

Dispositivos Fotónicos

Luis Roso

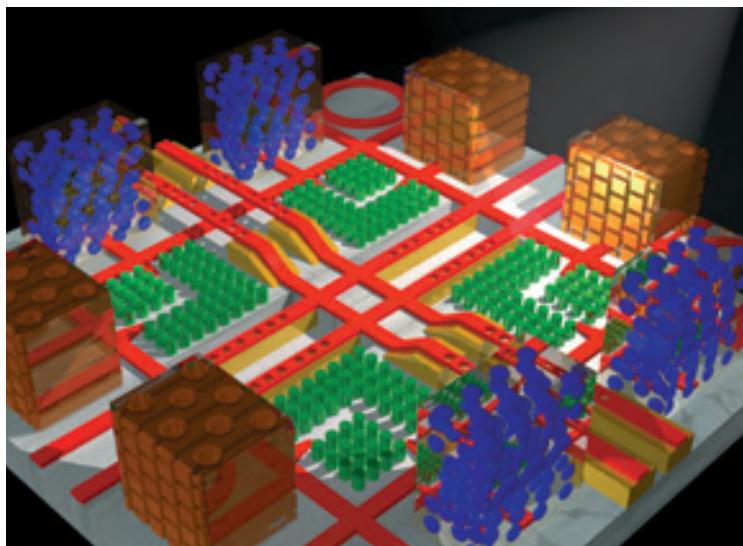
Se presentan algunos conceptos y mecanismos de funcionamiento básicos de los dispositivos fotónicos. Un aspecto común es que se basan en propiedades ondulatorias de la luz guiada.

Introducción

Si nos atenemos a su etimología, la fotónica debería ser la ciencia que se ocupa del estudio de la luz, mientras que la óptica debería estar dedicada al estudio de la visión. Como pasa muchas veces, la evolución lleva a concepciones diferentes, y es la óptica la que se ocupa del estudio de los fenómenos relacionados con la luz y de los dispositivos que la emplean (dispositivos ópticos). La importante expansión científica del siglo XX ha llevado a una serie de disciplinas especializadas dentro del campo de la óptica, que abarcan desde el estudio de la visión propiamente dicho a la óptica cuántica. Además, desde hace casi medio siglo la aparición de fuentes luminosas intensas y coherentes –los láseres– ha revolucionado prácticamente todos los rincones de la tecnología.

Por otra parte, la espectacular explosión microelectrónica acontecida en las últimas décadas ha hecho que los dispositivos microelectrónicos sean algo habitual en nuestras vidas. Es curioso ver como muchas veces los avances científicos se incorporan a nuestra vida cotidiana de forma que parece impensable vivir sin ellos. Ante esta "colonización" de dispositivos informáticos, las necesidades de transmisión y procesado de señales son cada día mayores. Eso es algo imparable que implica a toda nuestra sociedad y a lo que estamos dispuestos a dedicar ingentes presupuestos sin cuestionarnos lo más mínimo su oportunidad.

Cualquier nueva tecnología que permita sobrepasar las capacidades de transmisión o de procesado que permiten las comunicaciones convencionales y los dispositivos electrónicos es, por definición, bienvenida. Aquí entra en juego la óptica. Se ha demostrado que la luz representa una alternativa que hay que considerar en cuanto a capacidad de transmisión y manipulación de señales. Así ha aparecido una nueva disciplina que por analogía con el nombre de electrónica se ha denominado fotónica. Los dispositivos fotónicos están



Micrópolis fotónica (edificios: cristales fotónicos; carreteras: cristales fotónicos unidimensionales; bosques: cristales fotónicos bidimensionales, etc.)

ocupando un papel creciente en el desarrollo tecnológico. Aunque compiten con éxito desigual frente a los dispositivos electrónicos, están abriendo nuevos conceptos y plantean tecnologías prometedoras.

Vamos a presentar algunos conceptos básicos sobre la óptica y los dispositivos fotónicos y algunas ideas sobre su posible futuro. Puesto que la fotónica es un campo en rápida expansión es imposible mostrar todo su potencial. Intentaremos presentar los dispositivos teniendo en cuenta un cierto orden histórico. Así comenzaremos

hablando de las fibras ópticas, luego diremos algunas palabras sobre cristales fotónicos, a continuación comentaremos brevemente sobre las fibras microestructuradas y finalmente plantearemos conceptos más futuristas que implican ideas de la física cuántica.

2. Ecuación de ondas

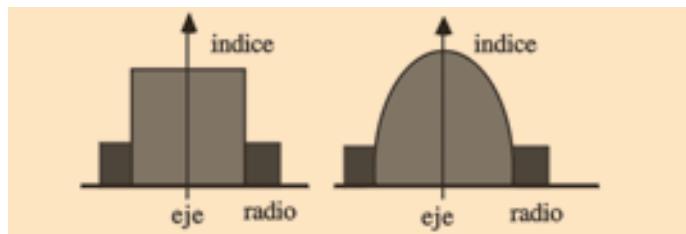
Pensar que la luz son rayos que se propagan en línea recta y que se refractan cuando encuentran un medio de índice diferente es correcto pero insuficiente para entender el funcionamiento de los materiales fotónicos. Para estar en condiciones de comprender las causas del comportamiento de los materiales fotónicos es útil un breve repaso de los conceptos básicos de la propagación de ondas electromagnéticas. Como es bien sabido, las ondas electromagnéticas vienen descritas clásicamente por las ecuaciones de Maxwell, que en el sistema de unidades de Gauss se escriben,

$$\nabla \wedge \mathbf{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{H}$$
$$\nabla \wedge \mathbf{H} = \frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{E} + \frac{4\pi}{c} \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{P}$$

Donde \mathbf{E} y \mathbf{H} son los campos eléctrico y magnético y \mathbf{P} es la polarización inducida en el medio. Por simplificar



Una fibra óptica es un cilindro de un medio óptico muy transparente que tiene un núcleo central de índice de refracción convenientemente mayor que el índice del recubrimiento externo.



Perfiles de índice para una fibra con salto de índice (izquierda) y para una fibra con gradiente de índice (derecha).

Hemos supuesto que no hay cargas (corrientes) libres y que el medio no es magnetizable. Además hay otras dos ecuaciones que actúan como condiciones de contorno, $\nabla \cdot (\mathbf{E} + 4\pi \mathbf{P}) = 0$ y $\nabla \cdot \mathbf{H} = 0$. Mediante una segunda diferenciación podemos calcular el rotacional del rotacional del campo eléctrico. Tras las correspondientes sustituciones se obtiene la ecuación de ondas,

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \nabla(\nabla \cdot \mathbf{E}) = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} + \frac{4\pi}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{P}}{\partial t^2}$$

donde hemos empleado que las derivadas espaciales y temporales comutan y que el rotacional del rotacional es igual al gradiente de la divergencia menos el laplaciano. Esta es la ecuación de ondas para el campo eléctrico, siempre junto a la condición de contorno $\nabla \cdot (\mathbf{E} + 4\pi \mathbf{P}) = 0$. En general no podemos seguir adelante porque no sabemos nada sobre $\nabla \cdot \mathbf{E} = 0$. Hay que destacar que toda la información sobre los campos está ahí dentro (incluso la información sobre el campo magnético). Sólo nos falta saber cómo responde el medio material a esos campos.

Cuando los campos no son excesivamente intensos se puede pensar en una respuesta lineal (o proporcional) de forma que a doble campo se induzca doble polarización. Sin embargo, es fundamental observar que no se puede escribir una relación instantánea del tipo $\mathbf{D}(t) = \epsilon \mathbf{E}(t)$. Eso sólo se puede hacer en caso de que las variaciones temporales de los campos sean sumamente lentas, mucho más lentas que los tiempos de respuesta de los electrones atómicos. Por tanto, para el estudio de dispositivos ópticos, donde $\mathbf{E}(t)$ varía a frecuencias de entre THz y PHz, esa aproximación no es válida. La respuesta a frecuencias ópticas no es instantánea sino que depende de la historia: $\mathbf{P}(t)$ no depende sólo de $\mathbf{E}(t)$, sino también de $\mathbf{E}(t')$, para todo $t' < t$.

Qué podemos hacer llegados a este punto para describir la respuesta del medio, si ésta requiere del conocimiento de la historia del campo. La solución es sencilla: podemos suponer que tenemos un campo monocromático, o lo que es lo mismo, un campo que oscila como $e^{-i\omega t}$, $\mathbf{E}(t) = \mathbf{E}_\omega e^{-i\omega t}$ (más su complejo conjugado, para que sea real) y una dependencia temporal igual para el campo magnético. En este caso la ecuación de ondas es $\nabla^2 \mathbf{E}_\omega - \nabla(\nabla \cdot \mathbf{E}_\omega) = -k_0^2 (\mathbf{E}_\omega + 4\pi \mathbf{P}_\omega)$ donde $k_0 = \omega/c$ corresponde al número de ondas en el vacío. Evidentemente, seguimos teniendo la ecuación de la divergencia $\nabla \cdot (\mathbf{E}_\omega + 4\pi \mathbf{P}_\omega) = 0$. En principio, sin hacer más hipótesis sobre la respuesta del medio no es posible elaborar más estas ecuaciones. Para seguir adelante hemos de saber cómo es la respuesta del medio al campo. Lo más razonable para intensidades moderadas es suponer que la respuesta del medio material es proporcional al campo, $\mathbf{P}_\omega = \chi \mathbf{E}_\omega$. La constante de proporcionalidad χ puede ser en general un tensor, pero no compliquemos las cosas y pensemos que es un esca-

lar (medio isótropo). La constante dieléctrica vendrá dada por $\epsilon = 1 + 4\pi\chi$, y el índice de refracción será su raíz cuadrada, $n = \sqrt{\epsilon} = \sqrt{1 + 4\pi\chi}$. Cuando los campos son suficientemente intensos la relación de proporcionalidad entre el campo y la polarización deja de ser válida y aparecen desviaciones de este comportamiento. Es lo que se denomina efectos no lineales.

Al asumir la linealidad en la respuesta del medio a un campo monocromático externo la ecuación de ondas se simplifica mucho. Si además la respuesta ϵ es uniforme en el espacio (medio homogéneo) y no es cero, concluimos que $\nabla \cdot \mathbf{E} = 0$, lo que nos permite obtener la ecuación de ondas más conocida, $\nabla^2 \mathbf{E}_\omega = -k_0^2 n^2(\omega) \mathbf{E}_\omega$. En este caso estamos frente a lo que podríamos denominar medios ópticos convencionales. Cuando introducimos una estructura fina a escala de la longitud de onda, el término n^2 introduce propiedades muy novedosas, que es lo que ocurre en los materiales fotónicos.

3. Fibra óptica

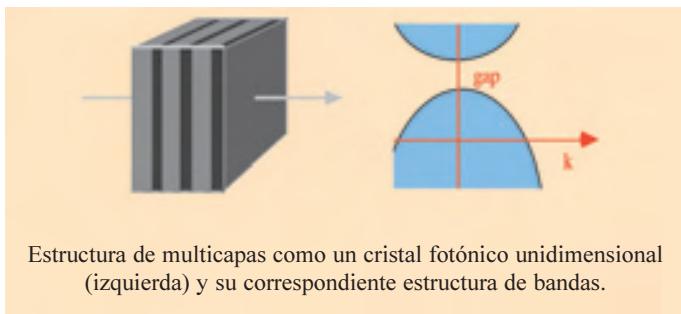
Inmediatamente después de la invención del láser quedó de manifiesto que la luz podía ser empleada para transmitir información de forma muy ventajosa respecto a los cables metálicos convencionales. Ingenuamente podríamos pensar que la utilidad de las fibras ópticas se debe a que la información viaja a la velocidad de la luz. Lo siento, pero eso no es así. La luz en la fibra, debido a su índice de refracción, viaja a velocidades del orden de $2/3$ de c (siendo c la velocidad de la luz en el vacío). En un cable eléctrico la señal –que no los electrones– viaja a velocidades del orden de una décima parte de c . Eso es una ventaja a favor de las fibras ópticas, pero no justifica los costes que implica la tecnología óptica.

La auténtica utilidad de las fibras ópticas es que la luz al implicar frecuencias mucho mayores que las que se pueden transmitir por un cable metálico (incluido un cable coaxial) tiene una capacidad de transmisión de información enormemente mayor pues la capacidad de información crece con la frecuencia. Emplear luz directamente en aire, es desde luego, una posibilidad que nunca ha sido olvidada y mucho menos ahora. Sin embargo eso plantea múltiples inconvenientes para garantizar que nada se interpondrá en su camino. Esos problemas se eliminan si enviamos la luz encerrada en un "cable" conveniente. Eso es la fibra óptica.

Una fibra mantiene atrapada la luz empleando la reflexión total interna. Un rayo de luz procedente de un medio de índice de refracción alto hacia otro más bajo se aleja de la normal. Si el ángulo incidente es suficientemente elevado y no se puede ya alejar lo suficiente de la normal, entonces aparece el efecto de la reflexión total y la luz queda atrapada en el medio de índice mayor. Así, una fibra óptica con-

vencional es un cilindro extremadamente fino de sílice (SiO_2) muy pura, con una distribución adecuada de índices de refracción que hacen que la luz quede atrapada en su interior debido al fenómeno de la reflexión total. Con eso se puede guiar la luz a grandes distancias. De hecho, una fibra óptica es conceptualmente muy similar a una guía de ondas de las usadas para microondas. Una fibra óptica es más delgada que un cabello y más fuerte que un cable de acero del mismo grosor. La fibra óptica puede llevar miles de veces más información que un cable de cobre.

Toda fibra óptica consta de un núcleo o zona central (*core*) de índice de refracción alto y un recubrimiento (*cladding*) de índice más bajo. Según que el perfil del índice de refracción del núcleo sea constante o varíe suavemente, hablamos de fibras con salto de índice (*step index*), o fibras con gradiente de índice (*graded index*), respectivamente. En las fibras con salto de índice la reflexión interna se produce exclusivamente en el cambio de índice entre el núcleo y el recubrimiento. En las fibras con gradiente de índice la reflexión se produce de una manera suave en el seno del núcleo, y si se hace adecuadamente, tiene muchas ventajas. El perfil de gradiente de índice más empleado es el parabólico, pero muchos diseños de perfiles de índice quedan dentro del secreto industrial de los fabricantes.



Estructura de multicapas como un cristal fotónico unidimensional (izquierda) y su correspondiente estructura de bandas.

En cuanto a su tamaño, el estándar internacional para las fibras es que el diámetro externo del recubrimiento sea 125 micras. Al tener un estándar se logra compatibilidad con mayor número de interconectores. Las diferencias fundamentales están en los diámetros del núcleo central más denso, que varían desde menos de diez micrómetros para las fibras monomodo hasta alrededor de los 50 micrómetros para las multimodo.

El problema de la propagación de la luz en un medio a larga distancia es que el medio acaba absorbiendo la onda. Por ejemplo, un vidrio ordinario (de una ventana) adquiere un tono progresivamente más verdoso conforme más grueso es. Así para propagar luz de forma competitiva es necesario que la absorción sea muy baja. Los vidrios más puros fabricados en el siglo XIX e incluso en la primera mitad del siglo XX tenían una atenuación de 1000 dB/km, que es un valor enorme para comunicaciones. Durante muchos años se trabajó en la búsqueda de materiales ópticos, fundamentalmente vidrios, con una absorción muy baja. En 1950 se fabricaron las primeras fibras ópticas. Servían para transmitir luz algunos metros, pero no para llevar información muy lejos. La señal se atenuaba muy rápidamente.

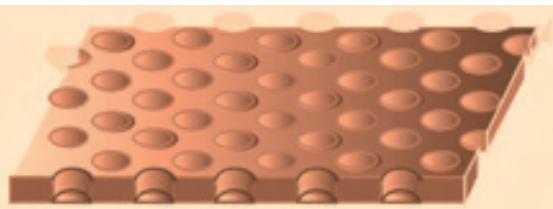
Con la llegada de los láseres se reactivó el interés por las fibras ópticas y se reactivó la búsqueda de materiales con muy baja atenuación. Diversas industrias trabajaron en ello

con éxito progresivo, aunque en los años siguientes la tecnología de las comunicaciones por fibra óptica seguía pareciendo algo utópico. Afortunadamente, las comunicaciones por fibra óptica dejaron de ser una utopía en 1970 debido a dos descubrimientos tecnológicos. En Corning Glass (Corning, estado de Nueva York) una empresa con dilatada tradición de productos ópticos y con gran experiencia en la sílice fundida, se obtuvo una fibra con una atenuación de sólo 16 dB/km en el rojo. Eso es un valor ya competitivo. Además ese mismo año aparecieron los primeros láseres de semiconductor. Esas dos cosas juntas representan el arranque de la fotónica, como alternativa a la electrónica. En 1980, las fibras de óxido de silicio llegaron a su límite de transparencia, que corresponde a coeficientes de atenuación del orden de 0,2 dB/km, para una longitud de onda de 1,5 micras. Desde entonces se ha avanzado poco en mejorar la transparencia.

Para tener una idea de lo que representan esos valores de la atenuación podemos hacer unos sencillos cálculos. Siendo α la atenuación (medida en dB/km), la intensidad de la onda entre dos puntos a distancia L vendrá dada por $\alpha = (10/L) \log_{10} (I(0)/I(L))$, es decir $I(L)=10^{-\alpha L/10} I(0)$. Si $\alpha=1000$ dB/km, y medimos la distancia L en kilómetros, observamos que $I(L)=10^{-100L} I(0)$, esto quiere decir que en 0.01 km = 10 m, la intensidad ha sido absorbida en un 90 por ciento. Eso imposibilitaba las comunicaciones ópticas a gran distancia. Si $\alpha=0.2$ dB/km, entonces $I(L)=10^{-L/50} I(0)$, lo que indica que en 50 km la intensidad ha sido absorbida en un 90 por ciento. Si el agua de mar tuviese una absorción tan baja podríamos ver perfectamente el fondo del mar incluso en las simas más profundas.

La atenuación de la luz en una fibra viene ligada por tres efectos, la absorción electrónica, la absorción iónica y el scattering Rayleigh. Por la parte de las altas frecuencias (visible) tenemos la absorción electrónica. Los electrones de la cima de la banda de valencia son promovidos a la banda de conducción o a estados de impurezas. Eso se podría controlar convenientemente, con materiales puros y que tengan energías del gap suficientemente elevadas. Por la parte de las bajas frecuencias (infrarrojo) tenemos la absorción resonante con las vibraciones de los iones de la red (eso se podría subsanar bajando las frecuencias de vibración, para lo que se están estudiando fibras a base de compuestos con átomos pesados). Eso no debería ser problema pues nos interesa enviar la mayor cantidad de información y para ello nos hemos de mover hacia frecuencias lo más altas posibles. Ahí entra en juego el tercero y mas molesto de los efectos, el scattering Rayleigh, que es proporcional al inverso de la longitud de onda elevado a la cuarta potencia. Ese scattering es tanto menor cuanto mayor sea la longitud de onda. El scattering Rayleigh es el responsable de que el cielo sea azul, debido a que las longitudes de onda cortas (azules) tienen mayor probabilidad de ser absorbidas y reemitidas en una dirección diferente que las longitudes de onda largas (rojos). Por la misma razón, cuando el Sol se acerca al horizonte tiene apariencia rojiza, pues ha perdido mucha de su componente azul.

Teniendo en cuenta la atenuación se han determinado tres ventanas de trabajo de forma estándar: la primera ventana, entre 800 y 900 nm aproximadamente (atenuación superior a 2dB/km debido a la alta frecuencia); la segunda ventana,



Cristal fotónico bidimensional consistente en una lámina transparente en la que se han realizado una serie de microperforaciones cilíndricas regularmente espaciadas.

entre 1250 y 1350 nm (atenuación algo inferior a 1 dB/km), limitada por la zona de absorción del radical OH en el entorno de 1380 nm; y la tercera ventana, entre 1500 y 1600 nm (atenuación próxima a 0.2 dB/km). Hoy en día esa tercera ventana es la más empleada debido a su extraordinaria transparencia, aunque si se pudiese trabajar en el visible se tendría más capacidad de transmisión de información. Además existen láseres de semiconductor y amplificadores de erbio que funcionan bien en esa ventana, lo que la ha consolidado desde el punto de vista de las aplicaciones.

La luz en sus diferentes reflexiones totales en el interior de la fibra, va a sufrir interferencias que van a ser importantes cuando estamos hablando de núcleos de las fibras que tienen tamaños comparables a la longitud de onda. En otras palabras, el interior de una fibra óptica funciona de forma similar a una guía de ondas y su descripción correcta requiere de la ecuación de onda independiente del tiempo, $\nabla^2 \mathbf{E} + \nabla(\mathbf{E} \cdot \nabla \epsilon)/\epsilon = -n^2(\mathbf{r}) k_z^2 \mathbf{E}$. Lo que sucede en una fibra óptica es que queremos una solución que mantenga su intensidad constante conforme avanza en el espacio, eso quiere decir que queremos una propagación bien determinada en la dirección longitudinal, z . Matemáticamente eso se escribe como $\partial E / \partial z = -i k_z E$ y entonces la ecuación de ondas se convierte en $\nabla_{xy}^2 \mathbf{E} + \nabla(\mathbf{E} \cdot (\nabla \epsilon)/\epsilon) + n(x,y) k_z^2 \mathbf{E} = k_z^2 \mathbf{E}$ donde la incógnita a determinar es k_z . Si existe un autovalor k_z adecuado, entonces tenemos un modo propio. Para que este modo sea guiado se requiere que $n_{cladd} k_0 < k_z$, donde n_{cladd} es el índice de refracción del recubrimiento.

Si esta ecuación de ondas te suena algo extraña, entonces haz la aproximación que E es un escalar, y elimina el término $\mathbf{E} \cdot (\nabla \epsilon)/\epsilon$, que tiene que ver con la transversalidad de los campos. Si lo piensas un poco verás que la ecuación resultante es igual a la ecuación de Schrödinger de un átomo bidimensional. Aquí k_z hace el papel de la energía propia del átomo y $-n^2$ es proporcional al potencial. Igual que hay átomos con un sólo estado ligado hay fibras que pueden propagar un único modo. Son las fibras monomodo. Si hay varios autovalores k_z , se tienen ondas a diferentes velocidades dentro de la fibra y eso siempre complica las cosas.

Hasta ahora todo parece muy bien entendido. Tenemos luz que se propaga en una fibra, qué más necesitamos. Nosotros no queremos la fibra para enviar energía luminosa sino para enviar información. El envío de gran cantidad de información requiere de pulsos muy cortos y muy seguidos. El problema radica en que el espectro de un pulso es tanto más ancho cuanto más corta sea su duración (la famosa banda ancha). Esto implica que transmitimos simultáneamente muchas frecuencias por la fibra y como el índice de refracción depende de la frecuencia, cada componente viaja

a una velocidad distinta y la señal se pierde. Eso es la dispersión. La dispersión del material no podemos alterarla.

Cuando estamos en un medio dispersivo, es decir, un medio en el que el índice de refracción depende de la frecuencia, sabemos que los pulsos se propagan con la velocidad de grupo,

$$v_g = \frac{d\omega}{dk} = c \left(n - \lambda \frac{dn}{d\lambda} \right)^{-1}$$

que es diferente de la velocidad de fase $v_{fase} = \omega/k = c/n$. Esto vale para pulsos de duración relativamente larga. Cuando los pulsos son muy cortos la variación de la velocidad de grupo con la frecuencia es importante pues distorsiona la forma de los pulsos. Para medir el grado de distorsión que sufre un pulso al propagarse en un medio dispersivo es habitual introducir el coeficiente de dispersión, D , definido como:

$$D = \frac{\Delta T}{\Delta \lambda L} = \frac{1}{v_g^2} \frac{dv_g}{d\lambda} = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n}{d\lambda^2}$$

y medirlo en picosegundos por nanómetro y por kilómetro (λ es la longitud de onda en el vacío). Así, un valor de $D=30$ ps/km/nm, un valor razonable para la sílice fundida en el entorno de 1.5 micras, indica que si consideramos dos longitudes de onda que difieren en 1 nm, entonces al propagarse durante un kilómetro se retrasará una respecto a la otra en 30 ps. Ese es un valor grande para comunicaciones ópticas.

En una fibra el coeficiente de dispersión es el resultado de la dispersión del material y de la dispersión de la fibra como guía de ondas. Puesto que la dispersión del material es difícil de cambiar, lo que se hace es jugar con el perfil de índice de la fibra de forma que la dispersión total, la del material más la de la guía de ondas, sea lo menor posible. Hoy en día con perfiles de índice adecuados –algunos de ellos sometidos a secreto industrial– es posible tener fibras con dispersión lo suficientemente baja como para transmitir las señales a distancias convenientemente grandes. De hecho algunas de las fibras actuales tienen una dispersión total tan sumamente baja que empiezan a aparecer efectos no lineales que vuelven a distorsionar la señal, pero eso es otra historia.

4. Cristales fotónicos

Los cristales fotónicos son una respuesta muy ingeniosa a una pregunta básica de la óptica: cómo alterar las propiedades de un material. Hasta hace pocos años quizás pareciese utópico pensar que cogiendo un trozo de vidrio (transparente) y simplemente haciendo agujeros cilíndricos en él fuese posible convertirlo en opaco. Hoy se sabe controlar eso perfectamente y se sabe como fabricar medios ópticos con una distribución espacial de índice de refracción de forma que sus propiedades ópticas sean controlables a voluntad.

Un cristal fotónico es simplemente una distribución espacial periódica de índice de refracción. Se obtiene a base de combinar periódicamente diferentes materiales. El problema es que esta distribución se ha de hacer a escala de pocas micras habitualmente. Igual que en el caso de las fibras, toda la física de un cristal fotónico viene determinada por la ecuación:

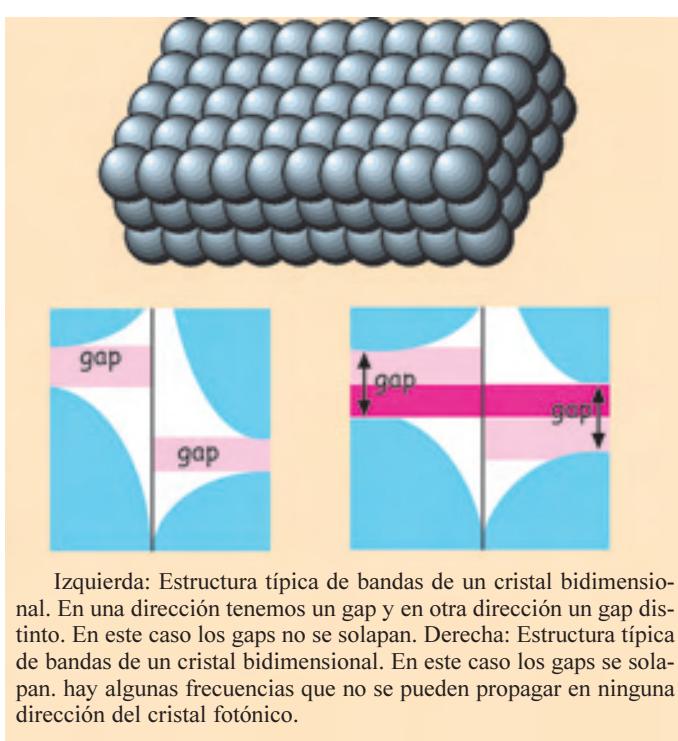
$$\nabla^2 \mathbf{E} + \nabla(\mathbf{E} \cdot \nabla \epsilon) / \epsilon = -n^2(\mathbf{r}) k_0^2 \mathbf{E},$$

donde ahora $n(x,y,z)$ representa una distribución periódica. Al igual que una fibra se asemeja a un átomo bidimensional, un cristal fotónico se asemeja a un cristal atómico. De hecho muchas de sus propiedades son extrapolables directamente. Los cristales fotónicos presentan gaps –de la misma forma que los cristales atómicos–. La existencia de estos intervalos prohibidos fotónicos, en determinadas direcciones del espacio, afecta de forma sorprendente la propagación de luz a través de estas estructuras.

Como muchas veces ocurre, tras creer haber inventado algo nos damos cuenta de que eso ya existía en la naturaleza. Los ópalos son piedras semipreciosas que tienen una coloración y propiedades ópticas especiales. Están formados por esferas submicrométricas de la misma forma que uno de los cristales fotónicos actuales.

Un cristal fotónico unidimensional es un material con un índice de refracción $n(z)$. Por ejemplo, una sucesión de planos de materiales de un índice y de otro. Cosas así son conocidas desde hace mucho tiempo y se denominaban multicapas. El modo de estudiar las propiedades ópticas de las multicapas estaba basado en considerar la reflexión que se producía en cada interfaz y luego combinar las reflexiones múltiples de forma adecuada. Eso es desde luego correcto, pero algo anticuado. Hoy en día es mejor presentar esos conceptos como una estructura de bandas.

Los cristales fotónicos bidimensionales son materiales en los que tenemos una estructura de índice de refracción que depende de dos coordenadas, $n(x,y)$. Por ejemplo puede ser un material homogéneo en el que se han grabado una serie de agujeros micrométricos cilíndricos distribuidos periódicamente. Contrariamente a lo que sucedía en el caso unidimensional, ahora tenemos muchas más posibles direcciones de propagación de la onda. Puede ser que para una dirección aparezca un gap y para otra otro gap. Ahora las propiedades dependerán de si estos gaps diferentes se superponen o no.



Izquierda: Estructura típica de bandas de un cristal bidimensional. En una dirección tenemos un gap y en otra dirección un gap distinto. En este caso los gaps no se solapan. Derecha: Estructura típica de bandas de un cristal bidimensional. En este caso los gaps se solapan. Hay algunas frecuencias que no se pueden propagar en ninguna dirección del cristal fotónico.

Los cristales fotónicos tridimensionales son simplemente distribuciones tridimensionales periódicas del índice. Por ejemplo, los cristales coloidales están formados por una solución acuosa precipitada de diminutas esferas de poliestireno recubiertas con una sustancia cromófora. Otras veces, usando técnicas de microelectrónica, se construyen complicadas estructuras periódicas en tres dimensiones. En todos los casos, la presencia de intervalos prohibidos de frecuencias para todas las direcciones depende de la estructura geométrica y de los índices de refracción.

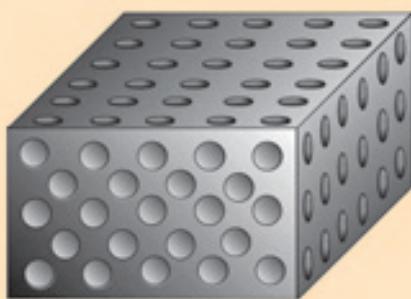
Las aplicaciones de estos cristales tridimensionales son muy variadas e insospechadas. Por ejemplo, si tenemos un gap en todas las direcciones y colocamos dentro del cristal algunos átomos que tengan una emisión espontánea a una frecuencia que quede dentro de ese gap, al ser una frecuencia prohibida no puede emitirse y se inhibe la emisión espontánea. En resumen, los cristales fotónicos permiten llegar a un control fundamental de los fenómenos de radiación.

Todos estamos familiarizados con la utilidad de dopar los semiconductores. Las impurezas crean estados localizados dentro del gap. Eso es una propiedad general: la presencia de un defecto en un sistema periódico conduce a la aparición de estados localizados. En el caso fotónico se forma una microcavidad, de tamaño impensablemente pequeño para realizarla con espejos convencionales. Las posibilidades tecnológicas de las microcavidades generadas a partir de un defecto en un cristal fotónico son múltiples y en áreas muy diversas.

Llegados a este punto esperamos que estés convencido de que los cristales fotónicos se comportan de la misma forma que los cristales atómicos normales. Si estás de acuerdo en eso, puedes extraerlo a cualquier onda que se propague en una estructura periódica. Por ejemplo, se fabrican actualmente cristales acústicos formados por unos cilindros de unos centímetros de alto distribuidos en aire. También tiene sentido considerar cristales sísmicos, aunque no tienen mucha aplicabilidad por el momento. Puesto que los átomos convenientemente enfriados pueden manifestar de forma coherente sus propiedades ondulatorias, se pueden fabricar cristales de luz que cambien las propiedades de los átomos fríos. Tras la consecución experimental de los condensados de Bose Einstein en la década de los 90, se están fabricando cristales de luz (distribuciones periódicas de intensidad a base de ondas estacionarias) que afectan a las propiedades de los condensados. Lo mejor, es que son siempre los mismos conceptos, pero aplicados a campos muy profundamente distintos.

5. Fibras microestructuradas

Hemos visto las propiedades de las fibras ópticas y las de los cristales fotónicos. El siguiente paso es combinar las ventajas de los dos. Dentro de la fibra óptica se puede diseñar una microestructura (habitualmente de pequeños agujeros micrométricos llenos de aire) que le dé en la dimensión transversal propiedades de cristal fotónico. Hoy en día se empiezan a fabricar en serio fibras ópticas que confinan la luz generando un defecto en el centro de un cristal fotónico. Aquella longitud de onda que quede en el gap del cristal fotónico será automáticamente atrapada por el defecto central. Así, la dispersión del modo guiado puede ser controlada a voluntad.



Esquema de un cristal fotónico tridimensional realizado a base de una distribución cúbica de microesferas de índice adecuado.



Representación esquemática de la sección transversal de una fibra óptica microestructurada. Una fibra de este tipo tiene una estructura bidimensional de índice de refracción que elimina la simetría de revolución de la fibra. La fibra representada en este esquema tiene una estructura con simetría cuadrada que tiene un defecto en el centro. Este defecto atrapa la luz –representada en rojo– y es el responsable del guiado.

6. Computación cuántica

Aunque se escapa de las pretensiones de esta introducción a los dispositivos fotónicos, es adecuado comentar una nueva tecnología que está emergiendo con enorme fuerza. La luz, además de ser una onda, está cuantificada. Digamos que sabemos como controlar y manipular ondas clásicas. Por qué no aprovechar también sus características cuánticas. El hecho de enviar información con pocos fotones en estados cuánticos peculiares está abriendo un sinfín de posibles aplicaciones que parecen casi de ficción. La computación cuántica, la criptografía cuántica y la teleportación son las ramas más desarrolladas de una ingeniería cuántica que está revolucionando la óptica y está derribando muchas barreras.

7. Electro-óptica

Hasta ahora hemos hablado de dispositivos ópticos como alternativa a dispositivos electrónicos. Tanto unos como otros presentan ventajas e inconvenientes. Una estrategia muy razonable es intentar combinar las ventajas de ambos. Así ha nacido la electro-óptica o la opto-electrónica, según se mire. El paso de electro a óptica se hace eficientemente a base de diodos láser, mientras que para el paso inverso se suelen emplear fotodetectores de semiconductor.

Cuando la parte óptica no requiere distancias enormes se pueden tolerar fibras con mayor atenuación. Hay fibras plásticas muy baratas y razonablemente transparentes que pueden emplearse para conectar diferentes componentes de determinados ordenadores.

Por otra parte, el procesado óptico permite de forma natural el procesado en paralelo. Así se está estudiando el incorporar elementos ópticos para procesado paralelo en el interior de ordenadores electrónicos más o menos convencionales.

8. Conclusiones

A dónde nos llevarán los dispositivos fotónicos. Nadie lo sabe. Las inversiones actuales en tecnologías fotónicas son cuantiosas, pero aún lo son más las inversiones en dispositivos electrónicos. Que una aplicación se desarrolle primero empleando tecnologías fotónicas o tecnologías electrónicas puede ser en ciertos casos cuestión de suerte más que de pla-

nificación. Lo único que es seguro es que se están produciendo cambios constantes y se están introduciendo nuevas tecnologías de forma imparable. Probablemente las soluciones más viables sean aquellas que sepan aprovechar lo bueno de una tecnología y de la otra, es decir, el futuro es de la optoelectrónica o de la electroóptica.

No podemos finalizar sin comentar que en nuestro país se investiga activamente en cristales fotónicos, en fibras convencionales y en fibras microestructuradas y también en cristales acústicos y otros temas relacionados, a nivel internacionalmente muy competitivo. En cuanto a la ingeniería cuántica España está en la vanguardia internacional.

Agradecimientos

Este artículo no hubiese sido posible sin la ayuda de mis compañeros del Fotón Charro de Salamanca.

Referencias

- Sólo destacamos algunos libros de carácter muy general,
- [1] J. HECHT, *The Story of Fiber Optics*, Oxford University Press, Princeton, New York, 1999
 - [2] J D JOANNOPOULOS, R D MEADE Y J H WINN, *Photonic Crystals*, Princeton University Press, 1995
 - [3] A YARIV, *Optical Electronics in Modern Communications*, Oxford University Press, New York, 1991
 - [4] BAHAA E A SALEH Y M C TEICH, *Fundamentals of Photonics*, John Wiley, New York, 1991.

Para más información al respecto, puedes consultar los apuntes sobre el curso de fotónica de la Universidad de Salamanca, en la dirección <http://optica.usal.es>.

Luis Roso

está en el Dpto. de Física Aplicada.
Universidad de Salamanca