bioingeniería y porque no la ciencia de materiales.

2. Cristales Fotónicos

En 1987 cuando E. Yablonovich y S. John propusieron de forma simultánea e independiente, el concepto de

cristal fotónico que de ahora en adelante denotaremos con la sigla CF (Cristal Fotónico) [8], correspondiente a una aplicación específica de la Fotónica, que es la ciencia que da forma (moldea) a un flujo de “luz” con el propósito de transportar, amplificar y generar una señal eléctrica modulada a partir de un grupo de fotones o soportar una función lógica Booleana. Es por ello que la fotónica, es entendida como la manipulación de la luz a una escala espacial considerablemente más pequeña de longitud de onda [9].

Así pues, los Cristales Fotónicos se definen como materiales microestructurados en los que la luz se comporta como los electrones en un semiconductor, produciendo una estructura de bandas que incluye bandas prohibidas o bandgaps, estos permiten detectar, generar y controlar vibraciones mecánicas. Según su estructura, son compuestos de dieléctricos periódicos o metales dieléctricos que son diseñados para afectar la propagación de las ondas electromagnéticas, del mismo modo como el semiconductor afecta la propagación de los electrones como se menciona en [10].

Los cristales fotónicos, en términos de la configuración atómica con forma de una red cristalina, tienen una disposición periódica de átomos o moléculas que presentan un potencial periódico para la propagación de un electrón a través de este. El potencial periódico en un cristal semiconductor afecta el movimiento del electrón por definición en las bandas de energía permitidas y prohibidas [11].

Los cristales fotónicos se clasifican según las dimensiones de periodicidad como se muestra en la figura 1, donde se puede apreciar un ejemplo de la distribución en diferentes tipos de cristal fotónico. En la figura 1(A) se respresenta la estructura de un cristal monodimensional que consiste en un sistema de multicapas en las que el índice de refracción varía alternativamente; en la figura 1(B) se encuentra el cristal bidimensional como una red de cilindros inmersos en un medio de distinto índice de refracción, por último, se observa un cristal tridimensional que se puede tomar

como un empaquetamiento de esferas en un medio de diferente índice de refracción [6].

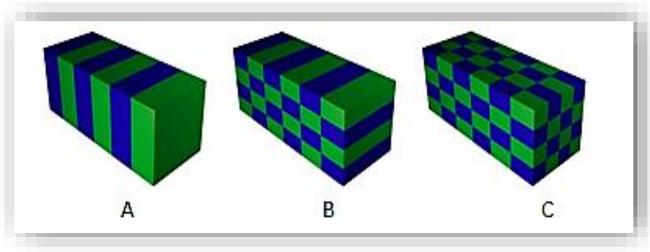


Figura 1: Cristales fotónicos de A. 1D, B. 2D Y C.3D. Los colores representan los distintos valores del índice de refracción. Fuente: [12].

Según lo anterior, se puede inferir que un parámetro fundamental de los CF es la distancia que separa una capa de un índice de refracción con la siguiente capa del mismo material, se denomina periodo y está directamente relacionada con la longitud de onda de los fotones que se propagan. Por ello, la longitud de la onda dentro del espectro visible y del infrarrojo cercano, se trabaja entonces en la escala de los nanómetros.

Otras propiedades importantes según [12] de los CF son:

(i) *La existencia de una banda fotónica prohibida (Photonic Band Gap, PBG por sus siglas en inglés), 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.*

Frente a eso, es importante reconocer que existe una analogía entre el comportamiento de los fotones en un CF y el de los electrones en un semiconductor. Mientras que el comportamiento de los electrones obedece a la ecuación Schrödinger, los fotones se rigen por las ecuaciones de Maxwell. Por tanto, también existe una analogía entre el efecto del potencial cristalino sobre los

electrones, y la variación periódica del índice de refracción sobre los fotones [6].

2.1 Parámetros que indican las propiedades de un cristal fotónico

A continuación, se describen las características que permiten definir un cristal fotónico:

2.1.1 Estructura cristalina

Está relacionada con la forma en que queda modulado el índice de refracción. Puede adoptar estructuras triangulares, cuadradas y de panal de abeja entre otras, para sistemas 2D. Mientras que los sistemas 3D pueden presentar cualquiera de las estructuras correspondientes a los 32 grupos puntuales cristalográficos (o 230 grupos espaciales) [13].

2.1.2 Topología

Referido al diseño de la distribución de los átomos en el cristal en donde el campo queda concentrado en las zonas de mayor constante dieléctrica, por lo que es muy importante conocer la disposición de estos centros de scattering. Si éstos se encuentran aislados entre sí e inmersos en un medio de menor constante dieléctrica, se dice que tienen una topología tipo Cermet. Por el contrario, si los centros de scattering se encuentran interconectados se dice que adoptan una topología tipo Network [13],[14].

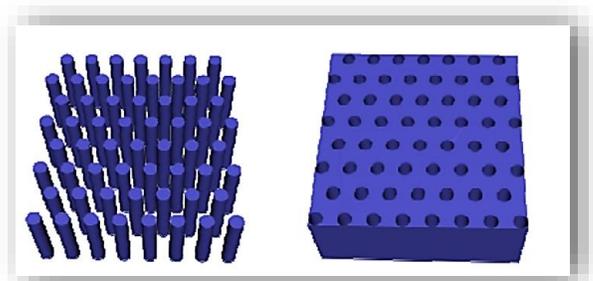


Figura 2. Cristales Bidimensionales con una red triangular de cilindros con topología Cermet (izquierda), Network (Derecha). Fuente: [14].

2.1.3 Contraste de índices

Es la razón entre los índices de refracción mayor y menor del material compuesto que forma el cristal

fotónico. En general existe un umbral por debajo del cual no se abre ningún gap fotónico completo. Este umbral será diferente para las distintas estructuras y topologías (13).

2.1.4 Factor de llenado

Es la razón entre el volumen ocupado por uno de los materiales con respecto al volumen total. La combinación de todos estos factores hace que existan multitud de posibles estructuras con muy diversas propiedades fotónicas. La aparición de un defecto puede dar lugar a modos localizados, de forma que un defecto puntual puede verse como una cavidad resonante donde el modo electromagnético quede atrapado. Así mismo, la fabricación de un cristal fotónico con un defecto bidimensional permitirá guiar un cierto rango de longitudes de onda [6].

3. Principales aplicaciones de los cristales fotónicos

El objetivo en la investigación en cristales fotónicos, es controlar los patrones de los materiales en una escala de longitud comparable a la longitud de onda de la luz, en una, dos [15] y tres dimensiones, creando así materiales con características ópticas diseñadas [4]. Dentro del campo de investigación de los cristales fotónicos, se justifica su importancia en diferentes aplicaciones, como se menciona en [16] de la Universidad de Kyoto-Japón: “Se ha demostrado que los cristales fotónicos pueden ofrecer nuevas y distintas formas de control de fotones. Cómo la Fotónica nanoestructura, dispositivos semiconductores fotónicos, chips, láminas láser, etc, pronto se convertirá en disponible. El mundo de los cristales fotónicos ahora se está expandiendo a diversas áreas interdisciplinarias como bio-fotónica, física atómica, computación cuántica y las comunicaciones”. En concordancia con esto la literatura en general reporta diferentes aplicaciones [17] que se clasifican como:

- Guías de onda (fibras ópticas)
- Mejorar la eficiencia de circuitos optoacoplados y Ordenadores ópticos
- Biomedicina: Detectores químicos y Biosensores
- Espejos de alta reflectividad en láseres

- Evitar el efecto Joule
- Filtros

Con lo que sigue con lo expresado de CF, se hace un recuento de las aplicaciones que más se reportan o han resultado representativas en investigación hasta el momento, de ahí que se decide mostrar cuatro de los que, según ésta investigación, se deben mencionar sin restarle importancia al gran espectro de aplicaciones que poseen los cristales fotónicos.

3.1. Luz laser en nanocavidades

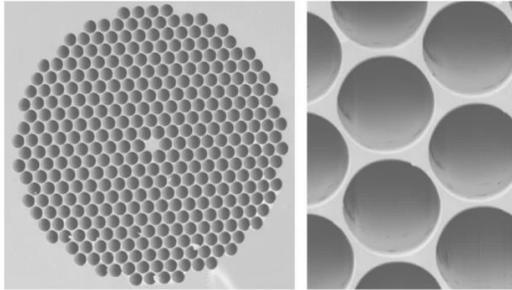
Entre las aplicaciones más frecuentes, las fuentes compactas con emisión láser han sido un campo importante de estudio en fotónica. Ya que los cristales fotónicos 2D permiten la realización de fuentes compactas de luz láser en nanocavidades ópticas y su integración con guías de onda, moduladores y detectores. Hasta el momento se han realizado diferentes tipos de emisores láser a temperatura ambiente basados en nano y microcavidades 2D y nuevos diseños basados en modificaciones de redes bidimensionales de cristales fotónicos han sido propuestos. Se ha empleado cristales fotónicos 1D como reflectores de alta eficiencia para un fotodetector de ultra-alta-velocidad en 1.5 μm basado en GaAs [18].

3.2. Guías de ondas (Fibras ópticas)

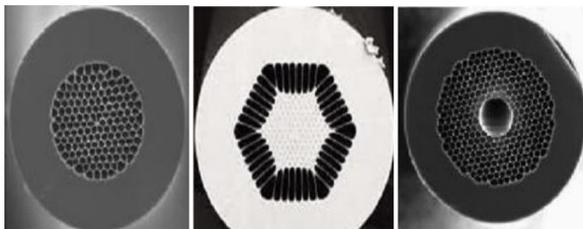
Las fibras de cristal fotónico (figura 3), son fibras microestructuradas con distribución periódica de agujeros de aire en la región de revestimiento. Estos agujeros de aire pueden ser infiltrados con líquidos o gases [19]. Las fibras ópticas, que se utilizan principalmente en sistemas de telecomunicaciones, son filamentos delgados y flexibles fabricados de materiales dieléctricos como vidrio o polímero con aproximadamente el grosor de un cabello humano. Se utilizan principalmente para transmitir la luz de un lugar a otro de la misma manera que los cables de cobre llevan señales eléctricas y energía. Las fibras juegan un papel importante también en algunos sistemas láseres industriales, equipos médicos y en los diferentes dispositivos de detección, como son los sensores. La investigación de fibras de cristal fotónico comenzó con los primeros experimentos, que demostraron que la luz

puede ser guiada por una fibra de cristal fotónico, primeramente, por reflexión total interna y después por la teoría fotónica de la zona prohibida o bandgap [20].

Figura 3. Secciones transversales de diferentes fibras de un cristal fotónico. Fuente: [20],[21].



3.3. Circuitos Optoacoplados y Ordenadores



Ópticos

Con respecto a los cristales bidimensionales, los esfuerzos de los investigadores se centran en conseguir circuitos para las señales ópticas utilizadas en comunicaciones, por lo que se presentan los cristales tridimensionales basados en su capacidad para prohibir bandas de transmisión en cualquier dirección del espacio. La nanofotónica es típica de 1300-1500nm para aplicaciones en telecomunicaciones [22].

También, es importante reconocer que una de las aplicaciones más interesantes de los cristales fotónicos 3D consiste en la inclusión de un defecto en la estructura perfectamente periódica con el fin de atrapar modos de propagación y acumular energía. Esta idea ya ha sido presentada con anterioridad al estudiar las propiedades de los cristales fotónicos con defectos en su estructura, una de ellas basada en la supresión de bandas de emisión [22]. Una manera de modelar algunas de las aplicaciones de cristales fotónicos, es la fotónica computacional (ver figura 4).

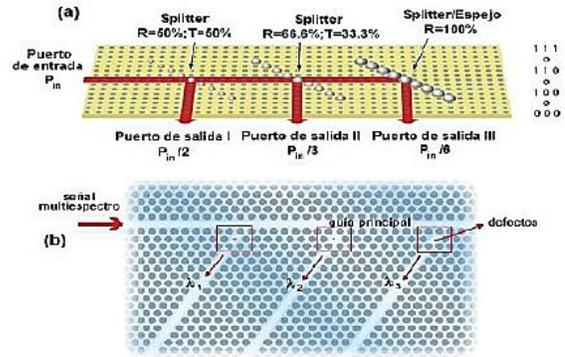


Figura 4. (a) Conversor AD de 2 bit basado en cristales fotónicos donde una línea de defectos, se encarga de dividir la señal de entrada en diversos puertos. (b) Demultiplexador basado en cristales fotónicos donde, ahora, los defectos dividen la señal en longitud de onda hacia los diversos puertos. Fuente:[17].

3.4. Biomedicina: Detectores Químicos y Biosensores

Los CF representan una clase única y versátil de dispositivos ópticos para la manipulación los campos electromagnéticos asociados a la luz. A través de la correcta aplicación de diseño y fabricación de CF, campos electromagnéticos pueden ser confinados y aumentar su concentración para mejorar la interacción entre la luz y la materia biológica en contacto con el CF [23]. Por lo tanto, a continuación, se enuncian las aplicaciones más comunes que emplean CF en Biomedicina.

3.4.1. Los CF coloidales:

Son estructuras tridimensionales (ver figura 5) con una gran calidad óptica y un bajo coste de producción como lo señala [5]. Además, pueden emplearse como moldes para otros materiales. Es por ello, que se han diseñado numerosos prototipos basados en cristales coloidales, se hace uso de las variaciones en la respuesta óptica del ópalo ante modificaciones en su estructura y que son perceptibles por el ojo humano. Aprovechando este fenómeno se han fabricado sensores de glucosa implementados en lentillas, sensores PH, papeles, tintas fotónicas, sensores de huellas dactilares, pantallas etc. En 1987, la mejora de la eficiencia de las celdas solares fue una de las principales aplicaciones potenciales de los cristales fotónicos, debido a la capacidad que presentan estos materiales para controlar el flujo de radiación electromagnética. En el 2003 se integró por primera vez

un cristal fotónico coloidal en el seno de una celda solar, con la idea de emplear estructuras fotónicas para aumentar la luz recogida por la celda [5].

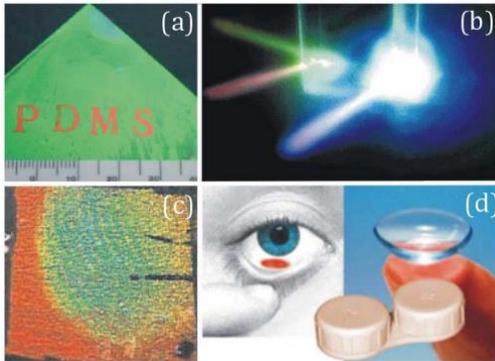


Figura 5. Recopilación de imágenes de algunos dispositivos o aplicaciones propuestos cristales coloidales de. (a) Papel fotónico, (b) radiación láser a través de un ópalo, (c) sensor de huellas digitales y (d) lentillas que incluyen un sensor de glucosa. Fuente: [5]

3.4.2. Los biosensores

En el campo de la medicina una palabra clave que ha de tenerse en cuenta es Biosensor, que constituye una de las principales aplicaciones de los cristales fotónicos. Con ello se dice que los cristales fotónicos fueron descubiertos como una posible solución para el control de la emisión espontánea y la emisión de la luz, de ahí que las aplicaciones de alto impacto tecnológico hasta el momento, son los láseres de cristal fotónico y las guías de onda de dimensiones submicrónicas [24]. Los biosensores, permiten identificar cambios patológicos dentro de una célula individual, comprendiendo el funcionamiento de la división celular, la apoptosis, funcionamiento de las nanomáquinas biológicas, entre otras aplicaciones, así, la medicina será sin duda la gran beneficiaria de la nanotecnología, donde la nanofotónica está contribuyendo a rastrear moléculas a través de detectores en bajísimas concentraciones, de cuya presencia se infieren, por ejemplo, determinadas patologías. Es el caso de los plasmones de superficie que amplifican la respuesta óptica, que permite identificar moléculas específicas [25].

De los biosensores (ver figura 6) desarrollados, se encuentra un nanosensor para la detección directa de proteínas y del ADN conformado por una fibra óptica

muy afilada que no daña la pared celular y permite el registro de su actividad a través de la interacción del campo evanescente de la luz que circula por la fibra previamente biofuncionalizada. (26)

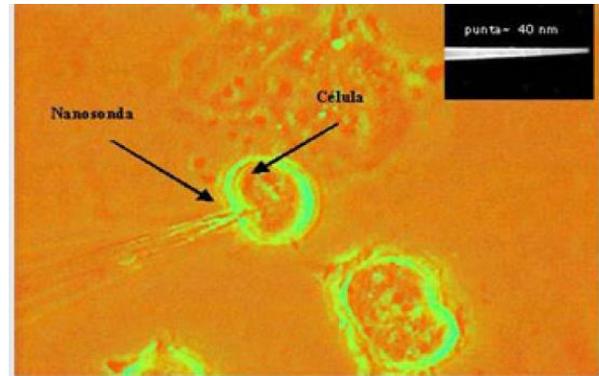


Figura 6. Medida de la actividad metabólica de una única célula mediante una nanosonda fotónica. Fuente: [26].

Existen nanosensores que consisten en una fibra óptica muy afilada (su extremo final tiene sólo 30-50 nm) lo que le permite penetrar a través de la membrana celular sin causar ningún daño y sin alterar el funcionamiento normal de la célula [27].

3.4.3. Terapia fototérmica

Se explica, en varias publicaciones que la terapia fototérmica utiliza luz y calor para destruir los tumores. La partícula absorbe mucha luz para acumularla en los tumores. Una vez que la nanopartícula alcanza su tumor objetivo se vuelve fluorescente para indicar “misión cumplida”. Polvo de silicio [28].

3.4.4. Láseres de anillo

La MBE (grupo de epitaxia de haces moleculares, Madrid- España) a diseñado, fabricado y caracterizado el láser más pequeño de España, también se han fabricado láseres de anillo con cavidades acopladas, que muestran emisión láser monomodal estable con una supresión modal mayor de 20 dB, o cristales fotónicos con simetría de red de fase Suzuki (ver figura 6), donde la luz viaja con velocidades 1000 veces menores que en el aire. Estos nuevos dispositivos pueden ser usados como sensores ópticos, memorias fotónicas, o eficientes nanofuentes de luz láser [24] y poseen una estructura de bandas fotónicas muy particular, 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. [18] Así, la red de fase Susuki (ver figura 7) es una estructura fabricada con un entramado triangular como referencia y la eliminación de los agujeros con el fin de crear una retícula rectangular con los agujeros que faltan.

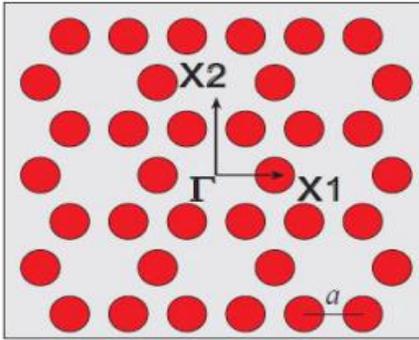


Figura 7. Simetría de la red de fase Susuki. Fuente: [29].

De éstas evidencias, se puede afirmar que las aplicaciones que tienen los cristales fotónicos dentro de la biomédica, se conocen como parte de la disciplina denominada Biofotónica o también llamada Fotomedicina y las investigaciones sobre éstas, ya han dado frutos por los beneficios de sus propiedades; entorno a esto sitios web como “sala de prensa” de la UPC hacen referencia al uso de la “luz para curar enfermedades” mostrando así la incidencia en diagnóstico y terapia del cáncer, la dermatología, la oftalmología, la cirugía o la cardiología entre algunas de las muchas especialidades [30].

4. Fundamentos Físicos del Comportamiento de un Cristal Fotónico

4.1. Comportamiento Físico del Silicio

Dispositivos que poseen componentes a base de silicio presentan propiedades excepcionales de luminescencia en relación con el material macroscópico masivo, que resultan del confinamiento cuántico de los electrones y huecos en la nanopartícula, como lo es una estructura bidimensional de columnas cilíndricas de Silicio con un parámetro de red de $2,5 \mu\text{m}$ (ver figura 8).

En el caso particular de semiconductores de “gap” indirecto, como el Si, la transición electrónica directa banda a banda puede ocurrir únicamente con la asistencia de fonones, lo que determina una baja probabilidad de recombinación radiativa.

Pero para cristales de dimensiones comparables al radio de Bohr del excitón, el confinamiento espacial de los portadores de carga produce un desplazamiento en energía de la emisión de luz hacia el visible, así como un notable aumento de su eficiencia. Esto permite que nanocristales de silicio o de germanio, crecidos en una matriz de SiO_2 , emitan en el rango visible y a temperatura ambiente [31]. Así, el Silicio por su elevado índice de refracción, 3.5 en la zona de transparencia, asegura la presencia del gap completo entre la octava y la novena bandas.

Además, variando adecuadamente el parámetro de red de la estructura, dicho gap fotónico se puede sintonizar a lo largo del infrarrojo cercano e incluso hacerlo operar en 1.5 micras, banda de vital importancia tecnológica debido a que es la ventana de las actuales comunicaciones ópticas [32].

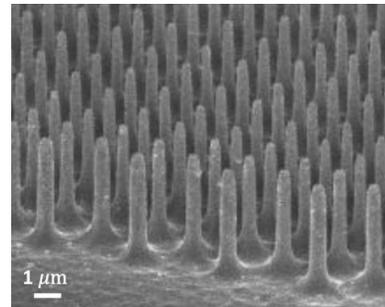


Figura 8. Imagen de microscopia electrónica de barrido de una estructura fotónica bidimensional de pilares de Si, creada a partir de la formación selectiva de silicio poroso (SiP). Fuente: [33].

4.2. Propiedades Ópticas de Los Cristales Fotónicos

Se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones de propiedades ópticas de los cristales como lo menciona [5] y [34]:

- El parámetro de la red, que debe ser del orden de la longitud de onda con la que se desea interactuar.

- La celda unidad y su topología, es decir, la geometría con que se disponen los elementos de difracción usados (láminas, cilindros, esferas), y como se encuentran conectados entre sí.
- Los índices de refracción de los materiales que componen el cristal fotónico, que son determinantes de la anchura del gap fotónico. El aumento del contraste dieléctrico en ciertas estructuras cristalinas facilita el solapamiento de los pseudogaps fotónicos que se abren en las distintas direcciones del cristal, de forma que pueda alcanzarse el gap completo. Asimismo, también es de gran importancia la proporción en que estos materiales se encuentran respecto del volumen total de la celda, magnitud denominada fracción de llenado (ff. Del inglés filling fraction).

4.2.1. Difracción

El fenómeno físico en el que se basa el comportamiento de los CF es un fenómeno de difracción (ver figura 9) ocurrido en las fronteras entre zonas de alta y baja constante dieléctrica, la periodicidad del cristal debe ser del mismo orden de magnitud que la longitud de onda en la que se pretende trabajar, [22].

4.2.2. Difracción Bragg

Relaciona el ángulo de incidencia de la radiación electromagnética en el cristal con la distancia entre los planes sucesivos de moléculas o átomos. Más específicamente, Bragg postula que la diferencia de camino entre dos planos de reflexión en la estructura adyacente debe ser un múltiplo de la de longitud de onda, de manera que esta sea una reflexión total [35], [36].

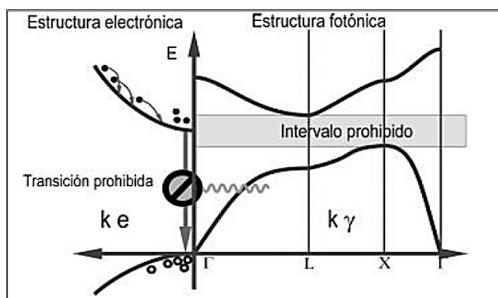


Figura 9. Interferencia constructiva y destructiva que se presenta debido a la difracción en un cristal. Fuente: [35].

4.3. Teoría de Bandas

La distribución periódica de la constante dieléctrica dentro de un cristal fotónico puede provocar la apertura de bandas de frecuencias, las cuales inhiben la propagación de la luz en su interior. Dichas bandas, consisten en rangos de frecuencia prohibidos para la propagación de fotones dentro del cristal fotónico, de forma análoga a las bandas de energía en los semiconductores que afectan a los portadores de carga [32]. Los CF cerca de la frecuencia donde presentan una banda prohibida se comportan con un índice de refracción efectivo que se encuentra limitado por el índice de refracción de los materiales que lo componen y es determinado por la estructura fotónica de bandas. Ese índice puede ser menor que la unidad y también negativo y se puede utilizar la ley de Snell para describir la propagación de la luz [37],[38].

Los CF son materiales con propiedades tan exclusivas que se han aplicado en diversos campos, los puntos cuánticos de InAs/GaAs son las nanoestructuras semiconductoras más estudiadas en la literatura. Ya que demuestran el efecto Purcell en el modo fundamental de cavidades de tipo micro-pilar conteniendo un único punto cuántico auto-organizado de InAs/GaAs [39].

5. Analogías entre la electrónica y la optoelectrónica de los cristales fotónicos

A continuación, se describen las características físicas para el estudio de los cristales fotónicos desde dos puntos de vista la Electrónica y la Optoelectrónica (ver figura 10):

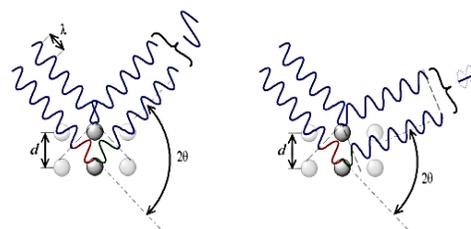


Figura 10. Ejemplo del acoplamiento entre los estados fotónicos de un cristal fotónico (derecha) y los electrónicos de un semiconductor (izquierda). Al coincidir el gap fotónico con el borde del gap electrónico, los electrones excitados a la banda de conducción no pueden decaer espontáneamente, ya que el fotón que necesitan emitir para volver a la banda de valencia no existe como estado extendido. Fuente: [40].

5.1. Punto de vista desde la electrónica

En primera medida se desea hacer una descripción de los fundamentos de la electrónica inmersa en el funcionamiento de un cristal fotónico, en ese orden de ideas, se menciona a la ecuación de onda como punto de partida para obtener las condiciones iniciales de la propagación de la luz dentro de un cristal nanofotónico, y cómo éste es capaz de confinar esas ondas de luz de ciertas frecuencias.

Para el caso de un electrón en un semiconductor a partir de la ecuación de Schrödinger [41], se tiene que:

$$\left[\frac{-\hbar^2}{2 \cdot m_0} \nabla^2 + U(r) \right] \cdot \Psi(r) = E \cdot \psi(r)$$

Pertenciente a la Ecuación de Onda para un semiconductor, donde $U(r)$ es la energía potencial a la que están sometidos los electrones dentro del semiconductor.

El comportamiento de los electrones en un metal y un semiconductor, parte del hecho de que el potencial al cual ellos están sujetos es periódico. La razón de la periodicidad es que los átomos están dispuestos en una red cristalina regular [42]. Donde, la estructura electrónica de un semiconductor se caracteriza por presentar, a temperatura ambiente, una cantidad de electrones en la banda de conducción despreciable comparada con la de la banda de valencia, siendo necesario un aporte energético externo (térmico, aplicación de un potencial eléctrico, o absorción de un fotón de luz) para que los electrones que se encuentran en el poblado de la banda de valencia, adquieran la energía necesaria para superar la zona prohibida, es decir superar el band - gap y pasar a ocupar estados en la banda de conducción. Como resultado se obtiene un electrón libre en la banda de conducción y un hueco en la banda de valencia, cargado positivamente, que en conjunto forman lo que se denomina par excitónico [43],[44].

Lo anterior, hace referencia a la forma en que un electrón se comporta dentro de un material semiconductor, el cuál es usado para la fabricación de cristales fotónicos como los menciona [43], dentro de

éstos materiales está el silicio poroso nanoestructurado, que está compuesto por “cristales de tamaño nanométrico que muestran efectos cuánticos de tamaño, entre los que puede destacarse la capacidad de emitir luz en el intervalo visible de longitudes de onda. Además, este material permite fabricar estructuras en una, dos o tres dimensiones con un comportamiento óptico que puede ser controlado de una manera relativamente sencilla.” [45], [46].

Por su parte el teorema de Bloch, relaciona los campos de dos celdas unitarias. Dicho teorema afirma que la autofunción, solución de la ecuación Schrödinger, debe de ser una onda plana modulada por una función que tiene el mismo periodo que el potencial [42].

5.2. Punto de vista desde la optoelectrónica

De acuerdo a la Optoelectrónica, siempre que se hable de una situación macroscópica como es el caso de la propagación de la luz a través de un cristal fotónico, pueden tratarse a través de las ecuaciones de Maxwell, [47], [22], [48], [49].

$$\begin{aligned} \vec{\nabla} \cdot \vec{D} &= \rho \\ \vec{\nabla} \cdot \vec{B} &= 0 \\ \vec{\nabla} \cdot \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \vec{\nabla} \cdot \vec{H} &= -\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{J} \end{aligned}$$

donde:

\vec{E} : Campo eléctrico

\vec{H} : Campo magnético

\vec{D} : Inducción magnética o vector desplazamiento

\vec{J} : Densidad de corriente eléctrica

ρ : Densidad de carga eléctrica

Los materiales dieléctricos se rigen bajo cinco consideraciones como lo menciona [50]:

1. Se asume que las fuerzas de campo son lo suficientemente pequeñas de modo que se habla de en un régimen lineal.
2. Se considera que el material es macroscópico e isotrópico, de manera que $E(r, t)$ y $D(r, t)$ están

relacionados por ϵ_0 multiplicado por una función dieléctrica escalar ϵ_r llamada permitividad relativa.

3. Se ignora cualquier dependencia explícita de la frecuencia con la constante dieléctrica.
4. Se enfoca en materiales transparentes de manera que pueden tratar a $\epsilon(r)$ como real y positivo.
5. No se tienen densidades de carga ni de corriente libres, así que $\rho_v = 0$ y $J = 0$.

En el caso de cristales fotónicos, es posible resolver las ecuaciones de Maxwell en el dominio de la frecuencia como solución de un problema de autovalores empleando el teorema de Bloch-Floquet. Este método permite obtener la relación de dispersión del cristal, así como sus autofunciones asociadas. También es posible llevar a cabo cálculos exhaustivos y precisos de cristales fotónicos finitos, empleando el método de la matriz de dispersión y el teorema de Bloch-Floquet. Este método, conocido como de Koringa-Kohn-Rostoker (KKR), se ha usado para resolver una amplia variedad de problemas relacionados con las propiedades de transporte en láminas de cristal fotónico [51],[52],[53].

Conclusiones

A lo largo de esta revisión se ha mostrado que los Cristales Fotónicos presentados como una de las aplicaciones de la Fotónica, hacen parte de mecanismos o estructuras tecnológicas usadas en biomedicina y en la industria en general, ya que del tipo de fabricación o condiciones iniciales bajo las cuales se obtiene los cristales fotónicos depende su campo de acción. Así pues, cobra gran relevancia la recopilación de la información relacionada con aplicaciones, como lo es el caso de los cristales fotónicos coloidales que finalmente hacen parte de sensores de glucosa implementados en sensores de PH, por mencionar alguno. Entonces, se observa que el amplio rango de influencia y aplicabilidad de los Cristales Fotónicos, ha llevado a la implementación de nuevos métodos para tratamientos médicos, además de postular interrogantes sobre la tecnología que se usará en tratamiento de patologías en los próximos años.

Por otro lado, los principios físicos del estudio de los cristales fotónicos desde el punto de vista de la optoelectrónica y la electrónica, sirvieron como soporte

teórico-científico para proponer: la fabricación de estructuras a escalas tan pequeñas como lo es la escala nano, la formación de estructuras cristalinas a “voluntad”, la postulación de una nueva ramificación de la fotónica como lo es la Biofotónica; donde ésta última es una disciplina no muy reconocida aún, para la comunidad en general, pero se encuentra vigente desde hace ya varios años, dentro de un gran espectro de propuestas. Es así, que se enfocan los estudios investigativos de cristales fotónicos en los beneficios de sus propiedades para la humanidad, como lo es el caso de la terapia para el cáncer y la cirugía o la radiología, que son algunas de las especialidades con mayor avance en éste campo, cómo se mencionó en el numeral 3 de éste trabajo.

Referencias

1. Erik P. Navarro-Barón, Diego N. Bernal-García, Herbert Vinck-Posada. (2014). Estudio de la estructura de bandas de cristales fotónicos bidimensionales con geometría triangular., *Revista de Física*, pp. 77-89.
2. Yablonovitch, E. (2007). Photonic Crystals What's in a Name?, *Optics Light Touch* , pp. 12-13.
3. Domingo, P. (2010) *La nanotecnología*. s.l. : CSIC.
4. Alivisatos, P. (2004) *The use of nanocrystals in biological detection*. Nature Publishing Group.
5. Cervelló, A. M. (2008). *Preparación, caracterización y modelización de cristales fotónicos coloidales para aplicaciones en células solares*. Sevilla : s.n.
6. Ibisate, M. (2003). *Cristales fotónicos basados en ópalo. cristales fotónicos basados en ópalo*. Madrid: s.n., pp. 5-17.
7. De la Rosa, E. C. (2007). *Nanofotónica: luz + nanopartículas*. 24, CONCYTEG.
8. Lidón, E. P. (2004). *Propiedades ópticas de sistemas fotónicos basados en ópalo*. Universidad Autónoma de Madrid.

9. Florez B. J., Barrios, H. G. (2009). *Estado del arte de la nanotecnología y su aplicación en las telecomunicaciones*. s.l. : Universidad Pontificia Javeriana.
10. Monografías del SOPT. Los materiales y sus aplicaciones en defensa . s.l. : Ministerio de defensa , 2011.
11. Peng, L. *Absorption and emission properties of photonic crystals and metamaterials*. s.l. : Iowa State University, 2007.
12. Tormo, A. D. (2012). *Diseño e implementación de sensores en cristales nanofotónicos*. Valencia : s.n.
13. Hu, E. L. Brongersma, M., Baca, A.(2010) *Advances in the last 10 years and Current Status Nanophotonics*. s.l. : cap 9.
14. Ioseba, N. A., and, Garde Alduncin, M. J. *Sensores Ópticos para Caracterización de Índice de Refracción Basados en Nanolitografía UV sobre Resinas Poliméricas*. Pamplona : upna, 2010.
15. Karachevtseva, L., Glushko, A. (2004). *PBG properties of three-component 2D photonic crystals*. Institute of Semiconductor Physics of NAS of Ukraine; 41 Nauki Prsp., Kiev-03028, Ukraine; , pp. 1-7.
16. Noda, S. *Photonic Crystals---Recent Progress---*. www.jsps.go.jp. [Online] 10 26, 2015. https://www.jsps.go.jp/j-bilat/fos_ja/data/jishi_06/abst08.pdf.
17. www.uam.es. www.uam.es/docencia. [Online] 10 26, 2015. https://www.uam.es/personal_pdi/ciencias/jsoler/docencia/solido/2010/presentaciones/cristalesFotonicos.pdf.
18. Postigo, P. A., Alija, A. R., Martínez, L. J., Sánchez-Dehesa, J. (2006). Fabricación y caracterización de cristales fotónicos bidimensionales para nuevos dispositivos optoelectrónicos. s.l. : *Sociedad Española de Óptica*, pp. 185-188. Vol. 2.
19. Poudereux, D., Corredera, P., Otón, E., Otón., J. M., Quintana, X. (2013). Photonic liquid crystal fiber intermodal interferometer. *Óptica Pura y Aplicada*.
20. Ghirghi, M. V. (2012). *Fabricación e Investigación de Fibras de Cristal Fotónico (Microestructuradas) con Núcleo de Gran Área*. Pereira. Centro de Investigaciones en Óptica, A.C.
21. Valencia, G. E. (2013). *Redes de Bragg en fibras ópticas microestructuradas*. Medellín : Universidad Nacional de Colombia.
22. García, D. H. *Estudio de cristales y cuasicristales fotónicos basados en silicio macroporoso. Estudio de cristales y cuasicristales*. Barcelona : Universidad de Catalunya, pp. 53-58.
23. Cunningham, B. Novel biosensors from photonic crystals.
24. MBE. MBE-IMM (CSIC). Grupo De Epitaxia De Haces Moleculares. [Online] 2011. [Cited: Junio 17, 2015.] <http://www.imm-cnm.csic.es/mbe/?page=lineas&idlinea=25&idpad=6>.
25. Abajo, F. J. (2010). *Nanofotónica: control de la luz a escalas nanométricas*. s.l. : Instituto de Óptica, CSIC.
26. Martínez, C., Lechuga, L. M. (2006). Nanobiotecnología: Avances Diagnósticos y Terapéuticos. *Revista de Investigación en Gestión de la Innovación y Tecnología*. 35, Marzo-Abril.
27. Lechuga, L. M. (2010). Nanotecnología, Nanomedicina: aplicación de la nanotecnología aplicación de la salud. Editors: J. L. Motellón and J. Bueren, Edikamed (Spain), 98-112.
28. <http://luxrerum.icmm.csic.es/>. [Online] 05 8, 2014. [Cited: 11 27, 2015.]
29. Alija, A. R., Martínez, L., Postigo, P. A., Sánchez-Dehesa, J., Galli, M., Politi, A., Patrini, M., Andreani, L. C., Seassal, Ch., Viktorovitch, P. (2007). Theoretical and experimental study of the Suzuki-phase photonic crystal lattice by angle-

- resolved photoluminescence spectroscopy. *Optics Express*, pp. 704-713. Vol. 15.
30. <http://www.upc.edu/saladeprensa>.
<http://www.upc.edu/saladeprensa>. [Online] upc, 3 16, 2010. [Cited: 9 28, 2015.]
http://www.upc.edu/saladeprensa/informacio/m onografics/biofotonica-una-luz-en-el-camino-de-la-medicina?set_language=es.
 31. Perez R. A., Garrido, B., Bonafos, C., Lopez, M., Gonzales-Barona, O. (2000). Síntesis por implantación iónica de nanocristales semiconductores para dispositivos en tecnología de Si. *Sociedad española de Cerámica y Vidrio*, pp. 458-462.
 32. Montes, A. B. (2001). *Cristales Fotónicos Ópalo-Semiconductor*. Madrid : s.n.
 33. Sánchez, G. R. (2013). *Aplicaciones fotónicas y biomédicas de Silicio poroso nanoestructurado*. Madrid : s.n.
 34. Chaves, F. S. (2014). *Flujo De Energía Reflejado Y Transmitido En Cristales Fotónicos Unidimensionales*. s.l. : Universidad Militar Nueva Granada.
 35. Silva, F. C. (2008). *Cristais Fotónicos Unidimensionais Com Metamateriais DNG*. Entradas Pereira da., Universidade técnica de Lisboa.
 36. Nuñez, F. (2013). *Caracterización experimental in situ de la atenuación de las barreras acústicas basadas en cristales de sonido. Aplicación de la especificación técnica.*, Vols. CEN/TS 1793-5.
 37. Gutiérrez-Arenas, R. A., Mendoza, D. *Cálculo del diagrama de bandas en un cristal fotónico metálico bidimensional con índice de refracción negativo en la región de las microondas*. México, D. F. : Universidad Nacional Autónoma de México.
 38. Rivas, D., Solarte, E. (2008). Cálculo de la Estructuras de Bandas para Cristales Fotónicos Bidimensionales. 2, Julio, *Revista Colombiana de Física*, Vol. 40.
 39. Ferrer, J. C. (2006). Micro-espectroscopía óptica en microcavidades de cristal fotónico con nanoestructuras cuánticas semiconductoras III-V.
 40. García, H. M. *Los ópalos artificiales como cristales fotónicos*. Madrid : s.n., 2000.
 41. València, La Universitat de. Componentes Electrónicos y Fotónicos. [Online] <http://www.uv.es/~esanchis/cef/>.
 42. Flores, J. V. (2008). *Cálculo de las bandas de energía para un potencial periódico unidimensional*. Lima-Perú: s.n., Universidad Nacional Mayor De San Marcos.
 43. Aragón, J. P. *Síntesis One-Pot y propiedades fotoluminiscentes de nanocristales semiconductores II-VI dopados en Europip (III)*. Castellón : s.n., 2012.
 44. Salisbury, D. F. (2015). www.vanderbilt.edu. [Online]: <http://www.vanderbilt.edu/exploration/stories/q uantumdotled.html>.
 45. Universidad Autonoma de Madrid. *Sinc La Ciencia es Noticia. Sinc La Ciencia es Noticia*. [Online] 9 26, 2015. <http://www.agenciasinc.es/Noticias/Avanzan-en-el-desarrollo-de-dispositivos-nanofotonicos>.
 46. Martin, J. E. (2008). *Physics for Radiation Protection*.
 47. Leite, H. D. (2013). *Propagação da Luz em Meios Periódicos Unidimensionais: Cristais Fotónicos*. Universidade Federal do Espírito Santo.
 48. Joannopoulos, J. D., et al. *Photonic-Crystal slabs. Photonic Crystals*. Princenton And Oxford: Princenton University, 2008, pp. 135-189.
 49. García, J. D. (2005). *Propiedades Optoelectrónicas de Nanocristales Semiconductores*. Universitat Jaume I. España.
 50. Loaiza, Y. G. *Estructura de bandas en un cristal fotónico bidimensional*. Universidad EAFIT: s.n., 211.
 51. Barbero, G., Lozano, S. (2010). *Análisis del crecimiento y la respuesta óptica en alta energía de cristales fotónicos*

coloidales. Instituto de Ciencia de Materiales de Sevilla: s.n.

52. Hui C., Jin-kyu Y., Heeso N., Seng-Fett L., Schreck, C., O'Hern, C. (2010). *Evolution of photonic band-gap and lasing from polycrystallin to amorphous photonic structures*. EEUU: OSA Publishing.
53. Bottger, G., Preusser-Mellert, K., Schmidt, M. (2004). *Photonic Crystals: Theory and applications*. Harburg : Materials and electrical Enginnering and Optics, Eich.