



Módulo: Conductores de Fibras Ópticas



Formació Ocupacional

Pàgina 1 de 43

DEPARTAMENT: Sistemes de Telecomunicacions i Informàtica

ACCIÒ FORMATIVA:

- Fonaments de la instal·lació de línies i equips de comunicació

CODI DEL CURS: elen20_257M333U1

MÒDULO: Comunicació per Fibra Òptica



ÍNDIX:

GESTIÓ DE LA PROGRAMACIÓ.

Hores: 60

Contingut de l'acció formativa (d'acord amb el programa formatiu del Servicio Público de Empleo Estatal):

Contenidos teóricos

1. Reseña histórica
2. Principios físicos del conductor de fibra óptica
3. Principios químicos del conductor de fibra óptica
4. Perfiles de los conductores de fibra óptica
5. Parámetros y métodos de medición de los conductores de fibras ópticas
6. Conformación del conductor de fibras ópticas
7. Fabricación de conductores de fibras ópticas
8. Cables conductores de fibras ópticas
9. Configuración de los conductores de fibras ópticas
10. Técnica de equipos y Sistemas
11. Configuraciones de Redes
12. Conversión electro-óptica de señales
13. Componentes de los conductores de fibras ópticas
14. Sistemas de transmisión con cables de fibras ópticas
15. Interpretar esquemas, planos y simbología estándar.
16. Manejo de aparatos de medida (analizadores de línea, analizadores de protocolos, etc..)
17. Estructura general de la red telefónica.
18. Medios de transmisión.
19. Líneas de transmisión (características físicas y eléctricas).
20. Clasificación, características, aplicaciones e instalación de los medios de transmisión
21. Normativa de seguridad e higiene
22. Normativa de calidad (Compatibilidad electromagnética, R.E.B.T., etc..)

Prácticas

23. Medida de parámetros característicos en cable y fibra óptica.
24. Tendido de conductores, tanto de cable como de fibra óptica.
25. Realización de conexiones de cable y fibra óptica.
26. Soldadura de fibra óptica.



Módulo: Conductores de Fibras Ópticas



Formació Ocupacional

Pàgina 3 de 43

GESTIÓ DE LA PROGRAMACIÓ:

	Realitzat per
Nom i cognoms	FELIPE CUERPO MOLINA
Càrrec	Professor
Data	19/06/2010
Signatura	

1.- PROFESSOR

Felipe Cuerpo Molina

2. LLIBRE I/O MATERIAL

Apunts de classe.

Llibres de consulta : Apunts



1. RESEÑA HISTÓRICA:

Desde la más remota antigüedad se ha utilizado la luz para la transmisión de información. Esto ocurría en forma de fogatas para señales. Hoy en día se puede encontrar este tipo de transmisión de información en la marina, los faros, los semáforos y las luces indicadoras de los tableros de maquinarias.

Desde hace siglos el hombre ha pensado en la construcción de sistemas que le permitirán transmitir mensajes por medio de pulsos luminosos cubriendo grandes distancias. Así Claude Chappé construyó en Francia, alrededor del año 1790, un sistema de telégrafo óptico que consistía en una cadena de torres con sistemas de señalizaciones móviles. Con este sistema se transmitían informaciones cubriendo unos 200 km en solamente 15 minutos y sólo se dejó de utilizar cuando fue reemplazado por el telégrafo eléctrico.

En el año 1889, el norteamericano Alexander Graham Bell desarrolló el "photophon" con el cual se podían transmitir señales de alta voz con ayuda de la luz. Esta idea, sin embargo, no encontró aplicaciones prácticas, pues las influencias climáticas y la visibilidad alteraban de forma inadmisible la transmisión.

En 1870, o sea antes del descubrimiento de Bell, el físico inglés John Tyndall señaló una solución del problema demostrando que un chorro de agua era capaz de conducir la luz, hubo que esperar. Su experimento se basaba en el "Principio de la Reflexión Total" que se utiliza actualmente en los conductores de fibra óptica.

Después de los primeros experimentos de Bell sobre modulación de la luz y de Tyndall en el campo de la transmisión de la luz, hubo que esperar hasta el año 1934 cuando el norteamericano Norman R. French obtuvo una patente que cubría un sistema telefónico óptico. En la misma describía que las señales de voz eran transmitidas por una red de conductores ópticos (formados por varillas rígidas de vidrio u otro material similar) con un pequeño coeficiente de atenuación para la respectiva longitud de onda de servicio.

La relación práctica de este concepto se logró 25 años más tarde. Primero se encontró una fuente de luz adecuada para ser utilizada como emisor: en el año 1958, los Premios Nobel Arthur Schawlow y Charles H. Townes desarrollaron el láser, utilizado con éxito por primera vez por Theodor H. Maiman en 1960.

En 1962 se descubrió que existía la posibilidad de producir un láser con materiales semiconductores. Paralelamente se desarrollaron elementos receptores en forma de fotodiodos de materiales semiconductores. Quedaba únicamente por encontrar un medio de transmisión adecuado.

En principio se propusieron conductores circulares huecos y espejados con un complicado sistema de lentes. En Inglaterra, en el año 1966, Charles K. Kao y George A. Hockham sugirieron utilizar fibras de vidrio como conductores y cubrir distancias apreciables, debían tener una atenuación máxima del orden de los 20 dB/km contra los aproximadamente 1000 dB/km que tenían en el año 1965.

Ya en los años 50, en la técnica médica se utilizaban fibras de vidrio para la transmisión directa de imágenes sobre distancias muy cortas.



Módulo: Conductores de Fibras Ópticas



Formació Ocupacional

Pàgina 5 de 43

En 1970, la empresa Corning Glass Works fabricó en los EEUU cables de fibras ópticas con un perfil escalonado y obtuvo valores de atenuación inferiores a los 20 dB/km con una longitud de onda de 633 nm.

En 1972 se lograron valores de atenuación de 4 dB/km con cables de fibras ópticas de perfil gradual.

Hoy en día, el estado de la técnica permite obtener atenuaciones de 0,2 dB/km con longitudes de onda de 1550 nm en cables de fibras ópticas monomodo.

Simultáneamente se mejoraron considerablemente la sensibilidad, la potencia y la vida útil de los elementos receptores y transmisores. Asimismo, gracias a una adecuada técnica para los cables, los conectores y los empalmes de los cables de fibras ópticas, se logró introducir sin inconvenientes el nuevo medio de transmisión.

Los primeros cables de fibras ópticas para telefonía se pusieron en funcionamiento en barcos de la armada de los EEUU en 1973.

El primer sistema de cables de fibras ópticas se ensayó en 1976 en la planta de la Western Electric de Atlanta (EEUU). Un año después se efectuaron los primeros ensayos de campo: la Bell Systems con una instalación de 2,5 km en Chicago y la General Telephone, con una de 9 km en Long Beach.

La primera empresa que suministró en EEUU cables de fibras ópticas monomodo a una compañía telefónica (Nueva York 1983) fue el Siecor Corporation, empresa fundada conjuntamente por Siemens y Corning Glass Works. En el año 1988 se logró instalar el primer cable submarino de fibras ópticas (TAT-8) en el Atlántico.

En el año 1976 Siemens experimentó en Munich con un tramo de 2,1 km e instaló en el año 1977 en Berlin el primer trayecto de fibras ópticas para la Deutsche Telekom AG (empresa telefónica de Alemania).

A partir de 1978 se aplica la nueva tecnología a nivel mundial utilizando al principio los cables de fibras multimodo. Hoy en día, con la técnica de cables de Siemens se están instalando anualmente más de 7000 000 km de cables de fibras ópticas monomodo al nivel mundial.



2. Principios físicos del conductor de fibra óptica

Naturaleza de la luz

La luz es una forma de energía que emiten los cuerpos luminosos y que percibimos mediante el sentido de la vista.

La luz

La luz emitida por las fuentes luminosas es capaz de viajar a través de materia o en ausencia de ella, aunque no todos los medios permiten que la luz se propague a su través. Desde este punto de vista, las diferentes sustancias materiales se pueden clasificar en opacas, traslúcidas y transparentes. Aunque la luz es incapaz de traspasar las opacas, puede atravesar las otras. Las sustancias transparentes tienen, además, la propiedad de que la luz sigue en su interior trayectorias definidas. Éste es el caso del agua, el vidrio o el aire. En cambio, en las traslúcidas la luz se dispersa, lo que da lugar a que a través de ellas no se puedan ver las imágenes con nitidez. El papel vegetal o el cristal esmerilado constituyen algunos ejemplos de objetos traslúcidos.

La naturaleza de la luz ha sido objeto de la atención de filósofos y científicos desde tiempos remotos. Ya en la antigua Grecia se conocían y se manejaban fenómenos y características de la luz tales como la reflexión, la refracción y el carácter rectilíneo de su propagación, entre otros. No es de extrañar entonces que la pregunta ¿qué es la luz? se planteara como una exigencia de un conocimiento más profundo. Los griegos primero y los árabes después sostuvieron que la luz es una emanación del ojo que se proyecta sobre el objeto, se refleja en él y produce la visión. El ojo sería, pues, el emisor y a la vez el receptor de los rayos luminosos.

A partir de esa primera explicación conocida, el desarrollo histórico de las ideas sobre la naturaleza de la luz constituye un ejemplo de cómo evolucionan las teorías y los modelos científicos a medida que, por una parte, se consolida el concepto de ciencia y, por otra, se obtienen nuevos datos experimentales que ponen a prueba las ideas disponibles.

El modelo corpuscular de Newton

Isaac Newton (1642-1727) se interesó vivamente en los fenómenos asociados a la luz y los colores. A mediados del siglo XVII, propuso una teoría o modelo acerca de lo que es la luz, cuya aceptación se extendería durante un largo periodo de tiempo. Afirmaba que el comportamiento de la luz en la reflexión y en la refracción podría explicarse con sencillez suponiendo que aquélla consistía en una corriente de partículas que emergen, no del ojo, sino de la fuente luminosa y se dirigen al objeto a gran velocidad describiendo trayectorias rectilíneas. Empleando sus propias palabras, la luz podría considerarse como «multitudes de inimaginables pequeños y velocísimos corpúsculos de varios tamaños».

Al igual que cualquier modelo científico, el propuesto por Newton debería resistir la prueba de los hechos experimentales entonces conocidos, de modo que éstos pudieran ser interpretados de acuerdo con el modelo. Así, explicó la reflexión luminosa asimilándola a los fenómenos de rebote que se producen cuando partículas elásticas chocan contra una pared rígida. En efecto, las leyes de la reflexión luminosa resultaban ser las mismas que las de este tipo de colisiones.



Con el auxilio de algunas suposiciones un tanto artificiales, consiguió explicar también los fenómenos de la refracción, afirmando que cerca de la superficie de separación de dos medios transparentes distintos, los corpúsculos luminosos sufren unas fuerzas atractivas de corto alcance que provocan un cambio en la dirección de su propagación y en su velocidad. Aunque con mayores dificultades que las habidas para explicar la reflexión, logró deducir las leyes de la refracción utilizando el modelo corpuscular.

El modelo ondulatorio de Huygens

El físico Christian Huygens (1629-1695) dedicó sus esfuerzos a elaborar una teoría ondulatorio acerca de la naturaleza de la luz que con el tiempo vendría a ser la gran rival de la teoría corpuscular de su contemporáneo Newton.

Era un hecho comúnmente aceptado en el mundo científico de entonces, la existencia del «éter cósmico» o medio sutil y elástico que llenaba el espacio vacío. En aquella época se conocían también un buen número de fenómenos característicos de las ondas.

En todos los casos, para que fuera posible su propagación debía existir un medio material que hiciera de soporte de las mismas. Así, el aire era el soporte de las ondas sonoras y el agua el de las ondas producidas en la superficie de un lago.

Huygens supuso que todo objeto luminoso produce perturbaciones en el éter, al igual que un silbato en el aire o una piedra en el agua, las cuales dan lugar a ondulaciones regulares que se propagan a través en todas las direcciones del espacio en forma de ondas esféricas. Además, según Huygens, cuando un punto del éter es afectado por una onda se convierte, al vibrar, en nueva fuente de ondas.

Estas ideas básicas que definen su modelo ondulatorio para la luz le permitieron explicar tanto la propagación rectilínea como los fenómenos de la reflexión y la refracción, que eran, por otra parte, comunes a los diferentes tipos de ondas entonces conocidas. A pesar de la mayor sencillez y el carácter menos artificioso de sus suposiciones, el modelo de Huygens fue ampliamente rechazado por los científicos de su época.

La enorme influencia y prestigio científico adquirido por Newton se aliaron con la falta de un lenguaje matemático adecuado, en contra de la teoría de Huygens para la luz.

El físico inglés Thomas Young (1772-1829) publicó en 1781 un trabajo titulado «Esbozos de experimentos e investigaciones respecto de la luz y el sonido». Utilizando como analogía las ondas en la superficie del agua, descubrió el fenómeno de interferencias luminosas, según el cual cuando dos ondas procedentes de una misma fuente se superponen en una pantalla, aparecen sobre ella zonas de máxima luz y zonas de oscuridad en forma alternada.

El hecho de que, en diferentes zonas, luz más luz pudiese dar oscuridad, fue explicado por Young en base a la teoría ondulatorio, suponiendo que en ellas la cresta de una onda coincidía con el valle de la otra, por lo que se producía una mutua destrucción.

Aunque las ideas de Young tampoco fueron aceptadas de inmediato, el respaldo matemático efectuado por Agustín Fresnel (1788-1827) catorce años después, consiguió poner fuera de toda duda la validez de las ideas de Young sobre tales fenómenos, ideas que se apoyaban en el modelo ondulatorio propuesto por Huygens.

El modelo corpuscular era incapaz de explicar las interferencias luminosas. Tampoco podía explicar los fenómenos de difracción en los cuales la luz parece ser capaz de bordear los



obstáculos o doblar las esquinas como lo demuestra la existencia de una zona intermedia de penumbra entre las zonas extremas de luz y sombra. Las ideas de Huygens prevalecían, al fin, sobre las de Newton tras una pugna que había durado cerca de dos siglos.

La luz como onda electromagnética

El físico escocés James Clerk Maxwell en 1865 situó en la cúspide las primitivas ideas de Huygens, aclarando en qué consistían las ondas luminosas. Al desarrollar su teoría electromagnética demostró matemáticamente la existencia de campos electromagnéticos que, a modo de ondas, podían propagarse tanto por el espacio vacío como por el interior de algunas sustancias materiales.

Maxwell identificó las ondas luminosas con sus teóricas ondas electromagnéticas, prediciendo que éstas deberían comportarse de forma semejante a como lo hacían aquéllas. La comprobación experimental de tales predicciones vino en 1888 de la mano del físico alemán Henrich Hertz, al lograr situar en el espacio campos electromagnéticos viajeros, que fueron los predecesores inmediatos de las actuales ondas de radio. De esta manera se abría la era de las telecomunicaciones y se hacía buena la teoría de Maxwell de los campos electromagnéticos.

La diferencia entre las ondas de radio (no visibles) y las luminosas tan sólo radicaba en su longitud de onda, desplazándose ambas a la velocidad de la luz, es decir, a 300 000 km/s. Posteriormente una gran variedad de ondas electromagnéticas de diferentes longitudes de onda fueron descubiertas, producidas y manejadas, con lo que la naturaleza ondulatorio de la luz quedaba perfectamente encuadrada en un marco más general y parecía definitiva. Sin embargo, algunos hechos experimentales nuevos mostrarían, más adelante, la insuficiencia del modelo ondulatorio para describir plenamente el comportamiento de la luz.

Los fotones de Einstein

Max Planck (1858-1947), al estudiar los fenómenos de emisión y absorción de radiación electromagnética por parte de la materia, forzado por los resultados de los experimentos, admitió que los intercambios de energía que se producen entre materia y radiación no se llevaba a cabo de forma continua, sino discreta, es decir, como a saltos o paquetes de energía, lo que Planck denominó cuantos de energía.

Esta era una idea radicalmente nueva que Planck intentó conciliar con las ideas imperantes, admitiendo que, si bien los procesos de emisión de luz por las fuentes o los de absorción por los objetos se verificaba de forma discontinua, la radiación en sí era una onda continua que se propagaba como tal por el espacio.

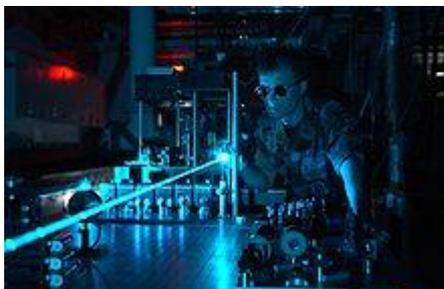
Así las cosas, Albert Einstein (1879-1955) detuvo su atención sobre un fenómeno entonces conocido como efecto fotoeléctrico. Dicho efecto consiste en que algunos metales como el cesio, por ejemplo, emiten electrones cuando son iluminados por un haz de luz.

El análisis de Einstein reveló que ese fenómeno no podía ser explicado desde el modelo ondulatorio, y tomando como base la idea de discontinuidad planteada con anterioridad por Planck, fue más allá afirmando que no sólo la emisión y la absorción de la radiación se verifica de forma discontinua, sino que la propia radiación es discontinua.

Estas ideas supusieron, de hecho, la reformulación de un modelo corpuscular. Según el modelo de Einstein la luz estaría formada por una sucesión de cuantos elementales que a modo de paquetes de energía chocarían contra la superficie del metal, arrancando de sus

átomos los electrones más externos. Estos nuevos corpúsculos energéticos recibieron el nombre de fotones (fotos en griego significa luz).

Fotón (γ)



Fotones emitidos en un rayo coherente por un láser

La luz ¿onda o corpúsculo?

La interpretación efectuada por Einstein del efecto fotoeléctrico fue indiscutible, pero también lo era la teoría de Maxwell de las ondas electromagnéticas.

Ambas habían sido el producto final de la evolución de dos modelos científicos para la luz, en un intento de ajustarlos con más fidelidad a los resultados de los experimentos. Ambos explican la realidad, a pesar de lo cual parecen incompatibles.

Sin embargo, cuando se analiza la situación resultante prescindiendo de la idea de que un modelo deba prevalecer necesariamente sobre el otro, se advierte que de los múltiples fenómenos en los que la luz se manifiesta, unos, como las interferencias o la difracción, pueden ser descritos únicamente admitiendo el carácter ondulatorio de la luz, en tanto que otros, como el efecto fotoeléctrico, se acoplan sólo a una imagen corpuscular. No obstante, entre ambos se obtiene una idea más completa de la naturaleza de la luz. Se dice por ello que son complementarios.

Las controversias y los antagonismos entre las ideas de Newton y Huygens han dejado paso, al cabo de los siglos, a la síntesis de la física actual. La luz es, por tanto, onda, pero también corpúsculo, manifestándose de uno u otro modo en función de la naturaleza del experimento o del fenómeno mediante el cual se la pretende caracterizar o describir.

El Experimentum Crucis de Newton

Newton había encontrado ya que la luz blanca es una luz compuesta, pero deseaba demostrar de una forma indiscutible que los colores que emergían del prisma no eran modificaciones de la luz blanca, como sugerían sus adversarios científicos. Para conseguirlo ideó un «experimentum crucis» o experimento crucial que consistía, en esencia, en someter a cada uno de los colores obtenidos por la acción de un primer prisma, a un segundo prisma, y comprobar por una parte que no podía descomponerse más y por otra su diferente comportamiento en cuanto al grado de desviación sufrida por efecto del prisma. Newton resume sus resultados en los siguientes términos: «En primer lugar descubrí que los rayos que son más refractados que otros de la misma incidencia exhiben colores púrpuras y violetas, mientras que aquellos que exhiben el rojo son menos retractados, y los azules, verdes y amarillos poseen refracciones intermedias... En segundo y a la inversa, descubrí que rayos de igual incidencia son gradualmente más y más refractados según su disposición a exhibir colores en este orden: rojo, amarillo, verde, azul y violeta con todos sus colores intermedios».

El experimento de Young

En su trabajo titulado «Esbozos de experimentos e investigaciones respecto al fondo y a la luz», Thomas Young describe su propio experimento de interferencias luminosas, conocido también como de las dos rendijas. Al igual que Newton, Young empleó la luz solar iluminando de forma controlada un cuarto oscuro.

Dispuso en su interior dos pantallas. Con la primera cubrió la ventana y en ella efectuó dos orificios que permitían el paso de la luz. Sobre la segunda recogía la luz proyectada. Modificando el tamaño de los orificios observó que si éstos eran grandes se formaban dos manchas luminosas y separadas en la segunda pantalla. Pero si los orificios eran suficientemente pequeños, las dos manchas de luz se extendían y sus mitades próximas se superponían una sobre la otra dando lugar a una serie de bandas brillantes separadas por otras oscuras.

Este fenómeno de interferencias luminosas podía ser explicado a partir de la teoría ondulatoria de la luz propuesta por Huygens. Cuando las ondas S y S' procedentes de los focos O y O' respectivamente, llegaban a la pantalla se superponían dando lugar a esa imagen compuesta observada por Young. Dicha superposición podía ser de dos tipos extremos, o bien los valles de la onda S coincidían con los valles de la onda S' (y análogamente para las crestas) o bien un valle de la onda S coincidía en la segunda pantalla con una cresta de la onda S' (y viceversa).

En el primer caso se produciría un refuerzo de la perturbación, lo que podría explicar la existencia de bandas brillantes en esa zona común; la interferencia luminosa habría sido constructiva. En el segundo se produciría una anulación mutua de las perturbaciones al estar dirigidas en sentidos opuestos; la interferencia habría sido destructiva dando lugar a esas zonas oscuras observadas experimentalmente.

La coincidencia o la oposición de las ondas al llegar a la segunda pantalla dependería de las diferencias de distancias entre el punto de confluencia y los focos O y O' respectivos, lo que explicaría que las bandas brillantes y oscuras se alternasen en la pantalla al desplazarnos desde el punto central equidistante de los dos orificios, hacia los extremos de la pantalla.

La luz es una radiación electromagnética que tiene como característica principal que el ser humano y los animales son capaces de percibirla. La partícula natural más pequeña causante de la radiación electromagnética es el fotón.

La energía de un fotón es:

$$E = \frac{hc}{\lambda}$$

J·s

donde es la constante de Plank y su valor es: $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$

de la luz.

c es la velocidad de la luz: $3 \cdot 10^8$ m/s i λ es la longitud de onda

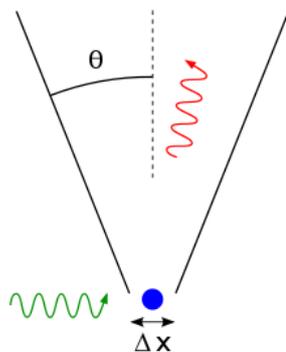
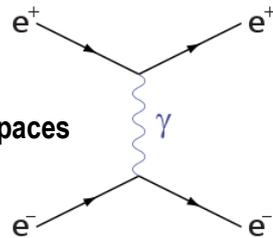
Y la cantidad de movimiento del fotón es: $p = \hbar \cdot k = h \cdot \lambda$

El fotón fue llamado originalmente por Albert Einstein[3] "cuanto de luz" (en alemán: das Lichtquant). El nombre moderno "fotón" proviene de la palabra griega φῶς (que se transcribe como phôs), que significa luz, y fue acuñado en 1926 por el físico Gilbert N. Lewis, quien publicó una teoría especulativa[7] en la que los fotones no se podían "crear ni destruir". Aunque la teoría de Lewis nunca fue aceptada —siendo contradicha en muchos

experimentos— el nuevo nombre "fotón" fue adoptado enseguida por la mayoría de los científicos.

En física, el fotón se representa normalmente con el símbolo γ (la letra griega gamma). Este símbolo proviene posiblemente de los rayos gamma, descubiertos y bautizados con ese nombre en 1900 por Villard[8] [9] y que resultaron ser una forma de radiación electromagnética según demostraron Rutherford y Andrade[10] en 1914. En química e ingeniería óptica, los fotones se simbolizan habitualmente por $h\nu$, que representa también la energía asociada a un fotón, donde h es la constante de Planck y la letra griega ν es la frecuencia de la partícula. Con mucha menor asiduidad, el fotón también se representa por hf , siendo f , en este caso, la frecuencia.

Por lo tanto como los fotones tienen cantidad de movimiento, nosotros somos capaces de desviar la trayectoria de un objeto o partícula con masa iluminándolo con luz.



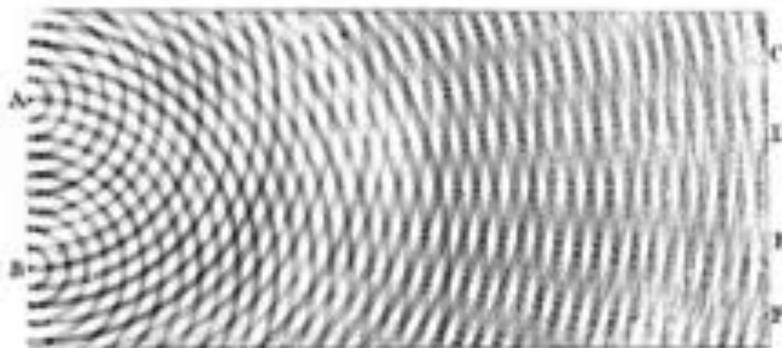
Este fenómeno tiene como consecuencia el principio de incertidumbre de Heisenberg

Este Científico concluyó que era imposible determinar la posición exacta de partículas muy pequeñas, ya que para conocer cual es su posición tenemos que iluminar el objeto, pero cada vez que le iluminamos, le estamos desviando de su trayectoria.

Las características físicas de los fotones:

- El fotón no tiene masa
- El fotón no tiene carga eléctrica
- El fotón se puede determinar a partir de su longitud de onda y su dirección

Comportamiento de onda

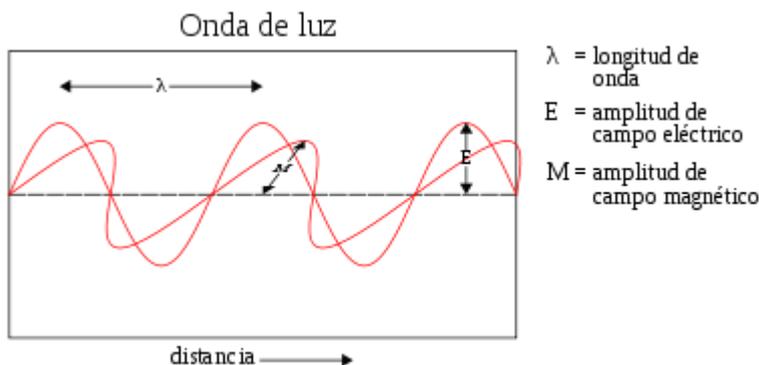


El experimento de la doble rendija de Thomas Young en 1805 demostró que la luz se comportaba como una onda, lo que ayudó a rechazar las anteriores teorías corpusculares.

[Video 1](#), [Video 2](#)

En la mayoría de las teorías hasta el siglo XVIII, la luz se consideraba formada por partículas. El hecho de que los modelos de partículas no pudieran explicar fenómenos como la difracción, la refracción o la birrefringencia de la luz, hizo que René Descartes en 1637,[12] Robert Hooke en 1665,[13] y Christian Huygens en 1678,[14] propusieran teorías ondulatorias para la luz; sin embargo, los modelos de partículas permanecieron vigentes, principalmente debido a la influencia de Isaac Newton.[15]

A principios del siglo XIX Thomas Young y August Fresnel demostraron con claridad que los fenómenos de interferencia y difracción se daban también para la luz, y para 1850 los modelos ondulatorios habían sido generalmente aceptados.[16] En 1865, las predicciones de Maxwell[17] sobre la naturaleza de la luz como onda electromagnética, que serían posteriormente confirmadas experimentalmente por Heinrich Hertz en 1888,[18] parecieron significar el final del modelo de partículas.



En 1900, el modelo teórico de la luz de Maxwell, como dos campos oscilatorios (uno eléctrico y otro magnético) pareció completo. Sin embargo, diversas observaciones no podían explicarse según los modelos de radiación electromagnética, lo que llevó a la conclusión de que la energía lumínica estaba empaquetada en cuantos descritos por $E = h\nu$. Experimentos posteriores mostraron que estos cuantos de luz también poseían momento lineal y en consecuencia podían ser considerados partículas. Nació así el concepto de fotón, que llevaría a un conocimiento más profundo de los campos eléctricos y magnéticos..

Sin embargo, la teoría ondulatoria de Maxwell no explicaba todas las propiedades de la luz. Predecía que la energía de una onda luminosa dependía solamente de su intensidad, no de su frecuencia, pero diversos experimentos demostraron que la energía aportada por la luz a los átomos dependía sólo de su frecuencia, y no de su intensidad. Por ejemplo, algunas reacciones químicas eran provocadas únicamente por luz con una frecuencia mayor que un valor determinado; si la frecuencia no alcanzaba dicho valor, la reacción no se producía, independientemente de la intensidad que tuviera la luz. De forma similar, se podían extraer electrones de una placa metálica iluminándola con radiación de una frecuencia suficientemente alta (efecto fotoeléctrico), y la energía con la que los electrones abandonaban la placa era función únicamente de la frecuencia de la luz incidente, y no de su intensidad.

Al mismo tiempo, las investigaciones realizadas a lo largo de cuatro décadas (1860-1900) por varios investigadores[19] sobre la radiación de un cuerpo negro, culminaron con la hipótesis de Max Planck,[20] [21] que proponía que la energía de cualquier sistema que absorbe o emite radiación electromagnética de frecuencia ν , era un número entero de veces la energía de un cuanto: $E = h\nu$. Como demostró Albert Einstein,[3] [4] debía aceptarse alguna forma de

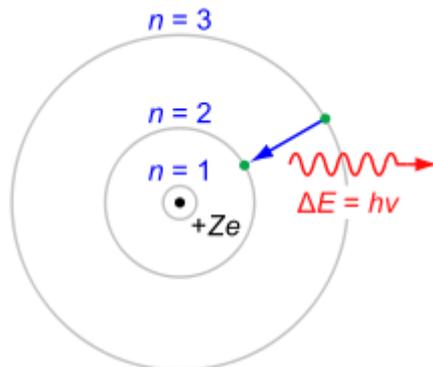
cuantización de la energía para explicar el equilibrio térmico observado entre la materia y la radiación electromagnética. Por esta explicación del efecto fotoeléctrico, Einstein recibió el Premio Nobel de física en 1921.

Puesto que la teoría de Maxwell permitía todas las posibles energías de radiación electromagnética, la mayoría de los físicos asumieron inicialmente que la cuantización de la energía era el resultado de alguna restricción desconocida sobre la materia que absorbía o emitía la radiación. En 1905, Einstein fue el primero en proponer que la cuantización de la energía era una propiedad intrínseca de la radiación electromagnética.[3] Aunque aceptaba la validez de la teoría de Maxwell, Einstein apuntó que las anomalías observadas en muchos experimentos podían explicarse si la energía de una onda de luz maxweliana estuviera localizada en unos puntos cuánticos que se movieran independientemente unos de otros, incluso aunque la onda se difundiera de forma continua por el espacio.[3] En 1909[4] y 1916[6] Einstein demostró que si era aceptada la teoría de Planck sobre la radiación de los cuerpos negros, los cuantos de energía tenían también que poseer momento lineal

$p = h / \lambda$, con lo que los convertía en partículas en todo el sentido de la palabra.

El momento lineal de los fotones fue observado experimentalmente por Arthur Compton,[22] quien por este descubrimiento recibió el Premio Nobel en 1927. La pregunta fundamental entonces paso a ser: ¿cómo unificar la teoría ondulatoria de Maxwell con la naturaleza corpuscular observada experimentalmente? La respuesta a esta pregunta mantuvo ocupado a Einstein el resto de su vida,[23] y fue resuelta dentro de la electrodinámica cuántica y de su sucesor, el modelo estándar de la física de partículas.

Primeras objeciones



Hasta 1923 la mayoría de los físicos eran reacios a aceptar que la radiación electromagnética fuera intrínsecamente cuantizable. En su lugar, trataron de justificar el comportamiento del fotón cuantizando la materia, como en el modelo de Bohr del átomo de hidrógeno (mostrado aquí). Aunque todos los modelos semiclásicos del átomo han quedado descartados por la experimentación, permitieron la evolución hacia la mecánica cuántica.

Las predicciones de Einstein de 1905 fueron verificadas experimentalmente de varias formas dentro de las dos primeras décadas del siglo XX, como reseñó Robert Millikan en su conferencia por la obtención del Premio Nobel.[24] Sin embargo, antes de que los experimentos de Compton[22] mostraran que los fotones poseían un momento lineal proporcional a su frecuencia (1922), la mayoría de los físicos eran reacios a creer que la radiación electromagnética pudiera estar formada por partículas. (véanse por ejemplo las conferencias por la obtención del Nobel de Wien,[19] Planck[21] y Millikan.[24]). Estas reticencias eran comprensibles dado el éxito y verosimilitud del modelo ondulatorio de

Maxwell. Por ello, la mayoría de los físicos sostenían, en su lugar, que la cuantización de la energía era consecuencia de alguna restricción desconocida sobre la materia que absorbía o emitía radiación. Niels Bohr, Arnold Sommerfeld y otros, desarrollaron modelos atómicos con niveles discretos de energía que pudieran explicar cualitativamente las finas líneas espectrales y la cuantización de la energía observada en la emisión y absorción de la luz por parte de los átomos. Estos modelos coincidían muy bien con el espectro del hidrógeno, pero no con el de otros elementos. Únicamente el experimento de Compton sobre la dispersión de fotones por un electrón libre (el cual no podía tener niveles de energía, al no tener una estructura interna) fue capaz de convencer a la mayoría de los investigadores sobre el hecho de que la propia luz estuviera cuantizada.

Incluso después del experimento de Compton, Bohr, Hendrik Kramers y John Slater hicieron un último intento por preservar el modelo de campo electromagnético continuo de Maxwell, que se conoció como el modelo BKS[25] Para justificar los datos disponibles, había que efectuar dos hipótesis drásticas:

- Energía y momento lineal se conservan sólo en promedio en las interacciones entre materia y radiación, no en los procesos elementales como la absorción y la emisión. Esto permite reconciliar los cambios discontinuos de la energía del átomo (salto entre niveles de energía) con la emisión continua de energía en forma de radiación.
- La causalidad se abandona. Por ejemplo las emisiones espontáneas son simplemente emisiones inducidas por un campo electromagnético virtual.

Sin embargo, experimentos de Compton refinados mostraron que el par energía-momento lineal se conservaba extraordinariamente bien en los procesos elementales, y también que la excitación del electrón y la generación de un nuevo fotón en la dispersión de Compton obedecían a una causalidad del orden de 10 ps. Como consecuencia, Bohr y sus colegas dieron a su modelo «un funeral tan honorable como fue posible».[23] En cualquier caso, el modelo BKS inspiró a Werner Heisenberg en su desarrollo[26] de la mecánica cuántica.

Unos cuantos de físicos persistieron[27] en el desarrollo de modelos semiclásicos, en los cuales la radiación electromagnética no estaba cuantizada, aunque la materia obedecía las leyes de la mecánica cuántica. Aunque la evidencia de los fotones, a partir de los experimentos físicos y químicos, era aplastante hacia 1970, esta evidencia no podía considerarse absolutamente definitiva; puesto que recaía en la interacción de la luz con la materia, una teoría de la materia suficientemente complicada podía explicar la evidencia. Sin embargo, todas las teorías semiclásicas fueron refutadas definitivamente en los años 70 y 80 del siglo XX por elegantes experimentos de correlación de fotones.[28] [29] [30] Con ellos, se consideró probada la hipótesis de Einstein que indicaba que la cuantización era una propiedad intrínseca de la luz.

Dualidad onda-corpúsculo y principio de incertidumbre

Artículos principales: Dualidad onda corpúsculo y Principio de incertidumbre

Los fotones, como todos los objetos cuánticos, presentan tanto propiedades ondulatorias como corpusculares. Su naturaleza dual onda-partícula puede ser difícil de visualizar.

El fotón muestra sus propiedades ondulatorias en fenómenos como la difracción y las interferencias.

Por ejemplo, en un experimento de la doble rejilla, un fotón individual pasando a través de éstas incidiría en la pantalla con una distribución de probabilidad dada por sus patrones de

interferencia determinados por las ecuaciones de Maxwell.[31] Sin embargo, los experimentos confirman que el fotón no es un corto pulso de radiación electromagnética; no se dispersa al propagarse, ni se divide al encontrarse con un divisor de haz. En vez de esto, el fotón se comporta como una partícula puntual, puesto que es absorbido o emitido en su conjunto por sistemas arbitrariamente pequeños, sistemas mucho más pequeños que sus longitudes de onda, tales como un núcleo atómico ($\approx 10\text{--}15$ m de diámetro) o incluso un electrón. Sin embargo, el fotón no es una partícula puntual cuya trayectoria sea determinada probabilísticamente por el campo electromagnético, según fue concebido por Einstein y otros; esa hipótesis fue también refutada por los experimentos de correlación de fotones ya mencionados anteriormente. De acuerdo con los conocimientos actuales, los propios campos electromagnéticos son producidos por fotones, los cuales a su vez resultan de una simetría de gauge local y las leyes de la teoría cuántica de campos.

El espectro electromagnético.

Desde hace casi 100 años se utilizan las ondas electromagnéticas para la transmisión de informaciones. Su utilidad se debe a que para propagarse no requieren necesariamente de un conductor metálico sino que pueden hacerlo con elevada velocidad, tanto en el vacío como en un medio dieléctrico, o sea un material no conductor.

La figura 2.1 brinda una reseña del espectro electromagnético y su utilización. La luz visible solamente ocupa la reducida zona que va desde los 380 nm (violeta) hasta los 780 nm (rojo). A la misma se le añade la radiación ultravioleta, con longitudes de ondas menores y la zona de radiación infrarroja, con longitudes de ondas mayores.

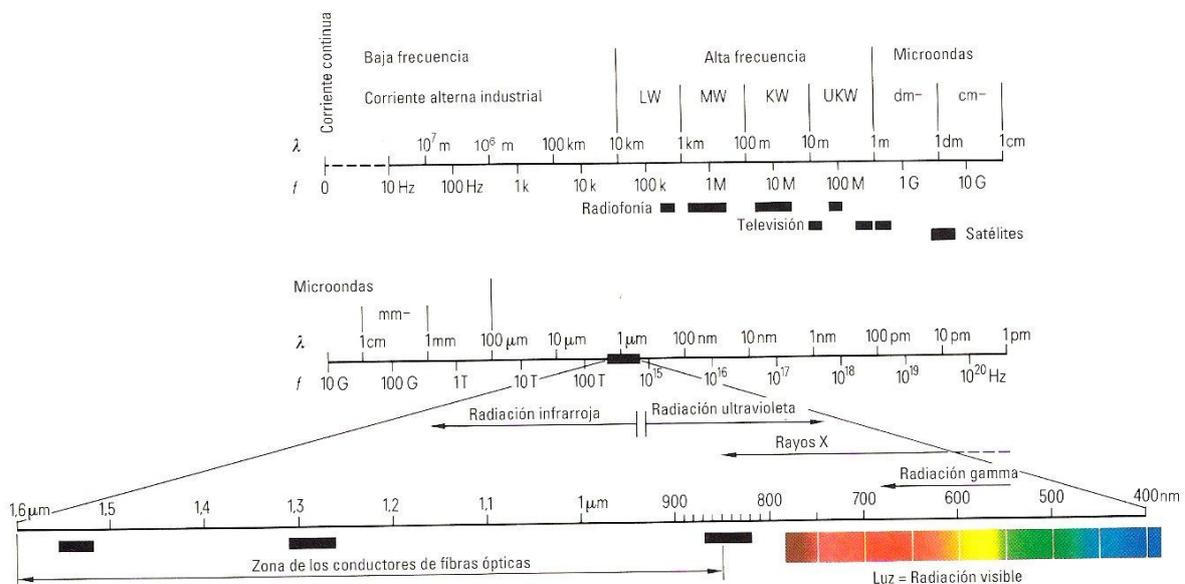


Fig. 2.1 Espectro de las ondas electromagnéticas

En las telecomunicaciones por fibras ópticas se utilizan las longitudes de onda del infrarrojo cercano o sea de 800 a 1600 nm, siendo los valores preferidos los de 850, 1300 y 1550 nm.

En el vacío las ondas electromagnéticas se propagan con la velocidad de la luz:

$$C_0 = 299792,458 \text{ km/s}$$

Para la propagación en el aire se puede tomar con suficiente aproximación el valor redondo de:

$$C_0 = 300000 \text{ km/s} = 3 \cdot 10^5 \text{ km/s} = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

La onda electromagnética y por ende la luminosa es una onda transversal en un medio sin pérdidas e infinitamente extendido. Su campo eléctrico y magnético oscila perpendicularmente a la dirección de propagación.

Si el campo eléctrico o el campo magnético oscilan en un plano, el extremo del vector de intensidad de campo eléctrico o magnético describe una línea recta. De una onda de este tipo se dice que está polarizada linealmente. Si el extremo del vector describe una circunferencia o, en general, una elipse se habla de luz polarizada circular o elíptica.

2.2 Conceptos básicos de las ondas

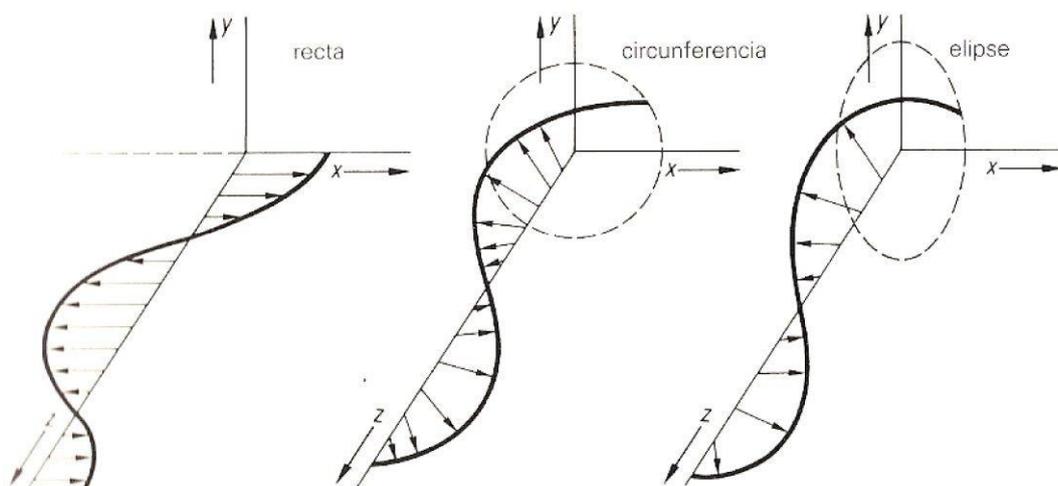


Fig. 2.2 Clases de polarización

Conceptos básicos de una onda:

Como concepto general se considera una onda como la propagación de un estado o una excitación en una sustancia, sin que ello implique necesariamente transportar la propia masa o materia.

En caso de una onda luminosa, el estado es el campo electromagnético que se propaga en una sustancia transparente, el medio óptico.

La forma más simple de describir la variación de esta onda en el tiempo y el espacio es por medio de una función senoidal. Así, para la desviación x de una onda plana que se propaga en la dirección z :

$$x = A \cdot \text{sen}(\omega t - kz) = A \cdot \text{sen} 2\pi (t/T - z/\lambda)$$

x ---- Desviación de la onda plana

A ---- Amplitud

ω ---- Frecuencia angular en s^{-1}

- .t ----- Tiempo
- .k ----- Número de onda en m^{-1}
- .z ----- Longitud en m en la dirección z
- T ----- Periodo de la oscilación en s
- . λ ----- Longitud de onda en m

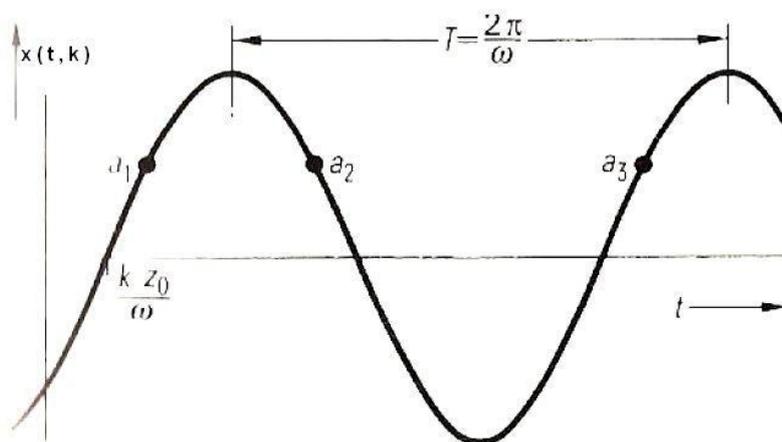


Fig. 2.3
Onda armónica, plana,
inmovilizada en z_0

Con la amplitud A se describe la máxima desviación de la onda fuera de su posición de reposo.

El valor entre paréntesis ($\omega t - k z$) se denomina ángulo de fase de la onda o en forma abreviada fase de la onda. Este ángulo de fase ϕ se mide en radianes.

$$1 \text{ rad} = 360 / 2\pi = 57,295^\circ.$$

Para ilustrar lo anterior, se representa una onda plana detenida en $z = z_0$ y como función del tiempo t .

Se observa que los puntos oscilantes a_1 y a_3 se hallan en la misma fase de oscilación con esa diferencia temporal de 2π . En cambio, el punto a_2 , si bien tiene la misma elongación, se halla en una fase diferente.

El valor de $\omega = 2\pi f$

Donde f es la frecuencia en Hz

El tiempo en el que transcurre una oscilación completa se denomina **periodo** T de la oscilación.

La frecuencia f es inversamente proporcional al periodo T o sea:

$$f = 1 / T$$

En la siguiente tabla podemos ver las unidades derivadas de la frecuencia.

Unidad	Denominación
1 kHz = 10^3 Hz	kilohertz
1 MHz = 10^6 Hz	megahertz
1 GHz = 10^9 Hz	gigahertz
1 THz = 10^{12} Hz	terahertz

Tabla 2.1
Unidades derivadas de Hz

Unidad	Denominación
1 ms = 10^{-3} s	milisegundo
1 μ s = 10^{-6} s	microsegundo
1 ns = 10^{-9} s	nanosegundo
1 ps = 10^{-12} s	picosegundo
1 fs = 10^{-15} s	femtosegundo

Tabla 2.2
Unidades derivadas de s

Unidad	Denominación
1 Mm = 10^6 m	megámetro
1 km = 10^3 m	kilómetro
1 m = 1 m	metro
1 dm = 10^{-1} m	decímetro
1 cm = 10^{-2} m	centímetro
1 mm = 10^{-3} m	milímetro
1 μ m = 10^{-6} m	micrómetro
1 nm = 10^{-9} m	nanómetro

Tabla 2.3
Unidades derivadas de m

La ley fundamental de las ondas nos dice que la velocidad de propagación de una onda viene dada por la ecuación:

$$v = f \cdot \lambda$$

Donde v es la velocidad de propagación de la onda, f es la frecuencia de oscilación de la onda y λ es la longitud de la onda.

En el caso particular de una onda de electromagnética debemos saber que la velocidad de propagación de esta onda es siempre la misma y depende del medio por el que se mueve.

Por tanto si nos dan como dato la frecuencia de una onda podemos calcular fácilmente su longitud de onda:

Supongamos una onda de frecuencia $f = 200$ kHz y queremos calcular su longitud de onda:

Sabiendo que la velocidad de las ondas electromagnéticas en el vacío es de $c = v = 300\,000\,000$ m/s

$$\lambda = v / f = 300\,000\,000 \text{ ms}^{-1} / 200\,000 \text{ Hz} = 1500 \text{ m}$$

Por tanto la longitud de onda es: $\lambda = 1500$ m

Por tanto si nos dan como dato la longitud de onda de una onda podemos calcular fácilmente su frecuencia:

Supongamos una onda electromagnética de longitud de onda $f = 0,5 \text{ mm}$ y queremos calcular su frecuencia

Sabiendo que la velocidad de las ondas electromagnéticas en el vacío es de $c = v = 300\,000\,000 \text{ m/s}$

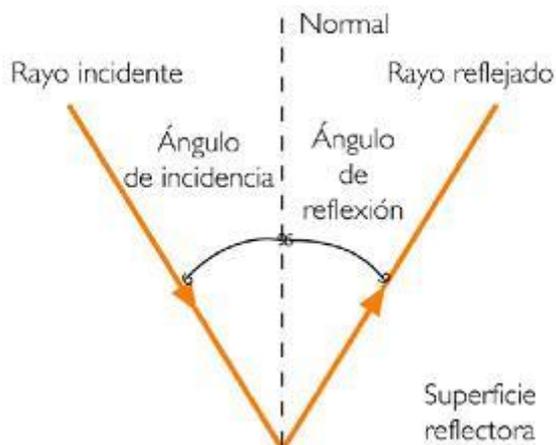
$$.f = v / \lambda = 300\,000\,000 \text{ ms}^{-1} / 0,0005 \text{ Hz} = 60\,000\,000\,000 \text{ Hz} = 60 \text{ GHz}$$

Por tanto la frecuencia es: $.f = 60 \text{ GHz}$

Fenómeno de Reflexión de una onda

Cuando una onda luminosa incide sobre la superficie de separación entre dos sustancias, una fracción de la misma se refleja. La proporción de luz reflejada es función del ángulo de incidencia que forma el rayo de luz con la perpendicular a la superficie de separación. Por rayo de luz se entiende aquí la trayectoria dentro de la cual se extiende la energía luminosa.

Para el rayo luminoso reflejado y el ángulo α_2 que éste forma con la perpendicular a la superficie de separación de las sustancias vale.



- El rayo reflejado se mantiene en el plano formado por el rayo luminoso incidente y la perpendicular a la superficie de separación de las sustancias.
- El rayo reflejado se encuentra en el semiplano opuesto al rayo luminoso incidente (con relación a la perpendicular a la superficie de separación de las sustancias).
- Los ángulos de incidencia y reflexión son iguales. $\alpha_{\text{incidente}} = \alpha_{\text{reflejado}}$

Fenómeno de Refracción de una onda

Cuando un rayo de luz atraviesa un medio que no es el aire, su velocidad se reduce dependiendo de la densidad del medio.

En el caso extremo, las ondas de luz que intentan atravesar un medio metálico no son capaces de atravesarlo y se ven reflejadas en su totalidad, sea cual sea el ángulo de incidencia que se le aplique.

A partir de esta velocidad de la luz propia del medio se define lo que se llama el índice de refracción del medio: $n_{\text{medio}} = c_0 / v_{\text{medio}}$ que representa el cociente de la velocidad de la luz en el vacío, dividido entre la velocidad de la luz en el medio.

Así, si una determinada radiación que viene del vacío o de un medio con una densidad baja (como el aire) entra en un medio que tiene una densidad mayor (como el agua o el vidrio) reduciendo su velocidad en un 5%. Es decir que la velocidad de la luz en este medio sería el 95% de la velocidad de la luz en el vacío.

Podríamos concluir que el índice de refracción de este medio se corresponde a:

$$n_{\text{medio}} = c_0 / v_{\text{medio}} = c_0 / (0,95 \cdot c_0) = 1,0952$$

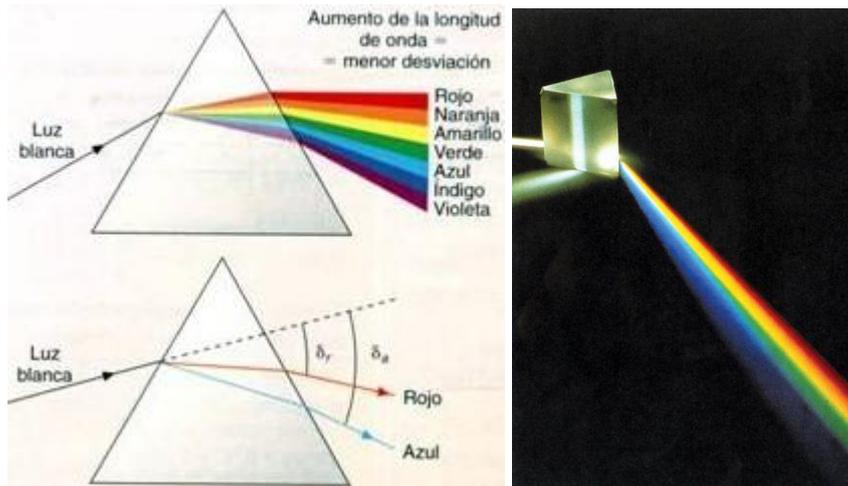
Este valor al ser una división de dos velocidades, no tiene unidades, i es un índice que muestra la variación de velocidad de una onda electromagnética al atravesar un medio.

A partir de este índice, podemos caracterizar los materiales y observar cuales son los índices de refracción:

Medio	.n
Aire	1,00029
Agua	1,33333
Alcohol	1,407
Parafina	1,43
Cuarzo	1,4564
Sal	1,5443

Como se puede observar, todos los índices de refracción son mayores que 1, ya que la velocidad de la luz es siempre más grande en el vacío que en los medios, sin embargo, en el aire, como podemos ver, el índice de refracción es casi 1.

Este índice de refracción como podemos ver aumenta con la densidad del material. Y no es el mismo para todas las longitudes de onda en un mismo material. Esta diferencia de refracción según la longitud de onda permite el fenómeno de la difracción de la luz. En la cual podemos dispersar la luz blanca con un prisma.



Índice de refracción $n(\lambda)$ e índice de refracción de grupo $n_g(\lambda)$ (100 % SiO₂)

Longitud de onda (λ) en nm	Índice de refracción n	Índice de refracción de grupo n_g
600	1,4580	1,4780
700	1,4553	1,4712
800	1,4533	1,4671
900	1,4518	1,4646
1000	1,4504	1,4630
1100	1,4492	1,4621
1200	1,4481	1,4617
1300	1,4469	1,4616
1400	1,4458	1,4618
1500	1,4446	1,4623
1600	1,4434	1,4629
1700	1,4422	1,4638
1800	1,4409	1,4648

Esta refracción cumple la Ley de Snell que cumple la siguiente ecuación:

$$\frac{\text{sen } \alpha}{\text{sen } \beta} = \frac{c_1}{c_2}$$

α ángulo de incidencia

β ángulo de refracción

c_1 velocidad de la luz 1

c_2 velocidad de la luz 2

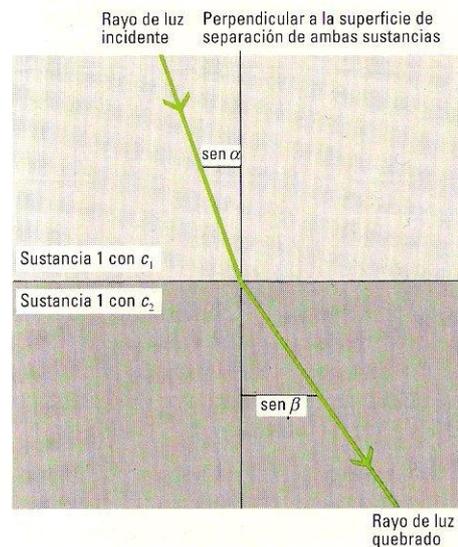


Fig. 2.5
Refracción de luz

Fenómeno de Reflexión total

Cuando un rayo luminoso incide con ángulo α cada vez mayor desde una sustancia ópticamente más densa con un índice de refracción n_1 sobre la superficie de separación con una sustancia ópticamente menos densa con índice de refracción n_2 , el ángulo de refracción β_0 , al llegar a determinado ángulo de incidencia α_0 , puede llegar a ser de 90° .

En este caso el rayo luminoso se propaga paralelamente a la superficie de separación de ambas sustancias y el ángulo de incidencia α_0 se denomina ángulo límite de las dos sustancias.

Para el ángulo límite α_0 vale la relación:

$$\text{sen } \alpha_0 = \frac{n_2}{n_1},$$

O sea, el ángulo límite es función de la relación de los índices de refracción n_1 y n_2 de ambas sustancias.

Ejemplos:

El ángulo límite para el agua ($n_1 = 1,333$) y aire ($n_0 = 1$) es:

$$\text{Sen } \alpha_0 = 1/1.333 \approx 0,75 \quad \text{y} \quad \alpha_0 = 49^\circ \text{C}$$

Para vidrio ($n_1 = 1,5$) y aire ($n_0 = 1$) se tiene

$$\text{Sen } \alpha_0 = 1/1.5 \approx 0,65 \quad \text{y} \quad \alpha_0 = 42^\circ \text{C}$$

Todos los rayos que inciden con un ángulo α mayor que el ángulo límite α_0 son reflejados en la superficie que separa ambas sustancias, o sea no se propagan en la sustancia menos densa sino en la más densa.

Este fenómeno se denomina **reflexión total** (Rayo luminoso 1).

La reflexión total puede ocurrir únicamente cuando un rayo luminoso incide desde una sustancia ópticamente más densa (p. ej. vidrio con $n_1 = 1,5$) sobre otra ópticamente menos densa (p. ej. aire con $n_0 = 1$) y nunca se da en el caso inverso.

2.6 Apertura numérica

En los conductores de fibras ópticas se utiliza el efecto de la reflexión total para conducir el rayo luminoso en virtud de tener estos conductores en su centro un "núcleo" formado por un vidrio con un índice de refracción n_1 y envolviendo lo en un "recubrimiento" formado por un vidrio con un índice de refracción n_2 . El valor de n_1 , es algo mayor que el de n_2 .

Analizando la expresión $\sin \alpha_0 = n_2 / n_1$ se concluye que todos los rayos luminosos que incidan con un ángulo menor que $(90^\circ - \alpha_0)$ con respecto al eje de las fibras ópticas son conducidos en el núcleo.

Para acoplar al núcleo un rayo luminoso desde el exterior de la fibra (aire con índice de refracción $n_0 = 1$), el ángulo (entre el rayo luminoso y el eje de la fibra) se rige de acuerdo a la ley de refracción:

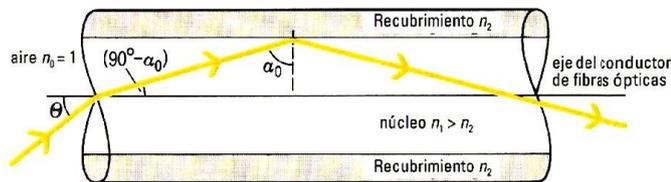


Fig. 2.8 Conducción de la luz en un conductor de fibras ópticas

Si volvemos a aplicar la ley de Snell a la entrada del cable de fibra óptica podremos calcular la apertura numérica exterior al cable, es decir el ángulo incidente exterior a la fibra, para el cual se produce reflexión total en el interior de la fibra.

$$n_0 \cdot \text{Sen } \theta = n_1 \cdot \text{Sen } (90 - \alpha_0) \text{ y con ello sabiendo que } \text{Sen } (90 - \alpha_0) = \text{Cos } \alpha_0$$

$$\text{Por la definición de } \text{Cos } \alpha_0 = \sqrt{1 - \text{Sen}^2 \alpha_0}$$

$$\text{Si sabemos que en el ángulo límite } \text{Sen } \alpha_0 = n_2 / n_1$$

$$\text{Tenemos que } \text{Cos } \alpha_0 = \sqrt{1 - (n_2 / n_1)^2}$$

Por tanto para calcular la AN, la apertura numérica deberemos calcular:

Como que n_0 es 1 ya que es el aire

$$\text{Sen } \theta = (n_1 / n_0) \cdot \sqrt{1 - (n_2 / n_1)^2} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

$$\text{AN} = \text{Sen } \theta = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

Este valor es de gran importancia para el acoplamiento de la luz a los conductores de fibras ópticas.

2.7 Propagación de la luz en el conductor de fibras ópticas

Las leyes de la óptica permiten describir la reflexión total de la luz en la superficie que limita al núcleo del recubrimiento del vidrio en un cable de fibras ópticas. Para ello se considera básicamente que la luz se propaga en forma de rayos radiantes y rectilíneos. Para efectuar un análisis más detallado de las diferentes posibilidades de propagación de la luz dentro del núcleo, es necesario considerar los fenómenos de la óptica ondulatoria dado que el diámetro del núcleo de un conductor de fibras ópticas es de aproximadamente $10 \mu\text{m}$, o sea que es solamente un poco mayor que la longitud de onda de la luz transmitida por ese núcleo (aprox. $1 \mu\text{m}$). Debido a esta relación de dimensiones ocurren fenómenos de interferencia que sólo se pueden describir con ayuda de la óptica ondulatoria.

En general se denomina interferencia a la superposición de dos o más ondas y su combinación para formar una onda única. Una manifestación típica de la interferencia de dos ondas se



Módulo: Conductores de Fibras Ópticas



Formació Ocupacional

Pàgina 24 de 43

obtiene solamente cuando ambas tienen la misma longitud de onda y existe una diferencia de fase constante entre ambas en el tiempo. Este tipo de ondas se denomina ondas coherentes. Si en determinado punto del espacio ambas ondas presentan una diferencia de fase igual a un múltiplo entero de λ (longitud de onda), se produce una suma de sus amplitudes; en cambio, si esta diferencia es igual a un múltiplo entero de $\lambda/2$ (media longitud de onda), una resta, y si ambas amplitudes son iguales, incluso una anulación local de las ondas.

Si se utilizan dos fuentes luminosas, p. ej. dos lámparas incandescentes, y se superponen sus luces no se observará ningún tipo de interferencia ya que su luz es incoherente.

La causa se halla en el proceso de emisión de luz del cuerpo luminoso, en el caso precedente el filamento incandescente de las lámparas.

En virtud de fenómenos espontáneos aleatorios, cada uno de los átomos del filamento incandescente emite destellos luminosos o sea cortos trenes de ondas con una duración de aprox. 10^{-8} s. Considerando que en el aire la velocidad de la luz es de 3×10^8 m/s, estos trenes de ondas tienen una longitud de unos 3 metros.

Esta longitud se denomina longitud de coherencia. La superposición de los trenes de ondas de esta longitud es totalmente irregular y únicamente ocasiona la iluminación general del ambiente.

Para la transmisión de luz con conductores de fibras ópticas fue necesario encontrar fuentes luminosas coherentes, o sea las que emiten una luz lo más coherente posible.

Por ello, el ángulo espectral de un emisor debería ser lo más pequeño posible. A diferencia de diodos luminosos con un ancho espectral de líneas > 40 nm se brindan especialmente los láser que en virtud de una emisión de luz forzada dan la posibilidad de contar con una diferencia de fases constante a igual longitud de onda.

Con ello aparecen también interferencias en el conductor de fibras ópticas, las cuales se reconocen porque la luz se propaga en el núcleo únicamente en determinados ángulos que corresponden a direcciones en las cuales las ondas asociadas al superponerse se refuerzan (interferencia constructiva).

Las ondas luminosas permitidas susceptibles de propagarse en un conductor de fibras ópticas se denominan modos (ondas naturales o fundamentales).

Estos modos de propagación se pueden determinar matemáticamente con exactitud aplicando las Ecuaciones de Maxwell.

Este sistema de ecuaciones de uso general para ondas electromagnéticas, se puede simplificar considerablemente si para los cables de fibras ópticas se consideran únicamente ondas débilmente guiadas. Se trata de ondas que se propagan casi en la misma dirección que el eje del conductor de fibras ópticas y cuyas intensidades de campo son insignificantes en la dirección de dicho eje.

Se presentan cuando difieren muy poco el índice de refracción del núcleo (n_1) y el del recubrimiento (n_2).

Una medida para esta diferencia de índices de refracción es la diferencia normalizada de índices de refracción Δ que se define:

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2 n_1^2} \approx (n_1 - n_2) / n_1$$

Un conductor de fibras ópticas la diferencia normalizada de índices de refracción es mucho menor que la unidad y por lo tanto las ondas luminosas son débilmente guiadas en el núcleo de este conductor.

Las soluciones de las ecuaciones simplificadas de ondas brindan muy buenas aproximaciones para los modos que se pueden propagar en el conductor de fibras ópticas.

Como ejemplo, en la figura 2.9 se observa para los diez primeros modos la distribución de la intensidad luminosa en toda la sección del conductor de fibras ópticas. Las ondas naturales o fundamentales presentan superficies de ondas planas, se polarizan linealmente y de ahí su denominación $LP_{\nu\mu}$ donde ν y μ son los índices modales.

El valor ν es el índice modal azimutal e indica la mitad del número de puntos luminosos que tiene cada anillo luminoso concéntrico. Puede adoptar los valores 0, 1, 2, 3... indicando $\nu = 0$ que cada anillo luminoso se halla presente sin subdivisión.

Con μ se da el índice modal radial, que indica el número de anillos luminosos concéntricos del modo. Puede adoptar los valores 1, 2, 3...

El modo fundamental se denomina LP_{01} , el que le sigue en orden, L_{11} .

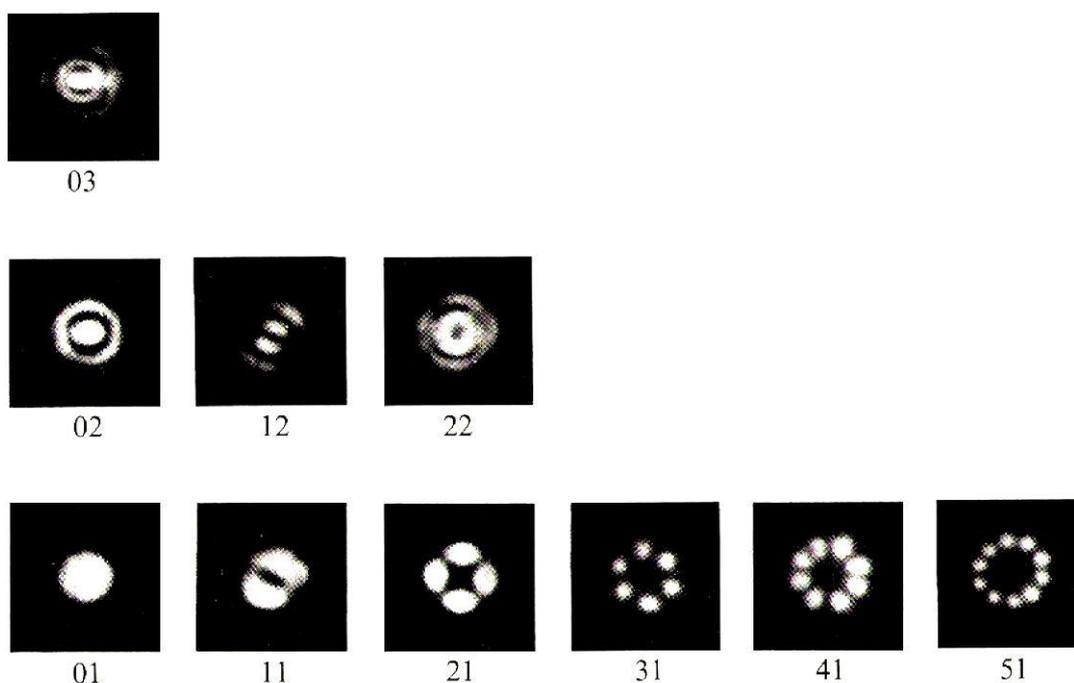


Fig. 2.9 Los primeros diez modos $LP_{\nu\mu}$ de un conductor de fibras ópticas.

(Stolen, R.H.; Leibolt, W.N.: Optical fiber modes using stimulated four-photon mixing. Appl. Opt. 15 [1976] 239-243)

1,8 Efectos ópticos no lineales

Si los cables de fibras ópticas trabajan con una alta intensidad de luz, cobran importancia los efectos ópticos no lineales, que en el ámbito atómico se basan en el efecto recíproco entre los fotones incidentes y el material vidrio de los cables de fibras ópticas.

Para entender la física adoptada, hay que aplicar métodos de la mecánica cuántica:

Ordinariamente se pueden dividir los efectos ópticos no lineales en por lo menos 4 clases:



Módulo: Conductores de Fibras Ópticas



Formació Ocupacional

Pàgina 26 de 43

- la primera describe el efecto recíproco de fotones incidentes con las oscilaciones moleculares, lo cual se denomina ***difusión estimulada Raman***.
- La segunda clase, la ***difusión estimulada Brillouin (SBS)***, se da cuando fotones Interaccionan con fotones acústicos. Ambas provocan un desplazamiento de la longitud de las ondas fotónicas y son mecanismos de difusión no elásticos.
- la tercera clase se da al cambiar el número de refracción dependiente de la Intensidad cuando fotones interaccionan con electrones de retícula. En el vidrio isótropo SiO₂ (dióxido de silicio) este efecto origina procesos que se conocen como ***Mezcla de Cuatro Ondas y Modulación Autofase (SPM)***.
- La Cuarta clase contiene la captura de electrones perturbados manteniendo por mucho tiempo el cambio del número de refracción. Este efecto se denomina ***efecto de de refracción de fotones***.

Hasta el presente, efectos no lineales en los conductores de fibras ópticas no han influenciado notablemente los sistemas de comunicación óptica.

Por ello, a la hora de diseñar estos sistemas, los efectos no lineales eran factores despreciables.

Sin embargo, la aplicación de fuentes luminosas de alta capacidad, de láseres de poco ancho espectral, así como de cables de fibras ópticas con pequeño diámetro del núcleo puede conducir a intensidades que sobrepasen el umbral crítico de acción para efectos no lineales, como la difusión estimulada Brillouin y la Modulación Autofase.

Los valores límite de capacidad para la difusión Brillouin son de unos 190 mW y aprox. 30 mW en el caso de la Modulación Autofase. Los otros efectos paramétricos arriba mencionados, como la Mezcla de Cuatro Ondas o Difusión Estimulada Raman, requieren una mayor densidad de potencia y por lo tanto no son de interés práctico.

La difusión SBS y SPM, sin embargo, pueden i causar falsificaciones de señales.

En el caso de la Difusión Estimulada Brillouin, una parte importante de la capacidad óptica difundida a lo largo del conductor de fibras ópticas, puede ser transformada en una segunda onda luminosa con desplazamiento de frecuencia, que se propaga inversamente a la emisora. La SBS, en formas diferentes, puede empeorar la calidad de un sistema óptico de telecomunicación; p.ej. los diversos desplazamientos de frecuencia pueden originar un debilitamiento de la señal, o bien pueden provocar el acoplamiento de fuertes señales de retro-dispersión en una transmisión óptica.

De ahí que sea necesario trabajar con bajos niveles de potencia, para permanecer debajo del umbral SBS. Esto significa que se limite significativamente la potencia de acoplamiento y por lo tanto la distancia entre regeneradores.

Con la Modulación Autofase se llega a una ampliación del espectro de las señales dependiente de la intensidad.

Esta mayor apertura espectral conduce a un aumento de impulsos debido a la dispersión de la velocidad de grupo.

Dicho proceso se puede entender como un desplazamiento diferencial desfasado entre el centro y los flancos del impulso óptico, resultado de la refracción dependiente de la intensidad.



Aunque esta refracción varía muy poco, la modulación de fase resultante puede ser notable al pasar por un conductor de fibras ópticas largo.

Sin embargo, si SPM y la dispersión cromática están bien sintonizados (intensidad luminosa adecuada, dispersión negativa), se puede producir un estrechamiento en vez de un ensanchamiento de los impulsos, generando los así llamados *solitones ópticos*.

Solitones son impulsos luminosos que no experimentan dispersión al propagarse en los conductores de fibras ópticas y así no están sometidos a limitaciones en las transmisiones a grandes distancias. En virtud de ello, parecen adecuados principalmente para la transmisión submarina.

En pruebas de laboratorio se ha podido demostrar la transmisión de solitones en conductores de fibras ópticas de una longitud de hasta 9000 km. Todavía no existen instalaciones comerciales de transmisión a base de solitones.

3 Principios químicos del conductor de fibra óptica

3.1 Vidrio de cuarzo

Aproximadamente la mitad (en peso) de la corteza terrestre sólida está compuesta por oxígeno y una cuarta parte, por silicio. En el sistema periódico de los elementos (ver tabla 3.1) el oxígeno es el elemento 8 y el silicio 14.

La abundancia de ambos elementos se debe a que la corteza terrestre está formada principalmente por cuarzo y sus compuestos con óxidos metálicos (silicatos). El cuarzo, que en su carácter de compuesto químico se denomina dióxido de silicio SiO_2 , aparece por lo general en la forma de la cuarzita como componente de la arena. Esta se ha formado en el transcurso de los siglos por la erosión de piedras, especialmente granito.

En su forma más pura el cuarzo cristalino aparece como cristal de roca claro como el agua. Sus propiedades ópticas y mecánicas son anisotrópicas: varían en las diversas direcciones de sus cristales.

Debido a sus múltiples aplicaciones técnicas, como p. ej. cuarzo oscilante, elemento óptico activo o elemento piezoeléctrico, hoy en día el cuarzo se elabora en forma sintética provocando su crecimiento a partir de un núcleo cristalino.

En contraposición con el cuarzo, el vidrio de cuarzo resulta de una masa fundida a partir de dióxido de silicio solidificado, de carácter amorfo - es decir no cristalino - con apariencia sólida debido a su alta viscosidad (tenacidad). No posee punto de fusión, pero a temperaturas elevadas se ablanda progresivamente, se vuelve pastoso y luego se evapora sin pasar previamente por el estado líquido.

La viscosidad es un valor muy importante para la elaboración y el conformado del vidrio. Con la misma se describe el rozamiento interno en el vidrio de cuarzo; su símbolo es η y su unidad puede ser indicada con 1 decipascalsegundo ($\text{dPa} \cdot \text{s}$) = $1 \text{g} / \text{cm} \cdot \text{s}$

. A medida que aumenta la temperatura T , la viscosidad del vidrio de cuarzo disminuye en forma progresiva.

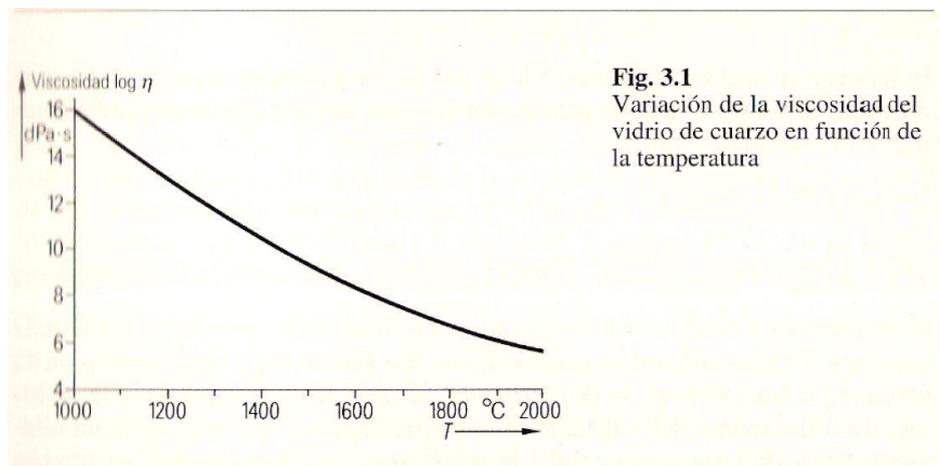


Tabla 3.1 Sistema periódico de los elementos químicos

Periodo	Capa	Serie	a	Grupo I	b	Grupo II	Grupo III	Grupo IV	Grupo V	Grupo VI	Grupo VII	Grupo VIIIb (Grupo VIII)	Grupo VIIa (Grupo 0)	Número																						
1	1 s	I	1	1 H Hidrógeno 1,00797	1								2 He Helio 4,0026	2																						
2	2 p 2 s	II	3	3 Li Litio 6,939	4	4 Be Berilio 9,0122	5	5 B Boro 10,811	6	6 C Carbono 12,01115	7	7 N Nitrógeno 14,0067	8	8 O Oxígeno 15,9994	9	9 F Fluor 18,9984																				
3	3 p 3 s	III	11	11 Na Sodio 22,9898	12	12 Mg Magnesio 24,305	13	13 Al Aluminio 26,9815	14	14 Si Silicio 28,086	15	15 P Fósforo 30,9738	16	16 S Azufre 32,064	17	17 Cl Cloro 35,453																				
4	3 d 4 s	IV	19	19 K Potasio 39,102	20	20 Ca Calcio 40,08	21	21 Sc Escandio 44,956	22	22 Ti Titanio 47,90	23	23 V Vanadio 50,942	24	24 Cr Cromo 51,996	25	25 Mn Manganeso 54,938	26	26 Fe Hierro 55,847	27	27 Co Cobalto 58,9332	28	28 Ni Níquel 58,71														
5	4 p 4 s	V	29	29 Cu Cobre 63,546	30	30 Zn Zinc 65,37	31	31 Ga Galio 69,72	32	32 Ge Germanio 72,59	33	33 As Arsénico 74,216	34	34 Se Selenio 78,96	35	35 Br Bromo 79,904	36	36 Kr Kriptom 83,80																		
6	4 d 5 s	VI	37	37 Rb Rubidio 85,47	38	38 Sr Estroncio 87,62	39	39 Y Ytrio 88,905	40	40 Zr Circonio 91,22	41	41 Nb Niobio 92,906	42	42 Mo Molibdeno 95,94	43	43 Tc Tecnecio [97]	44	44 Ru Rutenio 101,07	45	45 Rh Rodio 102,905	46	46 Pd Paladio 106,4														
7	5 p 4 d 5 s	VII	47	47 Ag Plata 107,868	48	48 Cd Cadmio 112,40	49	49 In Indio 114,82	50	50 Sn Estaño 118,69	51	51 Sb Antimonio 121,75	52	52 Te Teluro 127,60	53	53 J Yodo 126,9044	54	54 Xe Xenón 131,30																		
8	5 d 6 s	VIII	55	55 Cs Cesio 132,905	56	56 Ba Bario 137,34	57	57 La Lantano 138,91	58	58 Ce Cerio 140,12	59	59 Pr Praseodimio 140,907	60	60 Nd Neodimio 144,24	61	61 Pm Prometio [147]	62	62 Sm Samario 150,35	63	63 Eu Europio 151,96	64	64 Gd Gadolinio 157,25	65	65 Tb Terbio 158,924	66	66 Dy Disprosio 162,50	67	67 Ho Holmio 164,930	68	68 Er Erbio 167,26	69	69 Tm Tulio 168,934	70	70 Yb Yterbio 173,04	71	71 Lu Lutecio 174,97
9	6 p 5 d 6 s	IX	79	79 Au Oro 196,967	80	80 Hg Mercurio 200,59	81	81 Tl Tantalio 204,37	82	82 Pb Plomo 207,19	83	83 Bi Bismuto 208,980	84	84 Po Polonio [210]	85	85 At Astatio [210]	86	86 Rn Radón [222]																		
10	6 d 7 s	X	87	87 Fr Francio [223]	88	88 Ra Radio [226]	89	89 Ac Actinio [227]	90	90 Th Torio [232]	91	91 Pa Protactinio [231]	92	92 U Uranio 238,03	93	93 Np Neptunio [237]	94	94 Pu Plutonio [244]	95	95 Am Americio [243]	96	96 Cm Curio [247]	97	97 Bk Berkelio [247]	98	98 Cf Californio [252]	99	99 Es Einstenio [254]	100	100 Fm Fermio [257]	101	101 Md Mendelevio [257]	102	102 No Nobelio [259]	103	103 Lr Lawrencio [260]

Por consideraciones prácticas y con el auxilio del logaritmo de la viscosidad en la tabla 3.2 se han definido algunas temperaturas características ya que la curva que relaciona su variación no presenta puntos destacados.

El límite de relajación superior e inferior señala el alcance del área de enfriamiento o transformación, o sea la transición del estado elastoviscoso de una masa fundida subenfriada al estado frágil del vidrio de cuarzo. En el rango de rango de temperaturas de ablandamiento la forma del cuerpo de cuarzo cambia por la acción de su propio peso.

3.1.1 Fabricación

En general, la elaboración de vidrio de cuarzo de alta pureza tiene lugar mediante la separación de SiO₂ de la fase gaseosa, produciéndose, con el agregado de oxígeno y en virtud del desprendimiento de cloro gaseoso, la transformación del compuesto muy volátil tetracloruro de silicio - SiCl₄.

Tabla 3.2

Temperaturas características del vidrio de cuarzo interpretadas con ayuda del log η

Viscosidad Log η	Denominación	Temperatura del vidrio de cuarzo °C
7,6	Temperatura del ablandamiento (Softening point)	1730
13	Límite superior de relajación (Annealing point)	1180
14,5	Límite inferior de relajación (Strain point)	1075

El proceso se realiza utilizando SiCl₄, ya que este compuesto, en comparación con el SiO₂, natural, se puede obtener con un alto grado de pureza mediante destilación.

Ecuación de la reacción:



Actualmente se fabrican los conductores de fibra óptica para las telecomunicaciones ópticas utilizando este proceso.

Un factor muy importante para la propagación de la luz en un conductor de fibra óptica es, según se sabe, el índice de refracción n del vidrio.

Este se puede "ajustar" por medio de un adecuado "dopado" o sea agregando determinados óxidos durante la separación de la fase gaseosa.

Por ej. agregando flúor (F) o trióxido de boro (B₂O₃) se obtiene un índice de refracción bajo y al agregar dióxido de boro germanio (Ge(X) o pentóxido de fósforo (P₂O₅), un índice más alto, como el requerido para el núcleo del conductor de fibra óptica.

Sin embargo, se debe tener en cuenta, que las variaciones de los índices de refracción del vidrio de cuarzo que se pueden obtener al variar el dopado son relativamente limitadas.

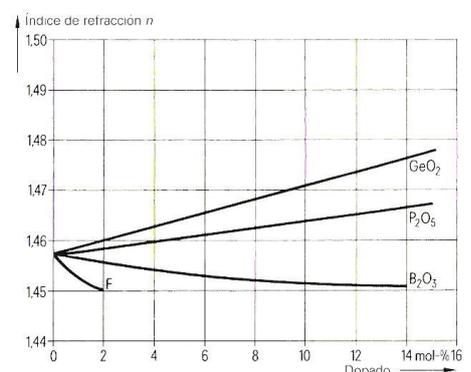


Fig. 3.2 Índices de refracción de SiO₂ con diferentes elementos dopantes

	Módulo: Conductores de Fibras Ópticas		
	Formació Ocupacional	Pàgina 30 de 43	

En la figura 3.2 se ha representado la variación del índice de refracción n del vidrio de cuarzo dopado en función de la concentración de diferentes elementos dopantes.

En virtud del agregado de estos óxidos al dióxido de silicio de alta pureza, se modifica no sólo el índice de refracción sino también otras propiedades. Así, p.ej., la dilatación lineal frente a variaciones de temperatura del vidrio de cuarzo difiere cuando éste está dopado con respecto al no dopado. Es también de gran importancia el hecho que por incorporación de moléculas extrañas se incrementa la dispersión de la luz y, por tanto, la atenuación de la luz que se propaga por el conductor.

Otro motivo por el cual se atenúa la luz que recorre el vidrio de cuarzo resulta de la *absorción* por los metales de transición Fe, Cu, Co, Cr, Ni, Mn y por el agua en forma de iones de OH. Incluso con muy pequeñas contaminaciones del vidrio de cuarzo con estas impurezas metálicas o con iones de OH son suficiente para producir elevadas pérdidas de luz. La concentración de estas impurezas se indica en ppm (partes por millón) o en ppb (partes por billón = 10^{-9}); significa que tiene una parte de impureza por cada millón o mil millón partes de la sustancia básica (cap. 5.2). La absorción de estas impurezas es muy marcada: p. ej. 1 ppm de Cu provoca una atenuación de varios dB/km a longitudes de onda del orden de los 800 nm y una concentración de 1 ppm de OH ocasiona una atenuación de 0,1 dB/km a 880 nm; 1 dB/km a 950 nm; 1,7 dB/km a 1240 nm y 35 dB/km a 1390 nm. De lo anterior se desprende además que, según la impureza, la atenuación puede ser importante a determinada longitud de onda, en razón de lo cual se habla de bandas de absorción en la correspondiente gama de longitudes de onda.

Si en lugar de dióxido de silicio de alta pureza como material de partida para la fabricación de conductores de fibra óptica se usaran *vidrios de varios componentes* como p. ej. vidrio de silicato alcalino de plomo o de borsilicato sódico, se obtendrían elevadas atenuaciones en función de las impurezas.

El vidrio común, p. ej. el utilizado para ventanas o vasos, está compuesto por óxidos adicionales que lo hacen mucho menos transparente a la luz; en cambio, tiene una serie de ventajas mecánicas y técnicas en lo relativo a su fabricación.

4.1.2 Propiedades del material

El vidrio de cuarzo es una sustancia isotrópica; quiere decir que sus propiedades Físicas son las mismas independientemente de la dirección. Muy conocido es su comportamiento frente a variaciones rápidas de temperatura. Teniendo en cuenta *su coeficiente de dilatación lineal* extremadamente pequeño (Tabla 3.3), presenta una extraordinaria estabilidad frente a los cambios de temperatura.

Ejemplo

Variación de la longitud de una fibra de vidrio de cuarzo:

Longitud de la muestra $L = 1$ km, Variación de la temperatura: de 20 a 40 °C:

$$\Delta T = 20 \text{ K.}$$

En la tabla 3.3 se indican una serie de características típicas del vidrio de cuarzo.

La variación de la longitud ΔL se calcula entonces con:

$$\Delta L = \alpha \cdot \Delta T \cdot L;$$

$$\Delta L = 5,5 \cdot 10^{-7} \text{ K} \cdot 20 \text{ K} \cdot 1 \text{ km} = 110 \cdot 10^{-7} \cdot 10^5 \text{ cm};$$

$$\Delta L = 1,1 \text{ cm.}$$

Para aclarar las características y sus valores se dan a continuación los siguientes ejemplos:

|> *Cálculo del peso*

de una fibra de vidrio de cuarzo de 1 km de longitud, sin recubrimiento, con un diámetro $d = 125 \mu\text{m} = 0,125 \text{ mm}$.

La superficie de la sección de vidrio es:

$$A = \pi \cdot d^2 / 4 \approx 3,14 \cdot 0,125^2 \text{ mm}^2 / 4 \approx 0,0123 \text{ mm}^2 = 1,23 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2$$

El peso G por km se obtiene con:

1 peso G por km se obtiene con:

$$G = \gamma \cdot A \cdot 1 \text{ km} = 2,20 \text{ g/cm}^3 \cdot 1,23 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2 \cdot 10^5 \text{ cm} \approx 27 \text{ g}$$

Tabla 3.3 Características del vidrio de cuarzo

Denominación	Unidad	Valor
Densidad γ	g/cm^3	2,20
Módulo de elasticidad E	N/mm^2	72 900
Módulo de torsión G	N/mm^2	33 000
Coefficiente de dilatación lineal (por variaciones de temperatura) α	K^{-1}	$5,5 \cdot 10^{-7}$



Cálculo de la variación de longitud ϵ

Y de la correspondiente fuerza de tracción de una fibra de vidrio de cuarzo con un diámetro $d = 125 \mu\text{m} = 0,125 \text{ mm}$ en un ensayo continuo (proof test) con una tensión

$$\sigma \approx 345 \text{ N/mm}^2 \approx 50 \text{ KPSI}$$

(1 KPSI kilopound force per square
Inch 1 KPSI = 6,8948 N/mm²)

Considerando la Ley de Hooke:

$$\sigma = E \cdot \epsilon$$

La tensión σ (tracción o compresión) es proporcional a la variación relativa de longitud $\epsilon = \frac{\Delta L}{L}$ (alargamiento o acortamiento por unidad de longitud) con

El módulo de elasticidad como factor de proporcionalidad. Se obtiene para la dilatación longitudinal:

$$\epsilon = \sigma / E = (50 \cdot 6,8948 \text{ N/mm}^2) / 72900 \text{ N/mm}^2 \approx 4,73 \cdot 10^{-3} \approx 5\%$$

Para una sección de la fibra óptica de vidrio $A = 0,0123 \text{ mm}^2$ se obtiene una fuerza de tracción:

$$F = \sigma \cdot A = 50 \cdot 6,895 \text{ N/mm}^2 \cdot 0,0123 \text{ mm}^2 = 4,24 \text{ N.}$$

Cálculo del coeficiente de Poisson μ para una fibra de vidrio de cuarzo:

El coeficiente de Poisson (denominado también coeficiente transversal) da la relación entre la variación del diámetro y la longitud de un cuerpo sometido a una cierta sollicitación:

$$\mu = \Delta d / d : \Delta L / L$$

Se puede calcular en base al módulo de elasticidad E y el de torsión G:

$$\mu = E / (2 \cdot G) - 1$$

Por lo tanto para la fibra de vidrio de cuarzo sigue:

$$\mu = 72900 \text{ N/mm}^2 / 66000 \text{ N/mm}^2 - 1 \approx 0,1$$

En el ensayo continuo con un estiramiento longitudinal del orden del 5 % se obtiene una reducción del diámetro de:

$$\Delta d / d = \mu \cdot \Delta L / L \approx 0,1 \cdot 5\% = 0,5 \%$$

Perfiles de los conductores de fibra óptica

Si en un conductor de fibra óptica se considera al índice de refracción n en función del radio r , se tiene el *perfil del índice de refracción* de este conductor. Con el mismo se describe la variación radial del índice de refracción del conductor de fibra óptica desde del núcleo hacia la periferia del recubrimiento.

$$n = n(r).$$

La propagación de los modos en el conductor de fibra óptica depende de la forma de este perfil de índices de refracción que presentan una variación que es función exponencial del radio:

$$n^2(r) = n_1^2 \cdot [1 - 2\Delta(r/a)^g] \quad \text{para } r < a \text{ en el núcleo.}$$

$$\text{y } n^2(r) = n_2^2 = \text{cte} \quad \text{para } r \geq a \text{ en el recubrimiento}$$

n_1 índice de refracción en el eje del conductor de fibra óptica ($r = 0$)

A Diferencia normalizada de índices de refracción

r Distancia del eje del conductor de fibra óptica, en μm

a Radio del núcleo, en μm

g Exponente, llamado también *exponente del perfil*

n_2 índice de refracción del recubrimiento

La diferencia normalizada de índices de refracción se relaciona con la apertura numérica AN o los índices de refracción n_1 y n_2 por la ecuación:

$$\Delta = AN^2 / (2n_1^2) = (n_1^2 - n_2^2) / (2n_1^2)$$

Merecen ser mencionados los siguientes casos especiales (fig. 4.1):

$g = 1$: perfil triangular

$g = 2$: perfil parabólico

$g \rightarrow \infty$: perfil escalonado (caso límite).

Únicamente en el último caso - el perfil escalonado - el índice de refracción es constante en el núcleo: $n(r) = n_1 = \text{cte}$. En todos los demás perfiles, el índice de refracción $n(r)$ en el núcleo se incrementa en forma gradual desde el valor

n_2 y en el recubrimiento hasta el n_1 en el eje del conductor de fibra óptica.

En virtud de este tipo de variación se denomina a estos perfiles también *per-files graduales*. Esta denominación se ha adoptado especialmente para el perfil parabólico (con $g = 2$) ya que los conductores de fibra óptica con esta clase de perfil presentan muy buenas características técnicas para la conducción de la luz.

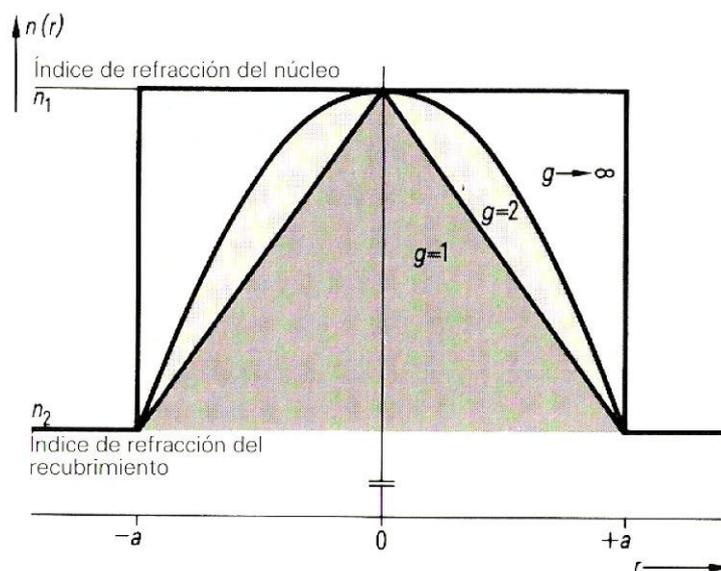
Otro valor importante en la descripción del conductor de fibra óptica son los así llamados *parámetros V* o *parámetros estructurales V*. Son función del radio a , de la apertura numérica AN del núcleo y de la longitud de onda λ o del índice de longitud de onda k de la luz. El parámetro V es adimensional:

$$V = 2\pi a / \lambda \cdot AN = k \cdot a \cdot AN$$

- a Radio del núcleo
- λ Longitud de onda
- AN Apertura numérica
- k índice de longitud de onda

El número N de los modos conducidos en el núcleo depende de este parámetro con aproximadamente la siguiente relación para un perfil exponencial de exponente g :

$$N \approx V^2/2 \cdot g/(g+2)$$



El número de modos del perfil

Fig. 4.1 Perfil de índices de refracción de un conductor de fibra óptica

escalonado ($g \rightarrow \infty$) es aproximadamente

$$N \approx V^2/2$$

El número de modos del perfil gradual ($g = 2$) es aproximadamente:

$$N \approx V^2/4$$

Ejemplo

Se considera un conductor de fibra óptica con perfil gradual ($g = 2$) y los siguientes datos:

diámetro del núcleo: $2a = 50 \mu\text{m}$

apertura numérica: $AN = 0,2$

longitud de onda: $\lambda = 1 \mu\text{m}$

el parámetro V es:

$$V = 2\pi \cdot 50 / 2 \mu\text{m} / 1 \mu\text{m} \cdot 0,2 = 2\pi \cdot 5 \approx 31,4 \approx 31,4$$

el número N de modos conducidos en el núcleo es entonces:

$$N = V^2 / 4 = 31,4^2 / 4 \approx 247$$

Un conductor óptico con varios modos se denomina conductor de fibra óptica multimodo.

Si se desea reducir el número de modos, o sea disminuir los parámetros V, se debe, o bien reducir el diámetro del núcleo (2a), o bien la apertura numérica (AN), o bien aumentar la longitud de onda. De la apertura numérica depende esencialmente cuánta luz se puede acoplar al núcleo del conductor, por lo cual su valor debería ser lo más elevado posible. La reducción del radio del núcleo a es posible sólo en forma limitada en razón de tornarse cada vez más dificultoso el manipuleo es más difícil de realizar y la técnica requerida para el conexionado.

Por otra parte, la fabricación de emisores y receptores para frecuencias más elevadas es más difícil de realizar y en consecuencia su valor no se puede incrementar a discreción.

Si en un conductor de fibra óptica con perfil escalonado ($g \rightarrow \infty$) el parámetro V se reduce hasta un valor inferior a la constante $V_{\infty} = 2,405$, se podrá propagar en el núcleo sólo un único modo, el modo fundamental LP_{01} . Un conductor con estas características se denomina *conductor de fibra óptica monomodo*.

El valor 2,405 se obtiene evaluando el valor de x en el primer cero de la función de Bessel $J_0(x)$ (fig. 4.2).

La forma de la curva de las funciones de Bessel $J_n(x)$ es similar a la de las oscilaciones senoidales amortiguadas. Son funciones típicas para conductores de ondas con simetría cilíndrica como p. ej. los cables coaxiales, los conductores huecos o los conductores de fibras ópticas.

La constante V_{∞} . representa un valor límite para el conductor de fibra óptica con perfil escalonado ($g \rightarrow \infty$). El subíndice c se toma de la expresión en idioma inglés "cut-off value". En el caso de un perfil exponencial con un valor cualquiera del exponente g, se obtiene una aproximación del valor límite V_c con la expresión:

$$V_c \approx V_{\infty} \text{ raíz } ((g + 2) / g)$$

Para un conductor de fibra óptica con perfil gradual ($g = 2$) el valor límite V_c es aproximadamente:

$$V_c \approx 2,405 \text{ raíz}(2) = 3,4.$$

Ejemplo

Un conductor de fibra óptica con perfil escalonado, con un núcleo de diámetro $2a = 9$ um y una apertura numérica $AN = 0,11$ alcanza el parámetro $V = V_{ca}$ con una longitud de onda de:

$$\lambda = \pi (2a/V) \cdot AN = \pi (9 \mu\text{m} / 2,405) \cdot 0,11 \approx 1,293 \mu\text{m} = 1293 \text{ nm}.$$

La longitud de onda X calculada que corresponde al valor límite V_c se denomina *longitud de onda límite* λ_c .

$$\lambda_c = \pi (2a / V_c) AN$$

En el núcleo de este conductor de fibra óptica se podrá propagar un único modo para todas longitudes de onda $> \lambda_c$. O sea que a partir de la longitud de onda A_c el conductor se comporta como un conductor de fibra óptica monómodo.

Asimismo cabe señalar que por la polarización de la luz el modo fundamental y todos los de orden superior están compuestos por dos modos cuyos ondas fundamentales oscilan en direcciones perpendiculares entre sí. Los efectos de estos modos de polarización no tienen solamente importancia para aplicaciones especiales, como p. ej. cuando se utilizan "conductores de fibra óptica polarizada" en la *técnica de los sensores* y en la *brújula de conductores de fibra óptica*. Los efectos que se obtienen por la división en estos dos modos son también relevantes para los sistemas actuales de telecomunicaciones por cables. Por un lado, las distorsiones de señales (CSO) en razón de dispersión de modos polarizados (PMD) (cap. 5.10.) pueden originar una reducción considerable de calidad de las señales analógicas en las aplicaciones de televisión por cable. Por el otro lado, por medio de PMD se puede limitar la longitud de amplificación de las señales digitales en los sistemas de transmisión con velocidades de transmisión de 10 Gbit/s y más.

4.1 Perfil escalonado

Para que la **luz** sea conducida en el núcleo de un conductor de fibra óptica con *perfil escalonado*, el índice de refracción del núcleo n_v debe ser algo mayor que el del recubrimiento n_2 , teniendo en cuenta la reflexión total en la superficie de ambos vidrios. Si el valor del índice de refracción n_i se mantiene constante en toda la sección del núcleo, se habla de perfil escalonado del índice de refracción, pues el índice se incrementa en forma de escalón a partir del valor que tiene en el recubrimiento hasta el que posee en el núcleo y que allí permanece constante. En la fig. 4.3 se representa un conductor de fibra óptica con su perfil escalonado de índices de refracción y , además, el recorrido de un rayo luminoso con sus correspondientes ángulos.

Un conductor con estas características se denomina conductor de fibra óptica con perfil escalonado o fibra escalonada. Para describir mejor la propagación de la luz en un conductor de fibra óptica se ha elegido el siguiente ejemplo (fig. 4.3):

Dimensiones típicas de un conductor de fibra óptica multimodo con perfil escalonado

Diámetro de núcleo	2a	100 μm
Diámetro del recubrimiento	D	140 μm
Índice de refracción del núcleo	n_1	1,48
Índice de refracción del recubrimiento	n_2	1,46

Para este ejemplo, el ángulo límite de reflexión total α_0 , o sea el menor ángulo con respecto a la normal al eje, bajo el cual el rayo luminoso incidente es guiado por el núcleo sin refractarse al recubrimiento, es:

$$\text{sen } \alpha_0 = 1,46 / 1,48 = 0,9865;$$

$$\alpha_0 \approx 80,6^\circ$$

Se propagarán por el núcleo todos los rayos luminosos que forman con el eje del conductor de fibra óptica un ángulo menor o igual a $(90^\circ - \alpha_0) = 9,4^\circ$.

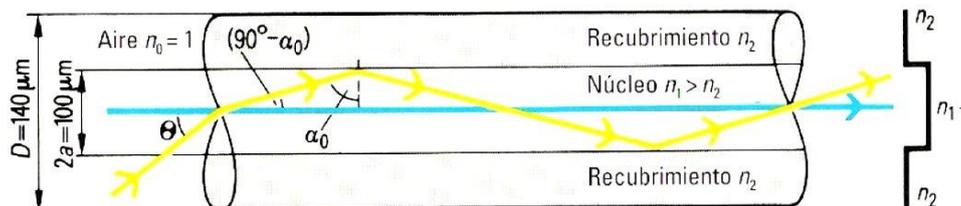


Fig. 4.3 Conductor de fibra óptica con perfil escalonado

Se debe tener en cuenta la Ley de Refracción cuando se acople al núcleo un rayo luminoso desde el exterior (aire con $n_0 = 1$) pues únicamente penetran a este núcleo los rayos luminosos que se encuentran dentro de un determinado ángulo de aceptación Θ . Para este ejemplo se tienen:

$$\text{sen } \Theta = \text{raíz} (n_1^2 - n_2^2) = \text{raíz} (1,48^2 - 1,46^2) \approx 0,242$$

$$\Theta \approx 14,0^\circ$$

El seno del ángulo de aceptación se define como apertura numérica AN:

$$\text{AN} = \text{sen } \Theta \approx 0,242$$

Ejemplo

Un conductor de fibra óptica monomodo con perfil escalonado y un diámetro del núcleo $2a = 8,5 \mu\text{m}$ y una longitud de onda límite $\lambda_c = 1255 \text{ nm}$ ($V_c = 2,405$) tiene un diámetro del campo de $2 \cdot w_0$ (considerando las longitudes de onda $\lambda = 1300$ y 1550 nm):

$$2w \approx 2,6 \lambda / (V_c \lambda_c) \cdot 2a$$

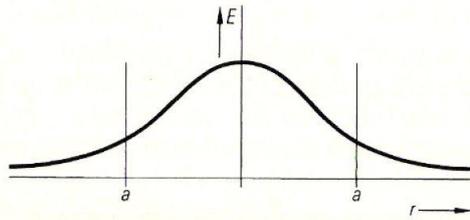


Fig. 4.5 Distribución radial del campo del modo fundamental LP_{01}

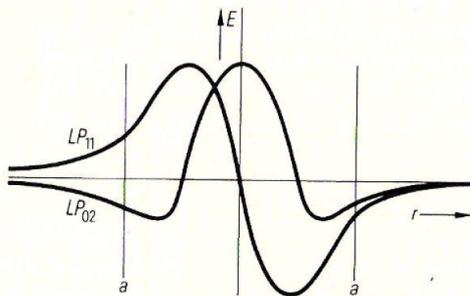


Fig. 4.6 Distribución radial del campo de los modos LP_{11} y LP_{02}

$$\begin{aligned} \lambda = 1300 \text{ nm: } \quad 2w &\approx 2,6 \cdot 1300 \text{ nm} / (2,405 \cdot 1255 \text{ nm}) \cdot 8,5 \mu\text{m} \approx 9,5 \mu\text{m} \\ \lambda = 1500 \text{ nm: } \quad 2w &\approx 2,6 \cdot 1550 \text{ nm} / (2,405 \cdot 1255 \text{ nm}) \cdot 8,5 \mu\text{m} \approx 11,5 \mu\text{m} \end{aligned}$$

El valor del diámetro del campo es de gran importancia para la absorción en el caso de que los conductores de fibra óptica monomodo tengan curvaturas o empalmes. Así, un diámetro de campo mayor ocasiona una menor conducción de las ondas luminosas en las curvaturas, pero produce bajas atenuaciones en empalmes y conectores.

4.2 Perfil gradual

En un conductor de fibra óptica con perfil escalonado y múltiples modos, éstos se propagan a lo largo de diferentes trayectorias por lo cual llegan al otro extremo del conductor en diferentes momentos. Esta dispersión modal es un efecto no deseado y puede ser reducida considerablemente si el índice de refracción en el núcleo varía en forma parabólica desde un valor máximo w , en el eje del conductor y decae hasta otro valor n_2 en el límite con el recubrimiento.

Un perfil gradual o perfil exponencial con exponente $g = 2$ se define por:

$$\begin{aligned} n^2(r) &= n_1^2 - AN^2 \cdot (r/a)^2 && \text{para } r < a \text{ en el núcleo} \\ \text{y } n^2(r) &= n_2^2 && \text{para } r > a \text{ en el recubrimiento.} \end{aligned}$$

Un conductor de fibra òptica con este perfil gradual se denomina *fibra gradual*.

Dimensiones típicas de un conductor de fibra òptica con perfil gradual

Diámetro del núcleo	$2a$	50 μm
Diámetro del recubrimiento	D	125 μm
índice de refracción máximo en el núcleo	n_1	1,46
Diferencia de índices de refracción	A	0,010

En la figura se ilustra el recorrido de ondas luminosas de diferente orden y el perfil en un conductor de fibra òptica con perfil gradual.

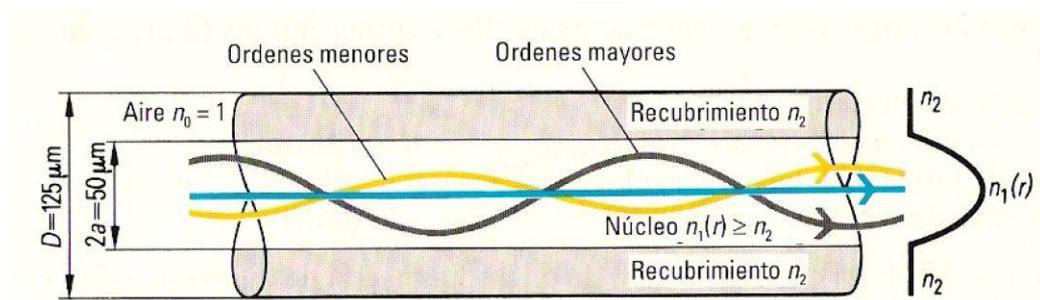


Fig. 4.7 Conductor de fibra òptica con perfil gradual

Los rayos luminosos recorren el conductor de fibra òptica describiendo trayectorias onduladas o helicoidales; contrariamente al conductor de perfil escalonado, en cuyo caso los rayos se propagan en forma zigzagueante.

Como consecuencia de la variación continua del índice de refracción $n(r)$ en el núcleo, los rayos luminosos también se refractan continuamente variando su dirección de propagación al recorrer estas trayectorias helicoidales. Si bien los rayos que oscilan en torno del eje deben recorrer aún un camino más largo que el que se propaga a lo largo de este eje, pueden desarrollar una mayor velocidad proporcional al menor índice de refracción que tiene el material en los puntos más alejados del eje, y así se compensa en el tiempo la mayor extensión del recorrido. Como resultado de esta compensación desaparece casi totalmente la diferencia de tiempos de recorrido. Cuando se conforma con exactitud el perfil parabólico de índices de refracción, se han medido en un conductor de fibra òptica con perfil gradual, con un tiempo total de recorrido de la luz de 5 μs a lo largo de 1 km, dispersiones de tiempo sólo algo mayores de 0,1 ns.

Esta insignificante diferencia de tiempo de recorrido en el conductor de fibra òptica con perfil gradual se produce no sólo por la dispersión en el material, sino también por la *dispersión del perfil*. Se origina en virtud de que los índices de refracción varían en el núcleo y en el recubrimiento de diferente manera con la longitud de onda λ y en consecuencia tanto la diferencia de índices de refracción A como el exponente del perfil g son función de la longitud de

	Módulo: Conductores de Fibras Ópticas		
	Formació Ocupacional	Pàgina 40 de 43	

onda. Para un perfil gradual de forma parabólica se obtiene teóricamente el exponente óptimo del perfil g , por la expresión:

$$g = 2 - 2P - \Delta \cdot (2 - P),$$

en la cual tanto el parámetro $P \ll 1$ como la diferencia de índices de refracción Δ dependen de la longitud de onda λ y por ende también el exponente del perfil gradual g .

El perfil de índices de refracción de un conductor de fibras ópticas con perfil gradual y con $g \approx 2$ permite obtener únicamente en un rango de longitudes de onda muy reducido tiempos de recorrido similares para todos los modos conducidos.

Como en un conductor de fibra óptica con perfil gradual el índice de refracción $n(r)$ depende de la distancia r al eje del conductor, también es una función de r el ángulo de aceptación Θ , cuyo valor es muy importante para el acoplamiento de la luz al núcleo.

$$\sin \Theta(r) = \sqrt{n_1^2(r) - n_2^2} = AN \cdot \sqrt{1 - (r/a)^2} \leq AN$$

El ángulo de aceptación es máximo e igual a la apertura numérica AN en el eje del conductor ($r = 0$). En el límite con el recubrimiento ($r = a$) este ángulo se anula.

La apertura numérica vale para un conductor de fibra óptica con perfil gradual típico:

$$AN = n_1 \sqrt{2\Delta} \approx 1,46 \cdot \sqrt{2 \cdot 0,01} \approx 0,206$$

y el ángulo de aceptación Θ_{\max} en el eje del conductor de fibra óptica:

$$\sin(\Theta_{\max}) = AN \approx 0,206$$

$$\Theta_{\max} = 11,9^\circ$$

Se ha encontrado que las coordenadas $\sin^2 \Theta$ y r^2 son las más apropiadas para representar en un sistema de ejes coordenados al ángulo de aceptación Θ en función de la distancia r al eje del conductor de fibra óptica. Un sistema con estas coordenadas se denomina fase-espacio.



Módulo: Conductores de Fibras Ópticas



Formació Ocupacional

Pàgina 41 de 43

La superficie debajo de la curva límite dada por el ángulo de aceptación máxima (θ_{\max} es proporcional a la potencia luminosa acoplable al núcleo. Se observa que, a igual apertura numérica AN e igual radio del núcleo a , en un conductor de fibra óptica con perfil escalonado, dicha potencia tiene un valor que duplica la de un conductor con perfil gradual.

También es proporcional a esta superficie el número N de modos guiados en el núcleo.

Cada uno de estos modos se puede localizar dentro de esta superficie. Así, los modos LP , de órdenes menores, cuyos índices modales son aproximadamente $v = 0, 1, 2$ y $p = 1, 2$ y se propagan casi paralelamente al eje del conductor, se encuentran en las cercanías del origen; en cambio los modos LP_{ni} de orden superior (con $v, p > 1$) se encuentran más alejados del mismo.

Los modos ubicados fuera de esta área no son guiados: son muy amortiguados. Aquellos modos que se encuentran muy poco fuera de la curva límite tienen limitadas posibilidades de propagación, pero muestran una elevada atenuación; estos modos se denominan *modos fugados*: en parte son guiados y en parte reflejados.

Con el diagrama fase-espacio se pueden describir otras propiedades de los conductores de fibras ópticas, como p. ej. condiciones de excitación también se puede utilizar para calcular la potencia luminosa acoplable desde una fuente luminosa a un conductor de fibra óptica.

4.3 Perfil múltiple

En un conductor de fibra óptica monomodo la dispersión total se compone, como se sabe, de dos clases de dispersión. Se trata, por un lado, de la dispersión en el material: se origina en el hecho de que el índice de refracción n , por ende, la velocidad de la luz son funciones de la longitud de onda, o sea $n = n(X)$ (fig. 2.6) y $c = c(A)$, y, por el otro lado, de la dispersión en el conductor de ondas resultante de la distribución de la luz del modo fundamental LP_{0v} entre el núcleo y el recubrimiento y, por lo tanto, la diferencia de índices de refracción $A = A(X)$ es función de la longitud de onda (fig. 4.5). Ambas clases de dispersión combinadas se denominan dispersión cromática.

Para longitudes de onda mayores de 1300 nm ambas clases de dispersión tienen signos opuestos en el vidrio de cuarzo. Variando la concentración de impurezas en el vidrio de cuarzo, se puede modificar la dispersión en el material en forma insignificante. En cambio, la dispersión por conductor de ondas se puede modificar considerablemente variando la estructura del perfil de índices de refracción.

El perfil de índices de refracción de un conductor de fibra óptica monomodo común es un perfil escalonado con una diferencia de índices de refracción A . Para esta simple estructura de perfiles la

Departament: Informàtica i Telecomunicacions

Formació Ocupacional

Mòdul: Fonaments de la instal·lació de línies i equips de comunicació

suma de la dispersión de material y de la dispersión del conductor de ondas es, en las cercanías de la longitud de onda $\lambda = 1300$ nm

Para desplazar esta anulación de las dispersiones a otras longitudes de onda es necesario modificar la dispersión del conductor de ondas y, por lo tanto, actuar sobre la estructura del perfil del conductor de fibra óptica. Se llega así a los *perfiles de índices de refracción múltiples o segmentados*. Con la ayuda de estos perfiles se pueden fabricar conductores de fibra óptica cuyo cero de dispersión se encuentra desplazado mas allá de los 1550 nm (los así llamados *conductores de fibra óptica con dispersión desplazada*) u otros con valores muy bajos de dispersión en toda la gama de las longitudes de onda que van desde los 1300 a los 1550 nm (*los conductores de fibra óptica de dispersión plana o dispersión compensada*).

En la fig. 4.11 se representa la dispersión cromática $M(\lambda)$ en función de la longitud de onda para un conductor de fibra óptica monomodo: (1) sin desplazamiento de la dispersión, (2) con desplazamiento de la dispersión y (3) con dispersión plana.

Estos conductores de fibra óptica monomodo pueden ser realizados con perfiles de diferentes estructuras. A continuación se da una reseña de dichos perfiles:

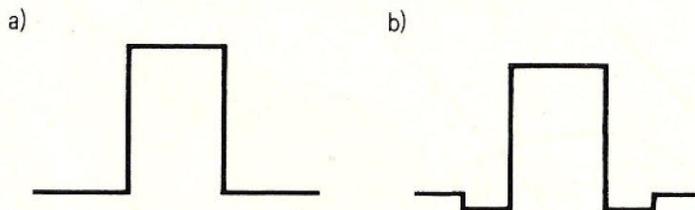


Fig. 4.12

Estructuras de perfiles de conductores de fibras ópticas sin desplazamiento de la dispersión

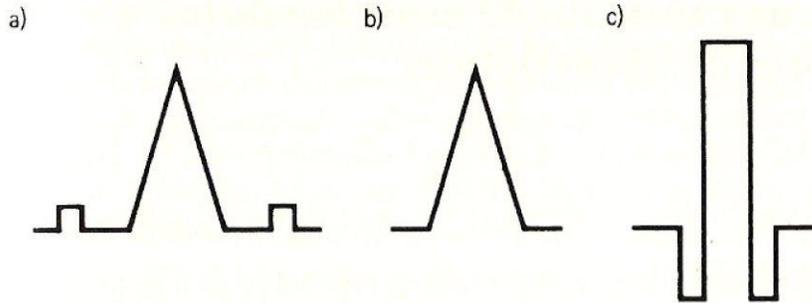


Fig. 4.13

Estructuras de perfiles de conductores de fibras òpticas con desplazamiento de la dispersi3n

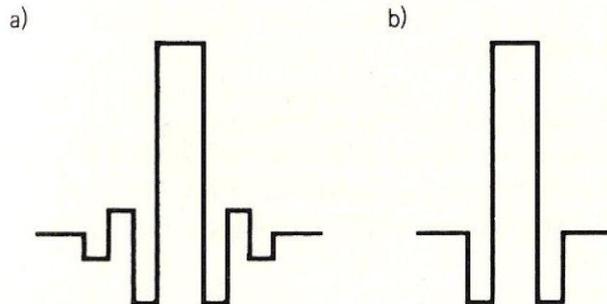


Fig. 4.14

Estructuras de perfiles de conductores de fibras òpticas con dispersi3n plana