

VI. Sensores de fibra óptica: *aplicaciones en áreas de la ingeniería ambiental*

Dr. Rubén Alejandro Vázquez Sánchez

Introducción

La fibra óptica en sistemas de comunicación

Las comunicaciones ópticas han estado con nosotros mucho más tiempo del que creíamos, tal vez, el ejemplo más claro es cuando debido a la necesidad de comunicarse, el hombre empleó las manos o brazos como una señal de expresión; en donde el movimiento de las manos representó una modulación, el sol como la fuente de luz y los ojos como el receptor. Con el transcurso del tiempo y debido a las necesidades de comunicación remota, se empezaron a utilizar señales de humo, antorchas, espejos para reflejar la luz del sol y tener una comunicación codificada entre torres de vigilancia en el caso de griegos y fenicios, los clásicos heliógrafos que fueron empleados primeramente por el ejército en la década de 1850 los cuales utilizaban un espejo con un diámetro entre 3 y 12 pulgadas que dirigía la luz del sol codificada en clave Morse hacia un punto fijo situado a una distancia que dependía de la intensidad de la luz del sol y de la visibilidad (hasta 90 millas en días soleados). En la década de 1870, el científico británico John Tyndall observó que la luz podía ser guiada dentro de un material transparente y utilizando un haz de luz y el flujo de agua que provenía desde un contenedor hacia otro; él demostró que la luz seguía un camino específico experimentando la reflexión total

interna en la interfase agua-aire. Este experimento marcó el inicio en la investigación sobre la posibilidad de transmitir luz en forma guiada^[1,2].

En 1880, Alexander Graham Bell construyó un sistema de teléfono óptico al que llamó fotófono que enviaba señales vocales a cortas distancias por medio de la luz. El sistema estaba conformado por un arreglo de lentes que enfocaban la luz del sol hacia una placa reflectante de vidrio bañada en plata. Cuando una persona hablaba sobre la placa de vidrio, esta vibraba y provocaba que la luz reflejada se modulara en intensidad siendo después enviada hacia un espejo parabólico reflectante a través de una serie de lentes. La luz reflejada por el espejo parabólico se hacía incidir sobre una fotorresistencia muy sensible de selenio la cual variaba su resistencia de acuerdo a la cantidad de luz que le incidía. De esta forma, utilizando un instrumento de teléfono y una batería el sistema fue capaz de reproducir la voz^[2,3]. Una principal desventaja inmediata que se presentaba es que este instrumento sólo funcionaba de día (un día soleado) pudiéndose cubrir una distancia en un rango de hasta 200 m. Posteriormente, la fuente de luz fue remplazada por una bombilla eléctrica incrementando la distancia hasta 2 km, pero debido a la cantidad de piezas del sistema necesarios para realizar la comunicación y a la falta de una fuente de luz intensa, la idea se detuvo y Bell concluyó que la atmósfera no transmitía luz de manera igual a como los alambres pueden transportar electricidad^[2].

Un inconveniente que se tenía en estos métodos de comunicación óptica es el medio de transporte (aire) en el que se propagaba la señal, y los fenómenos tales como la nieve, lluvia, tormentas, niebla, etcétera, lo hacían inoperable, además de la inhabilidad para esquivar obstáculos tales como árboles, edificios, montañas existentes entre el transmisor y el receptor. Debido a esto, las investigaciones empezaron a centrarse más en el medio de transporte de la luz. En el año de 1888 ya se utilizaban barras o tubos de vidrio con curvaturas para poder iluminar cavidades del cuerpo humano (una revisión dental por ejemplo) y se empezaron a investigar sistemas para guiar imágenes en un intento temprano de la televisión. Pero no fue sino hasta 1954 cuando se comprobó que si una fibra de vidrio o plástico se recubría con un revestimiento transparente de índice de refracción más bajo, la superficie de reflexión estaría libre de contaminación y se evitaría la fuga de luz. Con esta base, A. C. S.

van Heel, Kapany y H. H. Hopkins produjeron el primer endoscopio de fibra óptica. En esta época, los primeros experimentos llevaron al desarrollo de fibras ópticas de vidrio con revestimiento que tenían una atenuación de menos de 1 dB/m, las cuales eran útiles para aplicaciones médicas, pero no para aplicaciones en la industria de las telecomunicaciones. Con la aparición del LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) en 1958, se volvió a considerar el uso de las fibras ópticas en las telecomunicaciones como alternativas o sustitutos de los sistemas ya existentes.

En 1966, Charles K. Kao y George Hockham, propusieron un principio para la transmisión de información a través de un medio dieléctrico transparente, esto es, utilizar la luz para transmitir información a través de la fibra de sílice. Ellos encontraron que las altas pérdidas en las fibras ópticas eran debidas a las impurezas existentes y no al sílice con el que se fabricaron. Debido a ello, tres investigadores de la Corning Glass en 1970 (Robert Maurer, Donald Keck y Peter Shultz) obtuvieron fibras con valores de atenuación menores a 20 dB/km. A partir de ese momento con mejores formas de fabricación y con el uso de longitudes de onda mayores, se consiguieron fibras que tenían una atenuación de 2 dB/km para luz de 850 nm, pero rápidamente se redujo hasta cerca de 0.5 dB/km para luz de 1300 nm y con el uso de luz a 1550 nm (tercera ventana de telecomunicaciones) se tienen fibras con atenuación menor a 0.23 dB/km^[4].

En el mismo año en que la Corning Glass patentó la fibra óptica (1970) los laboratorios Bell en América y un equipo del Instituto Loffe de Física en San Petersburgo fabricaron diodos láser de semiconductor capaces de emitir en onda continua a temperatura ambiente. Con esto último y debido a la obtención de fibras ópticas de vidrio de baja pérdida, a partir de 1975 la tecnología de las telecomunicaciones ópticas ha avanzado a un ritmo vertiginoso y se sigue incrementando a medida que los laboratorios perseveran en su empeño de conseguir sistemas capaces de transmitir más cantidad de información, a mayores velocidades, a mayores distancias y a menores costos.

Como información, una única fibra de vidrio con grosor cercano al de un cabello humano, puede transportar aproximadamente el equivalente a 300 millones de llamadas telefónicas simultáneas.

La fibra óptica en sistemas de sensores

Siguiendo con el desarrollo de la historia de la fibra óptica, nos podemos dar cuenta que su aparición fue debido a la necesidad de tener un medio de transmisión de información en forma de energía luminosa que pudiera resolver los problemas de las telecomunicaciones, pero debido a las propiedades interesantes que presentaron estas fibras o medios de transmisión, a mediados de la década de 1960 aparece por primera vez el concepto de sensores de fibra óptica, aunque el concepto fue aplicado a sistemas muy rudimentarios de sensores, se obtuvieron las primeras patentes que incluyeron un sensor fotónico de desplazamiento mecánico y un sensor ultrasónico basado en modulación de fase^[5]. Sin embargo, con mayores esfuerzos de grupos de investigación y con una base más sólida en el conocimiento de las propiedades de la fibra óptica, a mediados de la década de 1970 se inicia la tecnología de los sensores de fibra óptica y desde este tiempo se ha tenido un crecimiento impresionante a tal grado que de investigaciones experimentales ha pasado a aplicaciones prácticas como por ejemplo; aplicaciones en diques, puentes y estructuras en donde se monitorea la tensión dinámica con sensores distribuidos, así como la elongación e inclinación y en algunos casos la corrosión del acero^[6,7], sensores acústicos como el hidrófono^[8,40], sensores de rotación como el giroscopio^[9], de temperatura y tensión^[10-16], de humedad relativa^[17], de viscosidad, de nivel y opacidad de líquidos^[18], de presión^[19-22], sensores químicos^[23-27], de aceleración^[28,29], de vibración^[30], sensores que hacen uso de componentes biológicos para sensar una especie de interés llamados biosensores de fibra óptica^[31,32] los cuales incluyen además aplicaciones en medicina^[33,34]. Puede seguir haciéndose una lista de las aplicaciones de los sensores de fibra óptica, pero sería interminable, aun así, las aplicaciones arriba mencionadas son de las más conocidas.

Byounggho Lee^[35] hace la clasificación mostrada en la figura 1, de publicaciones tomadas de la XV Conferencia de Sensores de Fibra Óptica (OFS-15: IEEE Catalog Number 02EX533) celebrada en Portland, Oregon, USA en mayo del 2002, de acuerdo al tipo de sensor investigado.

Se puede ver que las áreas más investigadas se establecen en la medición de la tensión y temperatura y las menos investigadas se encuentran en los biosensores. Por lo tanto, esta es una motivación para grupos de investigación en sensores de fibras ópticas que dirigen su mirada hacia la búsqueda de soluciones de problemas del medio ambiente, ya que a partir de los sensores químicos hasta los biosensores forman parte de sus investigaciones.

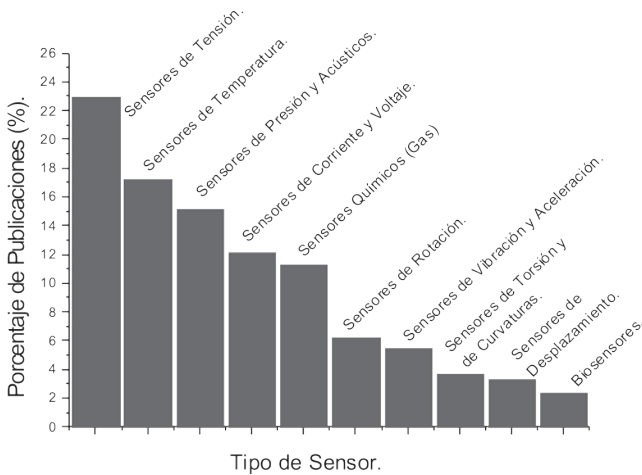


Figura 1. Gráfica que muestra la clasificación tomada de la ref [35] sobre el porcentaje de publicaciones de acuerdo al tipo de sensor investigado.

Una clasificación de los sensores de fibra óptica que se puede realizar es la que va de acuerdo a la tecnología que emplea y esta puede ser: basados en rejillas de Bragg, basados en interferómetros, por reflexión y dispersión, por rotación Faraday, por fluorescencia y luminiscencia, por interferometría de baja coherencia, etcétera. Dentro de estas técnicas las más investigadas y que han tenido éxito comercialmente son las técnicas basadas en rejillas de Bragg y en interferómetros.

Hasta ahora se ha hablado en forma general de la historia de los sensores de fibra óptica, pero uno se puede preguntar ¿por qué, si existe la tecnología más madura de los sensores electrónicos y mecánicos, se realizan investigaciones de sensores de fibras ópticas? La respuesta es

inmediata y es que los sensores de fibras ópticas tienen importantes ventajas sobre los sensores electrónicos y mecánicos: tienen inmunidad a interferencia electromagnética; estos sistemas explotan a la luz como la portadora de la información, son ligeros, son de tamaño pequeño; pueden tener acceso a lugares inaccesibles para los sistemas electrónicos y mecánicos, alta sensibilidad, gran ancho de banda; se puede transportar gran cantidad de información en una sola fibra, se pueden realizar sensores remotos^[1] y distribuidos, naturaleza pasiva; pueden aplicarse en lugares altamente inflamables en donde los sensores electrónicos estarían descartados, como la fibra es hecha de vidrio es inmune a ciertas sustancias químicas; esto es, puede utilizarse en ciertos tipos de suelos o en atmósferas corrosivas, etcétera, por mencionar algunas. Pero a pesar de estas ventajas, la tecnología de los sensores de fibra óptica tiene una desventaja: su alto costo, aun así, esta tecnología sigue en aumento y esto es debido a que el costo tiende a disminuir a medida que las redes de telecomunicación por fibra óptica crecen.

La fibra óptica

Aspectos generales

Una fibra óptica es un medio físico dieléctrico que transporta información en forma de luz, o sea, en ondas electromagnéticas guiadas paralelas al eje de la fibra. Se compone de un núcleo en donde se efectúa la propagación de la luz, una cubierta óptica o revestimiento necesaria para que se lleve a cabo el mecanismo de propagación y uno o más recubrimientos de protección mecánica. La geometría típica se muestra en la figura 2.

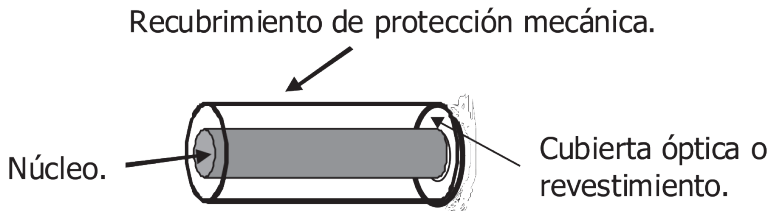


Figura 2. Geometría típica de una fibra óptica.

Uno de los parámetros que es necesario definir cuando se analiza la propagación de la luz en un material es el índice de refracción del mismo y se define como el cociente entre la velocidad de la luz en el vacío y la velocidad de la luz en el material, esto es:

$$n = \frac{c}{v} \quad (1)$$

donde c es la velocidad de la luz en el vacío y v es la velocidad de la luz en el material. n será siempre mayor a 1 a medida que el material o el medio sea más denso, $n > 1$.

Las fibras son hechas de vidrio consistiendo de silicio o un silicato (SiO_2). El núcleo debe tener un índice de refracción mayor que el revestimiento, para que exista la propiedad de reflexión interna total. Los óxidos de dopado tales como GeO_2 , B_2O_3 , y P_2O_5 son adicionados al silicio para obtener la diferencia entre los índices de refracción.

Las estructuras de las fibras ópticas se pueden clasificar basadas en el perfil del índice refractivo como: de índice escalonado, de índice gradual y otros perfiles para desplazar o aplanar la dispersión, o basadas en el diámetro del núcleo como: multimodo y monomodo.

En forma general clasificamos a las fibras en:

Fibras multimodo de índice escalonado: son aquellas en donde el índice de refracción del núcleo permanece invariable en toda su sección, pero cambia en la interfase núcleo/revestimiento. El diámetro del núcleo varía de 10 a 200 μm y los del revestimiento de 150 a 250 μm .

Fibras multimodo de índice gradual: en este tipo de fibras, el índice de refracción del núcleo es variable a lo largo del radio del mismo, siendo máximo en el centro y disminuyendo hacia la periferia. El índice del revestimiento permanece constante. El diámetro del núcleo generalmente es de 50 μm y el del revestimiento de 125 μm .

Fibras monomodo: son fibras que transportan un solo modo y son soluciones a problemas como la dispersión modal que existe en las fibras de índice escalonado. El diámetro del núcleo es de alrededor de 5 a 10 μm y el del revestimiento es de 125 μm .

Actualmente se cuentan con otros tipos de fibras como la de plástico que tiene una amplia aplicación en redes de sensores pero no así en

telecomunicaciones y las fibras de cristal fotónico o también llamadas *fibras microestructuradas*. Estas nuevas fibras son hechas enteramente de un tipo de vidrio, no se necesita de dopantes para el guiado de la luz, la región del revestimiento es fabricada con pequeños huecos a lo largo de la longitud entera de la fibra. Según la manera en que se guía la luz, estas fibras se pueden dividir en dos tipos:

- Fibras de núcleo sólido.
- Fibras de núcleo vacío.

Las fibras microestructuradas, figura 3, guían la luz debido a una modificada reflexión interna total. Los huecos actúan como el medio de menor índice de refracción en el revestimiento y es confinada en el núcleo sólido el cual tiene un índice relativamente más alto. A diferencia de las fibras convencionales, las fibras microestructuradas pueden hacerse de un único tipo de material, por ejemplo silicio no dopado. El índice de refracción efectivo del revestimiento puede variar fuertemente como una función de la longitud de onda de la luz guiada por la fibra. Por esta razón, es posible diseñar fibras con propiedades espectralmente únicas no posibles en las fibras ópticas convencionales.

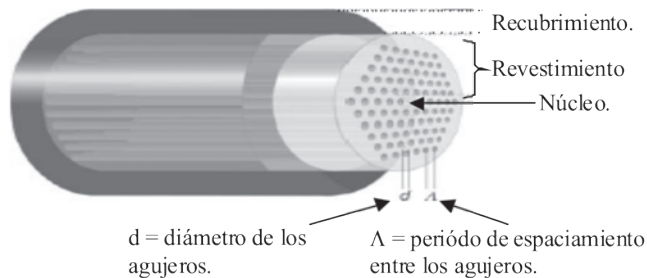


Figura 3. Geometría típica de una fibra óptica microestructurada o de cristal fotónico. La estructura de la fibra está determinada por el diámetro de los agujeros y por el espaciamento entre ellos.

El diámetro externo de estas fibras típicamente es de $125 \mu\text{m}$ y el periodo entre los agujeros es de $10 - 15 \mu\text{m}$. La aplicación inmediata de estas fibras es para la generación de fuentes de espectro ancho o gene-

ración del supercontinuo el cual es útil en espectrofotometría y para la fuente de iluminación en redes de sensores. Además, es posible construir sensores de onda evanescente con estos tipos de fibras.

Teoría de operación

Los principios básicos de operación de una fibra óptica puede entenderse de forma clara aunque no rigurosa utilizando las leyes de la óptica geométrica o de rayos. Pero si se requiere tener un conocimiento más riguroso sobre la propagación de la radiación en el interior de la fibra se pueden recurrir a la resolución de las ecuaciones del campo electromagnético, esto es, las ecuaciones de Maxwell.

Prácticamente el principio que se encuentra detrás del fenómeno de propagación de la señal luminosa en el interior de una fibra es el principio de la reflexión total interna. Es bien sabido que cuando una onda plana o un rayo de luz incide sobre un plano de separación entre dos medios dieléctricos con distinto índice de refracción n_1 y n_2 con $n_1 < n_2$ tal como aire-vidrio, la onda experimenta dos fenómenos, figura 4:

- El fenómeno de reflexión en donde parte de la onda sufre una reflexión hacia el medio del que procede.
- El fenómeno de refracción en donde parte de la onda atraviesa la interfaz hacia el segundo medio.

Bajo estas condiciones la onda reflejada cumple con la ley de la reflexión:

$$\theta_i = \theta_r \quad (2)$$

el ángulo θ_i que forma la onda incidente con la normal a la superficie es igual al ángulo θ_r que forma la onda reflejada con la normal. La onda refractada cumple con la ley de la refracción o de Snell:

$$n_1 \text{ sen } \theta_i = n_2 \text{ sen } \theta_2 \quad (3)$$

De la ecuación 3 se puede ver que si $n_1 < n_2$ entonces $\theta_2 < \theta_i$ y la onda refractada esta más cerca de la normal al plano de incidencia. Para el

otro caso cuando $n_1 > n_2$ se tendrá que $\theta_2 > \theta_1$ y la onda refractada se aleja de la normal al plano de incidencia. Así, si θ_1 aumenta, lo mismo hará θ_2 hasta un valor para el cual la onda refractada se propague en forma paralela al plano de incidencia. El ángulo θ_1 para el cual esto ocurre se llama ángulo crítico θ_c y cualquier onda que incida con ángulos mayores al ángulo crítico se reflejará en su totalidad conociendo este fenómeno como *reflexión total interna*. En la figura 5 se puede apreciar esto.

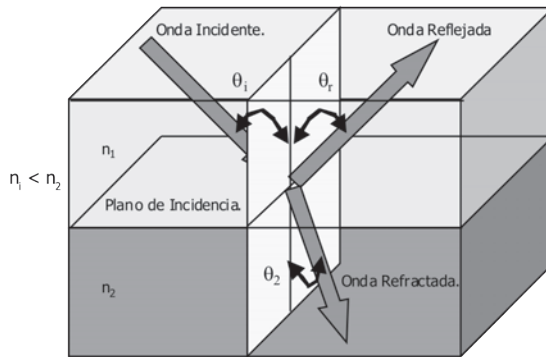


Figura 4. Fenómenos de reflexión y refracción que experimenta una onda al incidir sobre una superficie o plano de incidencia que forman dos medios dieléctricos de distinto índice de refracción. En este caso $n_1 < n_2$.

Para el cálculo del ángulo crítico θ_c , en la ecuación 3 de Snell se fija a θ_2 en un valor de $\pi/2$ y después de reducir la ecuación se llega al siguiente resultado:

$$\begin{aligned} n_1 \operatorname{sen} \theta_c &= n_2 \operatorname{sen} (\pi/2); \\ \theta_c &= \operatorname{arcsen} (n_2/n_1) \end{aligned} \quad (4)$$

debido a que $n_1 > n_2$ siempre existirá un ángulo crítico y por lo tanto existirá la reflexión total interna.

¿Pero que relación tiene esto con la propagación de la radiación en las fibras ópticas? Pues bien, debido a que el material del núcleo es de mayor índice de refracción que el material del revestimiento, las ondas que

viajan en el interior del núcleo de la fibra inciden en la interfase núcleo–revestimiento a ángulos mayores al ángulo crítico y debido a ello toda o casi toda la energía es reflejada internamente hasta que emerge en el extremo de la fibra. De esta forma el fenómeno de la reflexión total interna permite que toda la energía quede confinada en el núcleo de la fibra.

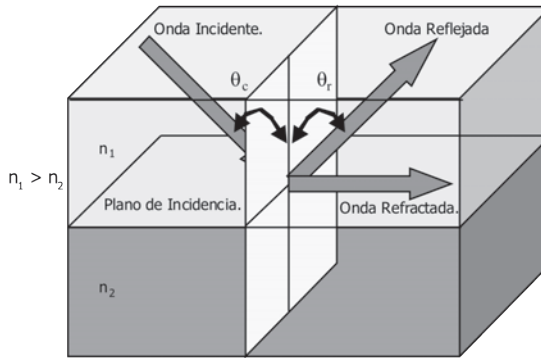


Figura 5. Fenómenos de reflexión total interna que experimenta una onda al incidir con un ángulo θ_c sobre una superficie o plano de incidencia que forman dos medios dieléctricos de distinto índice de refracción. En este caso $n_1 > n_2$.

Para que se cumpla la reflexión total interna (figura 6) es necesario que la luz que entra en la fibra cumpla con lo siguiente: Los rayos de luz que entran en la fibra deben formar un ángulo con la normal a la superficie de la cara de la fibra (sección transversal) menor al ángulo α_{MAX} para que el rayo refractado que incide en la interfase núcleo-revestimiento forme un ángulo con la normal a esta interfase mayor a β_{MIN} . De esta forma, la radiación tendrá sucesivas reflexiones en el interior del núcleo de la fibra hasta abandonarla.

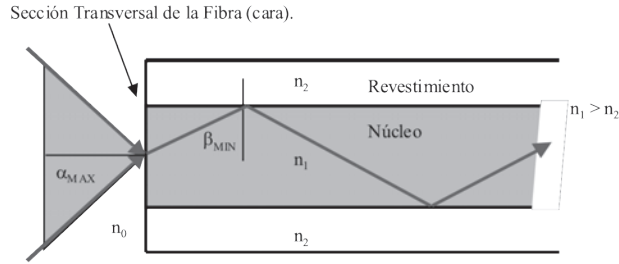


Figura 6. Ángulo límite de entrada y condiciones para que exista la reflexión total interna y por ende la propagación de la luz en el núcleo de la fibra. n_0 es el índice de refracción del aire.

En la figura 6 se puede observar que la energía luminosa que entra en la fibra debe estar contenida en un cono cuya generatriz forma un ángulo α_{MAX} con el eje de la fibra. Así, se puede definir la apertura numérica o índice de aceptación de luz como:

$$AN = n_1 (2\delta)^{1/2} \quad (5)$$

Donde δ es la diferencia relativa de índices de refracción del núcleo y el revestimiento, esto es:

$$\delta = (n_1 - n_2)/n_1 \quad (6)$$

Con esto, mientras más grande sea la diferencia relativa de índices mayor será la apertura numérica, mientras que para materiales más parecidos se necesitará que la fuente proporcione un haz de luz más estrecho para que no existan pérdidas al introducir la radiación luminosa a la fibra.

A pesar de que existe la reflexión interna total en el núcleo de la fibra, parte de la radiación luminosa atraviesa la interfase núcleo-revestimiento y se propaga en el revestimiento en forma de un campo evanescente. La profundidad de penetración Δy de esta energía en el revestimiento es 5 veces la longitud de onda respectiva. Esto se muestra en la figura 7.

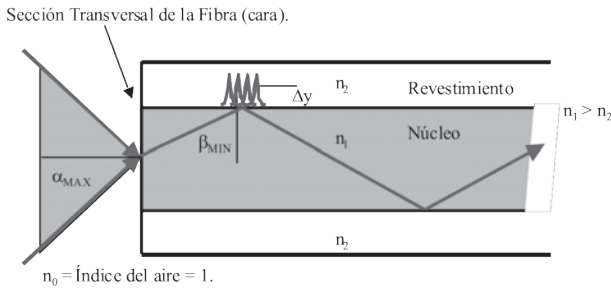


Figura 7. En el punto en donde ocurre la reflexión total interna existe una penetración de la radiación electromagnética en el revestimiento con una profundidad Δy .

La radiación de onda evanescente es muy útil en el área de sensores, ya que es una técnica que se utiliza para la detección de sustancia químicas. Más adelante se hablará en detalle.

Hasta ahora se ha hablado de forma general de las características básicas de la fibra óptica. En realidad, para un conocimiento más detallado es necesario recurrir al análisis de las pérdidas en fibras, la atenuación, la dispersión, etc., parámetros necesarios cuando las fibras ópticas se aplican en sistemas de comunicación. Para el área de sensores, la teoría ya mencionada es suficiente y cuando sea necesario algunas características se detallarán.

Los sensores de fibra óptica

Estructuras

Los sensores de fibra óptica (SFO) son sistemas en donde las características de la luz guiada por la fibra pueden ser modificadas en respuesta a la influencia de algún fenómeno físico, químico, biológico, biomédico, etcétera. De esta forma, a grandes rasgos, un sensor de fibra óptica consiste de una fuente de luz constante que es enviada a través de una fibra óptica hacia un punto en donde se va a realizar una medición. En este punto, el parámetro a ser medido o detectado es utilizado para modular alguna de las propiedades de la luz y esta luz modulada es de nuevo enviada por la misma fibra o por otra hacia un detector en donde es demodulada y convertida, generalmente, en una señal eléctrica. En la figura 8 puede verse la estructura general de un sensor de fibra óptica.

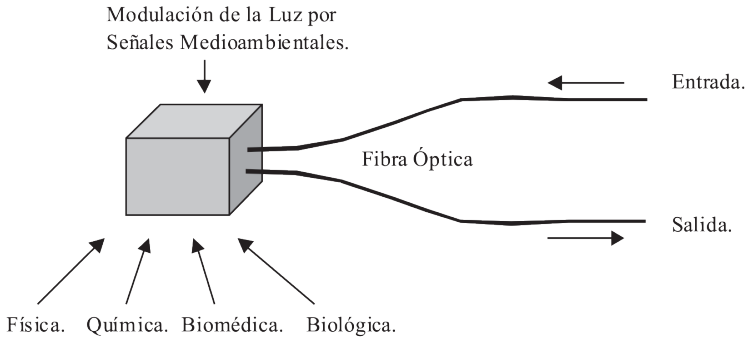


Figura 8. Estructura básica de un sensor de fibra óptica.

La información que la señal medioambiental imprime en la luz puede estar en términos de cambios de intensidad, fase, frecuencia, polarización, contenido espectral o de algún otro parámetro.

Dependiendo de la estructura del sensor y si la fibra óptica interviene directa o indirectamente en la medición del parámetro, los SFO pueden dividirse en dos grupos:

- Sensores extrínsecos.
- Sensores intrínsecos.

a) Sensores extrínsecos: Son sensores que utilizan a la fibra óptica sólo como un medio de transporte de la información o datos. La señal medioambiental imprime los cambios en la luz fuera de la fibra óptica. Uno de los arreglos más utilizados es el mostrado en la figura 9. La luz de entrada es transportada por la fibra óptica hacia una micro celda que contiene una muestra química (por ejemplo gas), la luz interactúa con la muestra y es de nuevo enviada hacia una fibra y de allí hacia un fotodetector o a un espectrofotómetro. La fibra de entrada debe estar alineada con la fibra de salida para evitar pérdidas. El parámetro de la luz que se modula es la longitud de onda y seleccionando adecuadamente la longitud de onda de la luz de entrada con la línea de absorción espectral de la muestra, se detecta la cantidad o el tipo de muestra.

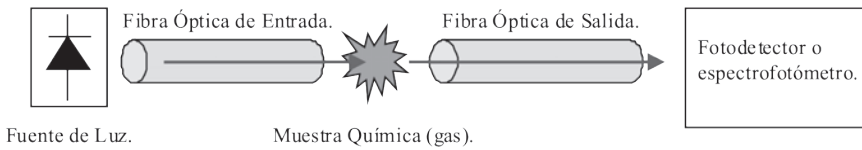


Figura 9. Estructura básica de un sensor extrínseco de fibra óptica utilizado para monitorear una muestra química

Una desventaja que se presenta en aplicaciones reales es que en el punto de medición pueden existir otros gases que provoquen mediciones erróneas. Por ello, esquemas basados también en la modulación de intensidad han sido investigados^[36]. Con estos arreglos es posible monitorear varios compuestos si se sintoniza la longitud de onda de la luz de entrada a frecuencias ópticas que coincidan con las líneas de absorción espectral de esos compuestos. Esta técnica es conocida como Modulación de Onda Espectral^[37].

Una de las ventajas que se tiene al trabajar con sensores de fibras ópticas es que la mayoría de los gases tal como el metano tienen líneas de absorción que se encuentran en el rango del visible al infrarrojo cercano, que es en donde las fibras ópticas trabajan apropiadamente. Fuera de este rango las fibras son casi opacas.

Una modificación que se le hace a este sensor extrínseco es utilizando un agente químico junto a la muestra química que complemente los cambios en las propiedades de la luz. De esta forma la reacción que ocurre entre el agente químico y la muestra química es única y con ello se evita que otras muestras en el medio ambiente interfieran con las mediciones.

Además del monitoreo de sustancias o compuestos químicos, estos sensores tienen aplicación para la detección de vibraciones, desplazamientos, etcétera, cuando se modifican ligeramente. En la figura 10 se muestran estos arreglos.

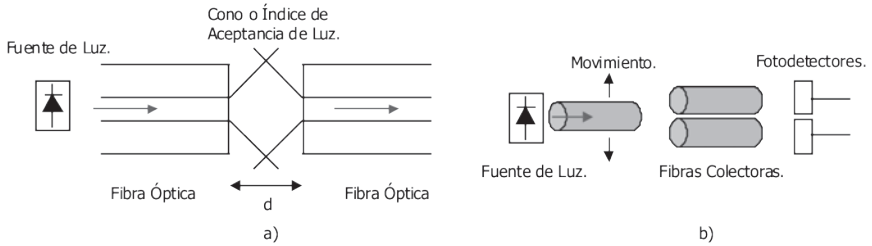


Figura 10. Estructuras de sensores extrínsecos de fibra óptica a) utilizado para monitorear vibraciones cuando d aumenta o disminuye. b) utilizado para medir desplazamientos cuando la fibra de entrada se mueve hacia arriba o hacia abajo.

La figura 10 a) muestra el arreglo de un sensor de vibraciones. Se utilizan dos fibras ópticas perfectamente alineadas. Como se dijo anteriormente, la cantidad de luz que una fibra óptica puede capturar depende del ángulo de aceptación y, en este caso, de la distancia d . De esta manera, una modulación de la distancia d produce una modulación de la intensidad de la luz que captura la segunda fibra en la cual va impresa la información de las vibraciones. La figura 10 b) muestra un sensor de desplazamiento radial que utiliza dos fibras ópticas de salida con una fibra de entrada. La razón de la cantidad de luz capturada por los fotodetectores es una medida de la cantidad de movimiento lineal producido en la fibra de entrada^[38].

b) Sensores intrínsecos: llamados sensores “todo de fibra”, son arreglos en los cuales la información de la medición se imprime directamente dentro de la fibra óptica, esto es, la luz nunca abandona a la fibra óptica. En las estructuras de estos tipos de sensores se puede hacer una clasificación de acuerdo a la propiedad de la luz que se module:

- Sensores intrínsecos modulados en intensidad.
- Sensores intrínsecos modulados en longitud de onda (rejillas de Bragg).
- Sensores intrínsecos modulados en fase (interferométricos).

Entre los sensores intrínsecos *modulados en intensidad* existen los que utilizan el fenómeno de la reflexión total interna como el arreglo mostrado en la figura 11.

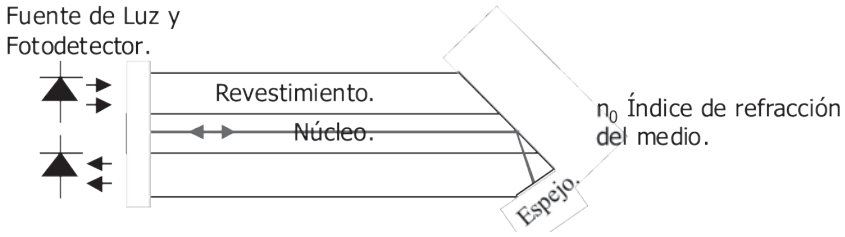


Figura 11. Estructuras de un sensor intrínseco de fibra óptica utilizado para medir índices de refracción o presión^[38].

En este caso, el extremo de la fibra óptica se corta formando un ángulo con el eje de la fibra. La luz que viaja en la fibra incide en el extremo cortado y si n_0 es menor que el índice del núcleo, toda la luz es reflejada hacia atrás por el espejo y colectada por el fotodetector. Si n_0 es casi igual al índice del núcleo parte de la luz viaja hacia afuera y parte se refleja por el espejo resultando en una modulación de la intensidad. Estos tipos de sensores pueden ser utilizados para medir índices de refracción y presión en líquidos o algún tipo de gel.

Una variación de esta técnica es la mostrada en la figura 12 con la cual es posible medir niveles de líquidos o simplemente para detectar la presencia o ausencia de los mismos. El extremo de salida de una fibra de núcleo grande (multimodo) es fijado a un prisma de forma tal que cuando el prisma no esté en contacto con el líquido ocurra la reflexión total interna y toda la luz es detectada por el fotodetector. Cuando el líquido entra en contacto con el prisma casi toda la luz sale de la fibra y esto genera una modulación de la intensidad^[38,39].

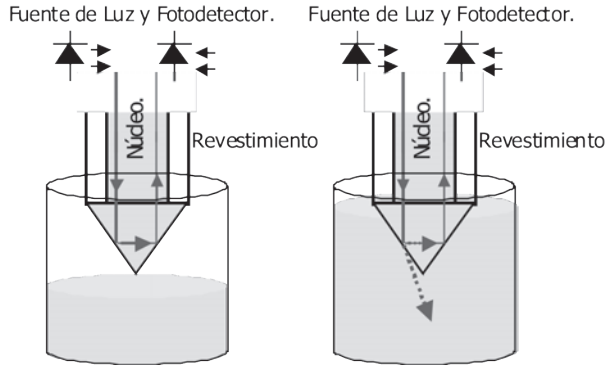


Figura 12. Estructuras de un sensor intrínseco de fibra óptica utilizado para medir la presencia, ausencia o niveles de líquidos^[38].

Los sensores basados en microcurvaturas y macrocurvaturas son, también, de modulación de la intensidad. Estos tipos de sensores son los primeros en ser investigados y pueden ser aplicados para medir muchas variables físicas tales como temperatura, presión, desplazamiento, etc., en los sensores basados en microcurvaturas se utilizan, generalmente, dos placas corrugadas que inducen una perturbación mecánica a una fibra multimodo causando una redistribución entre los modos del núcleo y del revestimiento, significando pérdidas de radiación en la fibra, el diseño es el mostrado en la figura 13. Las placas deformadoras deben cumplir un periodo de perturbación mecánico que está relacionado con la diferencia entre los índices de refracción del núcleo y revestimiento y con el diámetro del núcleo. Muchas investigaciones se han realizado con respecto a este sensor y se han aplicado en la medición de flujos, tensión, aceleración, velocidad^[38,41].

Una aplicación que se ha realizado es en medicina utilizando ciertos tipos de hidrogel los cuales absorben agua y se hinchan pero no se disuelven en medios acuosos^[42]. El principal mecanismo de funcionamiento de estos sensores basados en microcurvaturas es en la colocación de este tipo de gel entre las placas deformadoras y la fibra multimodo. De esta forma, cuando el gel detecta un medio acuoso se hincha e induce una perturbación mecánica en la fibra con un periodo igual al de las placas deformadoras. Otras aplicaciones de esta técnica corresponden a la detección de agua y fugas de hidrocarburos.

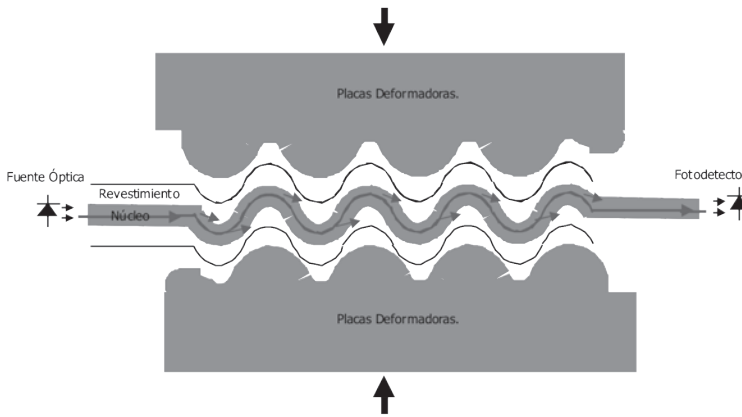


Figura 13. Estructura de un sensor intrínseco de fibra óptica que utiliza las microcurvaturas para medir variables físicas y para detectar presencia o ausencia de líquidos.

Los sensores basados en macrocurvaturas utilizan sistemas que inducen curvaturas grandes (radios del orden de centímetros) en la fibra óptica. De igual forma que los basados en microcurvaturas, son aplicables en la detección o medición de variables físicas.

Dentro de los sensores intrínsecos existen los llamados de onda evanescente los cuales son utilizados en la detección de gases o vapores y la mayoría de ellos utilizan una sustancia química depositada en la parte sensora de la fibra óptica para que tenga una reacción con el gas a medir y que con ello cambien sus propiedades ópticas o estructurales modificando las propiedades ópticas de transmisión de la fibra. En la figura 14 se observa un sensor de onda evanescente que consiste en la modificación del revestimiento de la fibra en la parte sensora. En su lugar se deposita una sustancia química que funciona como un transductor entre el vapor o gas a medir y la señal óptica que viaja en el revestimiento (onda evanescente). La sensibilidad de estos sensores depende de la potencia óptica transferida en el campo evanescente y por la profundidad de penetración de estas ondas en el revestimiento modificado. Si el revestimiento modificado tiene más bajo índice de refracción que el núcleo, entonces se cumple la reflexión total interna y en este caso la respuesta del sensor es gobernada por la modulación de la intensidad causada por la absorción de la luz de la onda evanescente

la cual es guiada a través del revestimiento; esta interacción resulta en la atenuación de la luz guiada por el núcleo. Si el índice de refracción del revestimiento modificado es más grande que el índice del núcleo, parte de la potencia óptica es refractada hacia el revestimiento y parte se refleja. Ambos, la potencia óptica reflejada hacia el núcleo y la refractada hacia el revestimiento, dependen de las propiedades ópticas del revestimiento modificado lo cual cambia con la presencia de vapores orgánicos al ser detectados.

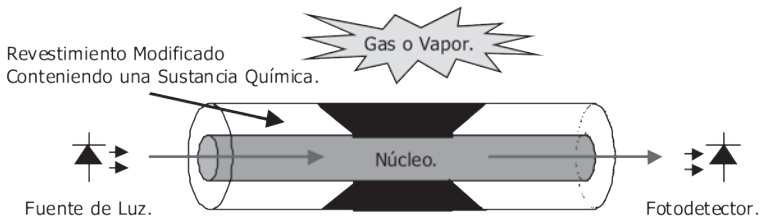


Figura 14. Estructura de un sensor intrínseco de fibra óptica de onda evanescente utilizado para detectar la presencia o ausencia de gases o vapores.

La pérdida de potencia óptica está caracterizado por la absorción de luz de la sustancia química que reemplaza al revestimiento, el número de interacciones entre el núcleo y el revestimiento, el diámetro del núcleo, la apertura numérica de la fibra, entre otros parámetros^[43]. Otros esquemas de estos tipos de sensores no utilizan sustancia químicas, sino que el revestimiento de la fibra óptica es diseñado de forma tal que en la parte sensora sea sensible a gases específicos. Otras formas consisten en la utilización de fibra estrechadas lo cual hace más frágiles a estos sensores, pero más sensibles. Otra técnica que utiliza el fenómeno de las ondas evanescentes son los sensores en forma de U. Este tipo de sensor utiliza una curvatura de la fibra óptica en la parte del núcleo modificado para tener más sensibilidad^[44]. De esta forma, la potencia óptica acoplada al campo evanescente se incrementa dependiendo de la curvatura de la fibra. Las fibras en estos casos deben tener un diámetro del núcleo mayor a 1 mm. Una última técnica que ha tenido éxito es la basada en la utilización de fibras de cristal fotónico o fibras microestructuradas. Debido a que en

estas fibras es más fácil alcanzar el campo evanescente y con ello aumentar la sensibilidad, se han realizado investigaciones para aplicarse en la detección de vapores de amonio y otros gases como vapores de acetileno, y para detectar la presencia de CO y CO₂ como ejemplos^[43].

Además de los sensores de onda evanescente de transmisión, existen los sensores que están basados en la medición de la señal reflejada y en la medición del tiempo de vida de fluorescencia. En los primeros es utilizado un depósito químico en un extremo de la fibra el cual refleja la luz dependiendo de la sustancia detectada, por lo tanto es posible utilizar un OTDR (Optical Time Domain Reflectometry: Reflectometría Óptica en el Dominio del Tiempo) para medir la señal reflejada y con ello existe la posibilidad de realizar redes de sensores distribuidos. En los segundos se utiliza una sustancia química que emite una fluorescencia cuando esta presente algún gas, como por ejemplo oxígeno^[43].

Una clase de sensores intrínsecos son los basados en rejillas de Bragg de fibra óptica. Estos sensores han sido ampliamente investigados y aplicados en distintas áreas que van desde el monitoreo de estructuras hasta aplicaciones médicas. El parámetro que se modula de la luz es la longitud de onda, por lo tanto cualquier pérdida de luz debida a curvaturas en la fibra, a empalmes o a conectores no influye en la información codificada de la medición, como sucede con los sensores basados en modulación de intensidad, explicados anteriormente, en donde una pérdida debida a algún conector se verá reflejado en la información del sensor. Una explicación rápida de estos dispositivos se puede resumir como sigue:

Algunas fibras cambian sus propiedades ópticas permanentemente cuando se exponen a una radiación intensa de un láser operando en la región espectral del azul o el ultravioleta. Este efecto fotosensible lleva a un cambio periódico en el índice de refracción a lo largo de la longitud de la fibra, resultando en la formación de una rejilla de Bragg intra-núcleo cuando las fibras de silicio dopadas con germanio son irradiadas por unos pocos minutos con un haz láser intenso^[43].

En su forma más simple una rejilla de Bragg de fibra, consiste de una modulación periódica del índice de refracción del núcleo de una fibra óptica, por lo general monomodo, como se ve en la figura 15. También

se puede ver como un arreglo periódico de placas o películas de dos índices de refracción diferentes, denominados índice de refracción alto n_H (~ 1.4563) e índice de refracción bajo n_L (~ 1.456)^[46].

Estas estructuras uniformes de fibra, donde los frentes de onda son perpendiculares al eje longitudinal de la fibra y las placas de la rejilla son de periodo constante, son consideradas estructuras fundamentales para diferentes tipos de rejillas de Bragg.

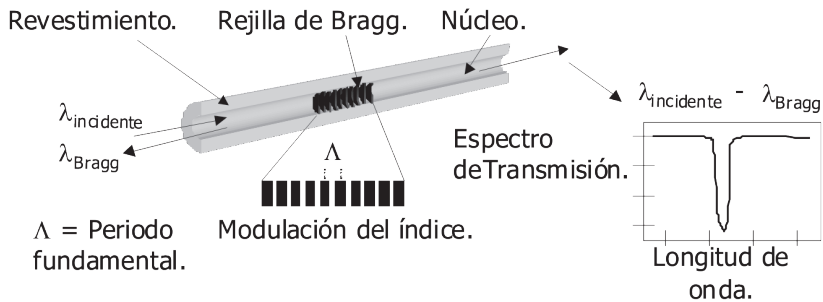


Figura 15. Estructura de una rejilla de Bragg de fibra óptica. Se muestra el espectro de transmisión y la modulación del índice de refracción.

La luz guiada a lo largo del núcleo de la fibra puede ser dispersada por cada placa de la rejilla. Si la condición de Bragg no se satisface, la luz reflejada por cada placa subsecuente, favorece para estar fuera de fase y puede eventualmente cancelarse.

Cuando la condición de Bragg se satisface, las contribuciones de luz reflejada por cada placa de la rejilla se adicionan constructivamente en la dirección hacia atrás formando un pico de reflexión centrado a la longitud de onda definida por los parámetros de la rejilla^[47].

Una ecuación que nos da la longitud de onda reflejada con mayor intensidad por la rejilla es la siguiente.

$$\lambda_B = 2 n_{\text{eff}} \Lambda \quad (7)$$

Donde la longitud de onda de la rejilla de Bragg, λ_B , es la longitud de onda central de la luz de entrada que pueda ser reflejada por la rejilla, Λ es el periodo fundamental y n_{eff} es el índice de refracción promedio efectivo entre n_L y n_H .

Físicamente, un ensamble de películas delgadas que satisfaga la ecuación anterior dará lugar a una alta reflectancia a la longitud de onda especificada por esa ecuación, debido a que los rayos reflejados por cada una de las interfases interfieren constructivamente en la superficie inicial.

Como una explicación simple, parte de la luz que incide sobre una rejilla se refleja y la otra parte se transmite, la rejilla de Bragg tiene una alta reflectancia debido a que las placas tienen un espesor óptico de $\lambda/4$ y por lo tanto los rayos que se van reflejando en cada superficie se encuentran en fase al salir de la primera interfase^[46].

Las características interesantes que presenta este dispositivo hacen que tenga aplicación en las áreas de sensores y en telecomunicaciones. Si nos basamos en la ecuación 7, la longitud de onda de Bragg se modificará si el periodo o el índice de refracción efectivo de la rejilla se modifica. Una forma de actuar sobre el periodo de la rejilla es aumentando, disminuyendo su temperatura, estirando o comprimiéndola. A partir de esto, las rejillas son sensibles a temperatura, tensión y presión. Como dato, una sensibilidad de 1.2 pm (picómetros) se espera para una rejilla centrada a una longitud de onda de Bragg de 1550 nm cuando se le aplica 1 $\mu\epsilon$ (micro tensión), además, una sensibilidad de 13.2 pm por cada $^{\circ}\text{C}$ de aumento de temperatura^[47]. En el campo de la medición o detección de gases o vapores, se necesita de un traductor entre el gas a medir y la rejilla de Bragg de forma tal que la medición afecte el periodo de la rejilla. Existen muchos tipos de rejillas de Bragg y todos tienen aplicaciones en sensores y telecomunicaciones, entre ellas se encuentran las rejillas inclinadas, las de periodo de espaciado gradual, las rejillas superimpuestas, las cuales, como su nombre lo indica, varias rejillas ocupan el mismo espacio, pero existen las rejillas que tienen más sensibilidad y estas son las rejillas de periodo largo o rejillas de transmisión^[48], las cuales, tienen una variación más grande del periodo. Una diferencia principal de estas rejillas en comparación con las rejillas

de Bragg es que la longitud de onda de Bragg es de transmisión y no de reflexión como las anteriores. Las rejillas de periodo largo acoplan la longitud de onda de Bragg en el revestimiento y por ello es más fácil de aplicarlas en las estructuras de sensores de onda evanescente, ya que modificando el revestimiento en donde se acopla la longitud de onda de Bragg es posible modificar la longitud de onda de transmisión.

Una desventaja que se tiene con estos sensores es que la lectura de las mediciones está codificada en términos de longitudes de onda y para el monitoreo se necesitan sistemas interrogadores complejos o instrumentos de alto costo como es el Analizador de Espectros Ópticos (OSA: Optical Spectrum Analyzer), pero a pesar de ello, se han aplicado en la detección de gases por medio de la detección del índice de refracción^[49] lo cual es útil en aplicaciones biológicas y químicas, además de la aplicación en medicina^[33] y algunas áreas como es la detección de hidrocarburos^[50].

La última clase de sensores que mencionaremos, sin entrar en detalles, son los basados en interferómetros. Estos sensores son arreglos interferométricos de tipo Fabry-Perot, Zagnac, Michelson y Mach - Zehnder. En estos sensores los parámetros que se modulan son la fase, polarización, longitud de onda, frecuencia, etcétera de la señal óptica^[51]. Los arreglos utilizados son complejos, pero sensibles, es decir, de alta resolución, ya que son ampliamente utilizados en medicina, en biología, química, en áreas donde se miden deformaciones de estructuras, de suelos, para medir vibraciones, aceleraciones, en giroscopios, etcétera.

Conclusiones

Las aplicaciones de la fibra óptica en sensores forman un área muy prometedora para las técnicas de detección y medición de sustancias tales como gases en la atmósfera, sustancias líquidas en el agua y en el suelo, lo cual da lugar a la solución de problemas de la contaminación presentes hoy en día. Debido a sus interesantes características, los sensores de fibra óptica tienen ventajas sobre los sensores electrónicos y mecánicos. Estas características las hacen aplicables en las áreas ya descritas.

Bibliografía

1. Gerd Keiser. 2000. *Optical Fiber Communications*, McGraw Hill. Chap. 1.
2. Ray Tricker. 2002. *Optoelectronic and Fiber Optic Technology*, Newnes. Chap. 1.
3. B. Rubio Martínez. 1994. *Introducción a la Ingeniería de la Fibra Óptica*, Addison-Wesley Iberoamericana. Chap. 1.
4. Govind P. Agrawal. 1992. *Fiber-Optic Communications Systems*, JOHN WILEY & SONS, INC. Chap. 1.
5. John Dakin and Brian Culshaw. 1988. *Optical Fiber Sensors: Principles and Components*. Artech House Boston and London. Chap. 1, Vol. I.
6. M. Sklodowski. *Theory of application of fiber optics sensors to settlement monitoring of historical structures*. AMAS Workshop on Smart Materials and Structures SMART'03, 291-299, Jadwisin 2 – 5.
7. Christopher K.Y. Leung, Kai Tai Wan and Liquan Chen. 2008. *A Novel Optical Fiber Sensor for Steel Corrosion in Concrete Structures*. Sensors, 8, 1960-1976.
8. D.J. Hill, P.J. Nash, D.A. Jackson, D.J. Webb, S.F. O'Neill, I. Bennion, and L. Zhang. 1999. *A Fiber Laser Hydrophone Array*. SPIE Vol. 3860.

9. John Dakin and Brian Culshaw. 1988. *Optical Fiber Sensors: Applications, Analysis, and Future Trends*. Artech House Boston and London. Chap. 11, Vol. IV.
10. R. A. Vázquez Sánchez, E. A. Kuzin, B. Ibarra Escamilla. 2004. *Láser de Fibra Óptica Compuesto por Dos Cavidades Acopladas: Aplicación Como Sensor de Fibra Óptica*. Revista Mexicana de Física, 50 (4), 374 – 378.
11. M. May Alarcón, E. A. Kuzin, R. A. Vázquez Sánchez. 2002. *Sensor Láser de Fibra Óptica con una Cavidad de 8.6 km Formada por Dos Rejillas de Bragg Usadas como Espejos*. Revista Mexicana de Física, 48 (5), 434 – 437.
12. M. May Alarcón, E. A. Kuzin, R. A. Vázquez Sánchez. 2003. *Multi-point fiber Bragg grating laser sensor interrogated by the intermodal beating frequency*. Optical Engineering. Vol. 42 (8), 2246 – 2249.
13. M. Song, S. Bae Lee, S. Sam Choi, B. Lee. 1997. *Simultaneous Measurement of Temperature and Strain Using Two Fiber Bragg Gratings Embedded in a Glass Tube*. Optical Fiber Technology 3, 194 – 196.
14. Bai-Ou Guan, Hwa-Yaw, Xiao-Ming Tao, Xiao-Yi Dong. 2000. *Simultaneous Strain and Temperature Measurement Using a Superstructure Fiber Bragg Grating*. IEEE Photonics Technology Letters. Vol. 12, No. 6. 675- 677.
15. O. Hadeler, M. Ibsen and M. N. Zervas. 2001. *Distributed-Feedback Fiber Laser Sensor for Simultaneous Strain and Temperature Measurements Operating in the Radio-Frequency Domain*. Applied Optics, Vol. 40, No. 19, 3169 – 3175.
16. A. D. Kersey and T. A. Berkoff. 1992. *Fiber-Optic Bragg-Grating Differential-Temperature Sensor*. IEEE Photonics Technology Letters. Vol. 4, No. 10. 1183- 1185.

17. Mauro Bacci, Costanza Cucci, Andrea Azelio Mencaglia and Anna Grazia Mignani. 2008. *Innovative Sensors for Environmental Monitoring in Museums*. Sensors, 8, 1984 – 2005.
18. John Dakin and Brian Culshaw. 1988. *Optical Fiber Sensors: Applications, Analysis, and Future Trends*. Artech House Boston and London. Chap. 13, Vol. IV.
19. Hao-Jan Sheng, Ming-Yue Fu, Tzu-Chiang Chen, Wen-Fung Liu, Sheau-Shong Bor. 2004. *A Lateral Pressure Sensor Using a Fiber Bragg Grating*. IEEE Photonics Technology Letters. Vol. 16, No. 4. 1146- 1148.
20. A. Frank, K. Bohnert, K. Haroud, H. Brändle, C. V. Poulsen, J. E. Pedersen and J. Patscheider. 2003. *Distributed Feedback Fiber Laser Sensor for Hydrostatic Pressure*. IEEE Photonics Technology Letters. Vol. 15, No. 12. 1758 - 1760.
22. M. G. Xu, H. Geiger and J. P. Dakin. 1996. *Fibre Grating Pressure Sensor With Enhanced Sensitivity Using a Glass-Bubble Housing*. Electronics Letters. Vol. 32, No. 2, 128 – 129.
23. M. G. Xu, I. Reekie, Y. T. Chow and J. P. Dakin. 1993. *Optical In-Fibre Grating High Pressure Sensor*. Electronics Letters. Vol. 29, No. 4, 398 – 399.
24. K. Cherif, S. Hleli, A. Abdelghani, N. Jaffrezic-Renault and V. Matejec. 2002. *Chemical detection in liquid media with a refractometric sensor based on a multimode optical fibre*. Sensors, 2, 195 – 204.
25. Jaw-Luen Tang and Jien-Neng Wang. 2008. *Chemical Sensing Sensitivity of Long-Period Grating Sensor Enhanced by Colloidal Gold Nanoparticles*. Sensors, 8, 171 – 184.
26. C. Córdoba, Jenny Mera, O. Paredes y J. Benavides. 2004. *Sensor óptico para mediciones de PH obtenido por el método sol-gel con moléculas orgánicas dopadas en matriz vítrea*. Rev. Soc. Quím. Méx. 48, 203-207.

27. Michal Borecki. 2007. *Intelligent Fiber Optic Sensor for Estimating the Concentration of a Mixture-Design and Working Principle*. Sensors, 7, 384 – 399.
28. B. D. Gupta, Navneet K. Sharma. 2002. *Fabrication and characterization of U-shaped fiber-optic pH probes*. Sensors and Actuators B 82, 89-93.
29. M. D. Todd, G. A. Johnson, B. A. Althouse and S. T. Vohra. 1998. *Flexural Beam-Based Fiber Bragg Grating Accelerometers*. IEEE Photonics Technology Letters. Vol. 10, No. 11. 1605 - 1607.
30. T. A. Berkoff and A. D. Kersey. 1996. *Experimental Demonstration of a Fiber Bragg Grating Accelerometer*. IEEE Photonics Technology Letters. Vol. 8, No. 12. 1677 - 1679.
31. Ka On Lee, Kin Seng Chiang and Zhihao Chen. 2001. *Temperature-Insensitive Fiber-Bragg-Grating-Based Vibration Sensor*. Optical Engineering, Vol. 40, No. 11, 2582 – 2585.
32. M. Espinosa Bosch, A. J. Ruiz Sánchez, F. Sánchez Rojas and C. Bosch Ojeda. 2007. *Recent Development in Optical Fiber Biosensors*. Sensors, 7, 797 – 859.
33. M. El-Sherif, Lalitkumar Bansal and Jianming Yuan. *Fiber Optic Sensors for Detection of Toxic and Biological Threats*. Sensors, 7, 3100 – 3118.
34. Günther Wehrle, Percy Nohama, Hypolito José Kalinowski, Pedro Ignácio Torres, and Luiz Carlos Guedes Valente. 2001. *A fibre optic Bragg grating strain sensor for monitoring ventilatory movements*. Measurement Science and Technology. 12, 805 – 809.
35. M. D. Marazuela Lamata. Tesis 1997. *Diseño, Caracterización y Aplicación Analítica de (Bio) Sensores de Fibra Óptica para la Determinación de CO₂, O₂ y Metabólitos de Interés Clínico*. Universidad Complutense de Madrid, Facultad de Ciencias Químicas.

36. Byounggho Lee. 2003. *Review of the Present Status of Optical Fiber Sensors*. *Optical Fiber Technology*, 9, 57 – 79.
37. G. Stewart, C. Tandy, D. Moodie, M. A. Morante, F. Dong. 1998. *Design of a fibre optic multi-point sensor for gas detection*. *Sensor. Actuat. B-Chem*, 51, 227-232.
38. A. Cheung, W. Johnstone, D. Moodie. 2006. *Gas detection based on optical correlation spectroscopy using a single light source*. *Meas. Sci. Tech.*, 17, 1107-1112.
39. E. Udd. 1995. *An Overview of Fiber-Optic Sensors*. *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 66, No. 8, 4015 – 4030.
40. John Dakin and Brian Culshaw. 1988. *Optical Fiber Sensors: Applications, Analysis, and Future Trends*. Artech House Boston and London. Chap. 17, Vol. IV.
41. G. D. Peng and P. L. Chu. 2002. *Fiber Óptic Sensors*. Francis T. S. Yu, Shizhuo Yin. Editores. Marcel Dekker, Inc. Chap. 9.
42. Kjell J. G Asvik. 2002. *Optical Metrology*. John Wiley and Sons, LTD. Chap. 13, 315 – 316.
43. John Dakin and Brian Culshaw. 1988. *Optical Fiber Sensors: Applications, Analysis, and Future Trends*. Artech House Boston and London. Chap. 14, Vol. IV.
44. Cesar Elosua, Ignacio R. Matías, Cándido Barriain, Francisco J. Arregui. 2006. *Volatile Organic Compound Optical Fiber Sensors: A Review*. *Sensors*, 6, 1440 – 1465.
45. B. D. Gupta, Navneet K. Sharma. 2002. *Fabrication and characterization of U-shaped fiber-optic pH probes*. *Sensors and Actuators B*. 82. 89 – 93.

46. Agrawal, G. P. 1995. *Nonlinear Fiber Optics*. Chap. 10, Academic Press, London. (1995).
47. H. H. Cerecedo-Núñez, L. A. Centeno-Sánchez. 1999. *Caracterización de Rejillas de Bragg en Fibra Óptica*. Revista Mexicana de Física. Agosto, 45 (4), 364-369.
48. Andreas Othonos. 1997. *Fiber Bragg Gratings*. Rev. Sci. Instrum. Diciembre. vol. 68, No. 12, 4309-4341.
49. Andreas Othonos, Kyriacos Kalli. 1999. *Fiber Bragg Grating: Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing*. Artech House Boston – London. Chap. 7.
50. Wei Liang, Yanyi Huang, Yong Xu, Reginald K. Lee, Amnon Yariv. 2005. *Highly Sensitive Fiber Bragg Grating Refractive Index Sensors*. Applied Physics Letters 86, 151122,
51. V. V. Spirin, M. G. Shlyagin, S. V. Miridonov, F. J. Mendieta Jimenes, R. M. López Gutiérrez. 2000. *Fiber Bragg Grating Sensor for Petroleum Hydrocarbon Leak Detection*. Optics and Lasers in Engineering, 32, 497 – 503.
52. Alan D. Kersey. 1996. *A Review of Recent Development in Fiber Optic Sensor Technology*. Optical Fiber Technology 2, 291 – 317.