



SENSORES Y ACONDICIONADORES

TEMA 5 (2)

SENSORES OPTOELECTRÓNICOS (Fibras ópticas)

**Profesores: Enrique Mandado Pérez
Antonio Murillo Roldán**



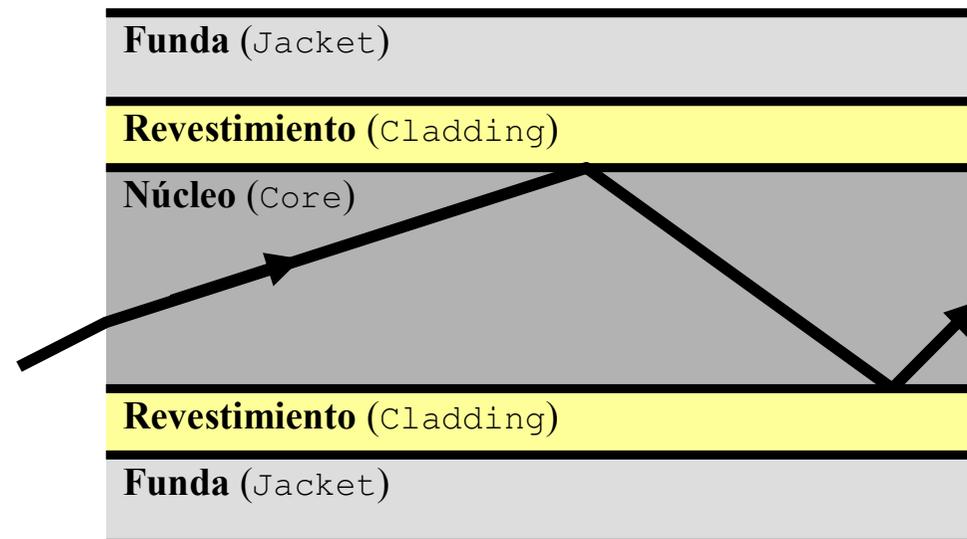
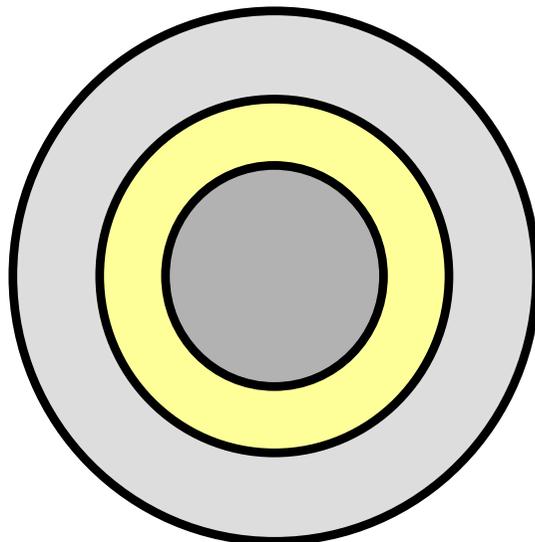
SENSORES DE FIBRA ÓPTICA

FIBRA ÓPTICA

[MAND 09 pag 525] [PERE 04 pag. 451]

La fibra óptica (FO) es una guía de ondas luminosas que se propagan a través de ella mediante reflexiones sucesivas.

Está constituida por dos cilindros coaxiales de material transparente a la radiación y de diferente índice de refracción.





SENSORES DE FIBRA ÓPTICA

Cilindro interior

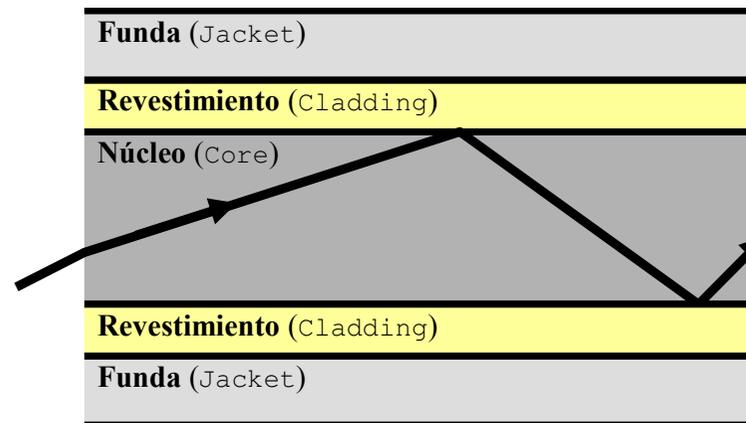
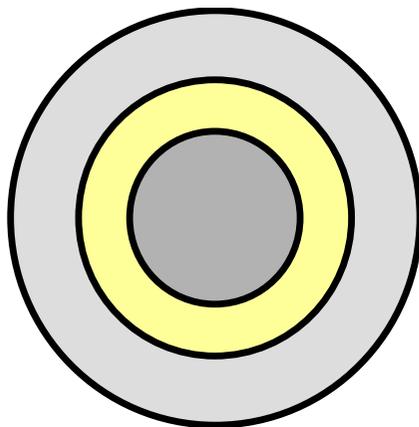
Se denomina núcleo (*Core*). Es el medio de propagación del rayo luminoso con una atenuación y distorsión mínimas.

Segundo cilindro

Se denomina revestimiento o corteza (*Cladding*). Refleja el rayo de luz debido a que su índice de refracción es distinto de él del núcleo.

Tercer cilindro

Se denomina funda o recubrimiento (*Jacket*). Es una protección primaria a base de barniz de acrilato o resina de silicona, que protege a la fibra contra la abrasión, rotura y agresiones químicas.





SENSORES DE FIBRA ÓPTICA

INDICE DE REFRACCIÓN

Relación entre la velocidad de la luz en el vacío y en el medio considerado:

$$n = C / v \quad (n \geq 1)$$

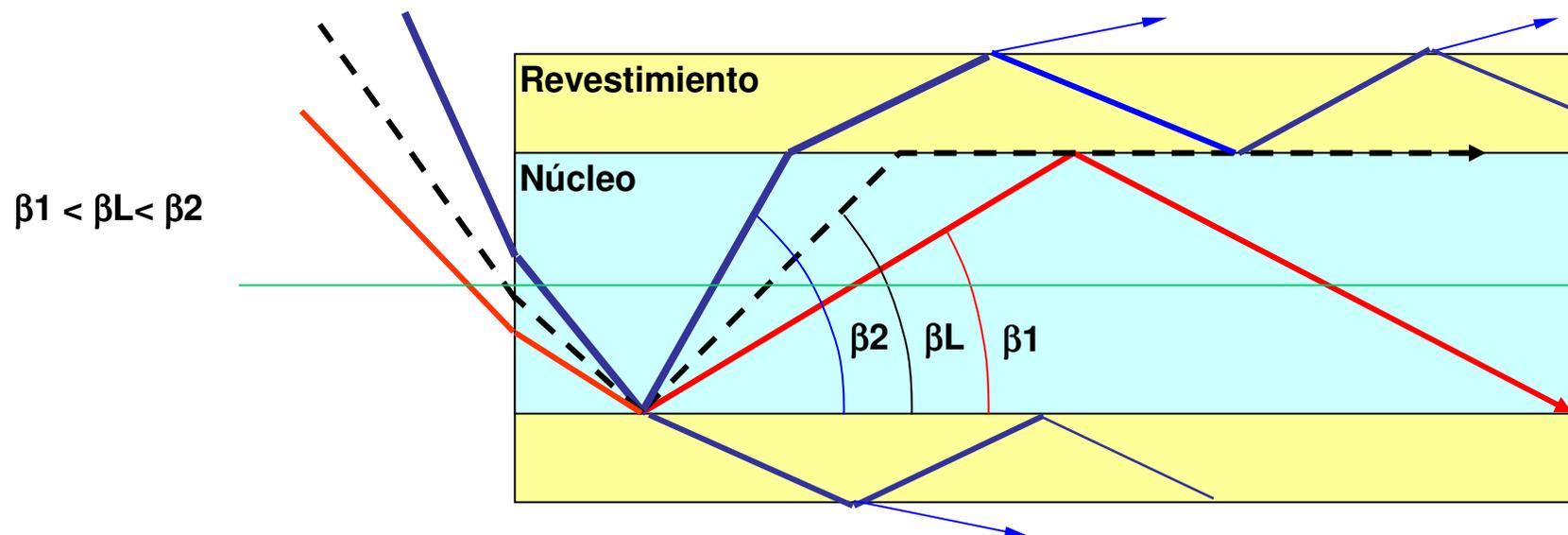
En una fibra óptica, el índice n_1 del núcleo es mayor que el índice n_2 del revestimiento. Debido a ello los rayos que inciden en el límite entre el núcleo y el revestimiento con un ángulo inferior a β_L , denominado ángulo crítico, se propagan a través del núcleo de la fibra.



SENSORES DE FIBRA ÓPTICA

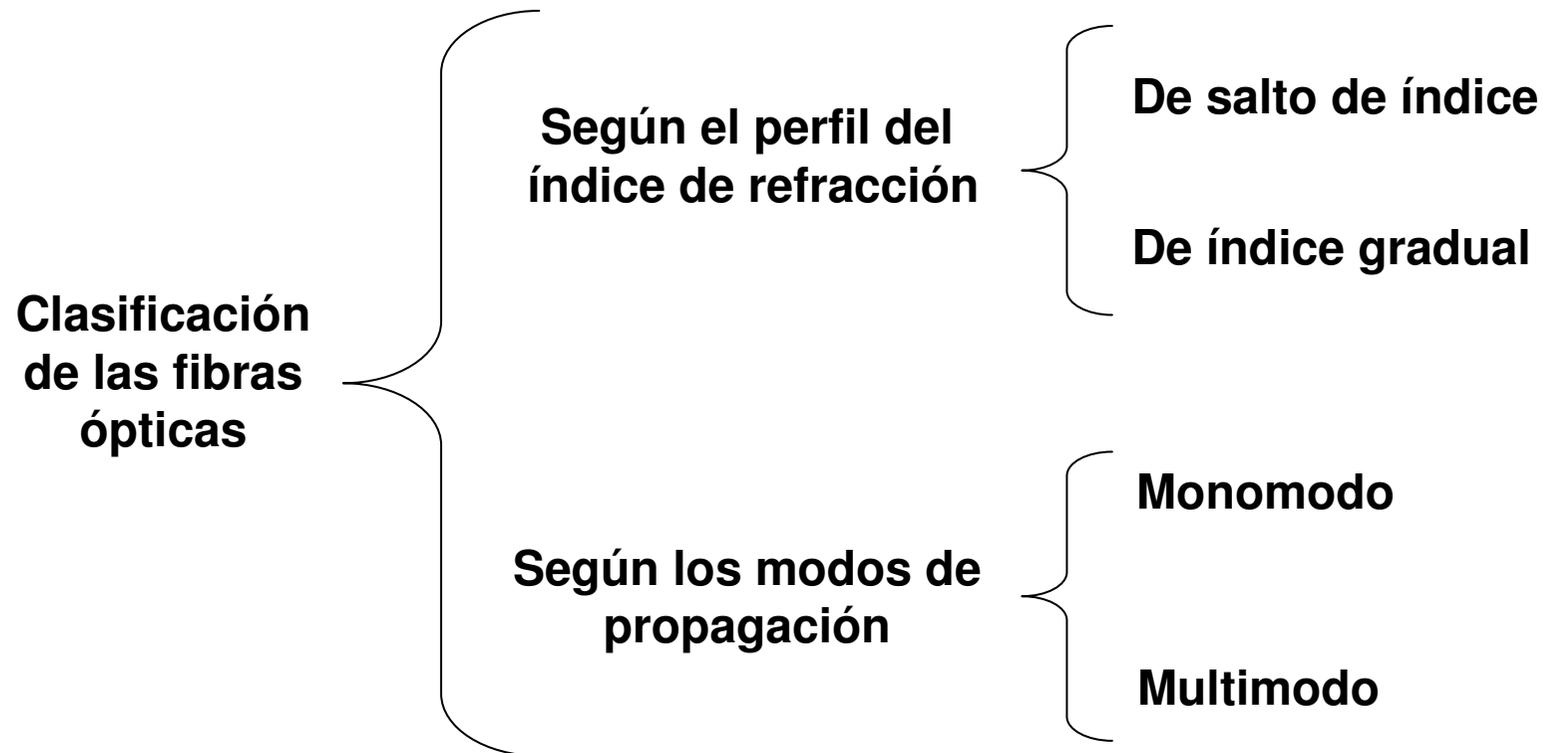
INDICE DE REFRACCIÓN

Los rayos que inciden en el límite entre el núcleo y el revestimiento con un ángulo superior al ángulo crítico, **pasan por refracción al revestimiento** y se anulan después de algunas reflexiones.





SENSORES DE FIBRA ÓPTICA





SENSORES DE FIBRA ÓPTICA

TIPOS DE PERFIL DE INDICE

La condición ($n_1 > n_2$) se puede obtener mediante un cambio brusco del índice o mediante un cambio continuo, lo que da lugar a dos tipos de FO que se diferencian por el perfil de índice de refracción:

- **Fibras de Salto de Índice (SI) o índice en escalón**
- **Fibras de Índice Gradual (IG)**

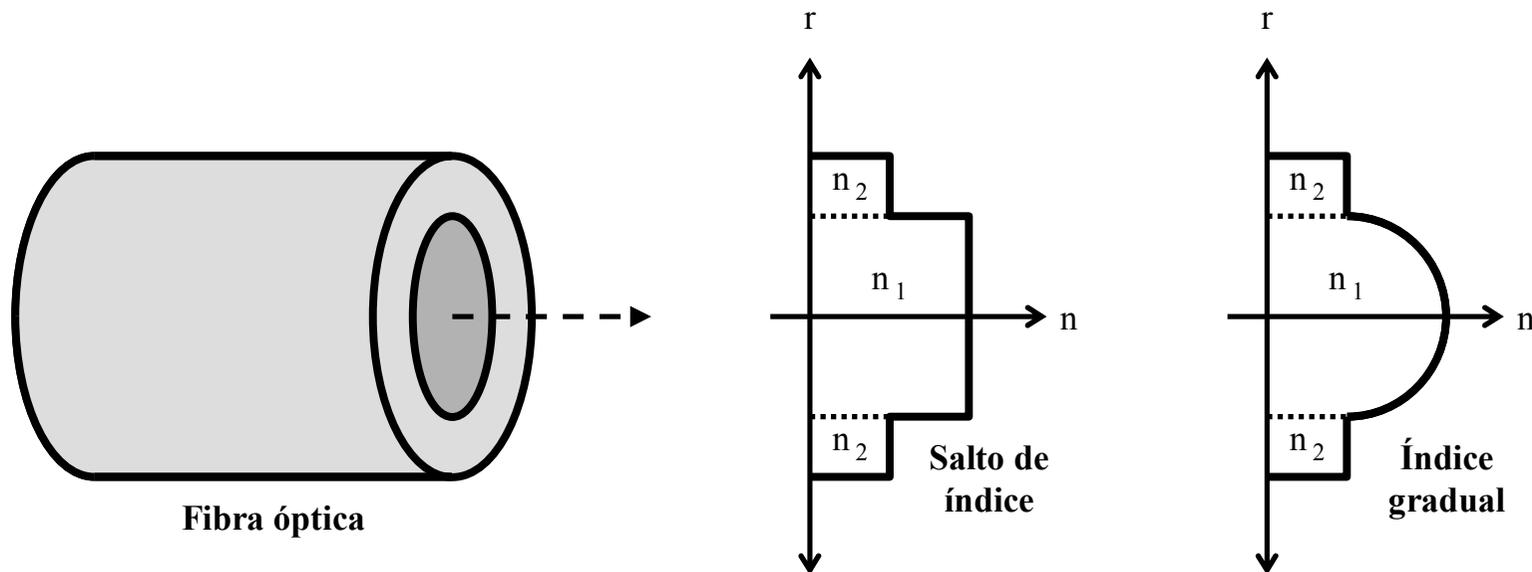


SENSORES DE FIBRA ÓPTICA

PERFIL DEL INDICE DE REFRACCION

Fibras de salto de índice o índice en escalón

El índice de refracción cambia bruscamente del núcleo al revestimiento. En este caso la trayectoria seguida por el rayo de luz es lineal.



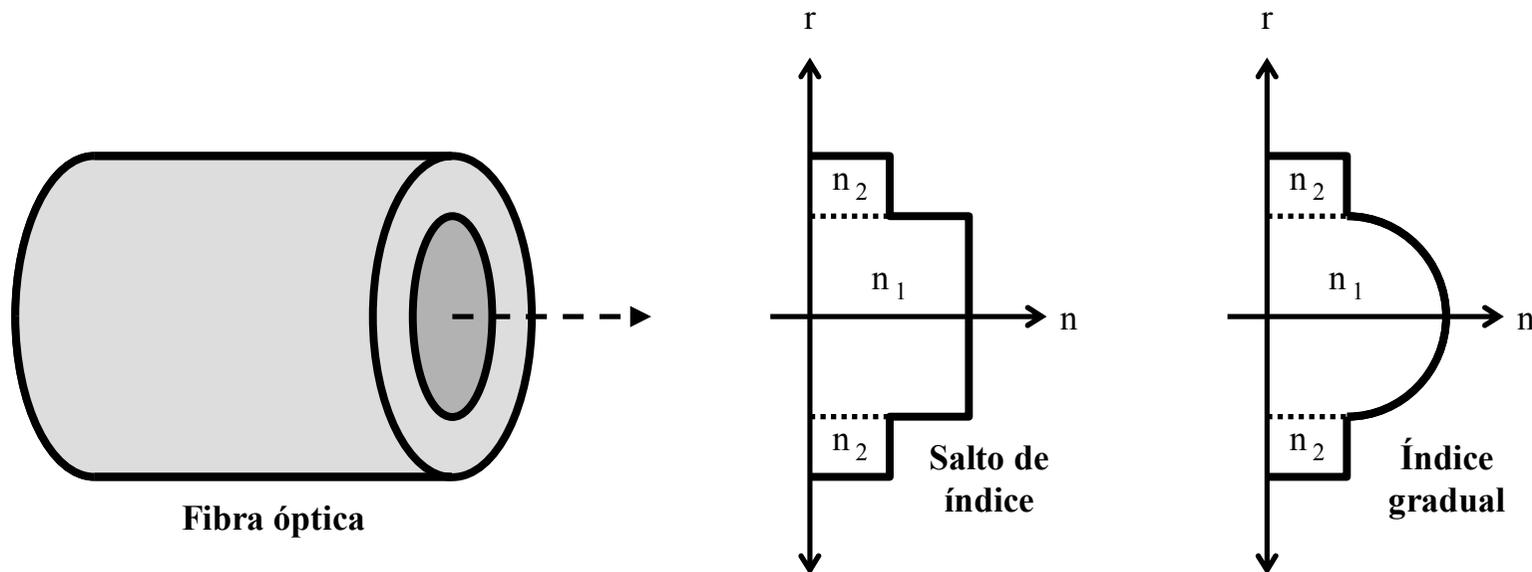


SENSORES DE FIBRA ÓPTICA

PERFIL DEL INDICE DE REFRACCION

Fibras de Índice Gradual (IG)

El índice del núcleo es variable y función de la distancia al eje de la fibra $n_1=f(r)$, lo que hace que la trayectoria del rayo sea curva.
El índice del revestimiento es constante: $n_2=K$





SENSORES DE FIBRA ÓPTICA

MODO DE PROPAGACION

Es el camino a través del cual se propagan los rayos o haces de luz que atraviesan una fibra óptica. Según las características de la fibra óptica la luz se propaga de dos formas que dan lugar a dos tipos diferentes de fibras ópticas:

- Fibras ópticas monomodo
- Fibras ópticas multimodo



SENSORES DE FIBRA ÓPTICA

FIBRAS ÓPTICAS MONOMODO

Todos los rayos de luz recorren la misma trayectoria en el interior del núcleo, que debe ser lo más estrecho posible para minimizar el número de reflexiones en él. Son difíciles de fabricar y empalmar.

Resumen de las características

- La luz se propaga a través de un solo camino (modo fundamental).
- El ancho de banda es teóricamente infinito, pero el ángulo de aceptación es pequeño y resulta difícil acoplar el haz de luz al núcleo.
- Se necesita en general que el fotoemisor utilizado emita un haz muy concentrado (un ejemplo de ello es el diodo láser).



SENSORES DE FIBRA ÓPTICA

FIBRAS ÓPTICAS MULTIMODO

Las dificultades de fabricación y empalme de las fibras monomodo hizo que se desarrollaran las fibras multimodo que poseen un diámetro mayor. Esto hace que el número de trayectorias que recorren los rayos de luz sea también mayor y da lugar a la dispersión de los mismos. Cada rayo recorre una trayectoria distinta y alcanza su destino en un tiempo distinto, tras sufrir un número de reflexiones diferente.

Resumen de las características

- El tipo de material utilizado define la distorsión (dispersión modal) que se produce en la recepción, debida a que unos modos de propagación recorren más distancia que otros. Como consecuencia de la dispersión modal, los impulsos luminosos de corta duración que se transmiten a través de la fibra se ensanchan, lo que hace que se reduzca el ancho de banda.
- Para igual diámetro del núcleo, la dispersión modal es menor en las fibras ópticas de índice gradual y por lo tanto el ancho de banda es mayor (mayor velocidad de transmisión de datos).



SENSORES DE FIBRA ÓPTICA

En el mercado existen tres tipos de fibras ópticas:

- Fibras multimodo de salto de índice

Presentan una distorsión elevada, que limita el ancho de banda entre 10 y 50 MHz. Por ello se utilizan en conexiones relativamente cortas (hasta 1Km) en enlaces de datos de baja velocidad.

- Fibras monomodo de salto de índice

La dispersión es baja y se pueden lograr anchos de banda de varios **GHz/Km.**

- Fibras multimodo de índice gradual

La luz se refracta desde las partes más externas del núcleo, lo que evita que se produzcan las reflexiones que aparecen en las fibras de salto de índice. La velocidad es mucho mayor que en las fibras multimodo de salto de índice porque se reduce la dispersión, y el ancho de banda puede superar el GHz (1 Km).



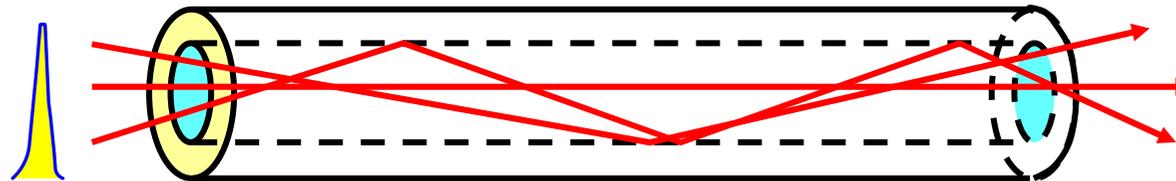
SENSORES DE FIBRA ÓPTICA

Impulso de entrada

TIPOS DE FIBRAS ÓPTICAS

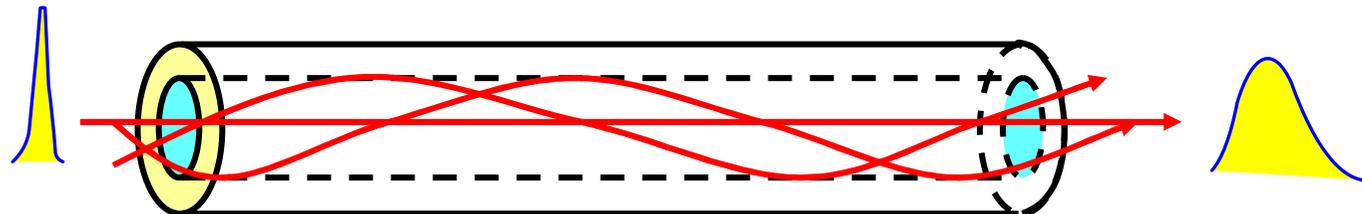
Impulso de salida

Multimodo de SI



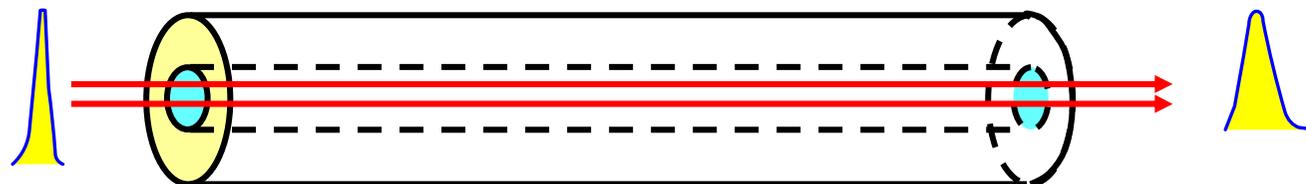
Núcleo (50 a 60 μm) y Revestimiento (125 μm)

Multimodo de IG



Núcleo (50 a 60 μm) y Revestimiento (125 μm)

Monomodo de SI



Núcleo (1 a 10 μm) y Revestimiento (125 μm)



SENSORES DE FIBRA ÓPTICA

[MAND 09, pag 527] [PALL 98 pag. 414] [PERE 04 pag. 456]

Son consecuencia del desarrollo de la tecnología de las fibras ópticas en el campo de las comunicaciones.

Sus principales características son:

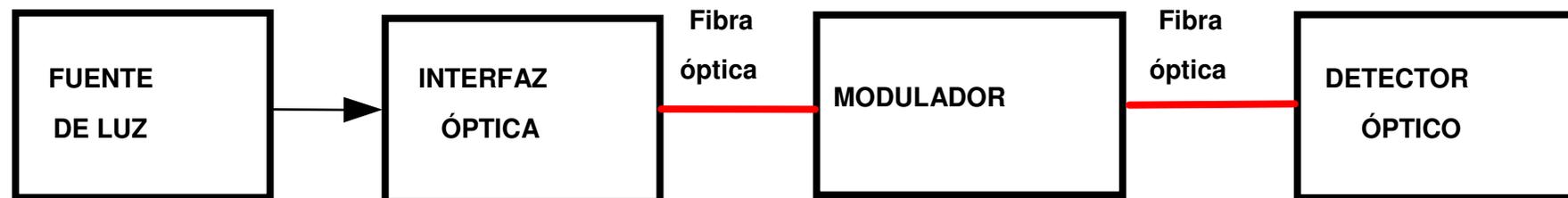
- Más sensibles que otras técnicas de medida**
- Versatilidad geométrica**
- Tolerancia a condiciones ambientales difíciles**
- Capacidad para detectar múltiples magnitudes físicas y químicas**
- Aplicación inmediata en telemetría**
- Coste elevado**



SENSORES DE FIBRA ÓPTICA

Están formados por:

- Una fuente de luz (LED, infrarrojo, láser, etc.)
- Una fibra óptica
- Un modulador que altera la luz de forma proporcional a la perturbación o todo-nada (magnitud física a medir)
- Un fotodetector



Fluorescente
Incandescente
Lámparas de
descarga
LED
Láser

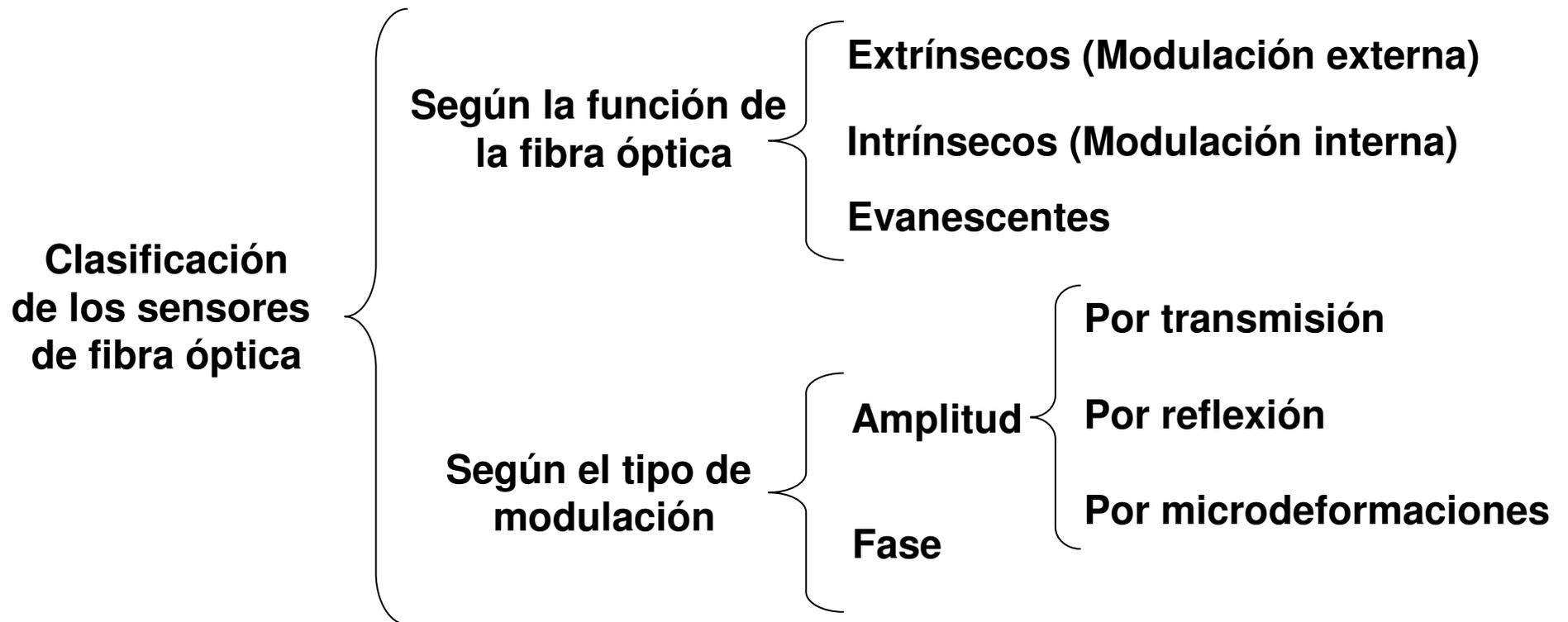
Lente
Polarizador
Conector
Acoplador

Fase
Intensidad
Polarización
Longitud de onda

Fotodiodo
Diodo de avalancha
PMT



SENSORES DE FIBRA ÓPTICA





SENSORES DE FIBRA ÓPTICA

TIPOS DE SENSORES SEGÚN LA FUNCIÓN DE LA FIBRA ÓPTICA

- Sensores extrínsecos o de modulación externa

Son sensores en los que la luz transportada por la fibra óptica se modula en un elemento externo bajo la acción de la magnitud a medir o del fenómeno a detectar.

- Sensores intrínsecos o de modulación interna

Son sensores en los que la magnitud a medir modifica las características ópticas de la fibra, directamente o a través de un recubrimiento. Dichas modificaciones producen variaciones en algún parámetro de la radiación.

- Sensores evanescentes

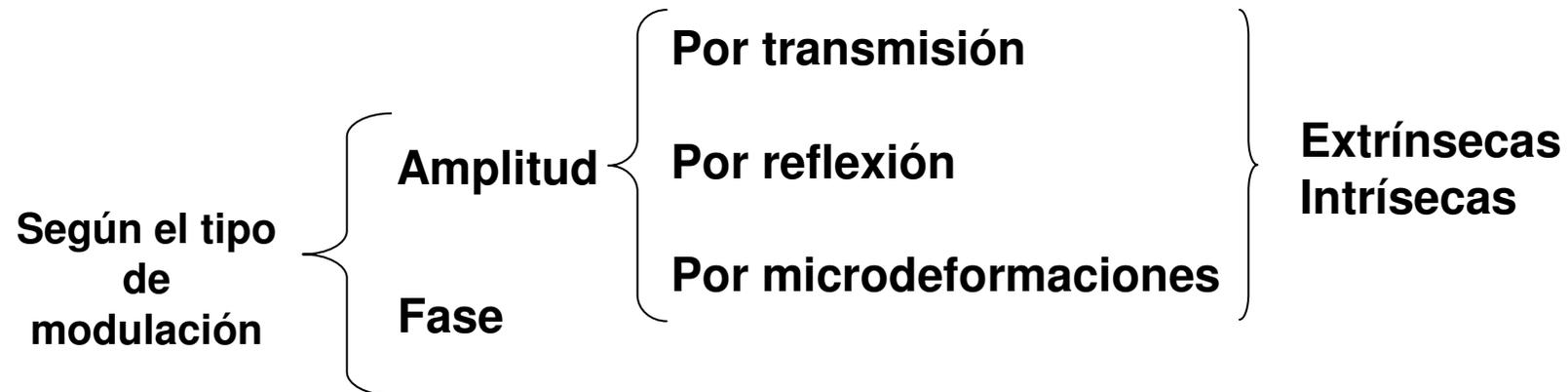
Son sensores en los que una parte de la fibra óptica está desprovista de la capa reflectora externa, lo que permite detectar ciertos elementos químicos (como por ejemplo el H) a través de su influencia en el campo evanescente. Se utilizan especialmente en óptica integrada.



SENSORES DE FIBRA ÓPTICA

TIPOS DE SENSORES SEGÚN LA MODULACIÓN UTILIZADA

Detectan la variación de la cantidad de luz asociada con la magnitud a medir. Utilizan elementos ópticos y circuitos muy simples. Normalmente utilizan fibras multimodo y la modulación en amplitud se consigue por transmisión, por reflexión, por microdeformaciones o por variaciones en la fibra óptica.





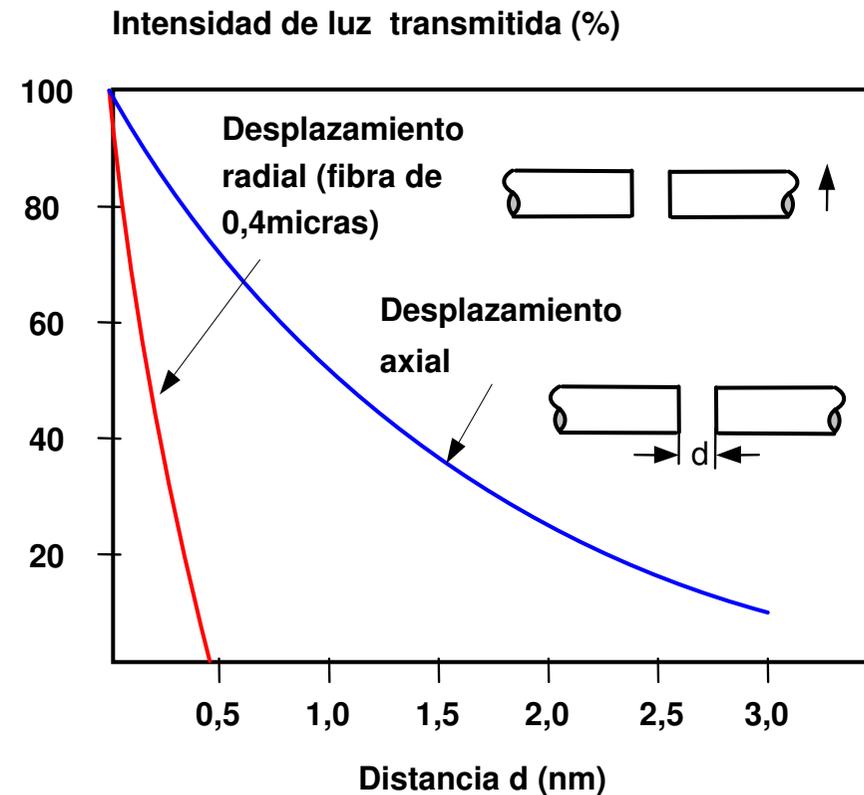
SENSORES DE FIBRA ÓPTICA

MODULACIÓN DE AMPLITUD POR TRANSMISIÓN (EXTRÍNSECA)

Se basa en la reducción de energía debida a la transmisión de la radiación óptica a través de un canal.

Se utiliza en la medida de desplazamientos axiales y radiales. (mayor sensibilidad en los radiales)

También se utiliza en la medida de la presión acústica (hidrófonos).



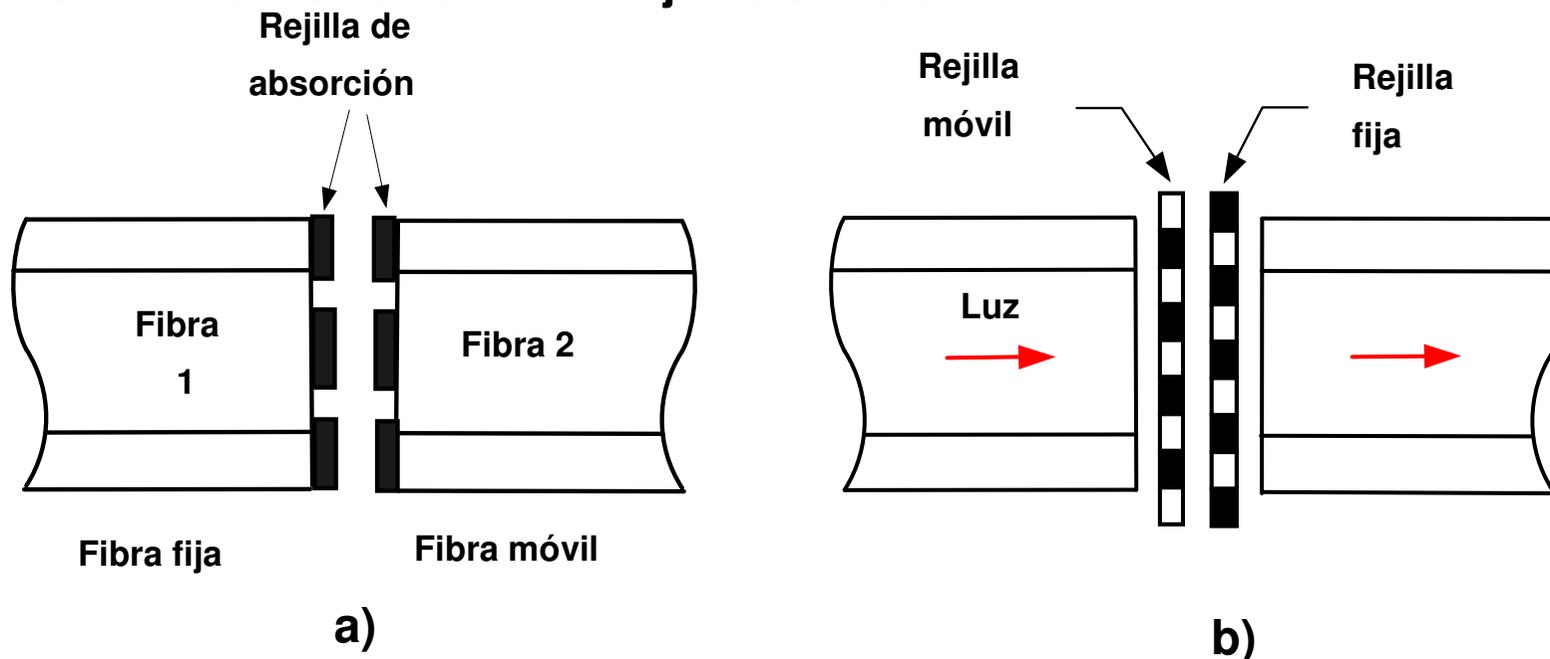


SENSORES DE FIBRA ÓPTICA

MODULACIÓN DE AMPLITUD POR TRANSMISIÓN (EXTRÍNSECA)

Para aumentar la sensibilidad se emplean rejillas de absorción colocadas:

- En las caras de la fibra, en este caso se mueve una de las fibras
- Entre ambas fibras, en este caso las fibras están fijas y se produce un movimiento relativo de las rejillas entre sí.





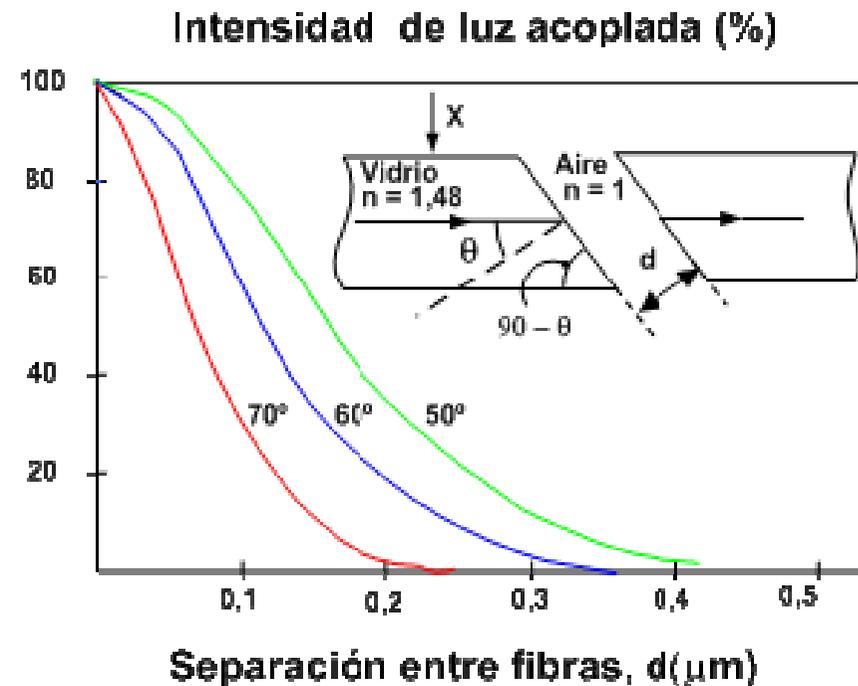
SENSORES DE FIBRA ÓPTICA

MODULACIÓN DE AMPLITUD POR TRANSMISIÓN (EXTRÍNSECA)

Una variante de la modulación por transmisión con alta sensibilidad es la basada en la anulación de la reflexión interna total.

Se colocan dos fibras con una pequeña separación entre ellas y se utiliza la condición de ángulo límite.

Se utiliza para la detección de movimientos de estructuras mecánicas y arquitectónicas.





SENSORES DE FIBRA ÓPTICA

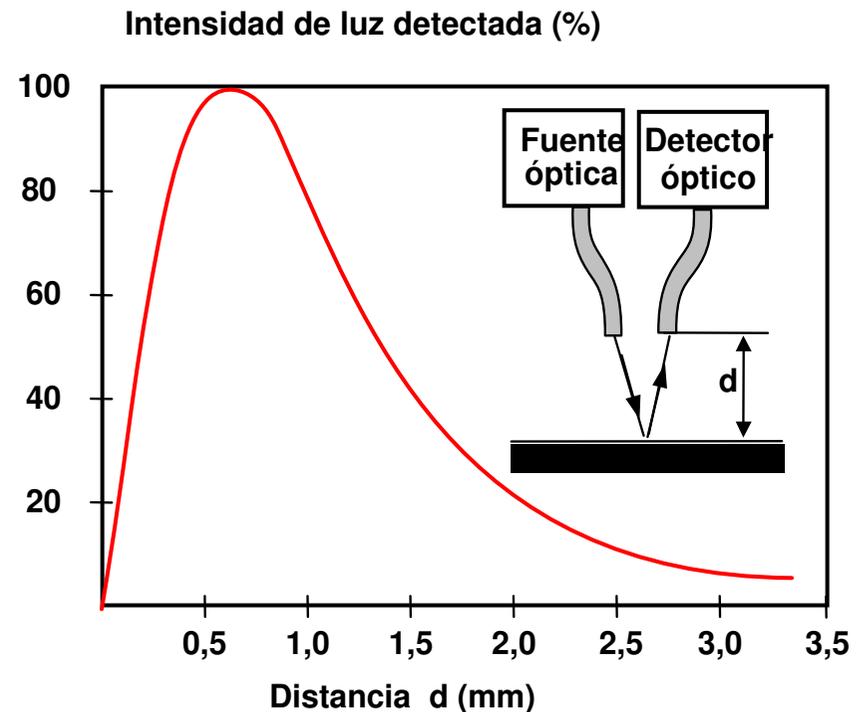
MODULACIÓN DE AMPLITUD POR REFLEXIÓN (EXTRÍNSECA)

El haz se transmite hacia una superficie reflectante que lo dirige hacia un detector óptico.

La intensidad de la luz reflejada depende de la distancia entre la fibra y la superficie (d).

A distancias pequeñas la intensidad crece y a medida que d aumenta la intensidad decrece según $1/d^2$.

Esta característica hace que este tipo de sensor se utilice en la medida desplazamientos, de presión (en este caso la superficie es un diafragma), de nivel, de temperatura, etc.





SENSORES DE FIBRA ÓPTICA

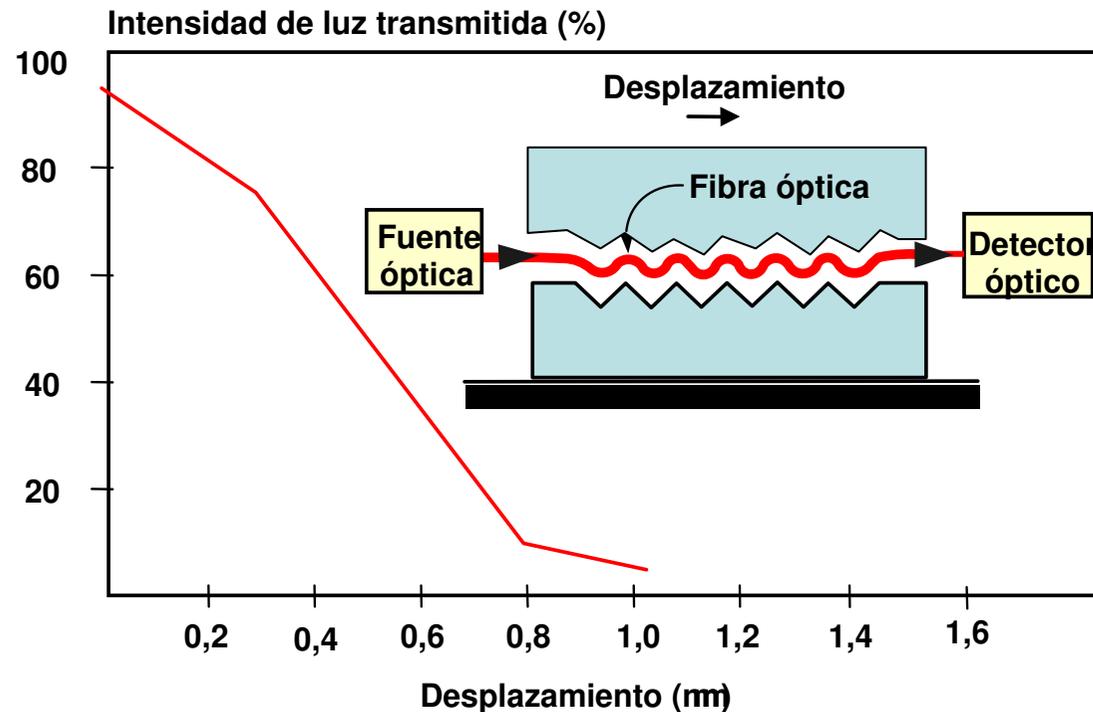
MODULACIÓN DE AMPLITUD POR MICRODEFORMACIÓN (EXTRÍNSECA)

La intensidad de la luz transmitida depende del valor de una magnitud física que provoca pequeñas deformaciones en la fibra óptica.

Las deformaciones hacen que no se produzca la reflexión total interna, y que se generen pérdidas.

En general la sensibilidad aumenta con el número de puntos de deformación y/o el espaciado entre ellos.

Se utiliza para medir presiones y desplazamientos.



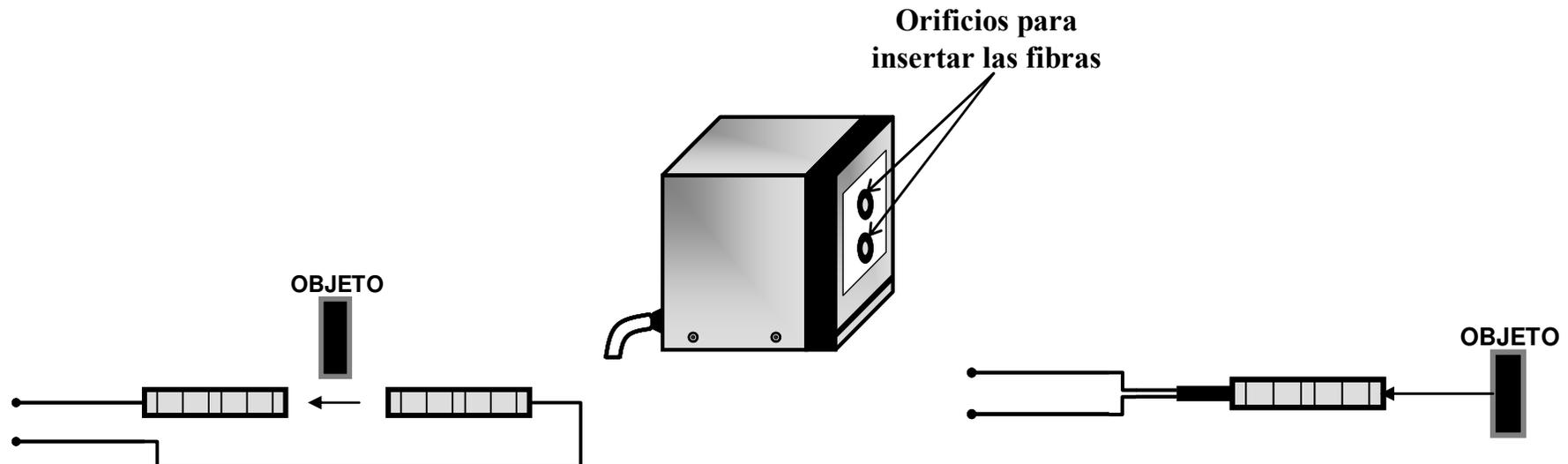


SENSORES DE FIBRA ÓPTICA

MODULACIÓN DE AMPLITUD POR INTERRUPCIÓN DEL HAZ (EXTRÍNSECA)

Fotocélulas de fibra óptica

Son sensores extrínsecos, implementados, en general, con fibras multimodo de salto de índice. Su carcasa se instala en la zona más adecuada y la luz se transmite al punto de detección mediante una fibra óptica. Se pueden utilizar con fotocélulas de barrera de luz, de reflexión sobre espejo y de reflexión sobre objeto en lugares de difícil acceso.





SENSORES DE FIBRA ÓPTICA

MODULACIÓN DE AMPLITUD POR VARIACIONES DE LA FIBRA ÓPTICA (INTRÍNSECA)

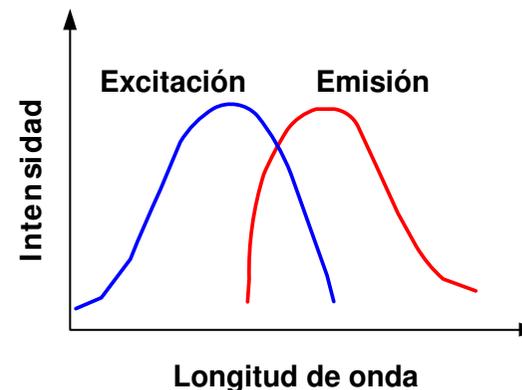
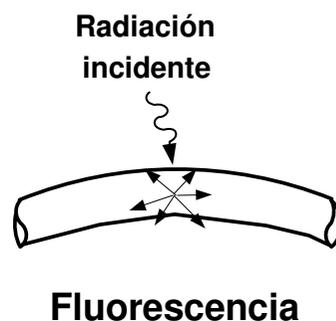
Se basa en la modificación de la composición química de la fibra. Puede ser:

- **Modificación del espectro de absorción (medidas de temperatura)**

Se impurifica el cristal de la fibra para hacer que su espectro de absorción sea sensible a la temperatura (los índices de refracción del núcleo y de la cubierta se aproximan al aumentar la temperatura).

- **Modificación de la fluorescencia (medidas de radiación)**

Se impurifica la fibra para conseguir su fluorescencia. La radiación incidente que se quiere medir estimula la fluorescencia.





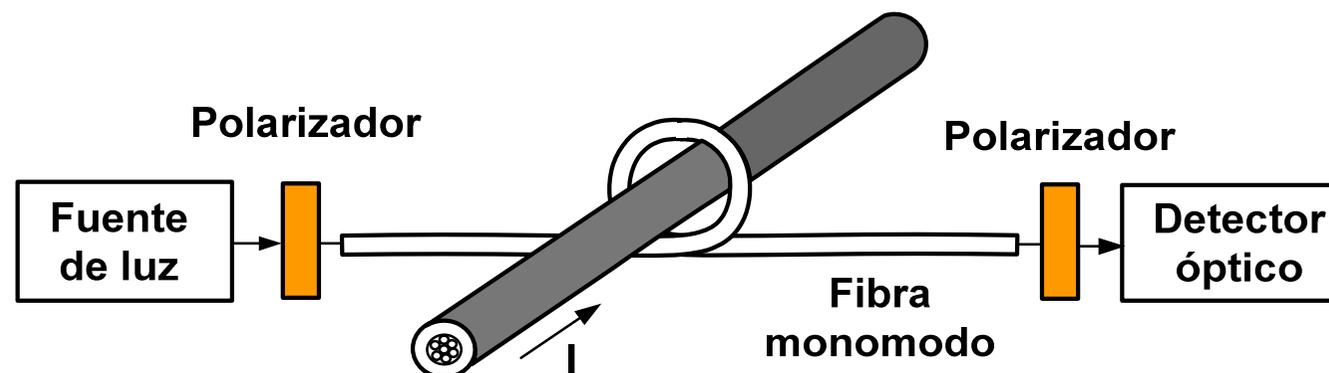
SENSORES DE FIBRA ÓPTICA

MODULACIÓN DE AMPLITUD POR VARIACIONES DE LA FIBRA ÓPTICA (INTRÍNSECA)

Un ejemplo de aplicación de los sensores de FO intrínsecos es la medida de la corriente eléctrica que circula a través de un conductor.

Dicha corriente genera un campo magnético que produce el giro del plano de polarización de la luz enviada por una fuente de luz a través de un polarizador.

A la salida de la FO la luz pasa por un segundo polarizador que entrega a su salida una radiación luminosa que es proporcional al campo magnético y por tanto a la corriente que se quiere medir.





SENSORES DE FIBRA ÓPTICA

MODULACIÓN DE AMPLITUD POR VARIACIONES DE LA FIBRA ÓPTICA (INTRÍNSECA)

El mecanismo de fluorescencia se utiliza principalmente en análisis químicos: medida de la concentración de oxígeno disuelto, de pH, etc. En general, la utilización de la fibra óptica en los análisis químicos facilita la realización de análisis in situ que no afectan al proceso, porque el tamaño de la muestra puede ser extremadamente pequeño. Su principal inconveniente es que la luz ambiente modifica el resultado de la medida y el tiempo de respuesta puede ser relativamente alto.

Otros mecanismos de modulación intrínseca son la modificación del índice de refracción, el cambio de la polarización, etc.



SENSORES DE FIBRA ÓPTICA

SENSORES DE FIBRA ÓPTICA BASADOS EN LA MODULACIÓN DE FASE

La modulación de fase no se puede detectar directamente debido a que la frecuencia de la luz es demasiado alta (10^{14} Hz) para que los sensores ópticos puedan responder. Por ello se utilizan técnicas interferométricas mediante las cuales la modulación de fase se convierte en modulación de amplitud.

Generalmente se utilizan dos fibras monomodo y elementos ópticos y circuitos relativamente complejos. Presentan numerosas ventajas: flexibilidad geométrica, aislamiento electromagnético, gran ancho de banda y elevada resolución.

Los cuatro tipos de interferómetros más utilizados son:

- Interferómetro de Mach-Zehnder
- Interferómetro de Michelson
- Interferómetro de Fabry-Perot
- Interferómetro de Sagnac



SENSORES DE FIBRA ÓPTICA

SENSORES DE FIBRA ÓPTICA BASADOS EN LA MODULACIÓN DE FASE [PERE 04 PAG 461]

Interferometría

Técnica óptica utilizada ampliamente en astronomía que consiste en combinar la luz proveniente de diferentes receptores. Se basan en la utilización del principio de interferencia de la luz mediante el cual dos ondas de luz que coinciden en fase se amplifican mientras que dos ondas en oposición de fase se cancelan.

Interferómetros

Utilizan una única fuente real para producir dos fuentes virtuales a partir de ella. Las fuentes virtuales pueden ser producidas por división de frente de onda y por división de amplitud. En el primer caso, se usan porciones del frente de onda primario, bien sea directamente como fuentes secundarias virtuales o en combinación con otros dispositivos ópticos. En el segundo caso, el haz primario se divide en dos haces secundarios que viajan por diferentes caminos antes de recombinarse e interferir.

Los interferómetros se utilizan para medir longitudes de onda y pequeños ángulos.



SENSORES DE FIBRA ÓPTICA

SENSORES DE FIBRA ÓPTICA BASADOS EN MODULACIÓN DE FASE

Elementos de los interferómetros de fibra óptica

Acoplador direccional

Dispositivos divisores de haz basados en el acoplamiento entre los núcleos de dos fibras adyacentes.

Espejos

Espejos de alta calidad, aunque de baja reflectividad. Se pueden conseguir cortando el extremo de la fibra óptica adecuadamente.



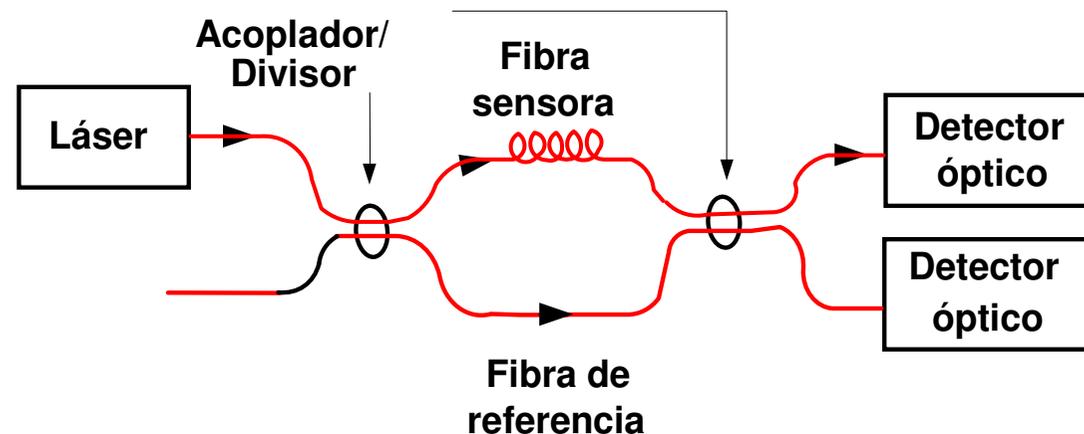
SENSORES DE FIBRA ÓPTICA

SENSORES DE FIBRA ÓPTICA BASADOS EN LA MODULACIÓN DE FASE

INTERFERÓMETRO DE MACH-ZEHNDER

La luz procedente de un diodo láser se divide por igual entre dos fibras monomodo, una sensora y una de referencia. El desplazamiento de fase en la fibra sensora se produce mediante cambios de longitud y de su índice de refracción.

Si las longitudes de las dos fibras son exactamente iguales o difieren en un número entero de longitudes de onda, los rayos recombinados en el acoplador están en fase y la intensidad es máxima. Si en cambio los dos rayos están desfasados $\lambda/2$ el rayo recombinado tiene un valor mínimo de intensidad.



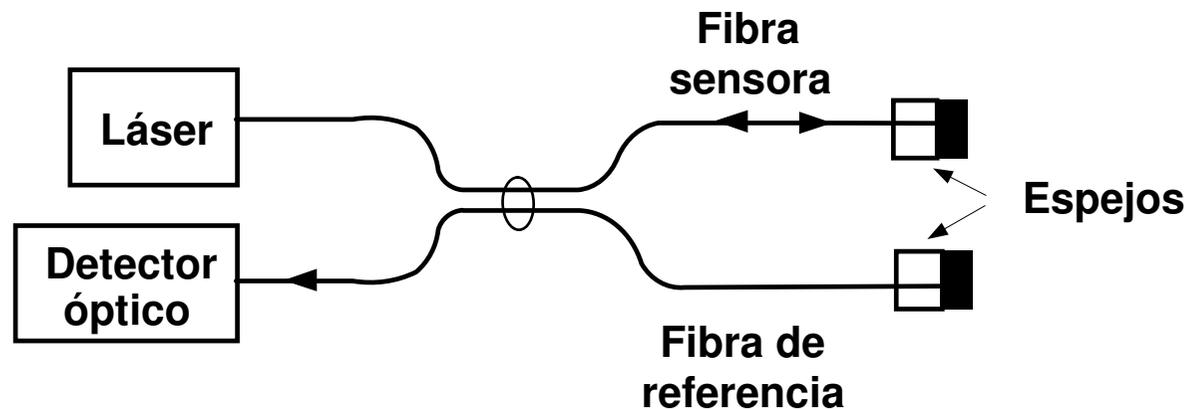


SENSORES DE FIBRA ÓPTICA

SENSORES DE FIBRA ÓPTICA BASADOS EN LA MODULACIÓN DE FASE

INTERFERÓMETRO DE MICHELSON

Se basa en un interferómetro de Mach-Zehnder en el que las fibras terminan en dos espejos que reflejan la luz hacia el detector a través del acoplador. De esta forma se elimina uno de los acopladores, aunque la luz se realimenta también al láser y se comporta como una fuente de ruido.



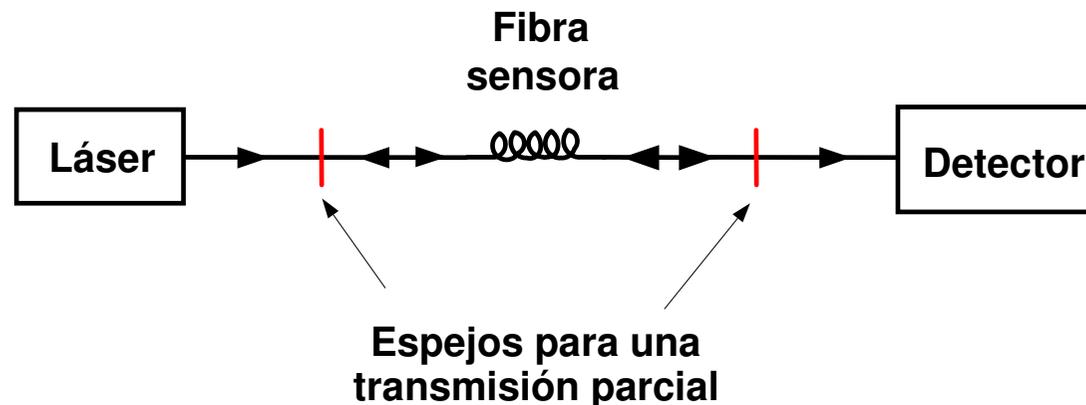


SENSORES DE FIBRA ÓPTICA

SENSORES DE FIBRA ÓPTICA BASADOS EN LA MODULACIÓN DE FASE

INTERFERÓMETRO DE FABRY-PEROT

No hay fibra de referencia. El rayo de luz se refleja parcialmente en el detector y llega de vuelta al láser. La porción de luz transmitida (generalmente un 5 %) llega al segundo espejo en el que una parte se refleja de nuevo y otra se transmite al detector óptico (otro 5 %). Se obtiene una sensibilidad doble de la de los dos interferómetros anteriores.

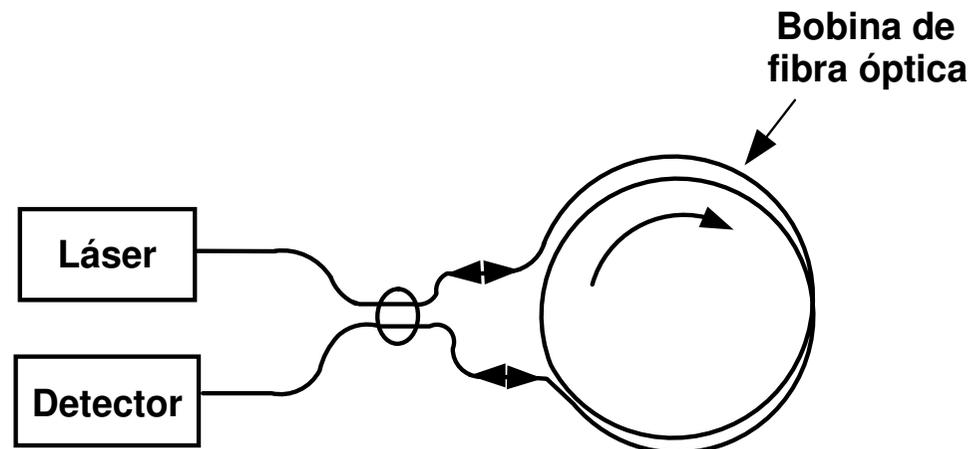




SENSORES DE FIBRA ÓPTICA

SENSORES DE FIBRA ÓPTICA BASADOS EN LA MODULACIÓN DE FASE INTERFERÓMETRO DE SAGNAC

El rayo de luz se introduce mediante un acoplador a través de los dos extremos de una fibra monomodo arrollada en forma de bobina. Si la bobina está inmóvil, la luz tarda el mismo tiempo en recorrer el camino en ambas direcciones. Sin embargo, si la bobina gira en una determinada dirección, el tiempo de propagación de la luz que se propaga en dicho sentido es mayor, debido a que el camino que recorre es más largo, y los rayos que se recombinan están desfasados. Esta técnica se utiliza para medir velocidades de rotación (giróscopos), ya que el desfase depende de la velocidad de giro.





ÓPTICA INTEGRADA

FUNDAMENTOS

Los primeros trabajos se realizaron en 1969 para tratar de conseguir en la óptica resultados similares a los que se obtienen en electrónica con los circuitos integrados.

DEFINICIÓN

La óptica integrada se puede definir como el campo de la óptica basado en el confinamiento y guiado de las ondas luminosas a través de películas o capas delgadas de un material transparente, que constituyen guías de ondas (*waveguides*).

Combinando estas películas con otras estructuras, la luz puede ser modulada, filtrada, concentrada e incluso convertida en una radiación láser.

La óptica integrada está formada por un conjunto de elementos ópticos colocados en un circuito integrado planar.

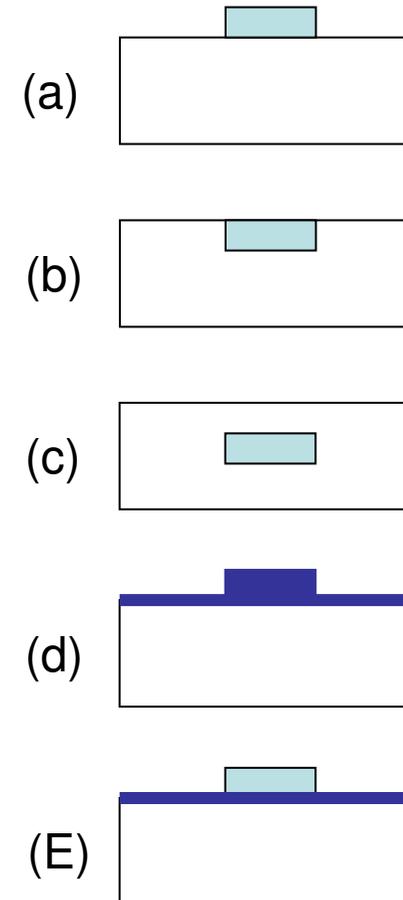


ÓPTICA INTEGRADA

ESTRUCTURAS DE LAS GUÍAS DE ONDA

Pueden ser implementadas de distintas maneras:

- a) Tira superficial (*strip*)
- b) Tira empotrada (*embedded*)
- c) Tira enterrada (*buried*)
- d) Cresta (*ridge*)
- e) Tira cargada (*strip-loaded*)





ÓPTICA INTEGRADA

TIPOS DE GUÍAS DE ONDA

Aunque no hay una clasificación aceptada universalmente, las guías de onda se pueden clasificar, de acuerdo con su comportamiento, en:

- **Pasivas**

Tienen propiedades ópticas constantes y se utilizan para dividir el haz de luz, curvarlo, etc.

- **Activas**

Poseen elementos que generan o amplifican un haz de luz, como por ejemplo un láser.

- **Pasivas y dinámicas**

Tienen propiedades ópticas variables, cuyo nivel se puede modificar mediante diversos efectos físicos de los que los más importantes son el electro-óptico, el acústico-óptico y el termo-óptico. El electro-óptico es ampliamente utilizado porque el LiNbO_3 es un compuesto químico cuyo índice de refracción cambia significativamente cuando se le somete a un campo eléctrico.

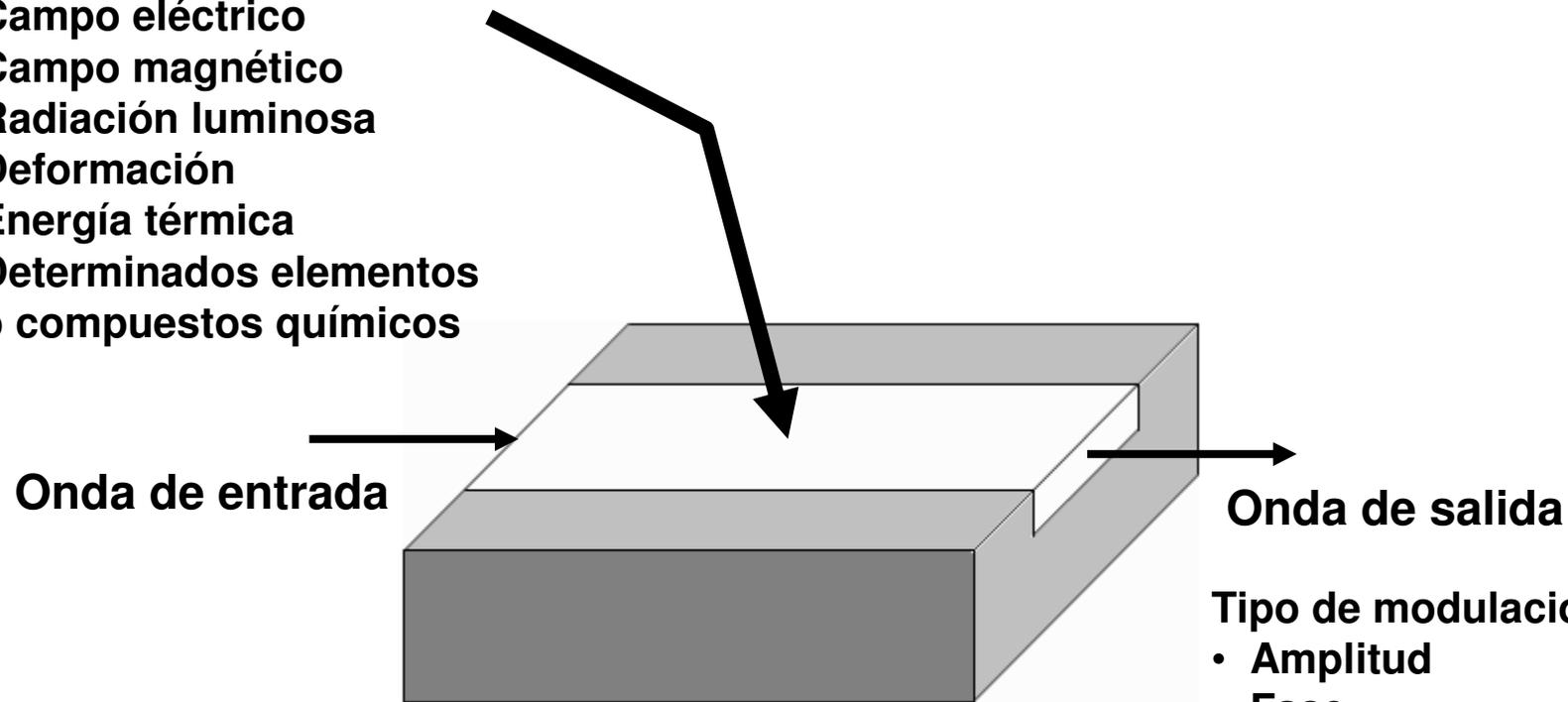


ÓPTICA INTEGRADA

GUÍAS DE ONDA PASIVAS Y DINÁMICAS

Influencia externa:

- Campo eléctrico
- Campo magnético
- Radiación luminosa
- Deformación
- Energía térmica
- Determinados elementos o compuestos químicos



Tipo de modulación:

- Amplitud
- Fase
- Polarización
- Cambio de dirección