

ESCUELA UNIVERSITARIA POLITECNICA

de

Las Palmas de Gran Canaria

Trabajo fin de carrera:

"ESTUDIO DE FIBRAS OPTICAS. APLICACIONES ACTUALES Y FUTURAS"

Autor:

tutor:

Angilberto Hernández Gonzalez

Sebastián Suarez Gil

Junio 1983

## INDICE

Capítulo	Pag.
0.- Objeto del trabajo . . . . .	1
1.- Fibras ópticas . . . . .	4
1.1.- Introducción . . . . .	4
1.2.- Conceptos teóricos . . . . .	10
1.2.1.- La fuente . . . . .	11
1.2.2.- El canal . . . . .	18
1.2.2.1.- Apertura numérica . . . . .	30
1.2.2.2.- Rayos . . . . .	32
1.2.2.3.- Poder de resolución y eficiencia . . . . .	44
1.2.2.4.- Uniones entre fibras . . . . .	48
1.2.3.- El receptor . . . . .	51
1.3.- Pérdidas . . . . .	64
1.3.1.- Ensanchamiento de pulsos en fibras ópticas multimodos . . . . .	64
1.3.2.- Pérdidas por juntas . . . . .	66
1.3.3.- Pérdidas "Splicing" (unión) . . . . .	67
1.3.4.- Pérdidas por curvatura ("Bending Loss"). . . . .	67
1.3.5.- Pérdidas de Fresnel . . . . .	67
1.3.6.- Efectos "Leakage" (de fuga) . . . . .	69
1.3.7.- Pérdidas por dispersión y desalineación. . . . .	70
1.4.- Aplicaciones . . . . .	72
1.5.- Integrados ópticos . . . . .	78

1.5.1.- Uniones . . . . .	91
1.5.1.1.- Uniones directas fuentes-guías . . . . .	91
1.5.1.1.1.- Uniones directas . . . . .	91
1.5.1.1.2.- Juntas con prismas . . . . .	93
1.5.1.1.3.- Juntas con asperezas . . . . .	95
1.5.1.1.4.- Juntas por disminución progresiva de la película . . . . .	96
1.5.1.1.5.- Juntas holográficas . . . . .	97
1.5.1.2.- Uniones fibras-guías . . . . .	98
1.5.1.2.1.- Directa por fluido de inmersión . . . . .	98
1.5.1.2.2.- Por disminución de la película . . . . .	98
1.5.1.2.3.- Por contacto . . . . .	99
1.5.1.3.- Uniones entre guías planas . . . . .	100
1.5.1.4.- Métodos auxiliares de juntas . . . . .	102
1.5.2.- Detectores . . . . .	104
1.5.2.1.- Fotodiodos . . . . .	105
1.5.2.2.- Fotodetector epitaxial . . . . .	105
1.5.2.3.- Detectores de electro absorción . . . . .	106
1.5.2.4.- Fotodetectores por implantación iónica. . . . .	106
2.- Lasers . . . . .	107
2.1.- Introducción . . . . .	107
2.2.- Conceptos teóricos . . . . .	113
2.3.- Tipos de Lasers . . . . .	129
2.3.1.- Lasers sólidos . . . . .	129
2.3.2.- Lasers gaseosos o en fase gaseosa . . . . .	135
2.3.2.1.- Bombeo por colisiones del segundo tipo. . . . .	136
2.3.2.2.- Bombeo por disociación molecular . . . . .	137

2.3.2.3.- Bombeo por excitación directa del	
electrón . . . . .	138
2.3.3.- Lasers de uniones semiconductores . . . .	138
2.3.4.- Lasers químicos . . . . .	140
2.4.- Aplicaciones . . . . .	141
Bibliografía	
Apéndice "A"	
Apéndice "B"	

## 0.- OBJETO DEL TRABAJO

Desde que en 1870, en la "Royal Society" de Londres, John Tyndall demostró que la luz era conducida con evidente éxito a lo largo de un camino curvo, los científicos de todo el mundo han visto en la luz un medio seguro y eficaz para transmitir información.

La importancia de las fibras ópticas como medio de transmisión no necesita ser descubierta, así que no forma parte de los objetivos de este trabajo el recalcar sus virtudes frente a los sistemas convencionales.

Los proyectos y trabajos que se están realizando actualmente en todas partes del globo hablan por si solos de como la utilización de la energía luminosa en el campo de las comunicaciones parece inundarlo todo.

Actualmente si preguntamos sobre fibras ópticas en ambientes más o menos catalogados, serán muy pocos los que puedan contestar con relativa soltura científica a preguntas tan sencillas como: "¿Qué es una fibra óptica?", "¿Cuáles son sus principios de funcionamiento?",...etc.

Esta carencia de conocimientos obliga a cuestionarnos por la existencia de una información directa y concreta sobre las fibras ópticas. El lugar que éstas están ocupando, y ocuparán, en el mundo moderno, las hace merecedoras de ocupar un mejor lugar en nuestra biblioteca de conocimientos y no verse reducidas a llenar efímeros apartados dentro de las comunicaciones visuales, o del futuro de las comunicaciones.

El objeto de este trabajo es simplemente ahondar en el conocimiento de las fibras ópticas a través de un repaso a las características, propiedades y funcionamiento de las mismas. Es en definitiva un intento de hacer un estudio serio en el que se pueda comprender las fibras ópticas y los ámbitos que la rodean. Se trata de sentar pilares teóricos que sirvan para desarrollar trabajos posteriores en este campo o simplemente para llegar a comprender la dimensión real de éstos a través de un conocimiento verídico de su filosofía.

En este punto es necesario aclarar que como normalmente las fibras ópticas se consideran como equipo completo, es decir, modulador, emisor, fibra propiamente dicha, receptor y demodulador, nosotros a lo largo de los diversos temas que compondrán este estudio trataremos de ir dejando a un lado, en la medida de lo posible, todo lo que se refiera a la parte emisora y receptora, aunque siempre será inevitable su comprensión en relación a la nueva tecnología, para centrarnos en el medio físico como tal: "La fibra óptica".

Hay un elemento que no se puede desligar de lo que es el núcleo central, el rayo Laser. De las posibles fuentes de luz utilizadas sólo el Laser compendia las características oportunas para lograr la máxima eficacia. Hemos creído que cualquier trabajo para tratar de explicar el funcionamiento y características de las fibras ópticas sería inútil sin un conocimiento real y físico del principal generador de ondas luminosas que existe en la actualidad, el Laser.

Así pues y resumiendo, el objeto del proyecto es recopilar, ordenar y valorar en su justa medida un material existente y disperso en innumerables publicaciones desde que las fibras ópticas comenzaron su andadura por los laboratorios y hasta nuestros días, es sobre todo un intento de contestar a una pregunta básica: "¿Por qué las fibras ópticas han revolucionado el campo de las comunicaciones?", y lo vamos a hacer descubriendo sus entrañas y explicando su naturaleza.

# 1. FIBRAS OPTICAS

## 1.1- Introducción

Nuestro universo es energía. Cada cosa o experiencia es de alguna forma energía en sí misma o resulta de esta. La luz es una forma de energía que siempre a maravillado al hombre, sin embargo antes del descubrimiento y posterior auge de los Lasers, pocas veces se había estudiado esta como tal.

Unos quinientos años antes de Jesucristo, Pitágoras afirmaba que la luz estaba formada por partículas que fluyen del propio cuerpo luminoso. Aristóteles, más tarde, estableció una cierta analogía entre la propagación del sonido por vibraciones del aire y la propagación de la luz, era el nacimiento de la teoría ondulatoria.

Desde entonces y hasta el propio siglo XX, la controversia se ha sucedido a través de los años, y ambas posturas han convivido y reñido por la posesión de la verdad.

En los albores del siglo XVIII, el gran genio de la física Newton, se oponía a las teorías ondulatorias y proponía, coincidiendo con Pitágoras, la teoría corpuscular.

A pesar de que esta teoría, por el prestigio de su principal promotor, el ya citado Newton, se impuso durante casi todo el siglo, el danés Cristian Huyghens mantenía que la energía emitida por un cuerpo se propaga con un movimiento ondulatorio transversal.

Las posibilidades de aseveración de ambas teorías quedaba supeditada a las propiedades que se sabía tenía la luz y que cada una podía explicar o no. En definitiva el problema pareció quedar resuelto cuando el francés Foucault, en 1862, logró verificar que la velocidad de la luz disminuye al pasar de un medio menos denso a otro que lo es más. Esto dejó el terreno abonado para el florecimiento de las teorías ondulatorias como las válidas.

Una vez que Maxwell descubriera la existencia de campos electromagnéticos y posteriormente Hertz estableciera definitivamente la identidad entre los fenómenos luminosos y los electromagnéticos, sólo quedaba sin explicar la forma en la que se realizaba la emisión y la absorción de la luz.

Hubo que esperar a que Plank, con su teoría cuántica retornara a las ideas corpusculares, insistiendo en que la energía es radiada en trozos discretos, paquetes, "cuantos" de energía, donde:

$$h f = \text{" quantum de energía "}$$

Posteriormente, Bohr, ya en 1913, aplicó estos efectos de tipo "cuántico" al modelo de átomo de Rutherford, obteniendo resultados que ofrecían explicaciones racionales a muchos fenómenos espectrales.

Einstein, explicando el efecto fotoeléctrico, llegó a la conclusión de que la luz es un chorro de partículas llamadas fotones ( cuantos de energía luminosa). El problema estribaba en cómo explicar las interferencias, la polarización, la difracción,...etc.

La solución que estaba más a mano era alegar una doble naturaleza de la luz, o mejor, una naturaleza compartida, por la cual en unas ocasiones se comportaría corpuscularmente y en otras de forma ondulatoria. Fue De-Broglie en 1924, quien, definitivamente dedujo que cada cuanto lleva una onda asociada, dando así con la naturaleza real de la luz, una naturaleza que es doble simultáneamente y que quedó demostrada experimentalmente en 1927.

Utilizando un ingenuo juego de palabras podríamos decir que a partir de entonces fue cuando el hombre comenzó a ver la luz. La oscuridad de todos los siglos que quedaban atrás había ocultado las posibilidades que ahora se abrían al hombre moderno.

Con la definición de la naturaleza de la luz se comenzó a pensar en las posibles aplicaciones y a unos pocos pioneros se les ocurrió la idea de generar ondas luminosas al igual que se estaba haciendo con las ondas de radio.

La idea lanzada por Alexander Graham Bell en 1880 proponiendo la transmisión de la información a través de un haz de luz ("Fotófono") ya se tomaba en serio y era objeto de estudio. La demostración de John Tyndall, diez años antes, en la Royal Society de Inglaterra, evidenciaba la posibilidad de conducir la luz a lo largo de un camino curvado, era ahora llenada de contenido por la comprensión del fenómeno físico.

El descubrimiento de los Lasers y posterior desarrollo de los mismos fue el espaldarazo definitivo. A partir de 1924 ya se conocía su existencia y en 1946 se dominaba, relativamente bien, su naturaleza con lo cual se podía contar

con una fuente ideal de luz capaz de acceder a todo el espectro visible.

El hombre emprendió pues la conquista de las grandes frecuencias. La televisión exigía un ancho de banda que en un principio se consideró imposible, pero eso también fue superado. El principal problema que se presentaba era el medio físico que debía de servir como soporte para la transmisión.

Utilizando el aire como medio de transmisión las ondas de radio encontraban algunos problemas, primordialmente el "ruido", pero se consideraba un medio suficientemente eficaz para las exigencias en aquel entonces. A medida que se iba aumentando la frecuencia se hacía más y más apremiante la necesidad de resolver esta contrariedad y buscar por tanto un medio físico oportuno que permitiera, no sólo disminuir el nivel de ruido, sino acelerar la velocidad de la información y que la cantidad de ésta fuera lo más grande posible.

La utilización de los cables solucionaba en parte el problema, pero presentaba inconvenientes como la lentitud, siempre relativa al sistema en el que se fuera a usar, y sobre todo el efecto "cross-talk" por el cual la información que se transportaba por un cable podía pasar, mezclándose, a la de los adyacentes, en el caso de cables formados por asociación de varios simples, deteriorando con ello la información transmitida. Esto suponía una grave limitación en la cantidad de ésta que se podía transmitir.

Para las "Ultra-High Frequencies" se comenzaron a usar lo que se llamó guía-ondas. En un primer momento se pensó

que estos mismos soportes podían servir para transmitir la luz y con ello salvar el problema del medio físico. La experiencia demostró que no se conseguía la eficiencia deseada.

Las dimensiones de la guía-onda eran demasiado grandes para tan pequeñas longitudes de onda, y además, la energía luminosa que llegaba al final de la guía era reducida aunque ésta no fuera demasiado larga. La solución parecía fácil, se debían reducir las dimensiones de las guía-ondas para transmitir luz. La idea, que en un principio parecía buena, no sirvió en la práctica debido a que al reducir las dimensiones los ángulos de incidencia y reflexión se hacían más pequeños con la disminución subsiguiente de eficacia.

Fue de esta manera como se empezó a hablar de las fibras ópticas. El primero en utilizar este nombre fue N. S. Kapany, quien en 1956, en su libro "Fiber Optics" las definía como " el arte de guiar la luz (rayos o modos de guía-ondas) en las regiones ultravioleta, visible e infrarroja, a lo largo de fibras transparentes ". Este mismo autor junto con H. H. Hopkins estaba investigando desde 1951 la transmisión de la luz a través de un paquete de fibras y es a él a quien se le atribuye la invención de las fibras de cristal cubiertas.

La expansión científica en torno a este nuevo medio fue en un principio bastante lenta y cobrando únicamente a partir de la década de los setenta una cierta revalorización. El costo era muy elevado y aún no se lograba evitar la energía que se perdía a través de la superficie del cristal o la que era absorbida por el propio medio en forma de calor.

El cristal estaba formado por arena de Silicio. Se procuró entonces un Silicio ultra puro que dopado oportunamente con fórmulas especiales y cubriendo la superficie con abrigos apropiados, de elevado índice de refracción, permitía resultados óptimos en distancias de poco más de 300 m. Hoy en día esto forma parte de la historia y es corriente que las fibras ópticas superen cientos de Kilómetros sin sufrir deterioro en su eficiencia.

La pureza de este medio de transmisión hace que cada vez se le utilice en más sectores y se le considere medio ideal para, en un futuro, sustituir los anticuados soportes físicos, Las fibras ópticas no conocen las interferencias electromagnéticas que tanto daño hacen a las guía-ondas y cables convencionales, además su capacidad para transportar información por unidad es mucho mayor, e incluso el peso se ve notablemente reducido. Lo único que mantiene retenida por ahora la expansión de este nuevo medio es el costo.

Nuevos campos y posibilidades se abren a la utilización de la luz y es aquí donde en los próximos años se verán reflejadas más claramente los increíbles beneficios de las fibras ópticas.

## 1.2.- Conceptos teóricos

Para fijar ideas desde el principio vamos a representar un esquema de lo que sería un sistema completo de fibra óptica :

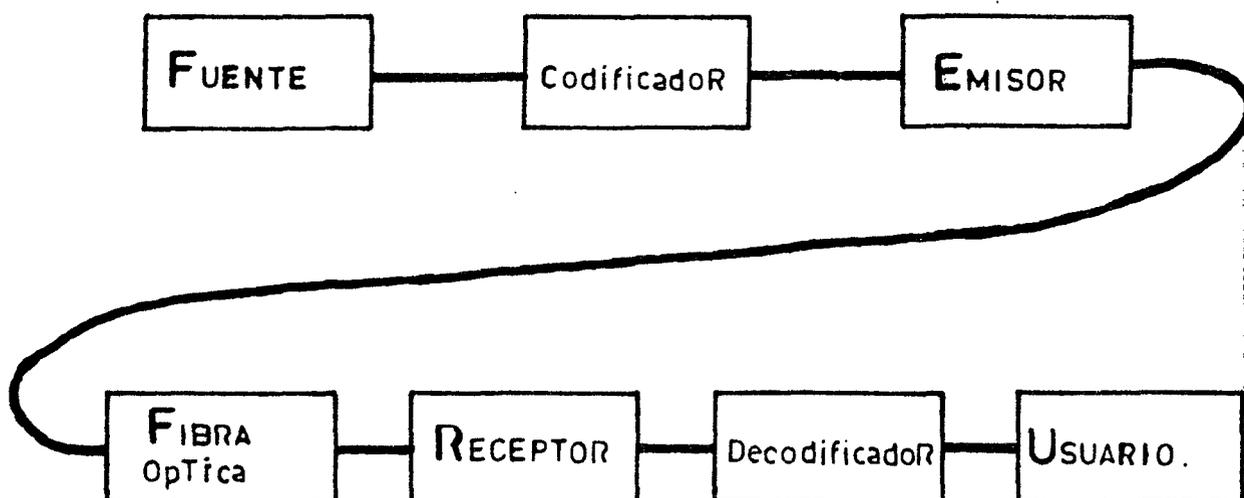


Fig 1.1

Lógicamente el punto principal en el que se distingue de otros medios de comunicación es el canal, y es precisamente en este punto donde vamos a centrar nuestro estudio, pues es el tema del proyecto. Esto no excluye que las partes primordiales de este esquema sean debidamente explicadas para poder comprender la filosofía y funcionamiento del canal.

Vayamos por partes :

### 1.2.1.- La fuente

Se entiende por fuente todo dispositivo o aparato que permite generar un haz de luz capaz de ser modulado o codificado y emitido a través de la fibra óptica.

El hecho de que conozcamos el medio a través del cual vamos a transmitir nos permite acceder a las características que deben de reunir, no sólo la fuente en sí, sino la luz que ésta debe producir para poder ser explotada con suficiente eficacia.

Esos principios excluyentes, como pueden ser la coherencia del haz, potencia de radiación, etc, nos reducen el campo prácticamente a dos únicas fuentes mayoritariamente utilizadas, el LED y el Laser. La importancia de esta última obliga a dedicarle un apartado preferente en la configuración del proyecto, así que no entraremos en más detalles por el momento.

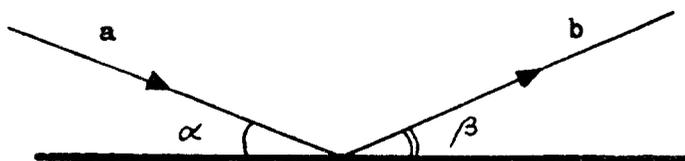
La luz es pues el elemento básico de todo el desarrollo que a continuación seguiremos con las fibras ópticas, de ahí que consideremos vital el tener bien claros los conceptos que a ella se refieren.

El espectro electromagnético va desde el rango de frecuencias subsónicas ( de unos pocos hertzios) a los rayos cósmicos que alcanzan  $10^{21}$  Hz ( Ver apéndice A fig.1 ). Con las alteraciones que siempre puede haber, las frecuencias que fundamentalmente interesan para transmitir a través de fibras ópticas serán las próximas a  $10^{14}$  Hz, es decir, desde

la infraroja a través de la luz visible hasta la ultravioleta.

Se podría definir la luz como un chorro de cuantos de energía luminosa (fotones) que se propagan describiendo un movimiento ondulatorio.

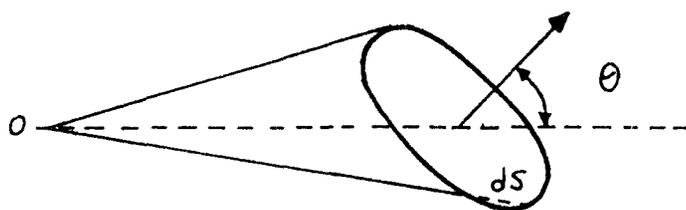
Quizá sería conveniente comenzar este repaso aludiendo a los ángulos de reflexión y refracción, a los rayos de incidencia y reflejados, pues su utilización será constante a lo largo del texto. La mejor manera de comprender lo que cada uno significa es mediante un dibujo representativo :



- El rayo de luz antes de llegar a la superficie donde se va a ver reflejado o refractado, se llama rayo incidente "a" y al ángulo que forma con dicha superficie se denomina ángulo de incidencia " $\alpha$ ".
- El rayo que parte de la superficie sobre la que acaba de incidir el haz de luz se llama reflejado "b" y el ángulo que forma con dicha superficie se denominará ángulo de reflexión " $\beta$ ".

Esta superficie que hemos mencionado no tiene porqué ser tal, puede ser un simple dióptrico, es decir una superficie plana y transparente que separa dos medios de distinto índice de refracción.

El principal parámetro a considerar en el estudio de un flujo luminoso es sin duda su potencia de radiación. El flujo luminoso, luz, radiada por una fuente puede ser definida como la potencia luminosa emitida por la fuente en una superficie cerrada en torno a la misma. Considerando que esta potencia depende de la distancia a la que se encuentra dicha superficie y de las dimensiones de la misma.

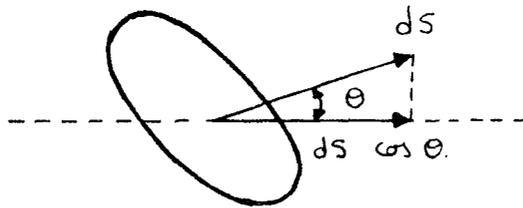


$$d\Phi = I \frac{dS \cos \theta}{R^2}$$

Si consideramos un caso más general aún, también dependerá de la dirección, pero normalmente se supone el eje de emisión paralelo a la horizontal.

Otra característica importante es la iluminación o luminiscencia producida por un flujo de luz incidente en una unidad de superficie.

$$E = \frac{d\Phi}{dS} = \frac{I \cos \theta}{R^2}$$



$$B = \frac{dI}{dS \cos \theta}$$

El brillo en un haz de luz es constante, por tanto si conocemos éste en una parte determinada de la superficie, la densidad sería :

$$R = \pi \cdot B$$

Hay un parámetro análogo a este brillo "B", análogo en fórmula y unidades, y que con el nombre de intensidad de flujo, "F", define el flujo luminoso transmitido en una dirección dada a través de una aparente sección de unidad de área.

La coherencia del haz a la que antes hacíamos referencia como una condición excluyente para las fuentes emisoras vendría dada por la combinación de algunos de estos parámetros que acabamos de estudiar. Así por ejemplo para obtener un haz coherente, la intensidad de luz radiada en esa dirección debe ser máxima para lo cual :

$$\left. \begin{array}{l} dI = B \cdot dS \cdot \cos \theta \\ \cos \theta = 1 \quad \theta = 0 \end{array} \right\} dI = B \cdot dS$$

Como se puede ver la luminiscencia sería inversamente proporcional al cuadrado de la distancia de la fuente al punto y directamente proporcional al coseno del ángulo formado por el rayo de luz y la normal a la superficie iluminada.

La densidad de flujo luminoso "R" sería otro elemento fotométrico a considerar y se define como el total de flujo luminoso emitido por unidad de superficie del emisor. La expresión matemática sería la misma que la de "E" aunque en este caso " $\theta$ " sería el ángulo entre la dirección de emisión elegida y la normal a la superficie.

El considerar todos éstos parámetros es imprescindible en el diseño de un sistema de fibra óptica pues nos permitirán la elección de una fuente propicia según nuestras necesidades.

Hay un último parámetro que nos puede ayudar en la definición de un emisor. Según Lambert's la intensidad de luz radiada en una cierta dirección por un elemento de superficie luminosa es proporcional al coseno del ángulo entre la dirección del haz y la normal a la superficie.

$$dI = B \cdot dS \cdot \cos \theta.$$

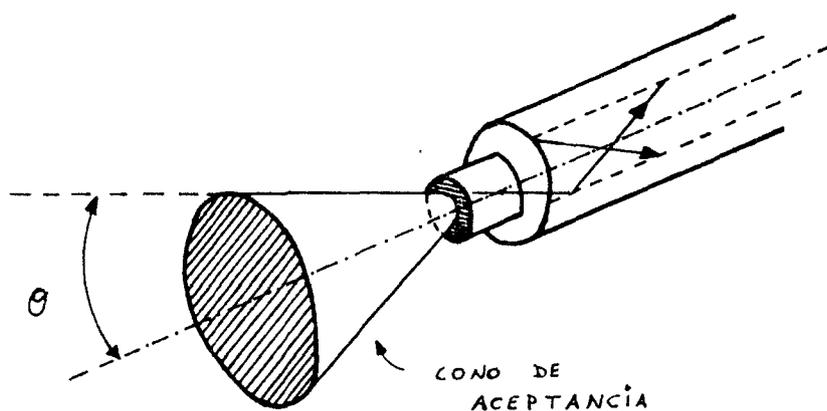
Donde "B" es el brillo que caracteriza la emisión de una superficie luminosa en una dirección dada. Se define como el cociente de la intensidad de luz en una dirección determinada y la proyección de un elemento de superficie en el plano perpendicular a esa dirección.

En general cualquiera de las fuentes de luz ( Ver apéndice A fig 2 ) con un rango de frecuencias aceptado por la fibra óptica puede ser usado, pero entonces no podemos cuestionar su eficiencia ( potencia de luz saliente de la fibra comparada con la potencia de luz de la fuente ) y posiblemente estemos desaprovechando o mal empleando sus posibilidades.

Para ciertos usos más específicos donde se exige una cierta sofisticación, las fibras ópticas brindan inmejorables oportunidades pero para aprovecharlas debemos saber sacarles partido y eso se consigue con una cuidadosa selección de la fuente de la que deberá salir nuestro haz de luz bajo las condiciones por las cuales ha sido elegida.

Esta cuidadosa elección debe hacerse en base a una serie de criterios cuya lista puede ser interminable. Además del propio costo podríamos citar algunos de los criterios más generalizados :

- Debemos definir la intensidad a la que vamos a trabajar pues normalmente el hablar de una intensidad más grande significa un calentamiento más elevado y un aumento en el tamaño físico de la fuente.
- Para que la luz entre en la fibra óptica con ángulos óptimos se requiere que el área de emisión de la fuente sea menor que el área del núcleo de fibra óptica.
- La fuente además debe producir un haz bastante direccional (coherente ) para acomodarse al cono de aceptación de la fibra :



- La luz debe ser tan espectralmente pura como sea posible para minimizar la dispersión causada por la coincidencia de diferentes longitudes de onda viajando a diferentes velocidades en la fibra.
- Si se trata de sistemas digitales la fuente debe de tener unos tiempos de subida y bajada muy pequeños.
- Si se utilizan sistemas de modulación analógicos requieren de la fuente de luz una variación relativa lineal de la corriente de conducción.

Bien ya sabemos que tipos de fuentes existen y algunas de las características que deben cumplir y también conocemos los parámetros fundamentales de las señales con los que vamos a trabajar, la luz a distintas frecuencias. Pasemos ahora a estudiar por donde se va a efectuar la transmisión, el canal.

### 1.2.2.- El canal

El canal como ya hemos mencionado es el soporte físico a través del cual se va a realizar la transmisión. En este caso el canal será la fibra óptica.

Aunque la fibra óptica como tal comenzó a existir a principios del siglo XX (Kampany 1924) ya en el siglo XVI se fabricaban elementos ópticos tales como lentes duras. Es pues la experiencia de todos esos años en problemas ópticos la que ha servido para alcanzar en poco tiempo altas cotas de calidad en fabricación y erradicación de impurezas en los materiales utilizados.

Las posibles impurezas encontradas en los materiales que sirven para la fabricación de fibras ópticas se explican matemáticamente porque la separación que existe entre dos puntos, dos partículas, no es exactamente una función cuadrática de sus coordenadas. Aunque esta característica es tenida en cuenta no es seguida al pie de la letra a la hora de la fabricación.

Lo que tampoco suele ser un problema son las aberraciones cromáticas, consecuencia del índice "n" de la longitud de onda o color, ya que en los sistemas de comunicación óptica se requiere normalmente un ancho de banda relativamente bastante pequeño.

Las fibras ópticas pueden ser consideradas en una primera definición, sin entrar en detalles, como una vara de cristal de un alto índice de refracción metida en un tubo, también de cristal, pero con el índice bastante más bajo.

Estas fibras sencillas se suelen empaquetar, formando grupos de cuatro o seis.

En la fabricación de una fibra óptica hay que tener en cuenta la tolerancia a la temperatura, compatibilidades químicas, índices de refracción,...etc.

Básicamente los métodos de fabricación de las fibras ópticas son :

- Un primer sistema de fabricación se basa en introducir un gas frío en un tubo caliente (figura 1.2). Las paredes calientes del tubo, calientan las capas más externas del gas reduciendo, consecuentemente, su densidad e índice de refracción. Este cambio en el índice de refracción es pequeño, indudablemente, pero suficiente para guiar haces ópticos.

Este sistema se denomina "lentes de gas" y tiene el inconveniente de que con la gravedad sufre grandes aberraciones de geometría óptica.

Existe una tendencia de las partes frías del gas a moverse hacia las capas más bajas de la guía-onda y este movimiento distorciona el índice de refracción.

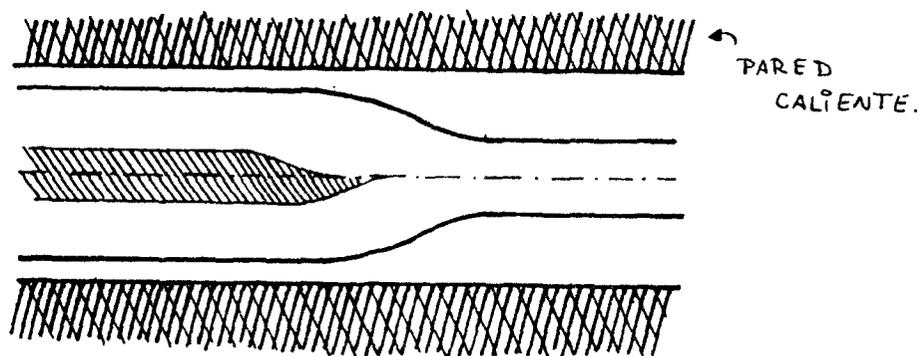
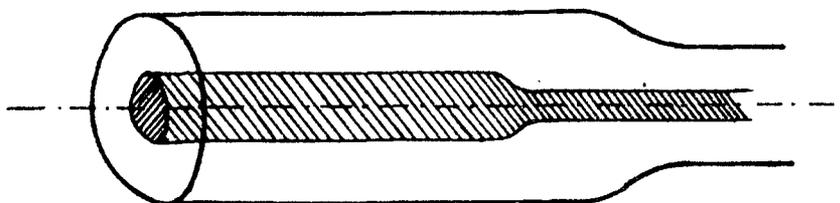


Fig 1.2

- Se trata de inducir a sólidos, cristal en este caso, a que cambie su índice de refracción mediante un cambio iónico, implantación iónica.
- Por último quizá el método más común basado en juntar dos cristales de diferentes índices de refracción, uno cubriendo al otro. Este tipo de fibras se denominan "step-index".



Con los aspectos que conciernen a la fabricación hay que tener muy en cuenta, aunque ya dedicaremos más adelante un estudio a esto, que la mayor fuente de pérdidas en las fibras son las impurezas del núcleo de cristal y la dispersión.

El desarrollo de las técnicas de fabricación se encuentra en una fase de constantes avances y actualmente concentrada en reducir las pérdidas de algunos decibelios por Kilómetro al orden de las decenas y centenas de unidad para la misma distancia. Es relativamente cercana en el tiempo la consecución de cristales de arena de Silicio puros con la consecuente reducción de los niveles de impurezas y pérdidas. Además la luz de dispersión puede ya ser suprimida con éxito usando envolturas con "film" absorbente.

De todas formas la mayoría de estas impurezas son adquiridas del recipiente usado para la construcción del cristal. En la manufactura de éste pueden darse variaciones indeseadas del índice de refracción o deshomogeneizaciones en exceso que producen luz de dispersión.

Los peligros que acechan en la fabricación de las fibras ópticas, como vemos son muchos y variados, no sólo en lo que concierne al cristal en sí, sino también a la fabricación del mismo.

Un medio relativamente eficaz para tratar de detectar y posteriormente subsanar las variaciones producidas en la fabricación son los estrictos controles de calidad a que tienen que ser sometidos.

Existen algunos elementos naturales que se asemejan, en sus características y propiedades a las fibras artificiales, por ejemplo:  $\text{Na}$ ,  $\text{Ca}$ ,  $\text{B}_2\text{O}_3$ ,  $8\text{H}_2\text{O}$ , e incluso, cuando no se desea una alta resolución, pueden utilizarse como tales siempre que se eliminen sus impurezas.

Por último mencionar el papel que juega la envoltura que cubre el núcleo de cristal en el contraste de la imagen o señal a transmitir. Para conseguir el máximo contraste es necesario que esta cubierta o abrigo sea lo más fina posible pero teniendo muy en cuenta la limitación impuesta por las interferencias con que se nos puede cargar la señal si ésta no es suficientemente aislante. Se trata una vez más de una cuestión de compromiso.

Los materiales más usados en la construcción de las fibras son, además del ya citado  $\text{SiO}_2$ , el  $\text{GeO}_2$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$

y B, O, con los que se mezcla para lograr los índices de refracción deseados. Este índice se obtiene en orden estimativo por la ley de escalas entre el elemento constitutivo y el dopante.

Las propiedades de las fibras comienzan a ser tenidas en cuenta desde que estas son de unas pocas micras de diámetro. A pesar de esta apreciación generalizada, en un primer estudio las fibras ópticas podrían ser consideradas como dieléctricos que propagan únicamente ciertos modos que dependen de los parámetros de la fibra, de la frecuencia, de la incidencia de la luz, ...etc.

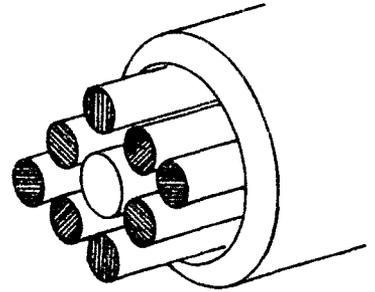
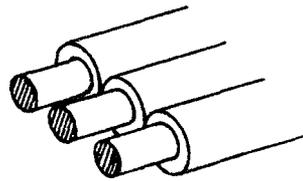
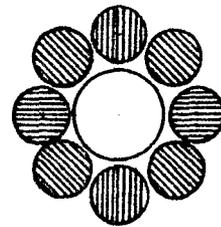
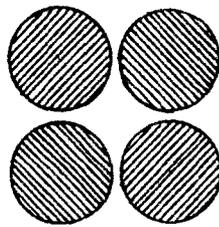
En una clasificación muy general de las fibras ópticas podríamos distinguir dos opciones clásicas :

- Fibras "singles" (sencillas):

Este tipo de fibras ópticas sólo permite la transmisión de información respecto a la magnitud del haz de luz incidente. En el caso, por ejemplo, de transmisión de una imagen, estas fibras transmitirían solamente un punto de la misma.

- Paquetes de fibras:

Es el camino más usual de transmisión. Se trata de agrupar una serie de "singles" en un mismo cable, con lo que podemos jugar con distintas informaciones al unísono. Normalmente estos paquetes muestran a través de un corte perpendicular a la dirección de propagación, una figura regular :



Para los paquetes de fibras muy finas y pegadas los escapes de luz pueden constituir un serio problema, por ello los requisitos que deben cumplir en cada caso particular exigen elegir el diámetro de la fibra y el ancho de la envoltura.

Los abrigos que primero se utilizaron fueron los metálicos. Estos tienen un alto coeficiente de reflexión, pero su absorción no es lo suficientemente alta como para producir los efectos deseados después de numerosas reflexiones. Como consecuencia la transferencia de la luz por abrigo de la fibra es reducido. Los abrigos de metal fueron sustituidos rápidamente.

Las fibras de cristal más gordas son normalmente cerradas en estuches de cristal de un índice de refracción más bajo. El ancho óptimo del estuche es aproximadamente igual a la longitud de onda de radiación transferida.

Lógicamente existen muchas maneras de clasificar los distintos tipos de fibras ópticas si tratamos de ampliar la

simple manción estructural a la que hemos hecho referencia, así en una ordenación coherente distinguiríamos las fibras de formas circulares y configuraciones simétricas como las de mayor valor potencial para las comunicaciones. ( Apéndice A figura 3, a), b), c), d), m), k). .)

La fibra "Step index" (a) permite transmitir la luz incluso de diodos con una alta resolución aunque cuando se trata de pulsos ópticos tiene el inconveniente de ensancharlos rápidamente. Como se deduce con facilidad tienen su mayor utilización para cortas distancias, primordialmente del orden de los cientos de metros.

Las fibras multimodo "near square" (b) son las más importantes en la actualidad ya que los ensanchamientos que producen son bastante pequeños, aunque no tan pequeños como sería lo ideal teóricamente.

Las fibras "w" (c) están basadas en un nuevo concepto. Lleva modos más pequeños para dar un radio interior que previamente se ha considerado. Los resultados experimentales de estas fibras todavía no están muy claros y siguen en estudio.

Las fibras del tipo (d) están dimensionadas de tal modo que únicamente van a transportar un modo, o en su caso muy pocos. Estas fibras "single mode" sólo pueden trabajar usando como fuente un Laser y aunque permanecen las dificultades de cableado se han podido comprobar sus bajas pérdidas en largas transmisiones.

Los campos ópticos pueden ser apretados en regiones anulares de más alto índice, es el caso de las fibras (k).

Los anillos concéntricos de alto índice de refracción pueden permitir operaciones multicanal preservando la simetría circular.

Las fibras (m) son, en principio, similares a las (a), pero la envoltura es de un material plástico de más altas pérdidas que el cristal. Para reducir la influencia de las pérdidas por envoltura en las totales, el sobre plástico está flojamente fijado al núcleo de la fibra. Con esta reducción en las pérdidas se nota una disminución considerable de las mismas pero el ensanchamiento del pulso es grande por lo que se suelen usar para distancias pequeñas.

Las fibras helicólicas (q) tienen un "graded-index" por su forma especial que recorre espacialmente la fibra. Pertenecen al tipo de las "near square". En principio el ensanchamiento de los pulsos en este tipo de fibras es pequeño.

Dentro de esta distribución que estamos realizando hay que considerar las fibras que emplean un sólo material, el Silicio por ejemplo. Estos tipos de fibras fueron los primeros propuestos y como se puede ver todavía no se habían conseguido sofisticaciones ni siquiera en la forma. Con ellas se pretendía atrapar los campos ópticos más pequeños que las longitudes de onda ya que la mayoría de los campos se propagaban en el aire. (por ejemplo (l))

Más tarde se descubrió que el Silicio puro tenía bajas pérdidas ópticas y comenzaron a funcionar las fibras "single material" que vendrían a ser las de la (f) hasta la (j), todas muy parecidas aunque trabajando con distintos modos.

Kaiser et al en 1973 experimentó con las (h) e (i) de un Kilómetro de longitud y las pérdidas fueron bajas (las del tipo (h) las utilizó como multi-modos y las (i) como "single mode") con lo que se reafirmaron las fibras "single material" como las más eficientes.

Las fibras (j) o de tubos unidos y las de cruces (l) pueden también ganar ondas ópticas. Las del tipo (p) serían helicoidales, "single mode" y "single material", y tienen la ventaja sobre las (i), de parecidas características, de que no necesitan membrana.

Dentro de todos estos tipos "single material" que hemos visto hay dos objeciones generales que se presentan :

- Existe una dificultad implícita en la fabricación (conseguir el Silicio puro) y de empalme.
- Hay que emplear una mayor cantidad de Silicio.

De todas formas éstas que emplean "Si" puro son menos sensibles a las radiaciones que las fibras dopadas.

Las fibras de tipo (n) están emparentadas con las "single material" ya que pueden estar construidas enteramente del mismo material. Los modos de orden mayor de la barra o núcleo son eliminados porque se juntan a los modos de la plancha externa. Este tipo de selección de modos es mucho más eficiente que en el caso de las fibras tipo "w".

Los del tipo (o) llevan la mayoría de la potencia óptica que transportan fuera del material dieléctrico. Pueden y suelen ser tapadas por confinamientos transversales.

Para finalizar este breve recorrido por los distintos tipos de fibras ópticas de más uso y valor hay que decir que

a algunas de las fibras "single material" se les está añadiendo anisótropos efectivos para ayudar al material en las rápidas variaciones espaciales del índice de refracción con lo que también se logra minimizar los ensanchamientos de pulsos.

La manera tradicional de trabajar con las fibras ópticas está basada en dos suposiciones primordiales :

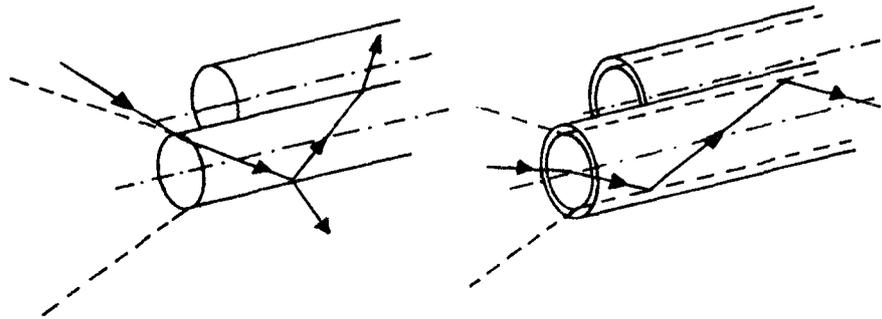
- La luz se transmite a través de fibras ópticas como resultado de una total reflexión interna.
- Los conjuntos de fibras ópticas empaquetadas transmiten la luz con total independencia unas de otras.

La primera suposición implica que la información se va a transmitir por aquellos rayos de luz que aparezcan a la entrada con un cierto ángulo. Además de esta, evidente, limitación hemos visto las imperfecciones e incoherencias que se incluyen en las fibras y que hacen que se absorba o disperse la luz. Ya hemos hablado de este tema e indicamos la utilización del dopaje y la búsqueda de la pureza como soluciones aportadas.

La segunda de las suposiciones básicas es también difícil de satisfacer en la práctica aunque ya es posible. Los experimentos demuestran que las interferencias entre fibras individuales se da cuando hay "una longitud de onda" de distancia de una a otra. Estas interferencias pueden causar el escape de luz de una sobre su vecina.

Este efecto se asocia a la penetración que tiene la luz en un medio de baja densidad en el caso de total reflexión interna.

Los estuches pueden ser adecuados para el aislamiento óptico pero son incapaces de eliminar los efectos de dispersión que se produce cuando el haz de luz entra en las fibras ópticas con un ángulo supercrítico. Si el ángulo de incidencia es superior al valor crítico, la condición de total reflexión interna se rompe y parte de la luz penetra en las fibras cercanas produciéndose un efecto de avalancha hasta alcanzar las superficies externas de la cubierta o dejarla salir al exterior.



Una protección auxiliar utilizada en algunos casos se basaría en la construcción de las fibras con un segundo abrigo absorbente que anule la luz de dispersión.

La propagación de la luz en fibras cuyo diámetro es sustancialmente mayor que la longitud de onda de la luz, es generalmente considerada dentro de las formas de trabajo de óptica geométrica.

La luz atraviesa el vacío a la velocidad de 299,806 Km. por segundo. Esta velocidad en cualquier otro medio es lógicamente menor. La proporción que existe entre la velocidad en el vacío y la velocidad en otro medio es el índice

de refracción de ese medio. En el caso del cristal, dividiendo ambas velocidades, se puede comprobar que el índice de refracción es 1,51.

El aire y el agua son dos medios, comúnmente adyacentes, y bastante buenos conductores de luz. Gracias a esta propiedad de nuestra atmósfera somos capaces de ver y sin embargo ninguno de los dos es un medio suficientemente seguro y eficaz cuando se trata de telecomunicaciones de alto nivel.

Los largos núcleos de cristal que constituyen las fibras ópticas permiten que el rayo de luz viaje hacia delante gracias a sucesivas reflexiones que en la mayoría de los casos superan el 98% de la luz incidente, siempre dependiendo de la capacidad de la fibra, del ángulo de incidencia y de la luz que sea, pues como sabemos el índice de refracción no es constante para todas las longitudes de onda, por ejemplo, las longitudes de onda más corta (azul) se ven afectadas por una mayor reflexión comparadas con las de longitud de onda más larga (rojo).

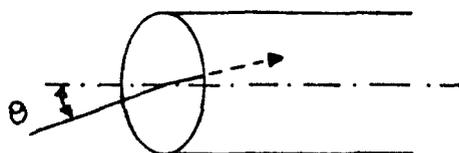
En los trabajos de fibras ópticas se busca fundamentalmente una eficiente transmisión de la luz mediante un perfeccionamiento del conjunto que constituiría un sistema básico ( Ver figura 1.1) pero sobre todo del elemento que servirá de sostén físico. Es en este punto donde esta nueva ciencia comienza a separarse de la óptica tradicional, pues ya no basta el estudiar la reflexión del haz en una superficie plana, sino ésta combinada con la propagación del mismo a través de las barras o núcleos de cristal (en algunas ocasiones plástico).

Como quiera que se van a barajar nuevos y viejos conceptos, es necesario explicar cada uno de ellos con detalle.

### 1.2.2.1.- Apertura numérica

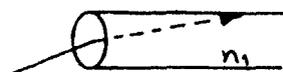
Se define como :  $A = n \sin \theta$

donde " $\theta$ " es el ángulo formado por el radio de la pupila de entrada del sistema óptico en el punto donde el eje óptico encuentra el objeto plano, y " $n$ " es el índice de refracción del medio.

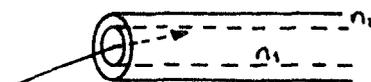


Este parámetro es uno de los más importantes pues determina directamente la resolución de potencia del sistema y se suele dar como característica de las fibras.

En las fibras ópticas esta apertura numérica es normalmente mayor que en las lentes, así como el ángulo de visión de las cubiertas, aunque está limitado por las dificultades técnicas que entraña el empaquetar las fibras. El empaquetamiento juega un papel importante dentro de la apertura numérica, así :

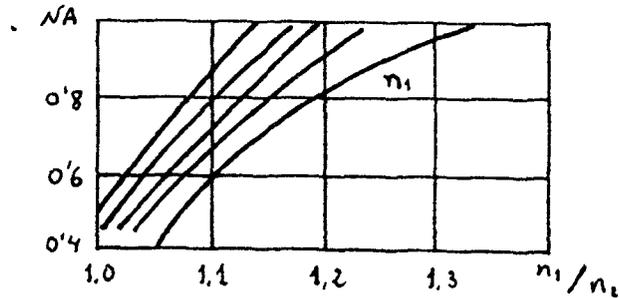


$$NA = (n_1^2 - 1)^{1/2}$$



$$NA = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2}$$

La relación entre los índices de refracción y la apertura numérica viene dada en una tabla que dibujamos a continuación por la importancia que tiene el conocimiento de ésta y de como podemos variarla mediante la alteración de los índices de reflexión del núcleo y del abrigo.



Ejemplo:

$$\text{Si } \left. \begin{array}{l} NA = 0.98 \\ n_1/n_2 = 1.3 \end{array} \right\} \begin{array}{l} \frac{NA}{n_2} = \sqrt{\left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 - 1} \\ \frac{0.98}{n_2} = \sqrt{0.69} \Rightarrow \begin{array}{l} n_2 = 1.086 \\ n_1 = 1.412 \end{array} \end{array}$$

$$\text{Si } \left. \begin{array}{l} NA = 1 \\ n_1/n_2 = 1.35 \end{array} \right\} \begin{array}{l} \frac{1}{n_2} = \sqrt{0.8225} \\ n_2 = \frac{1}{0.906} \Rightarrow \begin{array}{l} n_2 = 1.05 \\ n_1 = 1.417 \end{array} \end{array}$$

Con esta tabla, conociendo el índice de refracción de la fibra que tenemos, podemos alterar el índice de refracción de la cubierta para obtener la apertura numérica deseada, o combinar estos tres parámetros como queramos para variar dopajes del núcleo o del abrigo y hacer que aumente la apertura numérica.

Si el ancho de la primera envoltura es dos veces la longitud de onda el ancho de la segunda, ésta no influye.

Los materiales usados hoy en día permiten acercarse a una apertura numérica próxima a 1 e incluso superar este valor. Particularmente estos altos logros son característicos de sistemas para emisión en infrarojos porque los materiales ópticos correspondientes se distinguen por sus grandes índices de refracción.

La apertura numérica de una fibra curva es mucho más difícil de hallar pues hay que tener en cuenta el radio de curvatura y su diámetro.

En ocasiones se utilizan medios diferentes para envolver el comienzo y el final de las fibras con lo que se obtienen arreglos deseados para dispersar o concentrar el haz de luz como se quiera, pues estamos jugando con distintas aperturas numéricas.

#### 1.2.2.2.- Rayos

Cuando hemos visto la apertura numérica hemos considerado el haz de luz en su composición de rayos meridionales. Los rayos oblicuos por el contrario serían aquellos que no traspasan el eje de la fibra.

La importancia del estudio de estos rayos estriba en que hay un ángulo mínimo permisible para que exista total reflexión interna.

En este apartado trataremos de explicar todo lo que concierne a la propagación y transmisión propiamente dichas.

Como ya hemos explicado, la eficacia de la transmisión de la luz depende, en una fibra, de la transparencia del núcleo, y la envoltura, la calidad de las superficies reflectantes, el grado de escape de luz a través de la envoltura,

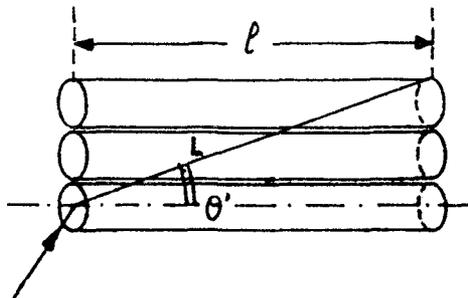
las pérdidas de Fresnel,...etc.

Las pérdidas se estudian normalmente separando las del núcleo y las de la envoltura, y además será objeto de un apartado particular más adelante, sin embargo y ya que estamos pasando revista a los parámetros más importantes es imprescindible indicar que la absorción de la luz viene dada usualmente por :

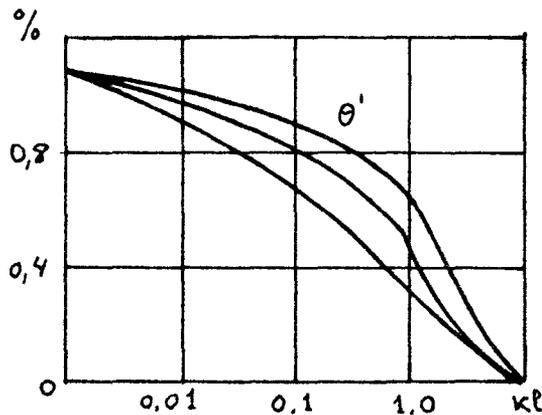
$$I = I_0 e^{-\kappa L}$$

Donde la "I" sería la intensidad de entrada, "I<sub>0</sub>" la intensidad de salida, "K" el coeficiente de absorción y la "L" el paso efectivo del rayo, que vendría definido por :

$$L = l \sec \theta'$$



Atendiendo a estas definiciones se puede concluir resumiendo los resultados en una tabla donde se refleja la transmisión en tanto por ciento dependiendo de la longitud de las fibras y del coeficiente de absorción, y según sea el ángulo "θ'". Esta tabla quedaría de la siguiente forma :



Como se puede apreciar, para un mismo ángulo " $\theta'$ " a medida que disminuye la longitud de la fibra aumenta el porcentaje de eficiencia de la transmisión.

Las pérdidas en cada total reflexión interna, que hasta ahora no habían sido consideradas, pueden ser permitidas introduciendo un coeficiente de reflexión  $\rho \neq 1$  que depende del ángulo de incidencia del haz de luz en la superficie interior de la fibra y también del ángulo de refracción. Aplicando este concepto a la transferencia tendríamos :

$$T = \frac{I}{I_0} = e^{-\kappa L} = e^{-\kappa \rho \sec \theta} = e^{-\kappa \frac{\rho}{[1 - (\sin \theta / n_1)^2]}^{1/2}}$$

En el caso de que  $0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$

$$T = T_{\min} = e^{-\left[ \frac{n_1 \kappa \rho}{(n_1^2 - 1)^2} \right]}$$

Como hay " $m$ " reflexiones :

$$T = \sum_{m=0}^{\infty} T_m = \sum_{m=0}^{\infty} R^m \int_{\theta_{m-1}}^{\theta'_m} e^{-\frac{\kappa \rho}{\cos \theta}} \sin \theta' d\theta'$$

Con este nuevo  $\rho \neq 1$  tenemos  $T = 1$ .

Con lo que habríamos conseguido la total transferencia de rayos a través de una fibra cilíndrica. Las fibras centelleantes son de mucho uso en la física nuclear como detectores y el núcleo de éstas está preparado con materiales especiales usando el centelleo contador.

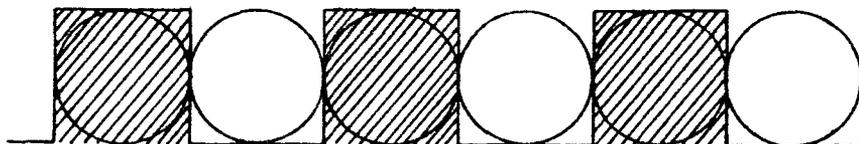
En la práctica se ha llegado a comprobar que los resultados calculados en la teoría únicamente coinciden con los experimentales en el caso de los coeficientes de reflexión por lo que el resto de los parámetros, excepto la apertura numérica, son tomados más bien a título orientativo y comparativo entre sistemas, pero nunca con un rigor extremo.

Otra consideración teórica que suelen atender los científicos es el contraste de imagen. El contraste de imagen se define por el valor :

$$C = \left| \frac{I_{\text{máx}} - I_{\text{mín}}}{I_{\text{máx}} + I_{\text{mín}}} \right|$$

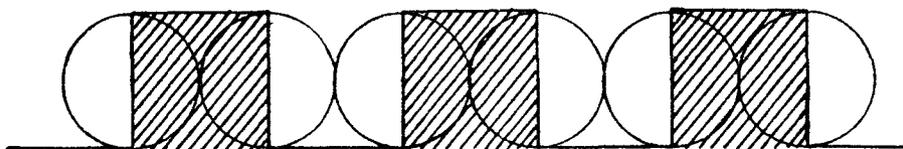
Donde la "I" representa en cada caso la intensidad de iluminación. El contraste de imagen está íntimamente ligado con el poder de resolución de la fibra, aunque también depende de la orientación de la imagen y sobre todo de si está cerca, del ancho de la imagen y del diámetro de la fibra.

Consideremos :



En este caso  $C=1$

Si rodamos un poco las luces :

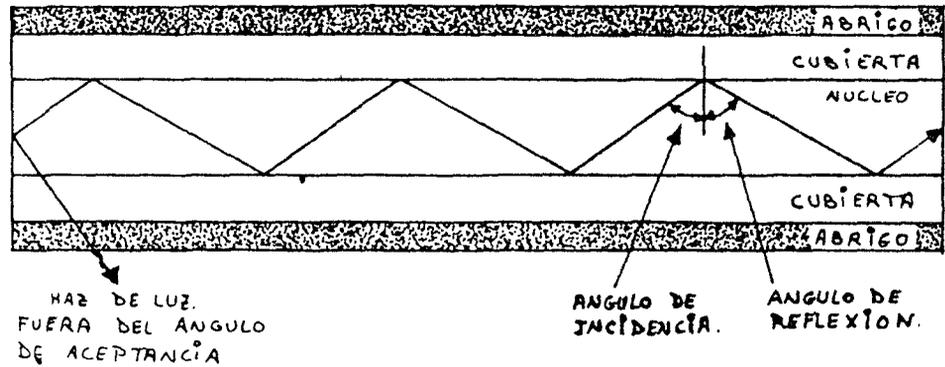


La luz se divide en las fibras adyacentes y por tanto la "C" disminuye.

Estudios teóricos y experimentales recientes han demostrado que con la distribución senoidal de iluminación el flujo de iluminación que emerge en seis fibras concéntricas es el 5-10 % de la intensidad de flujo que emerge de la fibra central, y la calidad de la imagen sigue siendo satisfactoria.

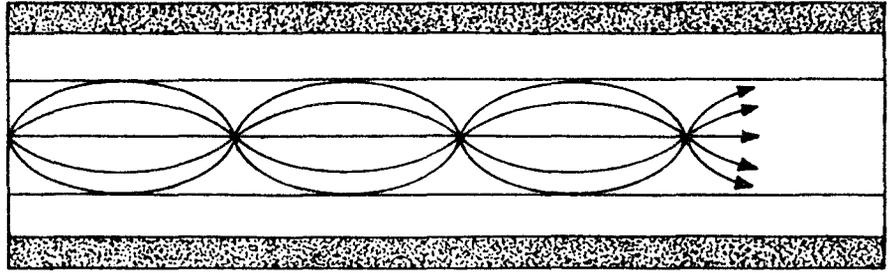
El tiempo de propagación, al igual que en los trabajos que conciernen a radar, en las fibras ópticas se considera importante en grado sumo. Todos los rayos que entran en la fibra con un ángulo incluido en la apertura numérica o ángulo de aceptación de la fibra se reflejarán en la superficie de ésta (debido a la diferencia de índices de refracción que existe entre el núcleo y la cubierta) y seguirán un curso en zig-zag a lo largo de toda la fibra.

La siguiente ilustración permite verlo mejor :



En la medida en que entre los dos extremos de la fibra los rayos experimentan variaciones en los ángulos de reflexión y refracción llegarán en tiempos diferentes. Esta diferencia en los tiempos de propagación se refiere a la dispersión normal en las fibras. Tal dispersión limita el ancho de banda de algunas a 20 Mhz. en un kilómetro. Esto ha constituido siempre un incentivo para los científicos y fabricantes que buscan denodadamente conseguir una banda que oscile entre los valores de 300 y 400 Mhz., pues en algunos casos se necesitan éstos márgenes. Como fruto del ingenio y desarrollo de la tecnología avanzada en la manufactura de las fibras se desarrollaron las fibras "graded-index".

Este tipo de fibras consiguen que la luz viaje más rápido en su interior y que las diferencias en los tiempos de propagación de los distintos rayos sean minimizadas.



Estas fibras además consiguen unos anchos de banda de propagación superiores a los 600 Mhz. por kilómetro de longitud de la fibra. Comparando este valor con las bandas utilizadas por las emisoras de radio standard (que se extiende de 0,54 Mhz. a 1,6 Mhz.) podemos operar 600 espectros simultáneos a través de una fibra. Igualmente podemos operar 100 canales simultáneos de televisión si suponemos cada uno con 6 Mhz, de ancho de banda, Estas aplicaciones se refieren a una sola fibra, pero un paquete no superior a un dedo puede contener cientos de éstas. Como se puede apreciar el campo de las aplicaciones y ventajas es incalculable, hasta el punto de que cada día lo que parecía futuro se está convirtiendo en presente.

La información transmitida a través de las fibras se puede decir que es algo corriente, incluso a nivel de utilización popular, en países como los Estados Unidos. Las nuevas líneas en el campo de la investigación van destinadas a mejorar la tecnología existente y abrir nuevos campos de posibilidades como puede ser la transmisión de potencia a través de fibras ópticas.

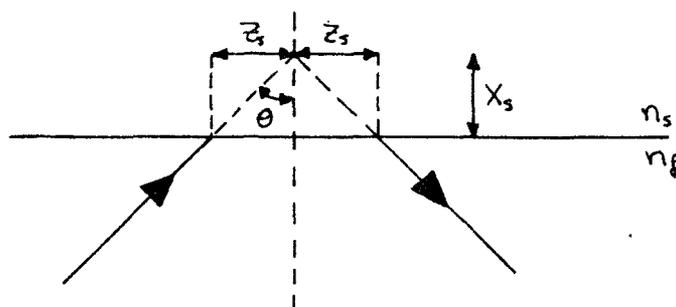
La idea es que la potencia eléctrica se convierte en potencia a frecuencias ópticas. En el punto de llegada se

realiza la operación inversa mediante una celda fotovoltaica. Los resultados obtenidos justifican que las investigaciones continúen.

De entre los materiales que además de reflejar la luz son capaces de transportarla en su interior, para los trabajos con fibras ópticas se suelen escoger los cristales y plásticos que cumplen unos requerimientos especiales.

Es perfectamente conocido que la luz mantiene una mejor reflexión en superficies previamente pulidas y cuando incide en dichas superficies con un ángulo distinto al perpendicular. Cuando trabajamos con barras de cristal (normalmente de Silicio) para la construcción de fibras ópticas nos encontramos con largas superficies planas que deben ser perfectamente pulidas para que cuando un haz incida con un ángulo de  $45^\circ$  se refleje en dirección opuesta también con un ángulo de  $45^\circ$ .

A pesar de que siempre se va a procurar que exista total reflexión no siempre se va a conseguir de aquí la necesidad de tener en cuenta el pequeño desplazamiento que se produce en la reflexión de los rayos :



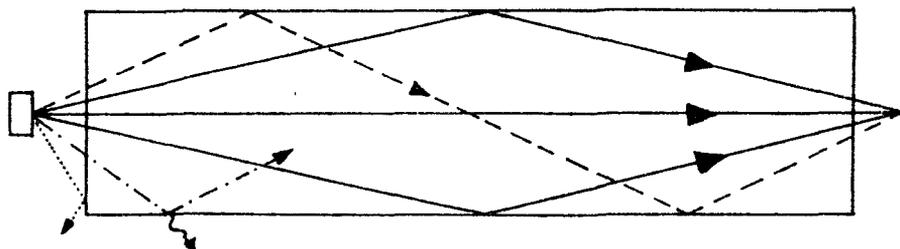
Este desplazamiento se denomina desplazamiento de Goos-Hänchen y vendría definido por :

$$X_s = \frac{Z_s}{\operatorname{tg} \theta} \quad Z_s = \frac{d\phi}{d\beta}$$

$$\beta = K n_f \operatorname{sen} \theta$$

La transmisión ideal a través de una fibra óptica de cristal se obtendría cuando el rayo de luz entra en la barra de cristal formando, exactamente, una línea paralela al eje de ésta y sale por el extremo final habiendo descrito a lo largo de toda ella una perfecta línea recta. Evidentemente estamos hablando de un caso hipotético que se podrá dar en algún momento concreto, pero que en ningún caso es usual debido a que las fuentes de luz no pueden proporcionar un único rayo en una dirección dada ( las lámparas radian abarcando casi la totalidad de la circunferencia, es decir  $360^\circ$ , los LED en menos de  $180^\circ$  y sólo los Lasers logran una cierta coherencia de haz), por tanto el diseño debe permitir el mayor número de rayos con ángulos diferentes.

Habría pues un número infinito de rayos entrando, y un número infinito de estos rayos saliendo, por tanto un número infinito de ángulos de incidencia. Habría muchísimos rayos que ni siquiera logran entrar en la fibra pues su ángulo de incidencia excede el ángulo crítico.

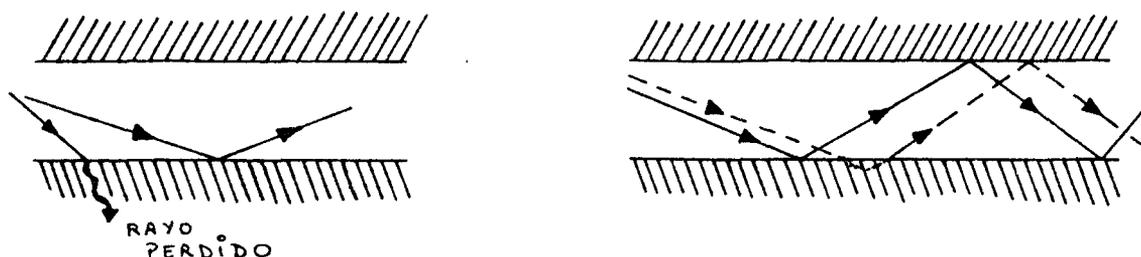


Uno de los factores que también intervienen en el cómputo de la eficiencia de una fibra óptica es la pérdida que se produce cuando un haz cambia de medio de propagación, en este caso, cuando el rayo, partiendo de la fuente de luz trata de penetrar en la fibra.

Por razones particulares de manufactura como son el cableado y propagación de la luz, no se suelen usar fibras cuadradas lo cual dificulta el pulido de las superficies de las circulares, que son las mayoritariamente utilizadas. Si las formas cuadradas tuvieran utilidad no tendría ningún problema el conseguir las calidades en los pulidos que se requieren en trabajos tan avanzados.

No todos los rayos que se pierden al entrar en la fibra son motivados por la reflexión que se produce en la cara de entrada de ésta sino que una vez que han entrado hay rayos de luz que salen de la misma atravesando su superficie debido a que su ángulo de incidencia supera el de aceptación de la fibra. Estas últimas pérdidas de haces se pueden minimizar, como ya comentamos cuando hacíamos referencia a las suposiciones de las que se parte en la construcción de las fibras ópticas, mediante el uso de abrigos de apropiados

## Índices de reflexión.



El cono de aceptación puede aumentarse considerablemente colocando un juego de lentes entre la fuente y la superficie de comienzo de la fibra óptica para capturar más luz de la fuente.

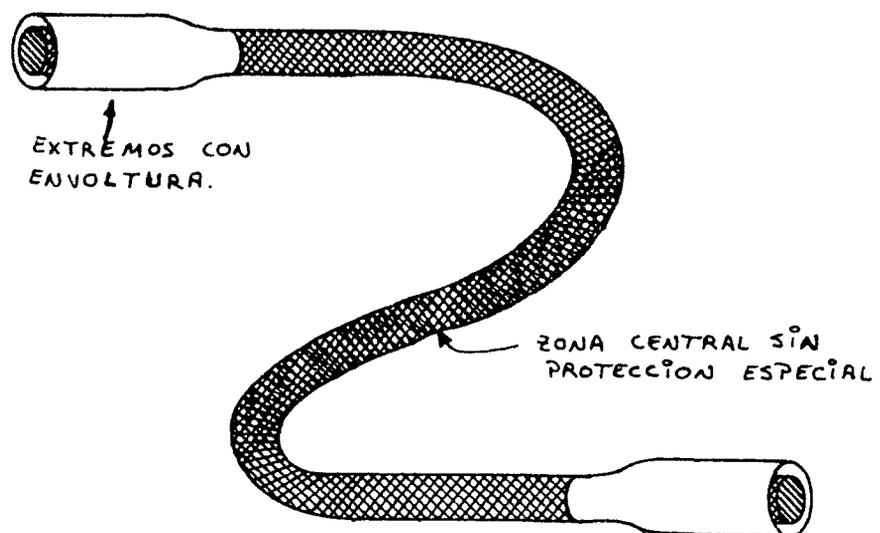
La luz como onda electromagnética que es viaja a una velocidad finita en un medio dado. Si el camino para un rayo dado es mayor que la trayectoria axial, al rayo le tomará más tiempo atravesar la fibra que a un rayo axial. Estas diferencias en los tiempos de propagación propician efectos adversos y causan algunas distorsiones de la señal.

Estas distorsiones se desprecian normalmente pues estamos trabajando con fibras tan finas que su diámetro puede fácilmente igualar al de un cabello humano.

La propagación a través de las fibras depende en gran medida de las envolturas, así por ejemplo las "step-index" están cubiertas por más de un material, lo que crea una línea aguda de demarcación entre el núcleo y el envoltorio, mientras que las "graded-index" tienen un único medio de manufactura que causa que el índice de refracción decrezca continuamente de una manera radial desde el eje de la fibra.

Las envolturas que proporcionan a ambos extremos de la fibra una disposición relativa igual son llamadas coherentes. Cuando se trata de una transmisión de imágenes es necesaria la utilización de estas fibras con estos tipos de envolturas puesto que las no-coherentes se usan exclusivamente para transmitir iluminación.

En ocasiones para mejorar la flexibilidad de las fibras ópticas lo que se hace es recubrir especialmente los extremos de la misma, dejando libres (siempre cubiertas con algún tipo de envoltura o lubricante) la parte central.



Las principales características de las envolturas coherentes son :

- La eficiencia en la transmisión de luz.
- La apertura numérica excasamente selectiva.
- El poder de resolución.
- El contraste de imagen.

Cuando se habla de paquetes de fibras la eficiencia de transmisión de luz está determinada por las propiedades de absorción de las fibras individuales y por su calidad.

La apertura numérica está determinada por la de cada una de las fibras que componen el paquete y depende, como ya hemos visto, de los índices de refracción del núcleo y la cubierta.

### 1.2.2.3.- Poder de resolución y eficiencia

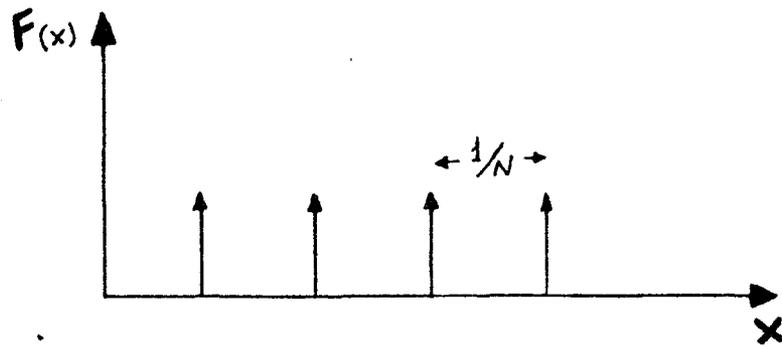
Como resultado de las reflexiones en la fibra óptica se observa una iluminación uniforme en la salida. Esta iluminación es proporcional a la luz incidente.

Las presentaciones pobres, por tanto, se pierden irremediablemente, al igual que la utilización de las partes ciegas. (láminas y envolturas)

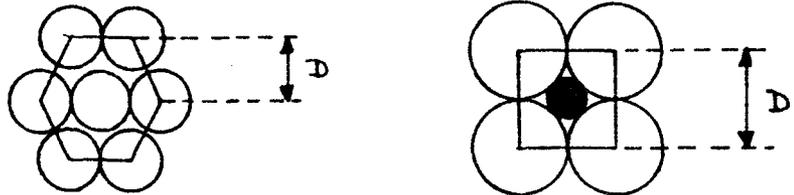
El poder de resolución de una fibra se puede definir si consideramos, de acuerdo con la teoría de la información, que " $F(x)$ " está describiendo la distribución espacial de información en la dirección " $x$ ", la cual no contiene frecuencias más altas que " $N$ " por unidad en la dirección " $x$ ". Esto quiere decir que si la información es leída cada  $1/N$ , todos los puntos transmitidos son detectados, aunque no sabemos nada sobre la posible información contenida entre los sucesivos puntos de lectura.

El máximo poder de resolución de un sistema de fibras que transmite con una cierta distribución de información está determinado por el periodo real de lectura de la corres-

pendiente dirección :



Este periodo para cualquier dirección en el plano de salida de un paquete de fibras sería el diámetro de la fibra.



El poder de resolución es una función pues del diámetro de las fibras, además de serlo del ancho de la cubierta y el paquete. Por tanto no sólo sería necesario y conveniente estrechar el diámetro de las fibras a los mínimos posibles, sino también el de el espacio entre ellas. Así tenemos que la eficiencia de transmisión es inversamente proporcional a la fracción del área de la sección longitudinal ocupada por la cubierta de la fibra, es decir, los sectores vacíos. El área efectiva crece usando secciones longitudinales de forma hexagonal o cuadrada, lo cual mejora notablemente, no sólo la aceptación, sino también el poder de resolución.

Como la imagen se transmite en dos dimensiones, el paquete de fibras debe tener la estructura adecuada de poder de resolución en ambas direcciones. El poder de resolución es expresado en términos de espacios entre láminas en las que cada fibra está en contacto con dos adyacentes en la misma lámina.

El factor básico de influencia del poder de resolución en los sistemas de fibras ópticas, está claramente en el diámetro. De todos modos siempre hay que tener en cuenta que aunque las fibras más finas tienen mayor poder de resolución, los paquetes formados por muchísimas fibras finas presentan efectos de difracción significativos causando iluminaciones longitudinales en los finales de fibras adyacentes y por tanto los poderes de resolución se reducen.

Se ha encontrado otro medio por el cual el poder de resolución puede ser incrementado notablemente sin reducir el diámetro. Los finales de los paquetes están hechos para soportar oscilaciones paralelas a los planos de la imagen. Para acentuar la información en este caso lo que se hace es transferirla a través de una fibra móvil. Este método se llama "exploración dinámica".

La razón por la que este método aumenta el poder de resolución viene dado porque, al ser movibles las fibras, suprimimos espacios ciegos en el paquete y conducimos las partes activas de la fibra a través de todos los detalles de la imagen transmitida.

Resultados parecidos pueden obtenerse por el movimiento de la imagen. Para ello se usan platos de cristal vibrando sincrónicamente montados a la entrada y salida de la fibra. Un rayo ataca un plano paralelo al plato, junto al ángulo "0", y es desplazado mientras retiene su dirección original de propagación. La efectividad de este dispositivo depende del ancho del plato, de su índice de refracción y del ángulo de incidencia.

Si se monta un plato a la entrada del paquete y es obligado a oscilar paralelo al final de la fibra, la imagen transmitida es repuesta con una cuña de cristal que actúa como un prisma desplazando los rayos de luz. Lo difícil de este procedimiento es lograr el perfecto sincronismo de los platos.

En la práctica la imagen está formada por la sucesión de puntos numéricos elementales. Esta combinación tiene un poder de resolución más bajo que en el caso anterior.

TEST

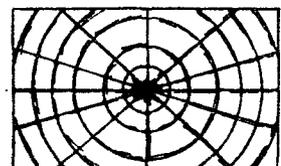
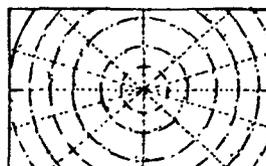
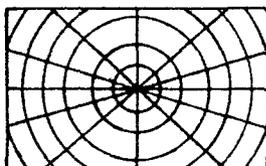
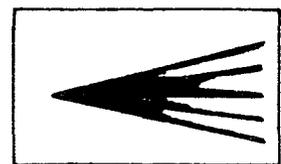
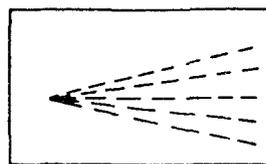
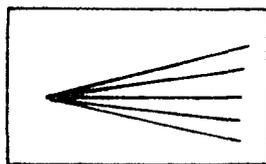


Figura de  
test

Con paquete  
estático

Con "exploración  
dinámica".

El incremento del número de elementos (puntos que constituyen la imagen) produce la disminución del poder de resolución debido a que los desajustes de posición de unos elementos no son relativos a los otros. Como resultado un golpe de haz que sale de cierta fibra de un primer elemento puede atacar un punto ciego del siguiente elemento, o puede dividirse entre dos fibras adyacentes de ese elemento.

El contacto imperfecto entre varios elementos de fibras ópticas conduce a pérdidas de Fresnel (ver sección 1.3.5.). esto puede ser eliminado casi en su totalidad utilizando abrigo óptico o inmersión en líquidos.

Para concluir baste recordar que el poder de resolución está determinado por el diámetro, que debe por tanto ser reducido, pero si se reduce el diámetro la difracción puede causar efectos indeseados. Se tiene pues que adoptar una solución de compromiso u optar por el método de "exploración dinámica", dependiendo de la eficiencia que queramos conseguir.

#### 1.2.2.4.- Uniones entre fibras

Idealmente una fibra óptica debería ser una barra continua desde la entrada hasta la salida. En la práctica las fibras son construidas con longitudes discretas que normalmente no sobrepasan el kilómetro, aunque existan extensiones de mayor longitud. Si la fibra tiene que juntarse con otra para continuar el tendido de la red, en la unión van a aparecer pequeñas pérdidas, por muy perfecta que hayamos tratado de realizar dicha junta.

Las pérdidas más serias e indeseables en las uniones se producen cuando las dos fibras no están alineadas con respecto a sus ejes axiales (Ver apéndice A fig. 4). Asumiendo que cada uno de los extremos que se van a unir han sido cortados según el eje perpendicular al axial y sus superficies han sido altamente pulidas, la desalineación de las dos fibras puede causar la pérdida total de la señal, y en el mejor de los casos, un efecto que puede considerarse despreciable en algunas circunstancias.

Los problemas a la hora de efectuar uniones entre fibras no se reducen a una desalineación axial, sino que pueden venir dadas también por la separación que exista entre los extremos de las fibras y por el desajuste en la alineación angular (Ver apéndice A fig. 4).

Una manera de salvar las dificultades que presenta la separación entre fibras se basa en la utilización de algún material especial (algún tipo de pegamento) con un índice de refracción lo más parecido posible al del núcleo de la fibra. Esta solución, como es lógico, reducirá prácticamente al nivel cero la separación entre los extremos a unir y gracias a las cualidades ópticas por las cuales ha sido elegido el pegamento no se producirán mayores pérdidas de luz.

La solución para los desajustes angulares es más complicada ya que obliga a la utilización de artilugios mecánicos especialmente diseñados para este cometido. En la mayoría de los casos redunda en la utilización de lentes convencionales dispuestas de maneras muy concretas según cada

caso y siempre montados en aparatos que deben cumplir condiciones muy estrictas.

En ocasiones se utiliza un tipo adicional de corrección. Este modelo recibe el nombre de "junta caliente" y consiste en embotar y soldar los dos extremos de las fibras con fuego o con un arco eléctrico.

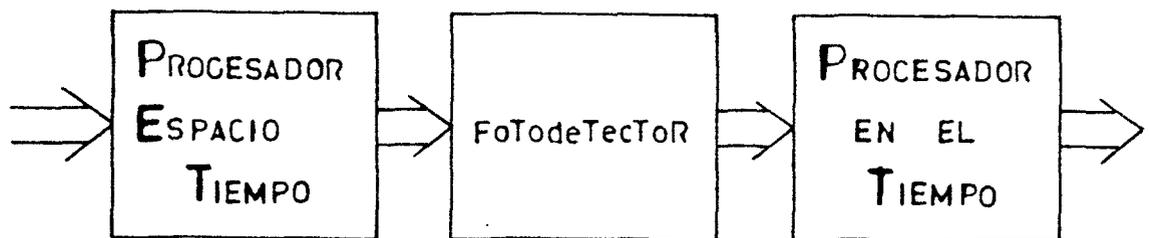
Refiriéndonos a los tres gráficos expuestos en el apéndice A figura 4 y que representan las pérdidas más importantes en las uniones de fibras, con las correspondientes curvas de relación, es evidente que en todas ellas parece aconsejable la modulación de luz.

Una modulación analógica puede ser aplicada a la onda portadora variando la cantidad de desajuste axial, con la limitación de frecuencia de modulación deseada, y mediante la separación de la distancia entre los extremos de las fibras a la frecuencia deseada, o cambiando el ángulo de la junta desde cero al máximo posible según los valores marcados. Otra posibilidad para efectuar la modulación aprovechando los desajustes en las uniones se presenta con la utilización de la celda o célula de Kerr, en la cual un cristal cambia de opacidad (o, desde el punto de vista contrario, de transparencia) a la frecuencia de modulación. Colocada entre las dos fibras, la celda de Kerr, aumentará o reducirá la cantidad de luz enviada de una a otra. Estos tipos de modulación son comúnmente usados pero sólo a nivel de laboratorio por el momento, aunque se trabaja en ellos para llevarlos al terreno práctico en el mundo de las telecomunicaciones.

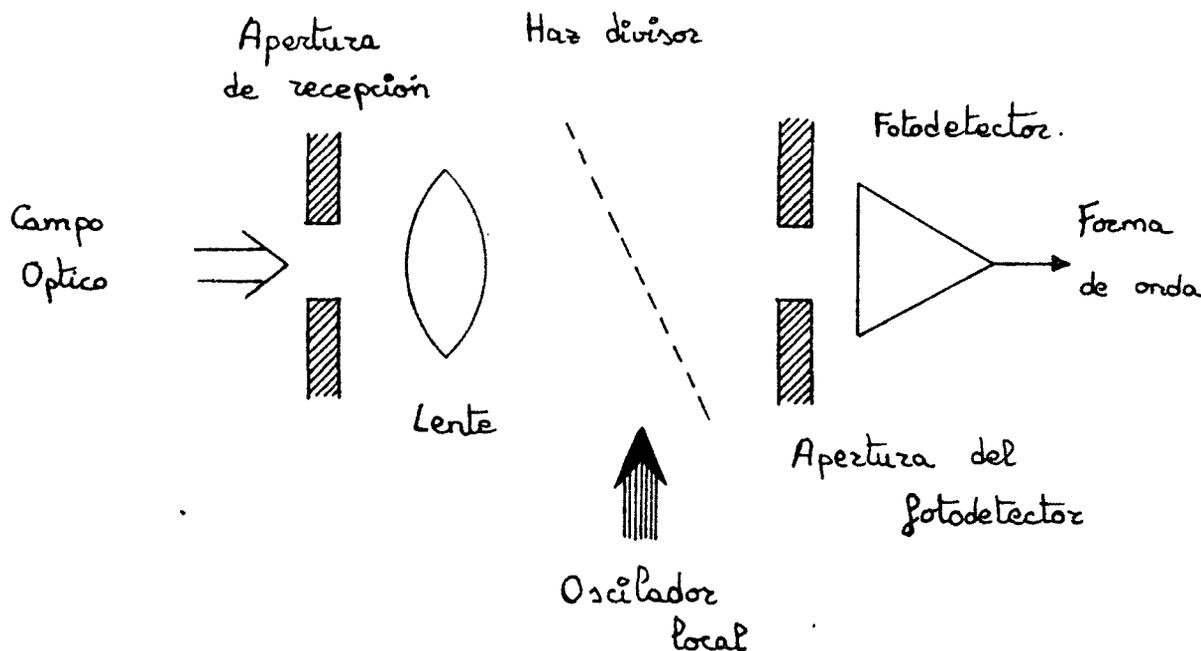
En ocasiones no conviene realizar una junta fija, de ahí que el método de fusión de los extremos no sea muy utilizado. Para estos casos lo que se suele hacer es incluir a la fibra en un paquete formado por varios "pin" (normalmente tres o cuatro) y fuertemente embotados de tal manera que los extremos de las fibras queden firmemente juntos y empaquetados en el centro del triángulo o del cuadrado. La alineación en estos casos la propicia los "pin" que a la hora de la unión deben de encajar perfectamente. Cuando se pretende unir a más de una fibra, los distintos mini-núcleos formados por los "pins" o conectores, y cada fibra en el centro, se unen para formar un gran paquete que aglutina a todos.

### 1.2.3.- El receptor

Pasamos en este apartado a detallar el tercer gran bloque que compone un sistema operativo de fibra óptica. Conceptualmente un receptor estaría compuesto por :



Normalmente para lograr un enfoque apropiado y aprovechar toda la energía luminosa que se recibe suele usarse una lente.



Si el oscilador local tiene una frecuencia apropiada, diferente a la central del campo óptico recibido, la estructura de recepción es llamada "receptor heterodino", si la frecuencia diferencia es cero, se llamaría "receptor homodino". En el caso de que no se utilice el oscilador local, el receptor sería de "detección directa".

Como hemos visto en la parte inicial cuando hablábamos de la naturaleza de la luz, ésta está compuesta por cuantos de energía que avanzan formando ondas electromagnéticas. La energía con que se recibe un cuanto luminoso en el fotodetector sería  $h\nu$ . Si suponemos que el ancho de banda de modulación es "B" y la potencia "P", cuando  $P/B$  sea comparable o menor que  $h\nu$ , los efectos del cuanto serán observables. También cuando  $h\nu/B$  es comparable o mayor que el inevitable ruido térmico  $KTB$ , tendremos el "ruido de cuanto" tan importante en los sistemas de comunicación ópticos como el propio ruido térmico.

Hay entonces que distinguir tres tipos de señales ópticas, las incoherentes, las coherentes de fase conocida y las coherentes de fase desconocida. El estudio de éstas en cada caso concreto es fundamental en la construcción del receptor.

Las comunicaciones, en general, se encuentran en última instancia restringidas o limitadas por el ruido térmico. En el caso de transmitir una información mediante señales infrarojas o de rango óptico, la limitación en ruido viene dada por lo que llamamos "ruido cuántico".

Si realizamos un breve estudio de como puede influir este tipo de ruido en una transmisión de tipo binario, podremos apreciar mejor cual es su influencia.

Consideremos un sistema de comunicaciones que a intervalos  $1/B$  emite un pulso. La probabilidad de que se de un pulso en un determinado intervalo es "Q". El sistema receptor grabará un 1 en un determinado intervalo de tiempo si en él detecta al menos un fotón, si no, grabará un 0.

Si suponemos, en un principio, que no hay ruido en el canal, cuando no enviamos ningún pulso el receptor graba un cero. Pero si el transmisor envía un 1 hay una probabilidad finita de que no se reciba ningún fotón aunque se haya enviado un haz de luz como pulso. De todas formas esta probabilidad es conocida y por tanto se puede estudiar y hacer que disminuya lo más posible. La distribución de probabilidad sería :

$$f(m) = \frac{S^m}{m!} e^{-S}$$

Donde :

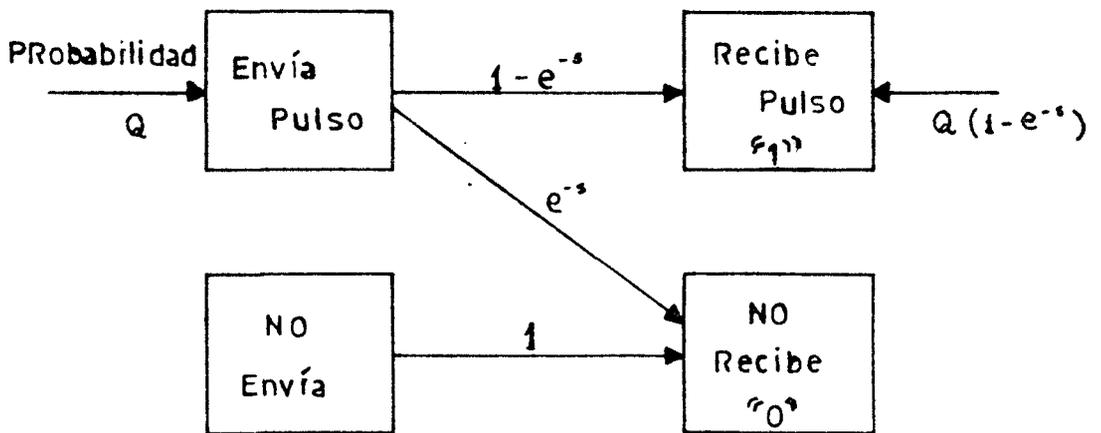
$m$  = número de fotones

$s$  = promedio o número de fotones que se esperaba recibir con el pulso

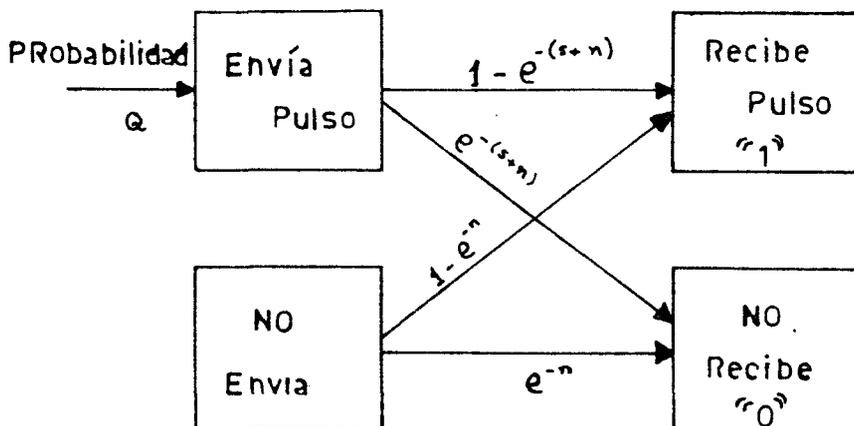
$e^{-s}$  = probabilidad de no recibir fotones

$1 - e^{-s}$  = probabilidad de recibir al menos un fotón.

Veamos esquemáticamente, por diagrama de bloques, como actúa el ruido afectando la recepción y alterando las probabilidades :



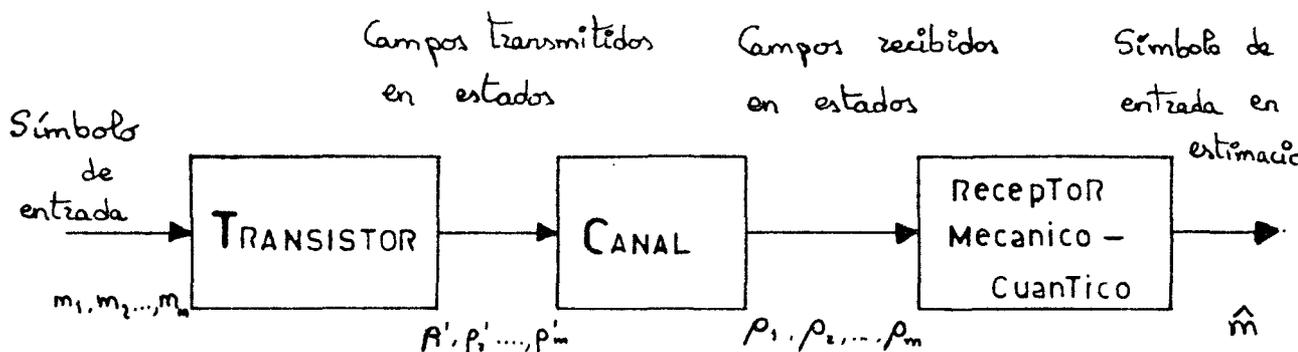
Si ahora consideramos el ruido :



El desarrollo de las nuevas técnicas de detección óptica, sobre todo en el campo de los radares, y las mejoras progresivas en la manufactura de los canales (fibras ópticas) ha permitido ir eliminando el ruido casual de las comunicaciones ópticas. La cuestión estriba en que la eficacia de los detectores no está limitada únicamente por el ruido casual que acompaña a la señal y se genera en los detectores, sino también por la naturaleza del cuanto y los elementos estáticos que introduce el canal en los procesos de detección.

Según Takahasi (1965) un receptor ideal estaría formado por una celda cerrada que se abriría sólo para permitir la entrada de la señal y luego se volvería a cerrar para extraer toda la información que ese campo electromagnético pueda aportar.

Las teorías de detección actuales prescriben que no sólo la medida de una señal debe ser procesada, sino que también debe de hacerse ésta. Si vemos un modelo típico de sistema de comunicación :



La probabilidad de error sería :

$$P(\varepsilon) = P_r [\hat{m} \neq m]$$

y es independiente, como es natural, del tiempo después de cerrar la apertura de la cavidad receptora. Si se tratara de un sistema analógico, la probabilidad correspondería a:

$$E [ |\hat{m} - m|^2 ]$$

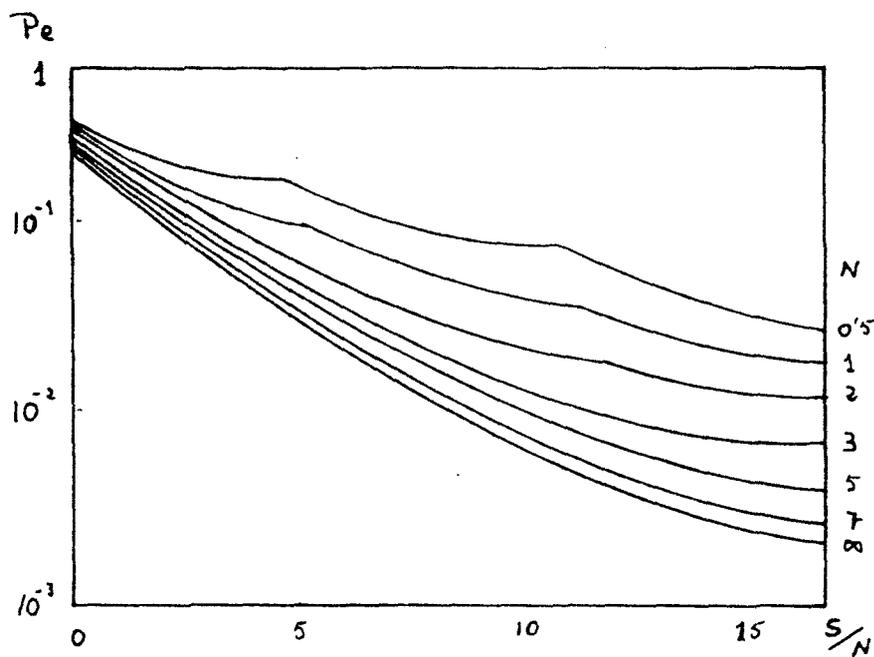
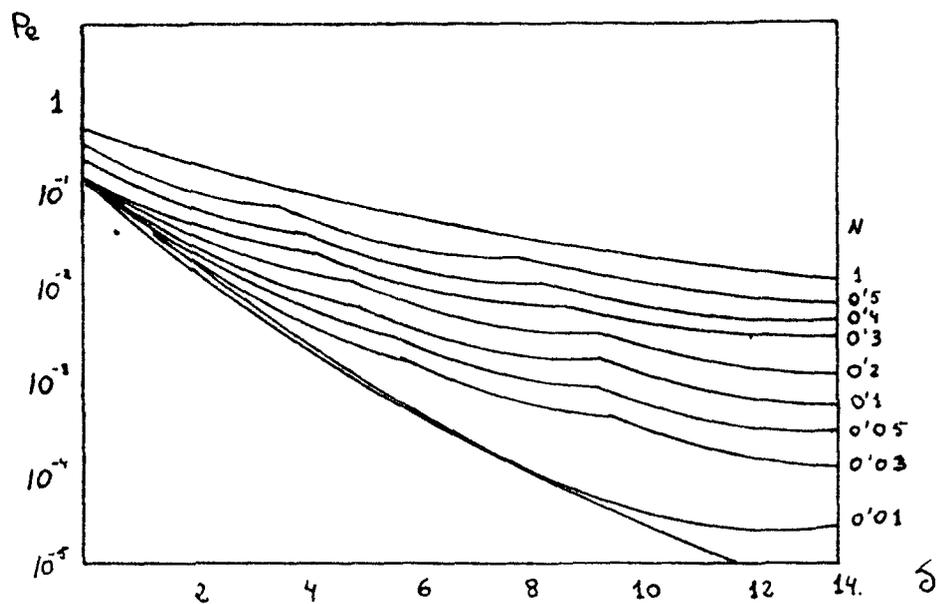
Si lo que tenemos es un paquete de ondas, a la hora de la recepción, la cosa se complica considerablemente al igual que si se tratara de señales ortogonales. en cuyo caso podríamos considerar al receptor como el que muestra la figura 5 del apéndice A.

El ruido térmico está siempre presente y proviene de la agitación caótica de los átomos y moléculas que componen el receptor y sus alrededores.

Se trata de que los receptores hagan las estimaciones de los campos recibidos lo más exactas posibles, teniendo en cuenta las limitaciones que tenemos y además la apertura de recepción, que correspondería al área efectiva en otros sistemas de comunicación.

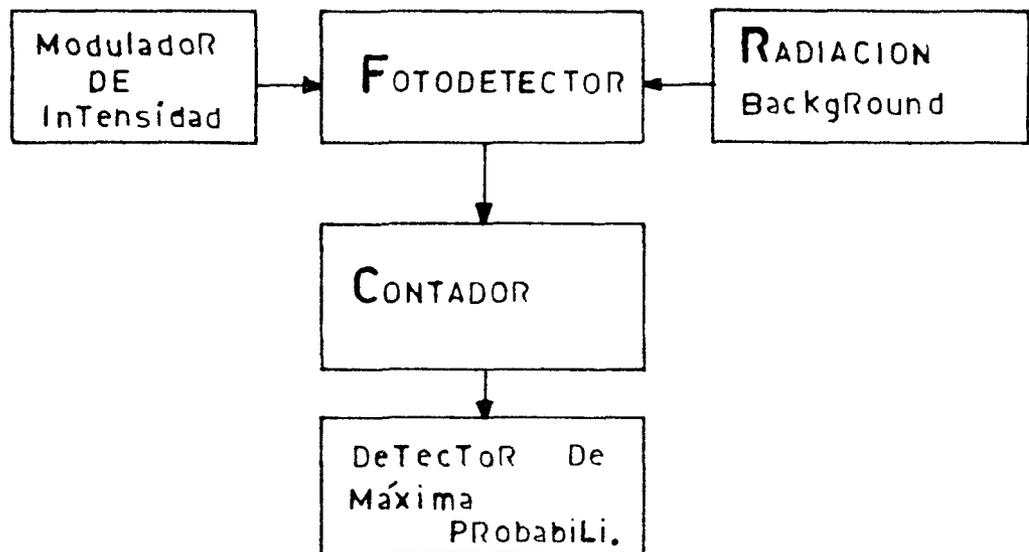
En el sistema de comunicación binario, el receptor tendría únicamente que seleccionar apropiadamente una de las dos hipótesis primarias : el campo está formado por el ruido térmico, (0), o está , por el contrario, formado, además, por una señal de cierta forma, (1). El mejor receptor, como es lógico, será aquel que consiga reducir la probabilidad de error al mínimo.

Podemos reflejar en dos gráficas como esta probabilidad de error varía con las alteraciones de señal y ruido :



Hay un método de detección llamado "M-ary Poisson detection", definido como la máxima probabilidad de detección de los "M" procesos discretos de Poisson en la presencia de un aditivo de ruido también discreto. Este método nos permite aclarar la eficacia de un receptor mediante un procedimiento bastante complejo, por el cual se proporciona una fuerte modulación al haz de fotoelectrones, corrompiéndolo con una radiación de intensidad fija. En suma lo que se hace es contar los electrones de cada uno de los "M" intervalos de  $\Delta T$  segundos e intentar la máxima probabilidad y por tanto cual de las "M" intensidades está controlando el proceso.

El esquema simple sería :



Muchos procesos de comunicación ópticos utilizan la obtención directa, en cuyo caso es necesario un filtrado, no solamente temporal, sino también espacial.

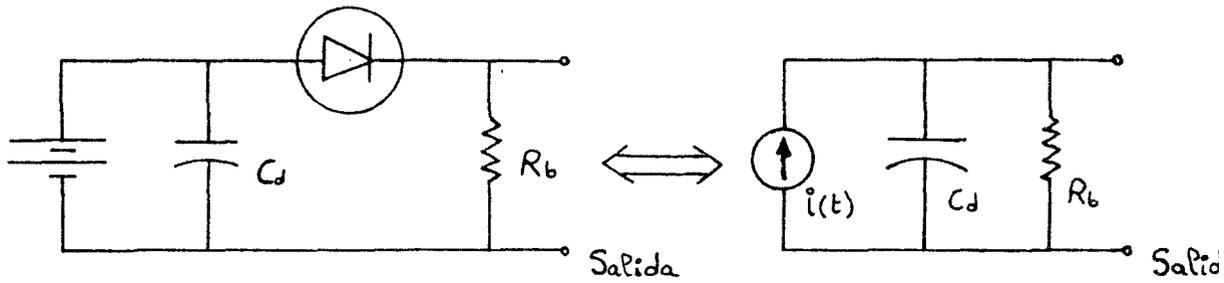
Hay que recalcar en este sentido que es muy importante tener en cuenta la incoherencia espacial, que implica

un acarreo en el procesamiento de la amplitud estática y por tanto de combinación de diversidades no lineales, y las incoherencias de fase, que implican la detección de energía.

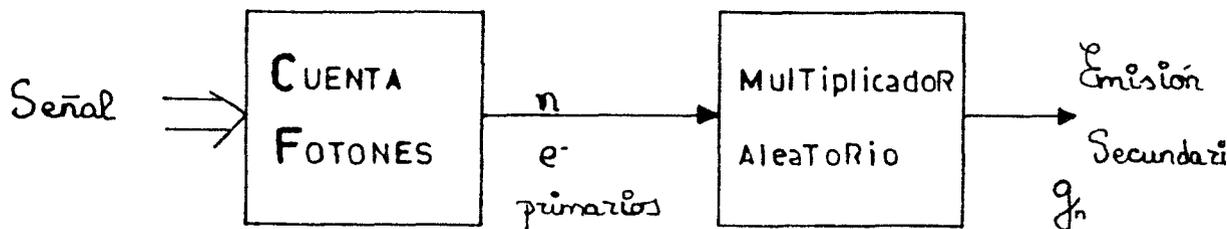
De todas maneras todas estas características que hemos estado estudiando se están viendo considerablemente simplificadas en su aplicación en las fibras ópticas, cada día más perfectas.

Quizá el elemento más utilizado en los equipos receptores sea el fotodiodo de avalancha junto con el fototransistor. El diodo de avalancha es un semiconductor que con la llegada de una potencia óptica y según sea ésta produce una agitación térmica por la que pares de electrones-hueco son generados en varios puntos del diodo.

Cuando uno de estos portadores pasa a través de un campo alto puede generar suficiente energía para crear uno o más pares sucesivos (por ionización en colisión). Estos nuevos pares repiten el proceso generando más. La probabilidad de que un portador genere un nuevo par depende del tipo de portador y del material con que fue construido el diodo. La acumulación de portadores en un extremo del diodo reduce el potencial a través del aparato hasta que son removidos por la polarización y tenemos una corriente correspondiente al número de portadores generados por ese haz de luz. Para distintas potencias ópticas recibidas, lógicamente tendremos, distintas intensidades en el receptor.



El generador de corriente de la figura de la derecha representa la generación de carga por el diodo, es decir, la generación óptica, térmica y de colisión. Para conocer esa  $i(t)$  deberemos saber el número de electrones generados, así :



El cuenta fotones nos da una serie de electrones que corresponden a la señal recibida, (generación óptica y térmica) luego estos electrones pasan al "multiplicador aleatorio" donde por colisión, cada electrón genera "g" más. Luego el número total de electrones será " $gn$ ".

El esquema básico de un receptor quedaría pues constituido como lo muestra la figura 6 del apéndice A.

La señal de entrada sería, tomándola como pulso digital :

$$\rho(t) = \sum_{-\infty}^{\infty} b_k h_p(t - kT)$$

Donde :

$b_k$  = Toma un valor para cada  $k$ .

$T$  = Ancho de pulso

$h_p(t - kT)$  = Forma de pulso, es positiva para todo "t".

Suponiendo :

$$\int_{-\infty}^{\infty} h_p(t - kT) dt = 1$$

$$|i_s(t)| = \frac{\eta g e \rho(t)}{h \Omega} \rho(t)$$

Donde :

$g$  = Ganancia media.

$e$  = Carga del electrón.

$\frac{\eta}{h \Omega} \rho(t)$  = Promedio óptico de electrones primarios por segundo

No considerando las componentes de corriente continua, el voltaje a la salida del ecualizador sería :

$$|V_{out}(t)| = \frac{A \eta g e \rho(t)}{h \Omega} * h_{pe}(t) * h_{eq}(t)$$

$$h_{pe} = F \left\{ \frac{1}{1/R_T + j\omega(C_D + C_A)} \right\}$$

Que sería la respuesta de corriente del circuito amplificador al impulso de entrada.

$$R_T = \left\{ \frac{1}{R_b} + \frac{1}{R_a} \right\}^{-1}$$

Representa la resistencia total del receptor, y  $p_{eq}(t)$  sería el impulso de respuesta del ecualizador.

Estas formas que sin duda podrían ser explicadas más detenidamente nos permiten ver, en una apreciación global, las características y requisitos preliminares que deben cumplir los circuitos detectores :

- El ruido es menor siempre que se incremente  $R_b$ .
- Nos interesa tomar el valor más pequeño posible de  $b_k$ .
- Es siempre deseable que la resistencia de entrada del amplificador sea lo más grande posible y que la "capacidad Shunt" sea lo más pequeña que se pueda.

Para reducir el ruido térmico introducido por el amplificador es necesario que las resistencias de entrada y del circuito de polarización sean lo suficientemente grandes. Al diseñar un receptor con un diodo foto-detector de avalancha hay que tener en cuenta que la energía óptica requerida por el pulso en una ganancia óptica varía bruscamente un factor 1/6 de variación de potencia de ruido térmico a la salida del receptor. Si no usamos la ganancia de avalancha, la energía varía un factor 1/2 en lugar del anterior 1/6.

La capacidad total del receptor debe ser lo más pequeña posible para reducir el ruido térmico. Si los ruidos del

amplificador son dominantes, incrementa el ruido térmico, pero esto se puede compensar con la ganancia de avalancha.

Cuanto mayor sea el nivel de ecualización, más energía será requerida, pero por otro lado tampoco es aconsejable el cero absoluto de ecualización, sobre todo cuando trabajamos con pulsos cuyo espectro cae rápidamente con la frecuencia.

Cuando trabajamos en ausencia de ganancia de avalancha, que es la otra posibilidad, necesitaremos una mayor potencia óptica y por tanto una fuente más alta y un canal mejorado que permita reducir las pérdidas de potencia durante el viaje.

### 1.3.- Pérdidas

Uno de los factores más importantes a tener en cuenta cuando se trata de constituir un sistema de comunicación de cualquier tipo, especialmente en el campo de la transmisión de luz y utilización de fibras ópticas, son las pérdidas.

A continuación vamos a estudiar los tipos más importantes y características de las pérdidas que afectan a los sistemas construidos con fibras ópticas. Normalmente hay niveles de pérdidas tolerados y dependen en gran medida de la fuente, pues van en función de la potencia de emisión.

#### 1.3.1.- Ensanchamiento de pulsos en fibras ópticas multimodos

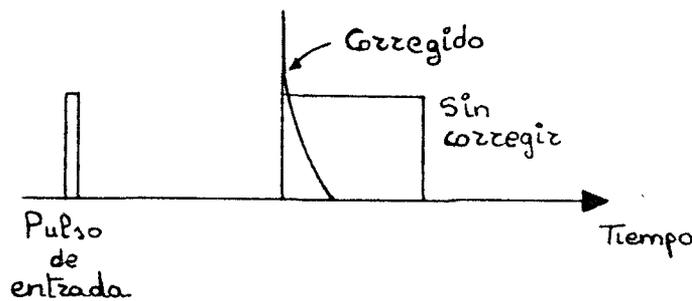
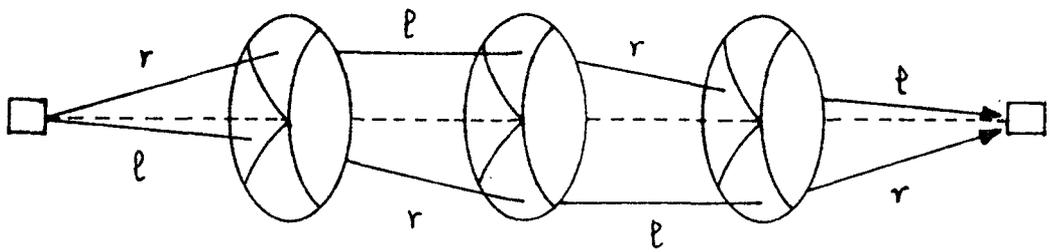
No es una fuente de pérdidas directamente sino más bien una consecuencia de otras pérdidas pero que debido a su importancia y a que de algún modo se relaciona con los posibles desperfectos que a la señal le pueden producir éstos, incluimos aquí.

La emisión óptica aporta una potencia en tiempo y espacio de forma incoherente. Estos pulsos ópticos incoherentes pueden ser transmitidos por fibras ópticas siempre que el radio del núcleo sea bastante mayor que la longitud de onda, lo cual es muy fácil pues estamos hablando de señales con frecuencias altísimas.

De cualquier modo estos pulsos, al propagarse por las fibras tienden a ensancharse. Esto se debe, en parte al ancho de línea espectral y en parte a la dispersión que produzca el material que constituye la fibra.

La otra causa del ensanchamiento de pulso se asocia a que la velocidad del grupo medio en la fibra es función de la trayectoria. Los pulsos que van a lo largo de rayos axiales, normalmente van más rápidos que los pulsos que van a lo largo de rayos de gran amplitud porque ambos tipos de rayos son excitados por fuentes espaciales incoherentes.

Knopfner descubrió que este ensanchamiento podía ser drásticamente reducido introduciendo un ecualizador de rayos en varias partes de las fibras. El papel del ecualizador sería cambiar los rayos rápidos por lentos, tal y como muestra la figura :



### 1.3.2.- Pérdidas por juntas

Este tipo de pérdidas se debe a que el número de modos que se pueden transmitir por las fibras de baja dispersión es significativamente más pequeño que el generado por los LED. Estas pérdidas pueden alcanzar valores de unos 15 dB.

La aceptación de la fibra (número de modos que es capaz de transmitir) está limitado por los requerimientos de fabricación : flexibilidad, diámetro,...etc.

Estamos pues ante un tipo de pérdidas salvable teóricamente, pero a costa de perjudicarnos en otros terrenos. Una vez más tenemos que someternos a una solución de compromiso que nos permita reducir al máximo estas pérdidas pero sin perder demasiado en otros campos importantes de las características de las fibras.

Como caso típico podríamos citar una fibra "step-index" con una apertura numérica  $NA=0,65$  obtenida con cristales muy especiales y que trabajando con un LED típico reduce las pérdidas por junta a unos 5 dB. Sin embargo con las mismas características las fibras "near-square (low)" (bajas) dan niveles de pérdidas mucho mayores.

La mejor manera, en principio, de salvar estas pérdidas es reduciendo el tamaño del LED o diseñándolo para un óptimo resultado al trabajar con una fibra específica.

### 1.3.3.- Pérdidas "Splicing" (unión)

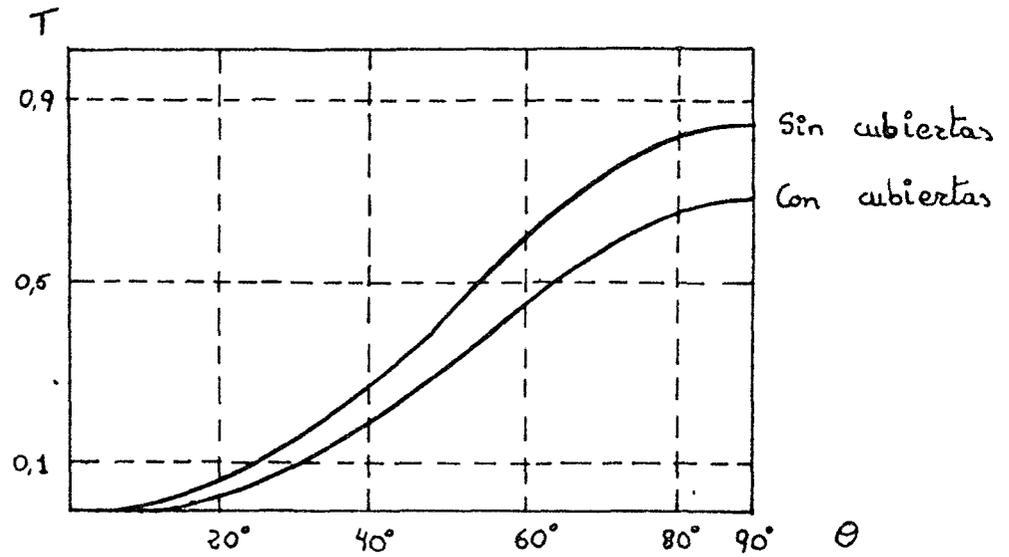
Este tipo de pérdidas se produce cuando unimos dos extremos de fibras.(Ver sección 1.2.2.4.). Estas pérdidas son más altas cuando se trata de fibras "single-mode". En fibras multimodos se pueden llegar a reducir hasta 0,4 dB. Esto se debe fundamentalmente a que el radio del corazón es más pequeño en el "single-mode".

### 1.3.4.- Pérdidas por curvatura ("Bending Loss")

Son las pérdidas que se producen al salir los rayos de luz de la fibra aprovechando la curvatura de la misma y debido a que ésta altera su ángulo de incidencia sobre las superficies externas de las fibras. En las fibras "multi-modos" se pueden llegar a reducir hasta el punto de ser consideradas insignificantes, pero en algunos casos pueden llegar a deformar el forro plástico que recubre las fibras.

### 1.3.5.- Pérdidas de Fresnel

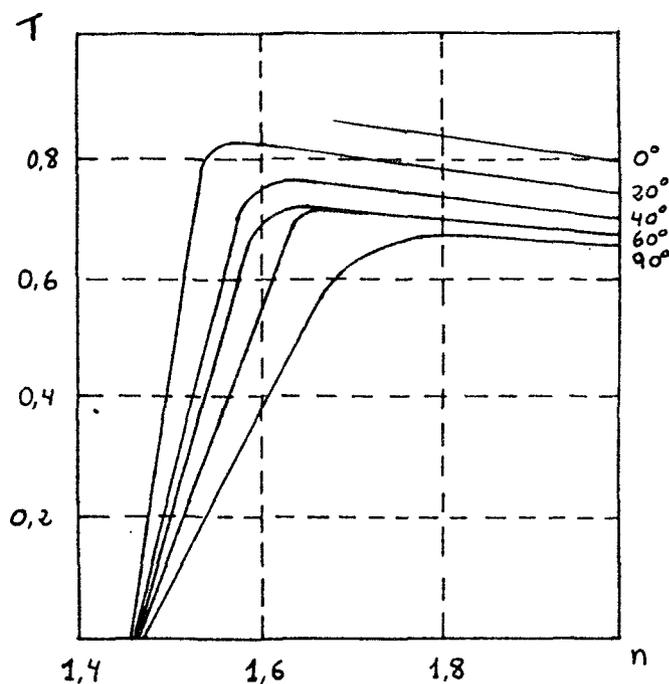
Estos tipos de pérdidas son las asociadas a la reflexión en el núcleo de las fibras y las envolturas. Como es lógico dependen del ángulo de incidencia. Veamos una gráfica en la que se nos muestra como varían lo uno con respecto a lo otro :



Como vemos, a medida que aumenta el ángulo de incidencia, aumentan las pérdidas, es decir, hay una mayor cantidad de potencia óptica que viene formando parte del rayo y que pasa a la cubierta, si la hubiera, saliendo del núcleo.

Como es lógico en las fibras descubiertas las pérdidas de este tipo son mayores.

Igualmente podemos apreciar como variando el ángulo de incidencia varía la transferencia de luz, siempre, claro está, dependiendo del índice de refracción del núcleo. Vamos a ver otra gráfica en la que se representa esta relación manifiesta entre el ángulo de incidencia y la transferencia de luz según sea el índice de refracción del núcleo.



Hay que destacar también que dependiendo del empaquetamiento de las fibras, las pérdidas relativas del área efectiva de envoltura, con una disminución en el diámetro de las fibras, fluctúa de un 16 a un 20%.

#### 1.3.6.- Efectos "Leakage" (de fuga)

Como ya hemos dicho, parte de la información que se transmite se pierde inevitablemente por causa del ancho finito de la cubierta o abrigo, aunque no tome parte en la transmisión directa de la luz. Estas pérdidas pueden ser parcialmente suprimidas usando fibras sin envolturas aislantes. En cualquier caso estaremos arriesgándonos a escapes de luz entre fibras adyacentes, y cuando hablamos de fibras adyacentes nos referimos a fibras que aún sin tocarse están a menos

de dos longitudes de onda de distancia.

Esta fuga depende de numerosas variables, diámetro, longitud, índice de refracción de las fibras, la longitud de onda de la radiación, su polarización y ángulo de incidencia, el contacto o distancia entre fibras adyacentes,...etc.

Para tener una idea real de lo que significan estas pérdidas podemos decir que el valor del flujo de fuga sería para  $\lambda = 6000 \text{ \AA}$  y un radio de  $r = 35\mu$  de un 15% del flujo total, y si el rayo disminuyera hasta  $5\mu$  tendríamos un 33,5 %.

Para fibras cortas, más finas incluso que  $25\mu$  de diámetro, el escape es insignificante comparado con el total de reflexión y el aislamiento óptico de las fibras no es necesario, sin embargo cuando hablamos de paquetes de fibras de mayor diámetro y más largas deberemos de utilizar abrigo ópticos para disminuir e incluso excluir estos escapes.

### 1.3.7.- Pérdidas por dispersión y desalineación

Hay que tener en cuenta, sobre todo cuando, para aumentar la capacidad de transmisión de la fibra, se transmiten dos o más haces simultáneamente, la dispersión óptica que se produce entre los canales de la fibra,

Otro tipo de pérdidas o desajustes a tener en consideración serían las desalineaciones que se producen accidentalmente en el sistema cuando se utilizan focos discretos. Esta dificultad es complicada de superar incluso utilizando varias servo-lupas.

Una vez terminado este repaso general a las principales fuentes de pérdidas que podemos encontrar en la configuración de un sistema óptico podemos considerar el tema concluso, a falta únicamente de resumir las utilidades en las que podemos poner en práctica los conocimientos adquiridos.

#### 1.4.- Aplicaciones

En este capítulo vamos simplemente a apuntar las utilidades o usos más comunes que se le suelen dar a las fibras ópticas, y comentar algunas de las últimas creaciones en este campo.

Cuando se trata de transmisión de imágenes las fibras nos permiten lograr una alta resolución, aunque si queremos pasar a imágenes tridimensionales tendremos que salvar algunos problemas con el consiguiente incremento en la complejidad del sistema. Es por tanto en este campo de transmisión de imágenes y en general en el campo de las comunicaciones donde la utilización de las fibras ópticas está aportando resultados contundentes.

En 1990, y por citar sólo un ejemplo, estará definitivamente instalada la red telefónica entre las ciudades de Boston y Washinton, permitiendo más de 80.000 y todo ello habrá supuesto un ahorro, sólo en costos, de más de 50 millones de dólares.

En el estado de Indiana, en los Estados Unidos de Norte América, una red de catorce fibras ópticas, únicamente catorce fibras, permiten la comunicación de más de cinco mil teléfonos.

Proyectos simultáneos se están desarrollando en todo el orbe y compañías como la "AT and T" preparan para finales de la década el salto del Atlántico, mientras ciudades enteras como Massachusetts rigen sus comunicaciones internas vía fibras ópticas.

Los hechos hablan por si solos y la velocidad en la que se progresa en estos campos sólo es igualada por la velocidad de la información que permite alcanzar márgenes de más de 140 Mega-baudios por segundo.

En otros campos las aplicaciones de las fibras ópticas van despertando cada día más y más interés :

- Endoscopio (fibroscopio)

Es un aparato que mediante un haz de luz que se envía a través de la fibra óptica permite inspeccionar cavidades y llevar la reflexión de esa luz a las lentes visoras. Tiene una gran importancia en medicina, pues permite explorar lugares hasta ahora nunca vistos por el hombre en un ser vivo. Un extremo está preparado para recibir las distintas intensidades de luz de los objetos y a través del cable se pueden mandar al osciloscopio, o a cualquier otro aparato preparado al efecto, donde se verían las imágenes. (sería como un ojo humano primario)

- Espectógrafo

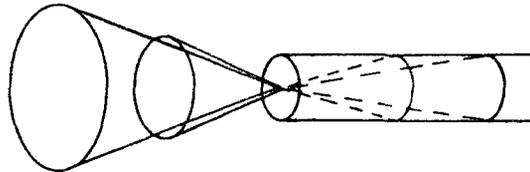
Subsana mediante la utilización de la potencia luminosa la baja intensidad de los objetos estudiados, con lo que podemos obtener mayor información de ellos.

- " Point- target autocollimator "

Es un dispositivo por el que mediante una simple fibra óptica cónica se logra alinear un conjunto de superficies reflectantes. Es de gran utilidad en campos industriales específicos.

#### - Refractómetro dieléctrico cilíndrico.

Es un aparato que permite observar cambios en el índice de refracción, lo que puede ser muy útil en controles automáticos de procesos sobre todo en el campo de las manufacturas o a nivel de laboratorio.



#### - Células CTR

Las células CTR por todos conocidas, con la inclusión de las fibras ópticas aportan una serie de ventajas como pueden ser el que la imagen esté libre de parallax y por tanto se distinga mejor, un alto brillo (incluso hasta 40 veces más ), una mayor resolución,...etc.

- Como ya hemos señalado hace mucho tiempo que se están utilizando las fibras ópticas para la transmisión de imágenes incluso desde una pantalla luminiscente, lo que aporta una mayor eficiencia del fósforo ya que se disminuye la reflexión y no hay contacto con la pantalla.

#### - Televisión

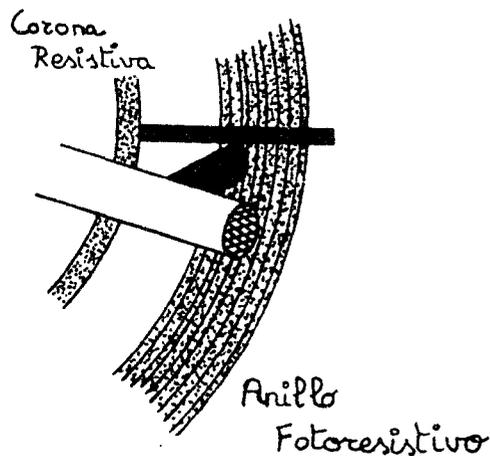
El campo de la televisión abierto a las fibras ópticas permite disminuir las pérdidas de luz a la vez que aumentar la sensibilidad a la misma, y como ya vimos también posibilita la transmisión simultánea de varios canales.

- Conversores de imagen e intensificadores
- Medidores de destellos que en la física nuclear son usados para registrar todos los cambios de luminiscencia habidos y permitir un mejor estudio de las partículas que las han producido.
- Fotografía de alta velocidad.

Con las fibras ópticas las fotografías de alta velocidad han encontrado un factor de enorme ayuda sobre todo en lo que respecta a la alta resolución que permiten conseguir.

- Las fibras ópticas también son usadas para unir circuitos electrónicos.
- fotopotenciómetro.

Se trata de que un haz de luz ilumina al fotoresistor y éste aumenta la conductividad entrando en contacto con el anillo resistivo.



- En el campo de las computadoras las fibras ópticas están aportando una velocidad de  $2 \times 10^{10}$  cm/s, además eliminan juntas indeseables e interferencias entre elementos activos. Los circuitos lógicos ópticos se harán con haces de distinta

polarización para marcar los unos y los ceros, y aunque todavía estén en estudio, es necesaria su mención en el campo de las aplicaciones.

Al reducir el volumen la microelectrónica necesita suprimir los espacios de las uniones y ésto es factible con las fibras ópticas por medio de uniones "p-n", las cuales transforman la energía de corriente eléctrica en radiación y viceversa, luego se detecta esa radiación y se transmite propagándola por la fibra.

La calidad viene, como es lógico, definida por la de la fibra y las condiciones de conversión corriente eléctrica-radiación.

Aunque la corriente eléctrica toma forma en el siguiente capítulo donde será estudiada más intensamente, por ser una de las más interesantes aplicaciones de las fibras ópticas no podemos terminar este punto dedicado a las aplicaciones sin mencionarlo.

Los diodos  $A_3$   $B_5$  son los mejores inversores y con ellos se ha conseguido ascender el nivel de calidad de la conversión aunque el principal problema sigue estando en la junta óptica entre la fuente de luz y el detector, sobre todo debido al alto índice de refracción de los semiconductores, hasta el punto de que en algunos casos más de la mitad de la radiación generada es absorbida por el material.

Lo que se suele hacer para aumentar el rendimiento es la inserción en líquido y utilizar fibras con alto índice de refracción.

Corrientemente se usan diodos de arseniato de Galio como fuente y de Silicio como detectores y las uniones de éstos con las fibras suelen hacerse a través de cristales como el Arsénico o Sulfuro.

Estos circuitos permiten incluso juntas ópticas sin contacto y aportan un mayor tiempo de vida al igual que la exclusión de ruido.

El interés en este campo es tal que cada día son más los laboratorios de investigación que no ya sólo utilizan circuitos con tecnología de fibras ópticas, sino que buscan la solución a los problemas que actualmente mantienen la optoelectrónica en la rampa de salida pero aún sin despegar definitivamente.

En general podemos decir que a pesar de ser un terreno todavía inexplorado los logros han sido innumerables. Casas como la "Burr-Brown" aseguran la transmisión con sus fibras ópticas a través de instalaciones eléctricas pesadas, de radiación, agentes químicos, agua salada,...etc.

Las conexiones sin adhesión y la total flexibilidad están totalmente superadas y los anchos de banda ya alcanzan con facilidad niveles de hasta 600 Mhz/km con márgenes de pérdidas bajísimos que permiten a empresas como "Le Croy" garantizar en sus sistemas digitales de fibras ópticas transmisiones de 100 Megabits/sg. con errores inferiores a  $10^{-9}$ .

### 1.5.- Integrados Ópticos

Los integrados ópticos están basados en la transmisión de energía electromagnética a frecuencias ópticas por películas finas y en sus orígenes estuvieron influenciados por la ingeniería de micro-ondas.

Los integrados ópticos se puede decir que nacen en 1962 y actualmente, en realidad desde el año 1968, se trabaja por conseguir circuitos equivalentes a los integrados electrónicos pero con tecnología óptica, lo que aportaría menos consumo y mayor estabilidad mecánica y térmica. Su factibilidad está probada en los laboratorios aunque todavía no hayan salido al mercado.

Para este novísimo campo ha hecho falta desarrollar nuevas teorías : guía-ondas planas y su eficiencia, el estudio de nuevos componentes pasivos que tengan menos pérdidas por dispersión y absorción, y además fuentes de luz, moduladores y detectores.

Normalmente en el campo de la optoelectrónica sería ideal utilizar los Lasers de gas o sólidos pero resulta evidente el problema de tamaño. Hay estudios recientes que van dirigidos hacia los Lasers  $Al_x Ga_{1-x} As$  de juntas hetero-estructuradas los cuales tienen la configuración planar requerida. Su principal defecto es su corta vida y la necesidad de mantener bajas temperaturas. También se pueden usar los  $Ga_{1-x} In_x As$  hetero-estructurados.

Por otro lado, la otra cara de la moneda consiste en buscar detectores planares, pero esto no supone un problema

fundamental pues ya existen. Están por ejemplo los fotodetectores Ga As vía crecimiento epitaxial,...etc.

Las ventajas incluidas en los circuitos por la utilización de tecnología óptica son muchas y muy variadas pero podemos resumir las más importantes en tres :

- Todos los elementos se presentan en la superficie lo que facilita las comprobaciones y modificaciones.
- Son lo<sup>4</sup> veces más pequeños que las guía-ondas convencionales y además pueden ser colocados muy cerca unos de otros en un sustrato sencillo formando un sistema óptico que naturalmente es más compacto.
- Como la película es mucho más estrecha con relación a la longitud de onda óptica y ya que la mayoría de la energía luminosa está confinada en la película, la intensidad de luz en la película puede ser muy grande, incluso en niveles moderados de potencia Laser.

A pesar de las ya apuntadas considerables ventajas que aportan estos integrados ópticos, las razones concretas de que aún no se hayan desarrollado comercialmente, a pesar de su simplicidad aparente, serían básicamente dos :

- La utilización de fibras ópticas implica un método simple pero fiable de unión y análogamente una técnica que permita unir éstas con las finas películas guía-ondas.
- El retraso en la tecnología de implantación de integrados ópticos también es causa de que los actuales proyectos no tienen necesidad inminente de la principal ventaja que aportan, un ancho de banda casi ilimitado.

La realidad en este campo es que todavía no se están haciendo grandes progresos. pues los esfuerzos para procurar una tecnología de integrados ópticos paralela a los electrónicos ya existentes son escasos, pero a pesar de todo los avances son imparables y se ha conseguido ya un dominio de las técnicas de construcción.

Veamos a continuación algunas de las técnicas más importantes para la creación de estos revolucionarios tipos de integrados :

- Usando fotoresistores.

La técnica consiste básicamente en la utilización de la fotografía litográfica, es decir, la fotolitografía. Con este método se exponen los fotoresistores a radiaciones visibles o ultravioleta, así lo que logramos es producir variaciones estáticas entre los puntos expuestos y los que no lo han estado. Estas variaciones pueden ser luego incrementadas mediante procesos químicos y también retirando el material sobrante.

- Por implantación de iones.

Este sistema también es llamado de "sputtering" (chisporroteo) y como su nominación adelanta implica la inclusión de iones en el material que servirá de base para lograr los efectos deseados.

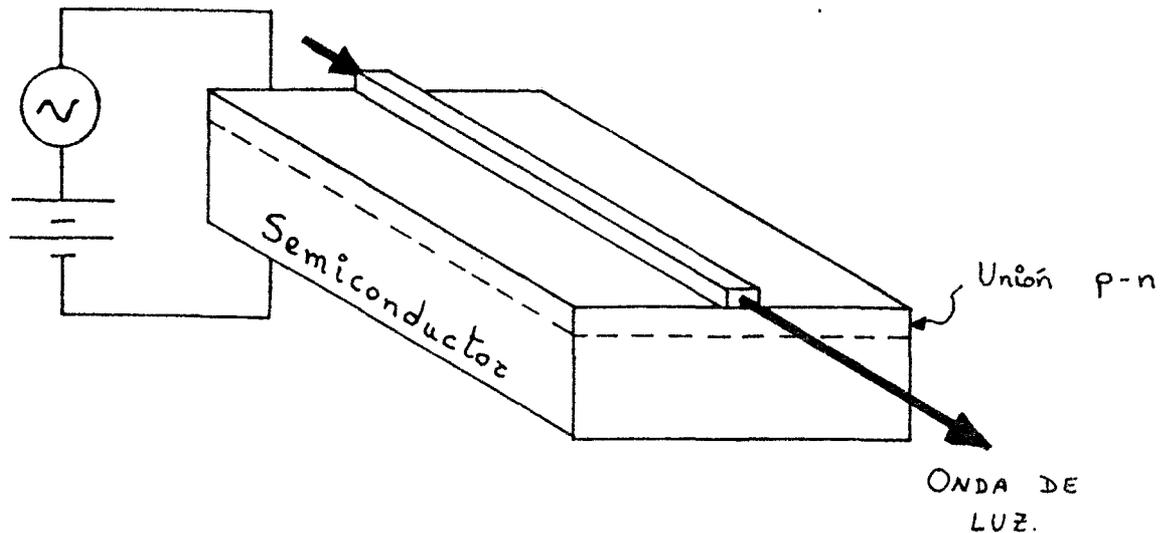
- El método Kaminow.

Este método se basa en la utilización de una fuente coherente de rayos ultravioleta que genere un par de ondas estacionarias que se asienten en un poli ( metilmetacrilato)

preparado, con lo que el índice de refracción cambia.

Las ondas estacionarias de la fuente causan la formación de dos fases granuladas, las cuales actúan como reflectores de frecuencia relativa para una onda presente entre ellos.

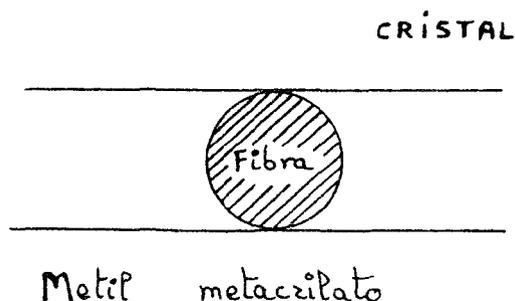
- Las nuevas técnicas van encaminadas a la utilización de semiconductores-diodo para la transmisión.



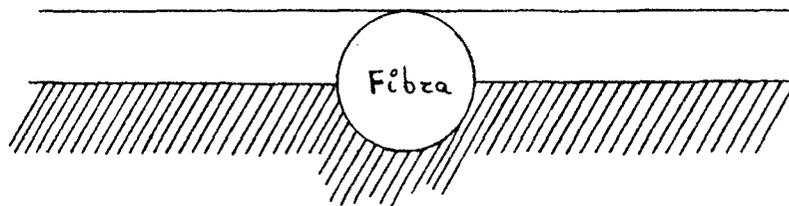
Las primeras películas usadas fueron las formadas con Zn O. Tenían pérdidas superiores a los 60 dB./ cm incluso logrando considerables grados de pureza en su fabricación. Lógicamente los resultados dejaban mucho que desear y se comenzaron a buscar nuevos materiales para esos films muy finos a través de los cuales debía transmitirse una serie de ondas con frecuencias luminosas y con niveles de pérdidas que dieran una fiabilidad a la información recibida.

Con materiales como el Zn S se consiguió reducir el nivel de pérdidas a sólo 5 dB/cm. Nuevos estudios han propuesto un material sustitutivo, el  $Ta_2O_5$  que permite reducir las pérdidas a tan solo 0,9 dB/cm.

Existen técnicas adicionales que van encaminadas a la utilización del Silicio orgánico para obtener las películas que componen los integrados ópticos. Según sea la calidad o perfección del Silicio y las características de fabricación podremos además disminuir aún más los niveles de pérdidas aproximándolos a 0,04 db/cm. Normalmente el método de construcción que se sigue parte de una fibra óptica ya construida y cumple los siguientes pasos :



Se coloca la fibra preparada para ser oprimida contra el sustrato. Este tiene que estar perfectamente pulido para eliminar impurezas, por lo cual, además suele ser limpiado, pero con sumo cuidado para no romper la calidad de su superficie.



Se apura el cristal y se abre por tanto un hueco.



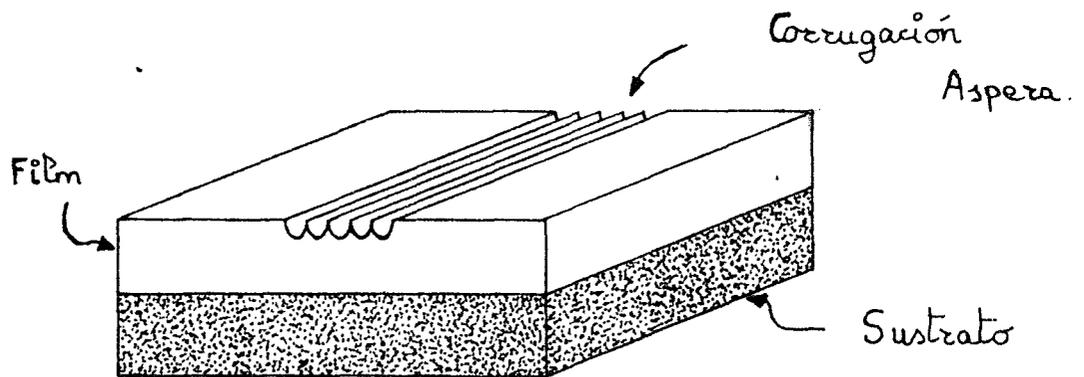
El hueco queda pues listo para ser llenado.



Se rellena ahora el hueco con el material que va a ejercer la función de guía-onda. En ocasiones en lugar de Silicio se utiliza el Cicloheylmetacrilato,  $\text{CH}_2 : \text{C}(\text{CH}_3) \text{COOC}_6\text{H}_{11}$  dopado con benzoin metil en un 2%.

Hay que hacer una salvedad en el caso de que no queramos transmitir en los modos correctos, sino que se fuera a

utilizar la película óptica como guía-onda periódica o incluso en la construcción de filtros, juntas o distribuidores de realimentación Laser. En este caso bastaría con aplicar unas pequeñas deformaciones en la superficie, tal y como muestra la figura :



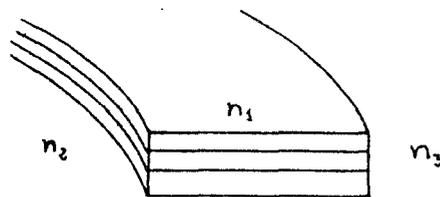
Un problema importante que se presenta en la construcción de estos circuitos es la posible interacción de la luz en el integrado con el sustrato. Cuando guiamos la luz a través de la fibra óptica, el diseño nos permite reducir considerablemente la posibilidad de radiación, sin embargo una vez que el haz entra en el integrado, las condiciones varían y hay que tener en cuenta la propagación bidireccional del haz y sus posibles fugas. De esto se desprende que hay que poner un especial interés en dos capítulos importantes, las pérdidas y los medios para reducirlas y los métodos de juntas.

Con respecto a las pérdidas hay que tener en cuenta que no sólo dependen del material, sino que también lo hacen del modo de propagación, es decir de la longitud de onda,

así estas pérdidas aumentan para modos superiores a  $m=0$ , y de la superficie de dispersión.

Las técnicas para recortar estas pérdidas son innumerables, pero no todas efectivas, de ahí que sólo vayamos a citar las más utilizadas :

- Como ya hemos dicho, una manera segura de reducir las pérdidas es utilizando el Silicio orgánico en la fabricación de las películas de guía-onda.
- Otra manera se basaría en el estrechamiento de la película, pudiendo incluso conseguir, si logramos que sea lo suficientemente estrecha, la reflexión total dentro de la guía.
- Una de las principales fuentes de pérdidas es el radio de curvatura de la película, al igual que en la fibra. Para estas ocasiones también existen métodos válidos que permiten reducir considerablemente estas pérdidas :
  - a) Incrementando la diferencia entre el índice de refracción " $n_1$ " de la guía y el de aquellos materiales que la rodean a ambos lados de la curva, que pueden ser según el caso dos tipos de sustratos diferentes.



- b) Incrementando el ancho de la guía "a", pero esta solución sería contraria a la que aboga por la reducción de esta dimensión, por lo que sería preciso calibrar cual de las fuentes de pérdidas es más importante para tratar de reducirla.
- c) Eligiendo la altura de la guía lo bastante grande como para confinar los campos, tanto como sea posible, en la dirección normal al plano de curvatura.
- En general las pérdidas serán menores si :

$$R > \frac{24 \pi^2 |\xi_2|^3}{\lambda^2}$$

Donde  $\xi_2$ , es la longitud sobre la cual el campo decae  $1/e$  en el medio 3.

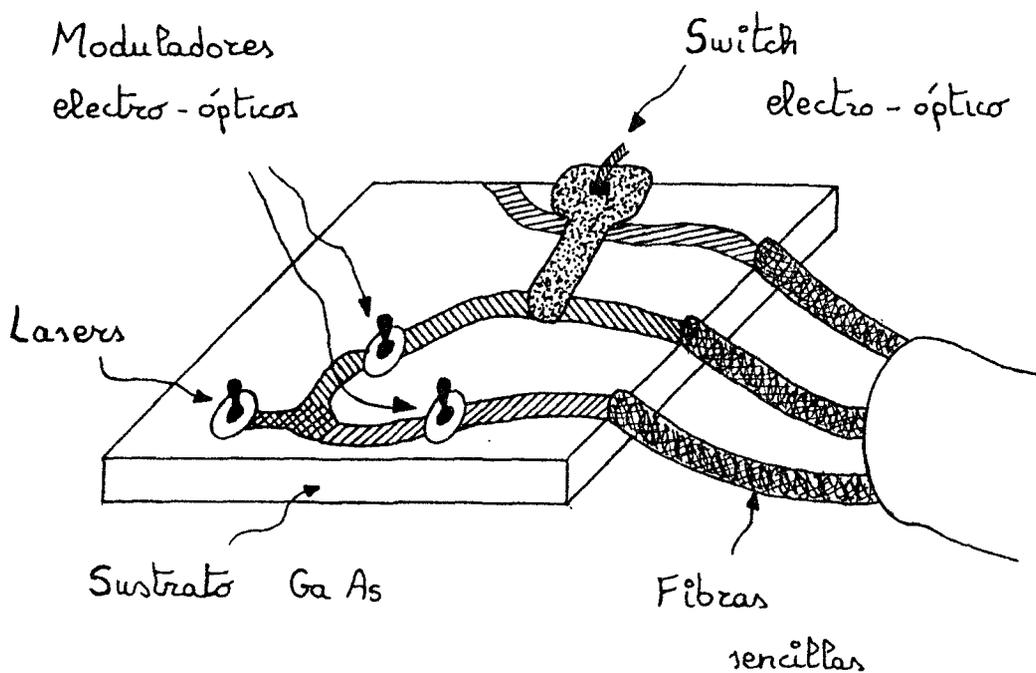
En cuanto al tratamiento de las paredes para evitar las pérdidas, podríamos decir que si éstas están direccionadas casualmente y no existe correlación entre las distorsiones que se dan en las paredes opuestas, el valor de las pérdidas será el doble que el que se daría en el caso de que sólo una estuviera distorsionada. Si las distorsiones de las caras opuestas están perfectamente correlacionadas, la cantidad de pérdidas se vería reducida.

Actualmente, y como hemos antes advertido, los integrados ópticos están a punto de dar el salto definitivo a los mercados como integrados sustitutivos de los electrónicos, ahora utilizados, pues su funcionamiento está probado en los

laboratorios prácticamente, sin embargo y hasta que llegue ese día su misión fundamental estriba en proporcionar moduladores y "switches" para los equipos que funcionan con tecnología de fibras ópticas.

Un modulador, en este caso, sería básicamente un dispositivo que sirve para depositar la información en una onda de luz por imposición de unas alteraciones variables en el tiempo de algunas de las propiedades de la onda. Estas propiedades serán intensidad, fase, polarización y longitud de onda o frecuencia.

Por conmutador entendemos la operación por la cual la localización espacial de un haz de luz cambia en respuesta a una señal eléctrica. Los "switches" son los dispositivos que nos van a permitir conmutar.



La modulación depende críticamente del valor de extinción :

$$\eta = \text{sen}^2 \left( \frac{\Delta\phi}{2} \right)$$

Donde  $\Delta\phi$  es el desplazamiento de fase para una modulación equivalente de fase.

Tenemos pues claramente relacionados los cambios de fase y los cambios de intensidad equivalente. Cuando trabajamos con moduladores e interruptores es preciso añadir al total de pérdidas que pueda tener el film óptico, las pérdidas :

$$L(\text{dB}) = 10 \log L \quad L = \begin{cases} 1 - I_m/I_{in} & \text{cuando } I_m > I_o \\ 1 - I_o/I_{in} & \text{cuando } I_m < I_o \end{cases}$$

Los moduladores ópticos de fase no tienen uso tecnológico. El método, por el contrario, quizá más comúnmente utilizado sería la modulación por polarización, basado en el uso de efectos electro ópticos. Este método es tan eficaz que normalmente no tiene pérdidas y los moduladores de este tipo pueden además ser utilizados como interruptores.

Básicamente y generalizando hay tres clases de efectos usados en la modulación de luz :

- Efectos electro-ópticos

Abarca la inclusión de cambios en el índice de refracción, en la absorción o en la dispersión, por la aplicación de un campo eléctrico. Según sea éste se variarán las características antes mencionadas.

- Efectos acústico-ópticos.

En este caso se cambia el índice de refracción por el paso de una onda acústica. La tensión y el porcentaje de las variaciones del índice de refracción es periódico a la longitud de onda igual a la de la onda acústica.

- Efectos magneto-ópticos.

Por ejemplo, se trataría de la utilización del efecto Faraday por el que la rotación de la dirección de polarización de la polaridad lineal de la luz es causada por un campo magnético.

Hay otro tipo de moduladores que son los "Bulk" que tienen como principal característica el que la mínima dimensión transversal de las ondas de luz pasando por el modulador son determinadas por las propiedades de difracción de la luz más que por las propiedades del propio modulador. La restricción o inconveniente que tienen estos moduladores es la exigencia de que el área de una sección longitudinal del modulador sea suficientemente grande para permitir pasar el haz de luz.

Los moduladores e interruptores de guía-ondas son especialmente usados en las técnicas de comunicación óptica. Mientras que los moduladores "bulk" son más usados para transmitir datos holográficos o comunicaciones especiales.

En general se puede decir que los moduladores más utilizados son los basados en los efectos electro-ópticos.

Creo que por todo lo dicho a lo largo del trabajo nos podemos dar perfecta cuenta de las diferencias que existen

entre las guía-ondas metálicas y las ópticas. En un nivel primario, las diferencias que surgen ya desde el comienzo del análisis son las más acusadas y se pueden reducir a dos :

- Las dimensiones de las guías de metal son  $10^4$  veces mayores que en el caso de las fibras ópticas.
- Las guías de micro-ondas son normalmente cerradas y toda la energía fluye dentro, mientras que las guías ópticas están abiertas así que aunque la mayoría de la energía está dentro, el campo se extiende, de cualquier forma, también al espacio exterior.

Las diferencias en las dimensiones exigen diferentes técnicas de fabricación, las cuales están sujetas a distintas tolerancias y capacidades. Vamos primeramente a concentrarnos en la segunda diferencia porque de ella dependen las técnicas de producción de capas en las guías ópticas, ya que éstas son diferentes a las guías de micro-ondas. Las antenas por ejemplo, en micro-ondas, suelen ser de relativo poco tamaño, en óptica, la excitación se produce principalmente por un haz de Laser, el cual puede ser considerado como generado por una antena de gran apertura.

Como consecuencia de esta diferencia de tamaño los problemas de excitación y sus soluciones son diferentes en ambos casos.

Diferencias similares se dan entre las guía-ondas ópticas y los integrados ópticos, se hace pues imprescindible el estudiar como la excitación óptica que viene a través de la fibra, entra en los integrados. Para ello el elemento más

importante a estudiar son las uniones, la conversión de un haz de luz en una onda y el proceso recíproco.

### 1.5.1.- Uniones

Por ser este uno de los elementos más importantes sin duda en la construcción de los integrados ópticos, ha sido el primero en ser abordado con total éxito, y es así como hoy el problema de las juntas, por uno u otro medio, está prácticamente resuelto.

Vamos a distinguir para su estudio cuatro facetas, una primera parte que servirá para ver las posibilidades de introducir en un film óptico, guía plana, un haz de luz directamente para ser modulado y procesado, una segunda parte en la que veremos como cambian las cuestiones si para la inclusión de ese haz de luz utilizamos una fibra óptica que transporta esa energía desde la fuente. Por último veremos una combinación de casos posibles de utilidad para unir guías dentro del mismo integrado o incluso distintas guías planas y lineales.

#### 1.5.1.1.- Uniones directas Fuentes-Guías

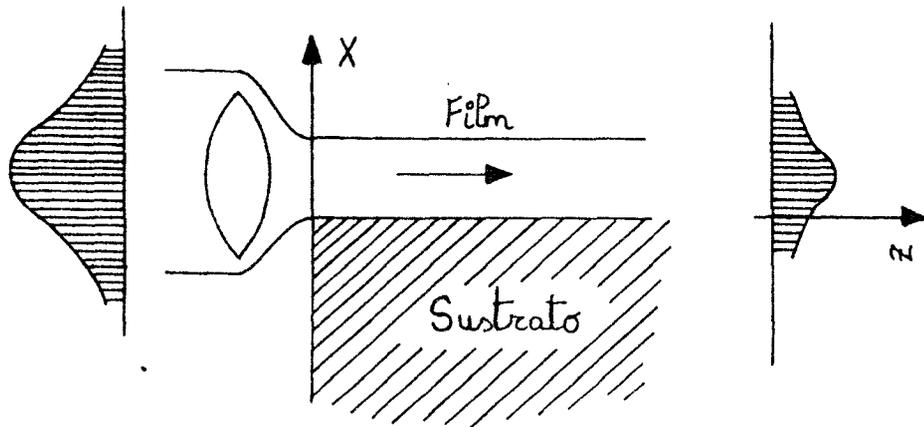
Las uniones directas pueden, en ocasiones y como tendremos oportunidad de ver, utilizar algunos elementos de ayuda externos. Vayamos por partes :

##### 1.5.1.1.1.- Uniones directas

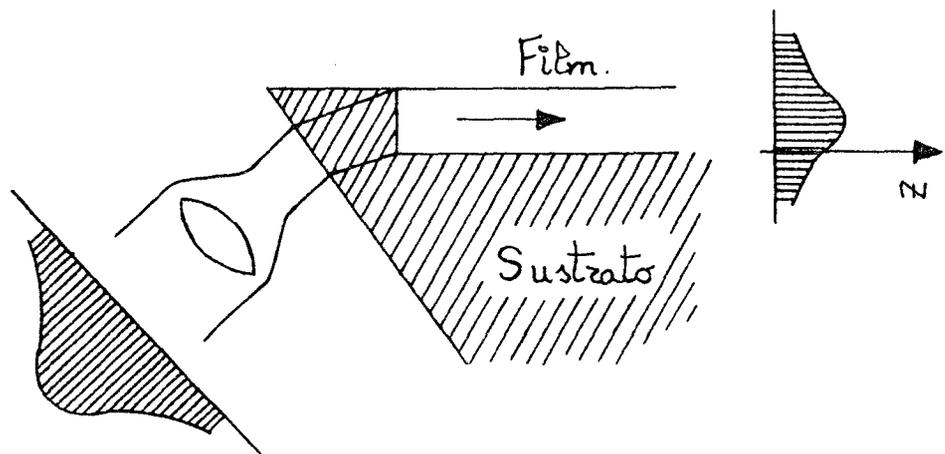
Pueden ser de dos tipos básicos :

- Transversales : en las cuales el haz es enfocado en la dirección de una sección longitudinal de la guía.
- Longitudinal : en las que el haz incide oblicuamente a la guía.

Las figuras muestran dos ejemplos típicos de uniones :



Transversal



Longitudinal

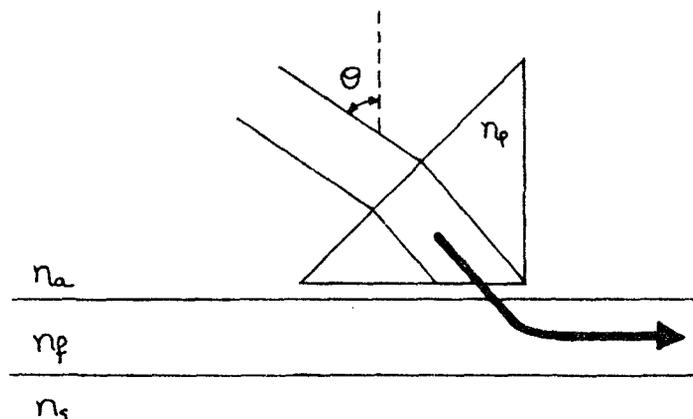
La conversión del haz en la onda de superficie deseada se está haciendo en este caso partiendo el campo de haz incidente a la izquierda del campo de onda superficial, la cual progresa hacia la derecha.

Si ocurre cualquier desajuste entre el perfil del haz incidente y la forma del campo de onda superficial, se pier-

de la energía en modos indeseables más altos y en campos de dispersión. Como vemos el problema de unión, o en definitiva el problema de introducir la energía óptica en el circuito optoelectrónico es muy delicado y aunque se puede llegar a un 100% de eficacia, en la práctica hay algunas pérdidas debidas, sobre todo a que el ancho del film óptico es aproximadamente 1 micro-metro, con lo que la lente y el Laser requieren alineaciones críticas y micromanipulaciones sensitivas para obtener los ajustes precisos. Debido a estas condiciones restrictivas este tipo de juntas, antes muy utilizadas, se usan en pocos casos y normalmente se prefieren métodos más seguros.

#### 1.5.1.1.2.- Juntas con prismas

Son fundamentalmente importantes, sobre todo por las bajas pérdidas que producen. El sistema es básicamente sencillo, tal y como lo muestra la figura :



Para tener una reflexión total :  $\theta > \theta_c$

Donde  $\theta_c$  sería el ángulo crítico total  $\theta_c = \text{sen}^{-1} (n_a/n_p)$

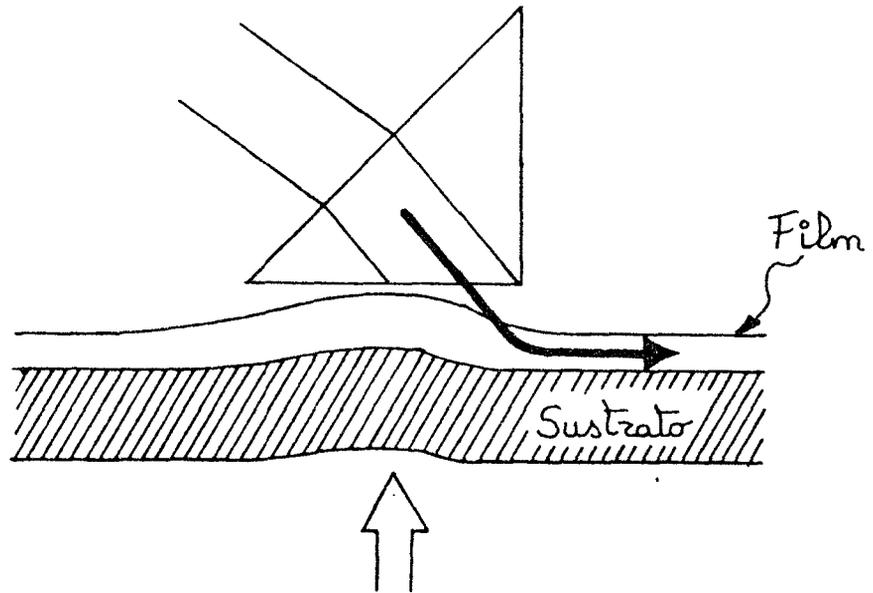
$$n_p > n_a$$

El haz incide a través del prisma de índice de refracción  $n_p$  y con un ángulo  $\theta$  elegido intencionadamente para satisfacer la total reflexión. El medio existente entre el prisma y la guía suele ser aire.

A pesar de las siempre inevitables pérdidas de energía este tipo de juntas pueden alcanzar el 80% de energía entregada. Lógicamente todas las distancias y medidas son calculadas para la máxima reflexión, pero podríamos decir que la condición para la máxima unión sería que el haz coincidiera con la esquina del prisma, tal y como se muestra en la figura.

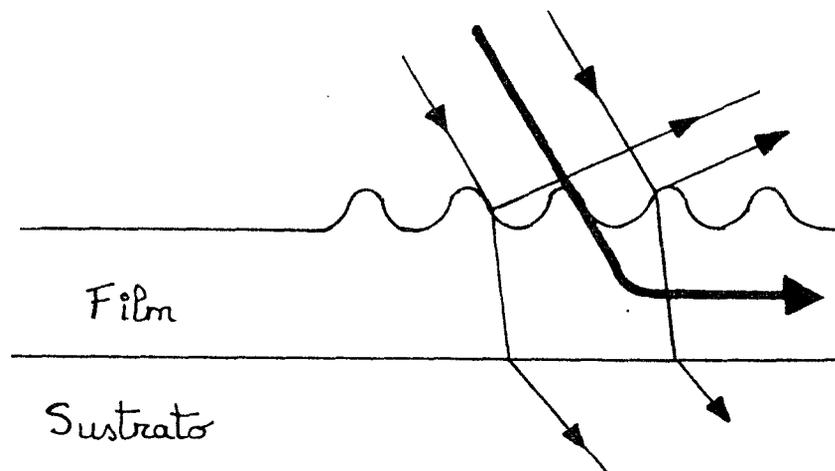
Un inconveniente en este tipo de juntas es que el prisma debe ser un material de  $n_p$  muy grande, además del ajuste en el aire y la posibilidad de incertarse partículas en ese espacio con la consiguiente distorsión.

De todas maneras hay una forma de mejorar su efectividad cuando este tipo de junta se utiliza para la entrada del haz y no para su salida del circuito optoelectrónico. Bastaría con ejercer una ligera presión a unas décimas de milímetro de la esquina del prisma, ya que con esta presión el hueco de aire entre la película y el prisma es menor y por tanto disminuyen las posibilidades de distorsiones. El haz ahora deberá estar comprendido entre el punto en el que se ejerce la presión y la esquina del prisma :



### 1.5.1.1.3.- Juntas con asperezas

Este tipo de juntas es básicamente igual al de prisma pero ahora la lámina de aire es reemplazada por una capa rugosa. La forma de esta rugosidad puede ser senoidal, triangular o trapezoidal e incluso, aunque son menos usadas, formas asimétricas y/o regulares. La elección de la forma depende en gran medida de la función fotoresistiva que vayamos a realizar.

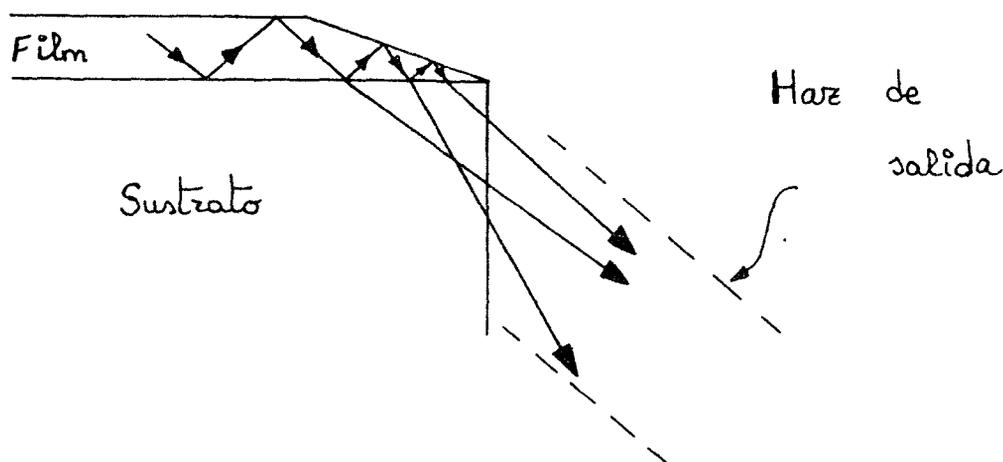


Las rugosidades no son más que un fotoresistor que está expuesto a un modelo de interferencia de dos campos viajeros opuestos obteniendo por partición y recombinación un haz de luz prácticamente igual al que teníamos.

La eficiencia aumenta cuando el haz coincide con el final de la aspereza. La mayor desventaja de este método es que una parte sustancial de la energía incidente es frecuentemente transmitida a través de la película y perdida en el sustrato porque no opera en régimen de total reflexión al contrario que el sistema antes estudiado del prisma. Su eficacia es aproximadamente del 70,5%.

#### 1.5.1.1.4.- Junta por disminución progresiva de la película

Están basadas en un principio básicamente sencillo : la onda que es transportada a través de la película incide en la parte en la que ésta comienza a disminuir, se va reflejando y va saliendo por el sustrato formando un haz que será el resultado de varias reflexiones y que depende del recortamiento de la película.

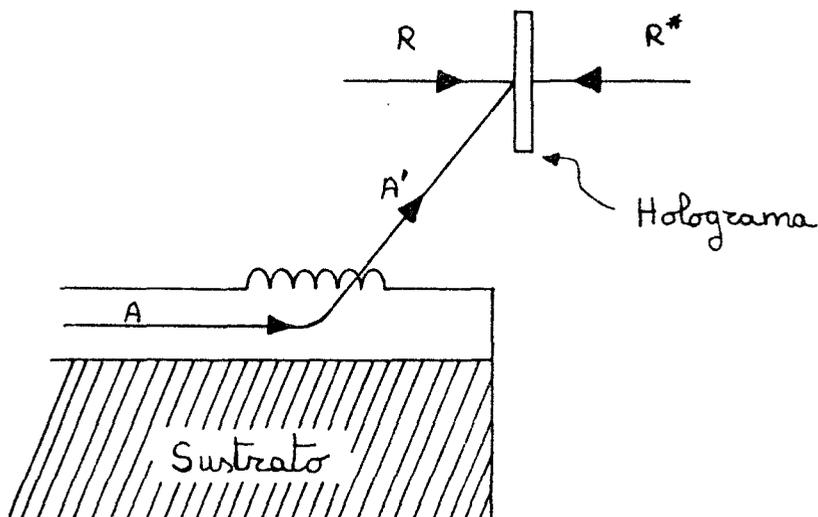


Como se puede ver éste es un método de junta que sirve para dar salida a la energía óptica directamente del circuito optoelectrónico.

El haz de salida se caracteriza por una gran divergencia (de  $1^\circ$  a  $20^\circ$  normalmente) debido a que está formado por diferentes rayos con distintos ángulos de salida.

#### 1.5.1.1.5.- Juntas holográficas

Para explicar este tipo de juntas es mejor acudir a la ayuda del gráfico :

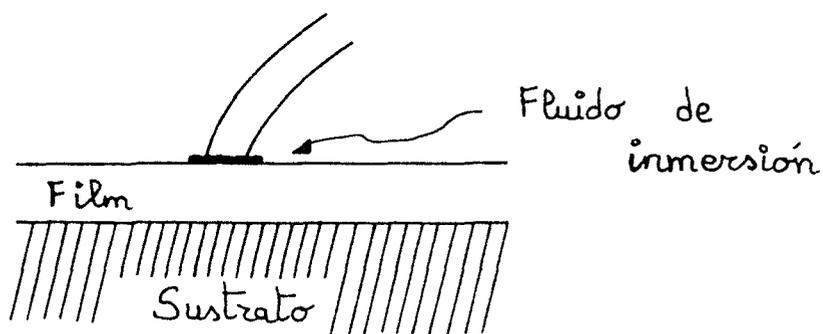


El rayo  $A'$  se utiliza con el rayo Laser  $R$  para grabar el holograma. La gran ventaja de este método es que las irregularidades no importan, pues el proceso holográfico se ajusta a sí mismo para tener duplicados de  $R$  y  $A$  sin tener en cuenta la dispersión que se ha producido al aparecer  $A'$ .

### 1.5.1.2.- Uniones fibras- guías

vamos a ver ahora los tipos de juntas más utilizados cuando se trata de combinar las fibras ópticas y los circuitos optoelectrónicos. Este es un tema bastante difícil y problemático. El principal inconveniente que se presenta es que el corazón de la fibra es muy pequeño para conectarlo a la guía plana, de manera que la conexión sea lo suficientemente rígida y la eficacia lo bastante alta. veamos los casos más usados.

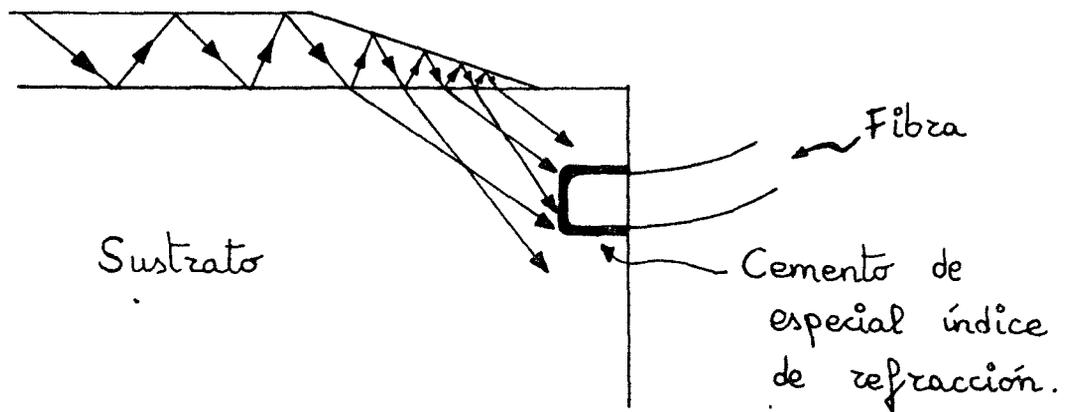
#### 1.5.1.2.1.- Directa por fluido de inmersión



Este tipo de juntas llega a alcanzar hasta un 50% de eficacia, pero la unión es muy frágil.

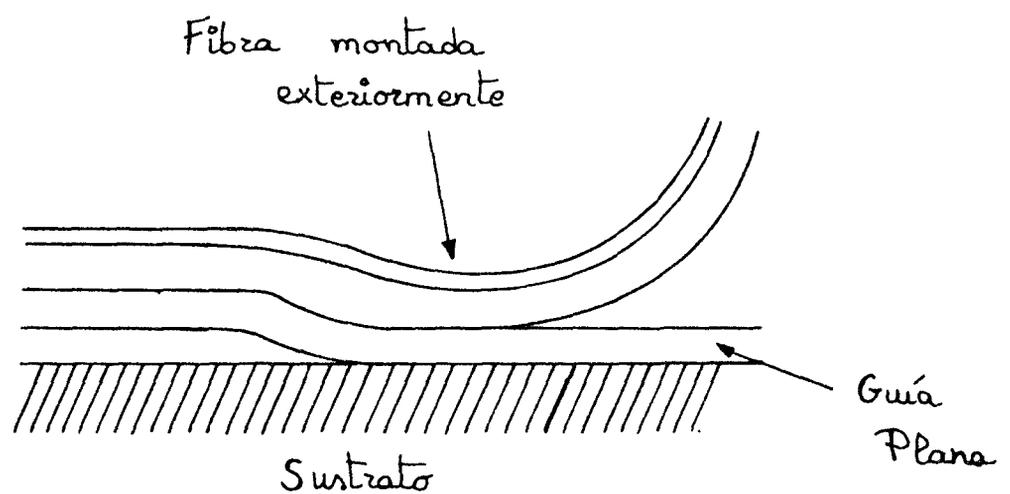
#### 1.5.1.2.2.- Por disminución de la película

Este método tiene una mejor eficacia, aunque por no ser una unión directa, y utilizar el sistema de estrechamiento progresivo de la fibra, presenta algunos problemas.



### 1.5.1.2.3.- Por contacto

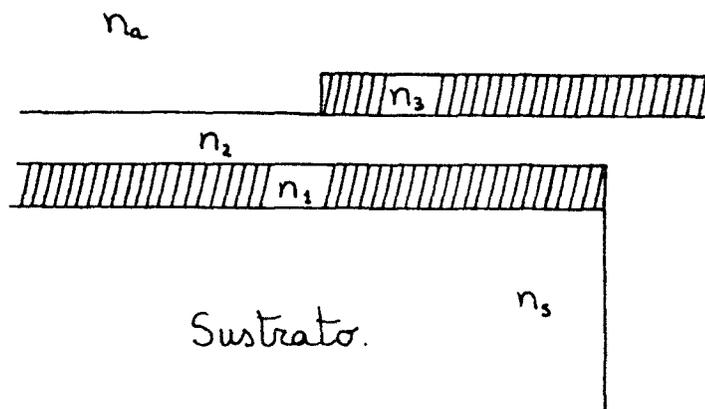
Normalmente se usan, con este método, fibras cuadradas para obtener una mayor superficie de contacto. La eficacia puede llegar a sobrepasar incluso el 70%. He aquí una de los pocos casos en los que en ocasiones se utilizan fibras de forma cuadrada.



### 1.5.1.3. Uniones entre guías planas

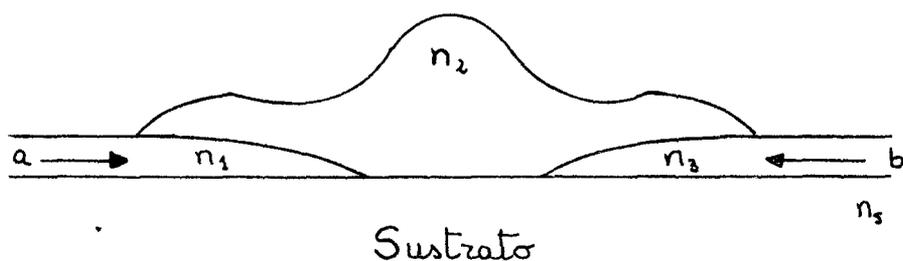
Hasta ahora hemos abordado el punto de las juntas y uniones con el fin de conseguir que el haz de luz entre o salga del circuito optoelectrónico, directamente o a través de una fibra óptica, pero para completar la visión sería preciso, aunque sólo sea de pasada para no extendernos mucho, mencionar las uniones entre guías planas, es decir los métodos de unión que existen para combinar dos o más "films" en un mismo circuito.

Estas uniones de guías planas podrían asemejarse a lo que significan las uniones de las líneas conductoras en los circuitos impresos. Son pues importantes en la configuración de los circuitos optoelectrónicos. Estas juntas son básicamente :



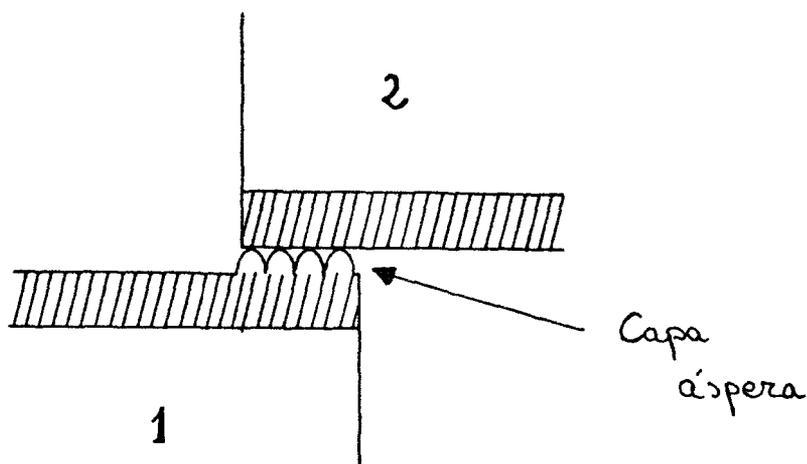
Los índices  $n_1$  y  $n_3$  deben de ser mayores que  $n_2$  .  
Este método no tiene muchas aplicaciones.

Hay otro modelo más comúnmente utilizado :



Si la onda viene por "a", como  $n_2$  debe ser mayor que  $n_s$ , la energía se radia al film intermedio y la onda continúa por él. Lo mismo ocurriría si viene por "b".

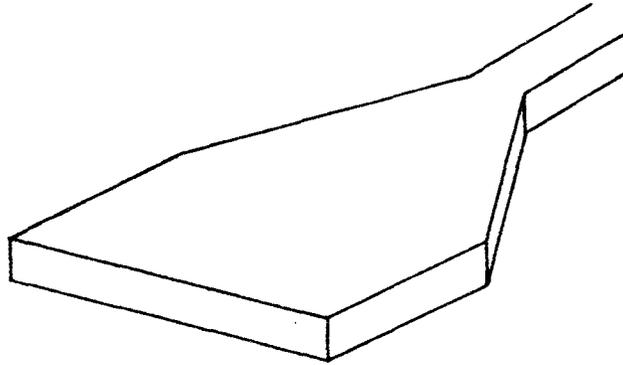
Por último citar otro de los modos usuales :



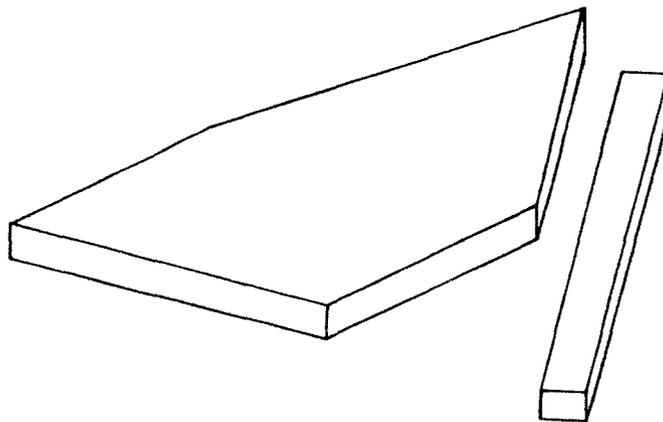
Para obtener una mayor eficiencia la aspereza debe ocupar toda la longitud de la junta.

#### 1.5.1.4.- Métodos auxiliares de juntas

Hay otros métodos de uniones que están basados en la combinación de gufa-ondas planas y lineales en el mismo integrado. Son básicas en optoelectrónica y los métodos de juntas son fundamentalmente dos :

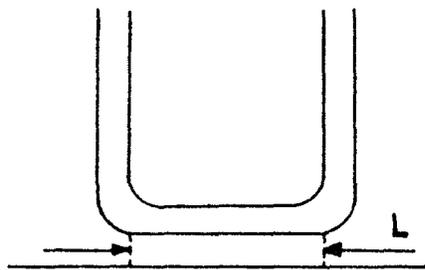


Puede tener muchas pérdidas pero para que éstas se reduzcan al máximo, lo que se hace es que se alarga lo más posible el embudo.

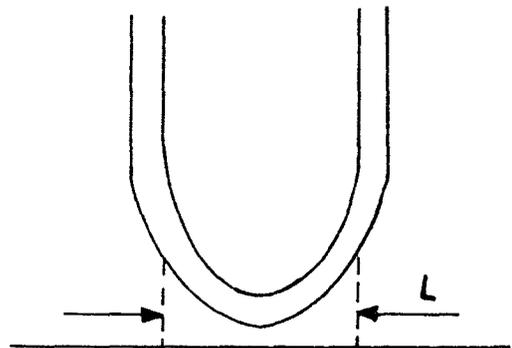


Se trata de terminar la guía plana con un prisma. La principal dificultad estriba en calcular la distancia que debe separar ambas guías. Este método está todavía en vías de experimentación.

Cuando se trata de dos guías lineales hay dos soluciones también :



a°)



b°)

El inconveniente de este método se haya en que la tolerancia es muy crítica y para resolver este problema se ha propuesto usar una disminución en la zona de unión de ahí la curvatura que se ve en el segundo dibujo.(b).

Parece que con esto todas las posibilidades quedan expuestas y que únicamente hay un problema o apartado sin resolver, en lo que a circuitos optoelectrónicos se refiere, los detectores

### 1.5.2.- Detectores

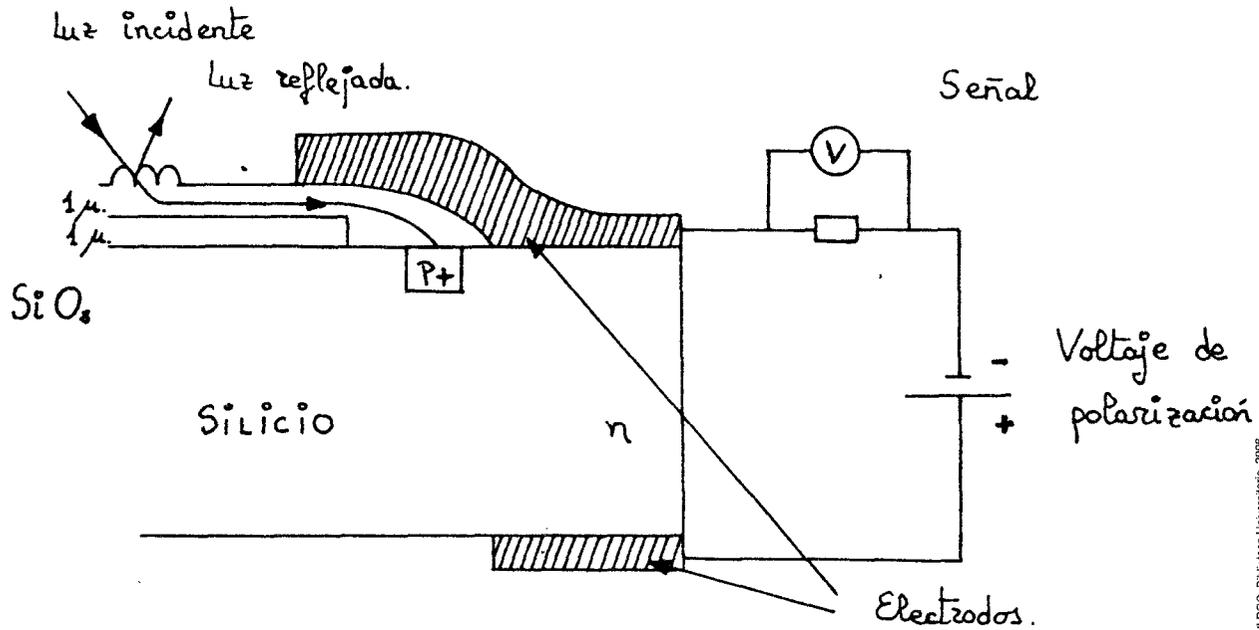
Hemos visto como conseguimos la fuente de luz, mediante un Laser incrustado en el propio circuito, tomándolo directamente o vía fibra óptica de una fuente exterior. Anotamos las funciones de los moduladores y "switches" como fundamental para la elaboración de la información que va a recorrer el circuito. Comprobamos como existen métodos que nos permiten transportar a través de todo el integrado esa información pasando por distintos films y hasta salir del mismo directamente o por una fibra óptica.

Son pues los detectores los únicos elementos que nos faltan por analizar. La idea de los detectores en los circuitos optoelectrónicos viene del deseo de dar una integración completa a los mismos, es decir, de dotarlos de autonomía para procesar toda la información óptica sin necesidad de salirnos de ellos.

Su función es la de absorber la luz incidente a través de una fibra plana y liberar portadores de una manera proporcional o siguiendo alguna regla que permita luego, al demodular esa señal, ya eléctrica, obtener la misma información originada en la fuente. Hay varios tipos básicos :

### 1.5.2.1.- Fotodiodos

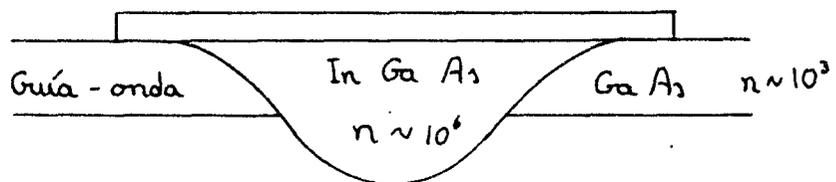
Estarian basados en una unión p-n o unión metal semiconductor. Esquemáticamente :



Los electrodos recogen la corriente generada por la absorción de la luz.

### 1.5.2.2.- Fotodetector epitaxial

Estos detectores tienen una excelente fotorespuesta. Esquemáticamente :



#### 1.5.2.3.- Detectores de electro absorción

Un semiconductor al que le es aplicado un campo cuenta la absorción óptica para la luz cerca de la banda vacía, la absorción genera pares de electrones-huecos, los cuales son barridos fuera por el propio campo, produciéndose fotocorriente.

#### 1.5.2.4.- Fotodetectores por implantación iónica

La implantación de iones es otro modo de disminuir la la banda vacía, para incrementar la absorción y por tanto la fotocorriente.

Con este repaso a los fotodetectores podemos dar por concluida esta incursión en el mundo de la optoelectrónica como una de las vías de la tecnología a seguir en el futuro de la electrónica.

## 2. LASERS

### 2.1.- Introducción

La importancia de esta fuente de energía óptica es tal en el mundo moderno, y en especial en el campo de la tecnología de fibras ópticas y optoelectrónica, que no podíamos dedicarnos a hacer un trabajo serio sobre aquellas sin tratar a fondo éstos.

En 1924 se observó que algunos osciladores no sólo absorbían la energía bajo el impacto de la luz, sino que además producían una radiación. En un principio se creyó que era debido a una dispersión negativa, pero hoy ya sabemos que la emisión estimulada se debe a una inversión de población, como más adelante veremos.

Los estudios pues, por aquel entonces, iban encaminados a producir una dispersión negativa, por eso no tenían demasiado éxito. Hasta la segunda guerra mundial no se desarrollarán suficientemente los estudios de micro-ondas y por tanto de los Masers ( Maser = "microwave amplification by stimulated emission of radiation").

Los florecientes avances en el campo de las micro-ondas para su utilización, sobre todo en radar, y en general para la totalidad de las comunicaciones sostuvieron la investigación y producción de nuevas técnicas para trabajar eficazmente con el nuevo descubrimiento, ya las viejas re-

sistencias y condensadores convencionales quedaban desfasados y desplazados por nuevos conceptos.

Fue en 1946, cuando se aplicó la tecnología de microondas a estudiar fenómenos importantes de resonancia, cuando se comprobó que algunos cristales brillaban, evidentemente, por inversión de población.

Poco después en 1951 ya se estaba experimentando con Fluoruro de Litio, y paso a paso este fenómeno de radiación, por otro lado ya descrito en su día por Einstein en sus ecuaciones de radiación, fue convirtiéndose en una realidad y no en pura especulación o hipótesis, como algunos investigadores quisieron dejar claro al principio.

Se empezaba ya a perfeccionar el espectroscopio y se buscaba una manera eficaz de amplificar las radiaciones en microondas ya que se estaba en condiciones de que fueran captadas. Las primeras observaciones se hicieron tomando elementos con moléculas sencillas como el Amoníaco, formado por 1 átomo de Nitrógeno y 3 de Hidrógeno en forma piramidal y que además exhibía unas fuertes líneas espectrales  $\lambda \simeq 2,4 \times 10^{10}$  cpsg.

Tomando como base estos estudios se comenzó a fabricar tecnología apropiada para esta longitud de onda, con la facilidad implícita de que era adaptable a la existente.

Es así como en 1954 se llega a la construcción del primer Maser de la historia, es decir, a la primera amplificación de microondas por emisión estimulada de radiación, utilizando la energía almacenada en las moléculas de Amoníaco.

Comenzaba la idea de desarrollar un Laser, amplificador de ondas de luz, como ondas, directamente, sin necesidad de convertirlas primero en vibraciones de electrones, como hacían los primeros amplificadores de señales luminosas. La forma común de un Laser está basada en una sustancia activa (sólida, líquida o gas) unida con aparatos reflectantes, los cuales permiten reflejar las ondas de luz cuando el "quanto" interacciona con ellas.

Tomando conciencia de que su importancia superaba incluso la de las micro-ondas convencionales, baste citar que éstas quedaban superadas 20 veces en potencia y además las líneas espectrales pueden estrecharse mucho más, que la luz de Laser es también coherente y otras innumerables ventajas más, precursores como Schawlow, Townes, Basov y Prokhorov, se lanzan a la conquista de este apasionante mundo incluyendo nuevos aspectos a las teorías ya existentes, como pudo ser el hecho de incluir iones de tierras raras para activar las sustancias que servían de base.

En 1960 Maimman de la "Hughes Aircraft Company" anunció el desarrollo de un Laser rubí, sintético y pulsado, formado por el cristal  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Cr}^{3+}$ , que emitía en la región roja del espectro visible. En ese mismo año, Sorokin y Stevenson, de I.B.M., descubrieron un cristal de Laser nuevo, el  $\text{CaF}_2\text{-U}^{3+}$ , y mientras que el Laser de rubí era un sistema de tres niveles, este lo era de cuatro y emitía a una longitud de onda  $\approx 2,6 \mu\text{m}$ .

Al año siguiente los mismos investigadores lograron una emisión de  $0,7\ \mu\text{m}$  añadiendo iones Sn al cristal por ellos descubierto.

De todas maneras fue después del desarrollo del Laser  $\text{CaWO}_4\text{-Nd}^{3+}$  por Johnson y Nassau cuando las propiedades de los cristales activados quedaron más claros. Este Laser emitía a  $1\ \mu\text{m}$  a temperatura ambiente y con una excitación bajísima.

A partir de ese momento los progresos han sido continuos y no siempre han ido paralelos al campo de las fibras ópticas, de ahí que mientras éstas son las grandes desconocidas, los Lasers sugieren, casi instantáneamente, innumerables aplicaciones y usos, incluso para el profano.

Tras el gran auge que se produjo en el campo de los Lasers en 1962 comenzaron a aparecer nuevos tipos de éstos, cada día eran mejores y dejaban sumidos en la prehistoria aquellos de Amoníaco.

La cuestión que se había presentado en un principio acerca de cual era la causa real de esa emisión estimulada ya no tenía cabida pues la respuesta fue encontrada en las transiciones entre niveles electrónicos de iones activadores.

En 1963 Johnson, Dietz y Guggenheim mostraron que esos cristales activados por ciertos iones bivalentes del grupo férreo podían también ser inducidos a emisión por transición de fotones asistidos.

Ya se conocían los Lasers de onda continua (CW) y los de interrupción "Q-switches", pero se comenzaron a usar nuevos métodos para incrementar la eficacia: usando mezclas de

sistemas desordenados según los estudios de Voronko, Kaminskii, Osiko y el propio Prokhorov.

Esta nueva concepción basada en la utilización de sistemas mezclados desordenadamente ha tenido éxito con cristales que contienen moléculas de oxígeno y sobre todo con la utilización de iones del tipo  $RE^{3+}$  (tierras raras  $3+$ ), pues están distribuidos en muchos centros activos con diferentes estructuras, con lo que los estados excitados de estos centros contribuirán a mejorar los parámetros aparentes del Laser.

Los avances más significativos se pueden encontrar, primeramente, en la creación de los Lasers en estado sólido, con esquemas de operación en cascada, y medios activos combinados con inyección de fotones donde algunas excitaciones de niveles metaestables de alta energía se deben a sucesivas conversiones de cuantos infrarojos bombeados, y en segundo lugar, aquellos con frecuencia de emisión continua o escalonada por variación de la temperatura del cristal o de los parámetros de la cavidad óptica. También tienen una importancia fundamental los Lasers multi-haces y los que operan a altas temperaturas.

La emisión estimulada ha sido observada en más de 280 cristales dopados con iones de elementos de transición. La mayoría son cristales de Laser oxidados con estructuras ordenadas en las que los iones dopantes fueron mayormente un tipo de centros activadores.

Tal magnitud puede darnos una clara idea de lo que actualmente significa el Laser en nuestra sociedad, no obstante

no es el objeto de este proyecto, como creo que ha quedado claro, aventurarnos en este terreno, sino analizar el tema de una manera somera, aunque concienzuda, desde el punto de vista de fuente de radiación, de punto de partida para la luz que utilizará el mejor canal de comunicación, la fibra óptica.

## 2.2- Conceptos teóricos

Para comenzar a comprender la filosofía del Laser, quizá lo más conveniente sea retornar, montados en el caballo del tiempo, a lo que fue el primer Laser.

En los elementos, en algunos cristales y gases especialmente, los electrones y huecos mantienen un equilibrio electrónico mediante un intercambio de energía. Estos electrones o huecos se van a distribuir pues estáticamente por los niveles energéticos y lógicamente los niveles de energía serán los estados más altamente poblados, configurando así una distribución "normal" de energía.

Una radiación incidente de frecuencia apropiada, o cualquier otro método de los que veamos más adelante, puede interactuar con el sistema electrónico por estimulación de un proceso de absorción, o por estimulación del proceso de emisión. De cualquier modo, la posibilidad de que un sistema sea estimulado para emitir es la misma, tanto si los electrones están en niveles más bajos, como más altos que el nivel de absorción de radiación.

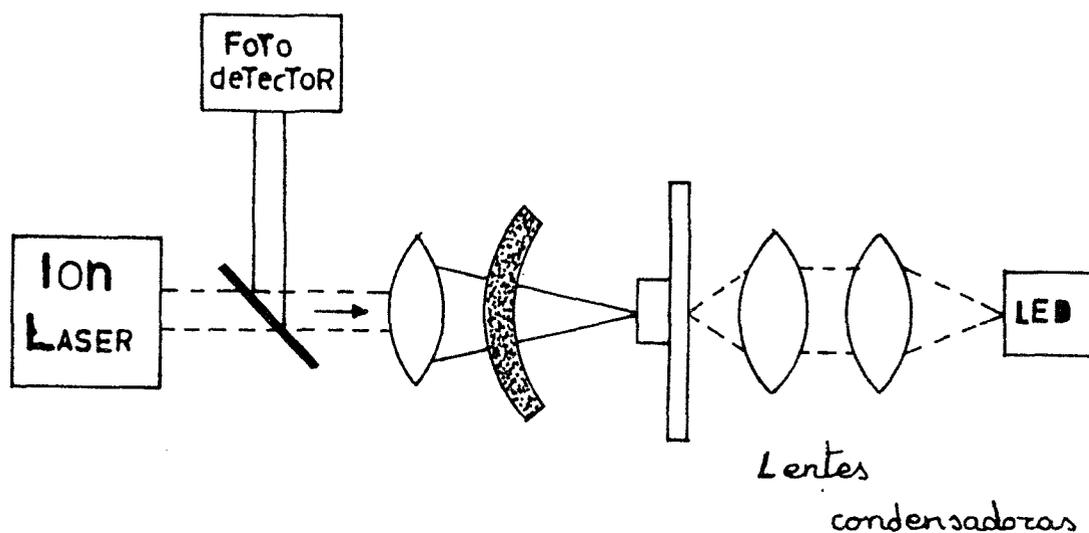
Así cuando la radiación incidente es suficientemente pequeña para no alterar la distribución "normal" más que por la propia interacción, la potencia de radiación se debe al campo de radiación del sistema electrónico. Es decir, los acontecimientos de absorción predominan, porque tenemos mayor número de niveles de menor energía.

Si la distribución normal de población pudiera ser invertida para que los estados de más alta energía electrónica

relativa estuvieran más poblados, entonces estimularíamos la emisión y la potencia neta que fluye lo hará desde el sistema electrónico al campo de radiación.

Para obtener la inversión de población, primer principio y causa de la emisión estimulada, y que los átomos aumenten en los niveles de energía más altos, se pueden hacer muchas cosas, citemos algunas :

- Bombear el material por exposición de este a una energía electromagnética de una cierta frecuencia, la cual fuerza al material a absorber energía. Normalmente se utiliza una fuente Laser o un Led para producir la excitación, por lo que realmente se deberían llamar cristales convertidores, pues lo que hacen es convertir un Laser bombeador a otra frecuencia, en estos casos la de emisión del excitado.



También se puede hacer usando una descarga eléctrica que produzca una transferencia de energía entre moléculas. La corriente eléctrica hace que aumenten las colisiones de las moléculas del gas y esa energía despedida sirve para poblar los niveles más altos con átomos.

- Aplicando un campo magnético para orientar el "Spin" de los electrones. Esta técnica es usada primariamente en Lasers sólidos y puede ser combinada con la técnica de bombeo.
- Pasando a través de un gas energía eléctrica, con lo que se separan las partículas, ya que el nivel de energía del mismo determina su grado de reacción con el campo eléctrico.
- Bombeando directamente electrones. Este método se aplica principalmente a los Lasers sólidos y es interesante por las facilidades para la modulación que aporta ya que se puede modular el haz de electrones con el que se está efectuando el bombeo por métodos convencionales y con ello conseguir un Laser modulado.

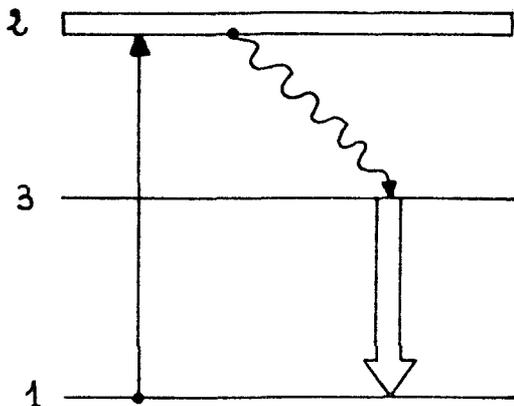
Resumiendo podemos decir que a la hora de la fabricación de los Lasers hay tres facetas en el proceso :

- Encontrar un material que emita energía a la frecuencia que queramos.
- Encontrar la manera, normalmente alguna de las citadas anteriormente, para lograr una inversión de población que estimule la emisión.
- Intensificar la acción anterior, mediante la aplicación

de un retardo a la señal para que se mueva relativamente más despacio a través del medio activo.

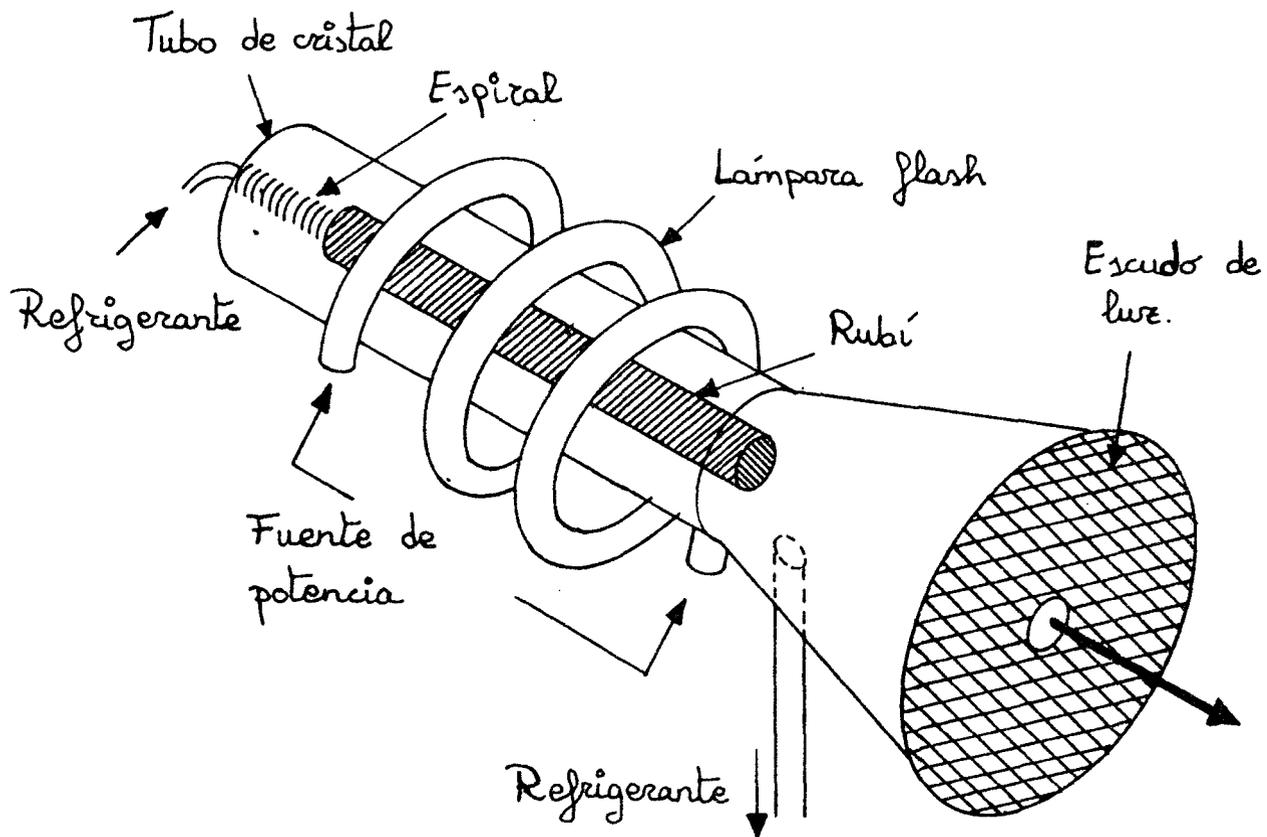
Aquel legendario Laser de Maiman, el primero en construirse, estaba formado por un rubí que en estado de equilibrio mantiene todos los electrones en el nivel "1" o tierra. ( Ver apéndice B figura 1, correspondiente a los esquemas de excitación). Por absorción de la luz verde del bombeo de un tubo-flash, un número de electrones son elevados al nivel "2", parte de la energía es entregada en forma de calor y entonces se encuentran en el nivel "3".

Cuando ocurre el salto del cuanto del nivel "3" al "1" para retornar al equilibrio se emite luz roja y tenemos la emisión Laser.



La amplificación la conseguía Maiman añadiendo espejos paralelos, uno de los cuales es opaco y el otro semitransparente para permitir la salida del haz.

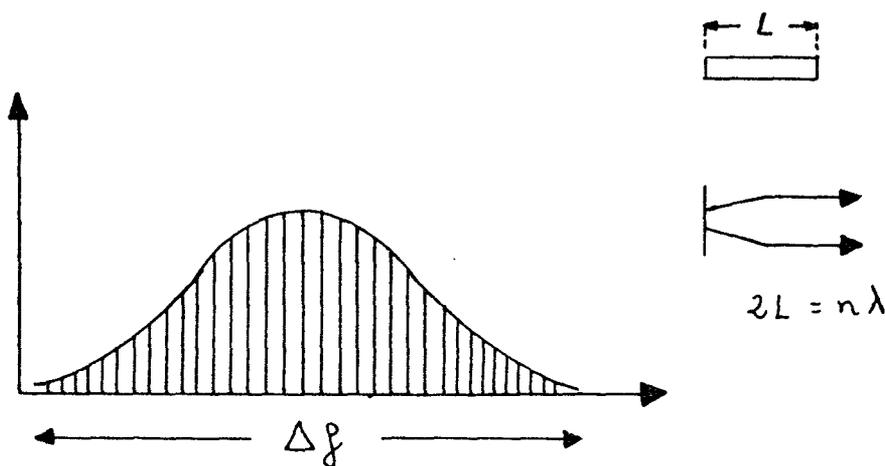
# LASER DE RUBÍ



El cristal es excitado por el flash de luz que le envía un gran número de fotones violetas y verdes, esto causa que el nivel metaestable esté lo suficientemente superpoblado para producir la amplificación de la luz roja. El rubí es un núcleo cilíndrico que termina en dos espejos cuyas superficies son perpendiculares al eje longitudinal de la misma.

Como veremos más adelante, poco después de este Laser de rubí de Maiman se descubrió la posibilidad de utilización de un cuarto nivel consiguiendo aumentar la efectividad puesto que ahora la emisión se produce en el salto de los niveles tercero al segundo, y no tenemos una disminución drástica de población, como era el caso anterior. Necesitamos pues menos energía de bombeo que en el sistema de tres niveles, pero bueno, esto lo entenderemos mejor en explicaciones sucesivas. Vayamos ahora a un estudio más generalizado de los Lasers.

La luz de Laser no es absolutamente coherente, como dice la sabiduría tradicional "nada es perfecto", porque esta es una propiedad absoluta, sin embargo es la más coherente de las fuentes de luz estudiadas. Esta coherencia aumenta a medida que el ancho de onda de las líneas espectrales disminuye, podemos pues decir que el ancho de onda es el límite inferior para el grado de coherencia temporal.



$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{cn}{2L} \quad \Rightarrow \quad \Delta f = \frac{c\Delta n}{2L}$$

Uno de los principales problemas que se presentan es la determinación de la frecuencia a la que se produce la emisión estimulada, pues depende sobre todo del método y características de la excitación, además del propio material.

Las principales contribuciones a este ancho espectral que debemos determinar serían :

- La más fundamental surge de la presencia a la salida del Laser de un ruido amplificado. Al igual que los casos de ruido de radio-frecuencias, donde la temperatura de los elementos del circuito disipativo contribuían al ruido térmico, en la región óptica el campo amplificador del "punto cero" electromagnético añade en fase casual y a menores frecuencias ruido térmico a la salida.
- Para los Lasers tipo "Skiping" o "Q- switched" hay una contribución adicional debida al desarrollo de la oscilación por transformadas del tipo Fourier.
- Las fluctuaciones en la longitud del paso del circuito óptico oscilador inducirá a variaciones de fase en la salida que contribuirán a variar el ancho espectral.

Podríamos considerar dos grandes bloques dependiendo de las propiedades espectroscópicas de los centros activadores : materiales simples y sistemas mezclados o soluciones sólidas cristalinas. Los centros activadores ( por centros activadores entendemos el micro-sistema formado por un ión dopante y los iones del sustrato que lo rodean ) suelen estar en bajas concentraciones aunque las concentraciones idóneas serían del orden de  $10^{19}$  a  $10^{20}$   $\text{cm}^{-3}$ .

Cuando dopamos un cristal ordenado, los iones ocupan posiciones idénticas en la matriz y en las correspondientes líneas espectrales. Esto se llama ensanchamiento homogéneo. Puede darse el caso de que incluso en una distribución isomórfica los centros activadores ocupen lugares diferentes teniendo así el ensanchamiento no-homogéneo.

Sobre todo a bajas temperaturas se observa la superposición de varias líneas de frecuencia separadas que corresponden a centros separados. Normalmente el ancho de estas líneas sería :

$$\Delta\nu_e \approx \frac{1}{2\pi} A_{ij} \approx \begin{cases} 10^{-2} \text{ cm}^{-1} \\ 10^{-4} \text{ cm}^{-1} \end{cases}$$

Donde  $A_{ij}$  sería el número de oscilaciones emitidas por unidad de volumen.

La energía emitida o absorbida por el cristal viene determinada por la energía de las transiciones entre los diferentes niveles activadores. Así si consideramos dos niveles, uno superior  $E_2$  y uno inferior  $E_1$ , el equilibrio vendría dado por :

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{q_2}{q_1} e^{-\left(\frac{E_2 - E_1}{kT}\right)}$$

Teniendo en cuenta que  $T$  correspondería a la temperatura,  $k$  sería la constante de Boltzman, los  $N_2$  y  $N_1$  representan los números correspondientes a la población de los niveles y por último  $q_2$  y  $q_1$  las degeneraciones o peso estático de los niveles.

Cuando irradiamos el sistema con luz de frecuencia el sistema sale, lógicamente, del equilibrio y entra en la fase de transición de electrones de 1 hacia 2 cuya probabilidad es  $B_{12}U(\nu_{21})$ . Suponiendo que ambos niveles tienen  $\chi_{21}$ , igual peso estático,  $q_1=q_2$ , el terreno de las probabilidades para el retorno de la transición viene caracterizado por:

$$A_{21} + B_{21} U(\nu_{21})$$

Ahora la condición de equilibrio sería:

$$B_{12} U(\nu_{21}) N_1 = A_{21} N_2 + B_{21} U(\nu_{21}) N_2$$

$$U(\nu_{21}) (B_{12} N_1 - B_{21} N_2) = A_{21} N_2$$

$$U(\nu_{21}) \left( B_{12} e^{-\left(\frac{E_2 - E_1}{kT}\right)} - B_{21} \right) = A_{21}$$

como  $\nu_{ij} = \left| \frac{E_j - E_i}{h} \right|$  y la expresión de Planck

$$U(\nu) = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}$$

comparando con

$$U(\nu_{21}) = \frac{A_{21}}{B_{12} e^{(h\nu/kT)} - B_{21}}$$

Suponiendo  $B_{12} = B_{21}$

$$B_{21} = \frac{c^3 A_{21}}{8\pi h \nu_{21}^3 n^3}$$

Como siempre, en estas fórmulas "c" representa la velocidad de la luz en el vacío, "n" el índice de refracción, "h" la constante de Planck y "A<sub>21</sub>" el número de oscilaciones radiadas por unidad de volumen emitiendo sobre rango de frecuencias sencillo o "single".

Constantemente estamos mencionando los niveles del material y como se producen transiciones entre éstos dando lugar a la emisión de energía Laser. Los esquemas básicos de excitación vienen todos representados en el apéndice B figura 1.

Estos esquemas tienen todos una cosa en común y es que la emisión estimulada envuelve un estado metaestable de un ión activador y pérdidas considerables en las transiciones secundarias, especialmente en canales bombeados sin selección de excitación óptica.

En el espectroscópio de la emisión estimulada el contorno amplificado podría ser modificado introduciendo pérdidas selectivas que supriman las subsodichas amplificaciones a la frecuencia de la transición principal y produzcan un factor "Q" más alto a la frecuencia deseada, o también introduciendo ganancias selectivas en la cavidad que recoja al Laser, con lo que se incrementa la eficiencia de la ganancia a la frecuencia de la línea excitada por un valor determinado.

Los diferentes esquemas muestran como los distintos estudios que se van realizando en este campo aportan cada día mejoras en la obtención de este tipo de emisión estimulada.

Una de las mejoras que se ha introducido, además de ese cuarto nivel que propicia mayores órdenes de energía, es la sintetización de los Lasers, es decir, junto con los iones activadores se añaden al cristal otros iones llamados sintetizadores (donadores). Su función es absorber la energía

de excitación y transferirla a los iones más importantes, los aceptores. Gracias a las bandas adicionales de absorción de los iones sintetizadores, la banda efectiva de bombeo será extendida. Con esto la excitación umbral descenderá mientras la intensidad de emisión iónica crecerá.

La utilización de este método marginal, al igual que otros que veremos a continuación, está propiciando nuevos modelos de Laser que en algunos casos se consideran como tipos distintos a los convencionales y se incluyen en la clasificación de éstos, pero sin embargo nosotros vamos a seguir un criterio más estandarizado y distinguir estas modificaciones aparte.

Hay, en este campo de las variantes, algunos Lasers a los que se les hace trabajar operando en cascada. La estructura de éstos, cuando se trata de Lasers de cristal, es similar a la de los gaseosos, operando en varias transiciones sucesivas. Se trata, simplificando muchísimo la explicación, de que una emisión estimulada en cascada envuelva varios estados metaestables que pertenecen a uno o más tipos de iones activadores. Se podría hacer una distinción entre cascada directa, que envolvería a por lo menos dos metaestables de iones similares y aquellas cascadas con una transferencia intermedia de excitación de energía. Este último caso es posible con dos o más impurezas.

Los Lasers producidos por autosaturación se basan en la producción de un cierto número de inversiones de los niveles operativos utilizando dos estados de iones activadores, el más bajo con mayor tiempo de vida. Todavía se está trabajando

mucho en este campo pues se acaba de empezar a vislumbrar nuevos horizontes en esta dirección.

Es posible incluso obtener Lasers con auto-duplicado de frecuencias añadiendo a la emisión estimulada algunas sustancias ópticas no-lineales como generadores de armónicos ópticos. Estos Lasers son especialmente utilizados para moduladores y deflectores.

Como última variante, de las importantes, podríamos citar los Lasers multi-haces que se caracterizan porque en ellos coexisten varias cavidades con un mismo medio activo, así en un mismo instante podemos conseguir emisiones simultáneas de frecuencias y polarizaciones diferentes atribuidas a transiciones entre diferentes niveles de estados del mismo ión activador. La gran ventaja que aportan estos Lasers es que por constituirse de dos haces diferentes pueden ser trabajados con distintos criterios e incluso uno ser modulado y el otro no.

Hasta ahora en este apartado teórico de los Lasers únicamente hemos visto las características de la luz y el ancho espectral de los Lasers, pero igualmente importantes serían los estudios de la estructura y composición del cristal, el ión activador y porcentaje en que se encuentra, temperatura, modo de operación o tipo de Laser.

Un oscilador de Laser está compuesto básicamente por cuatro elementos:

- Un material medio que presenta una ganancia óptica coherente, por ejemplo, incrementa la amplitud de campo óptico a medida que éste progresa por el material, mientras, claro está, la polarización y dirección de propagación no varíen.
- Un circuito óptico resonante para provocar la onda "feedback" al medio amplificador.
- Un excitador apropiado o bomba que mantenga al medio en el estado de amplificación.
- Una junta de salida que permita la división de la potencia de oscilación para ser usada externamente.

Estos elementos, con más o menos variaciones, se van a encontrar en todo sistema Laser. Los osciladores Lasers son fundamentalmente ganadores de muy altas frecuencias que trabajan en un orden de éstas que va desde  $3 \times 10^{14}$  cm/sg ( $\lambda = 0,1$  mm) hasta  $10^{15}$  cm/sg ( $\lambda = 3000 \text{ \AA}$ ).

Quizá la especificación más importante que haya que hacer de una salida Laser sea la radiación. Se entiende por radiación la potencia (o pulso de energía) por unidad de apertura radiante, por unidad de ángulo del campo de salida.

Este parámetro es de capital importancia pues resume la efectividad de los Lasers y delimita en gran medida la modulación que vayamos a realizar.

Lógicamente la modulación de un Laser se puede referir tanto a la amplitud como a la frecuencia, y la utilización de uno u otro método depende de las características del propio Laser, así como de los efectos que queramos conseguir.

La modulación de un Laser en amplitud puede realizarse de dos maneras :

- Internamente.

Variando la longitud de la cavidad :

$$2L = n\lambda$$

- Externamente.

- : Procesando los efectos cuadráticos de Kerr. Se trata de colocar una celda con un determinado líquido en la trayectoria del haz, y variando el voltaje de ésta logramos polarizar la luz.
- : Efecto Pöckels. Se basa en colocar unos cristales cúbicos para modular señales separadas en el mismo haz de luz.
- : Operación síncrona. El campo de modulación viaja en sincronismo con la luz.
- : Banda lateral. La modulación se da por encima o por debajo de la frecuencia central.
- : Unión "p-n" polarizada. La luz pasa a través de la unión p-n y por el voltaje aplicado a ésta se logra polarizar el haz.

La demodulación y detección depende del modo o método empleado, pero siempre teniendo en cuenta la relación señal-ruido.

Los moduladores de frecuencia, por el contrario, se construyen básicamente colocando un modulador de F M en la cavidad donde se produce el Laser. Para una mejor salvaguarda de la información se suele someter al Laser F M a una segunda modulación de fase de  $180^\circ$  y con el mismo índice de

modulación. Esta modulación adicional da una frecuencia simple y a los Lasers de este tipo se les suele llamar Lasers super-modo.

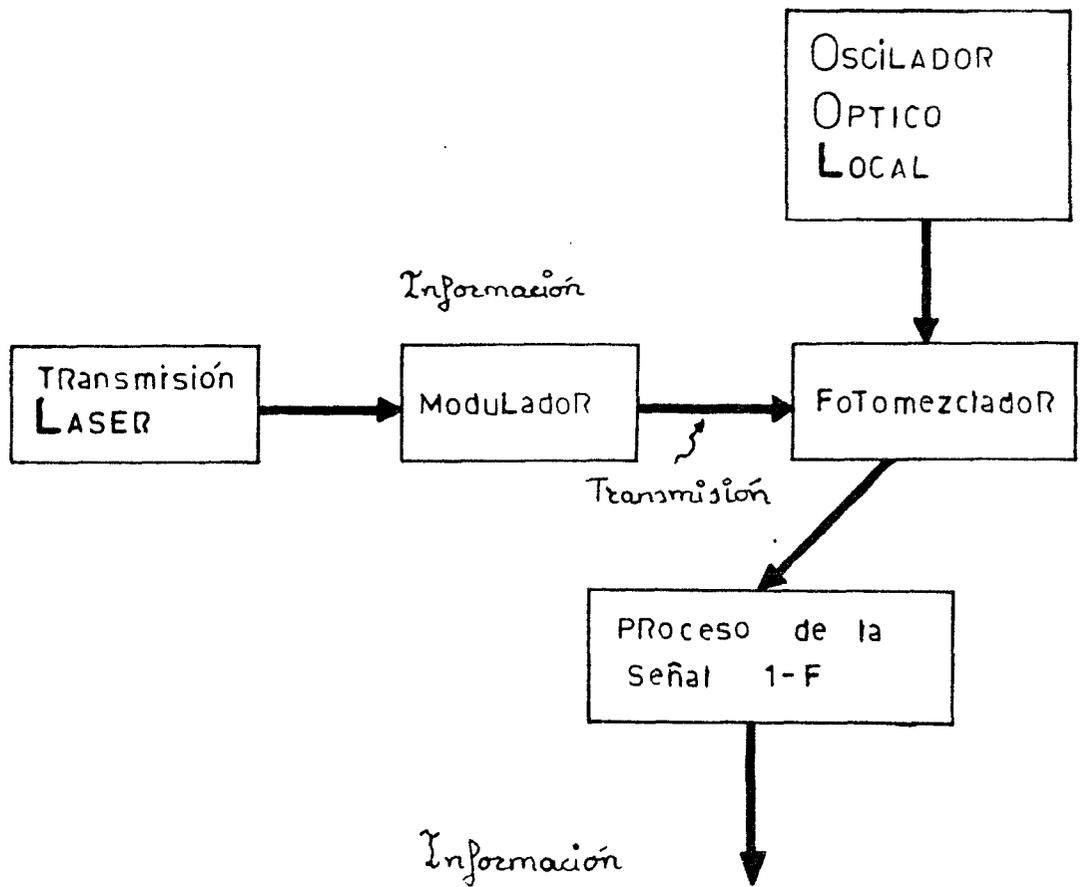
El desarrollo en todo el campo de los Lasers y en especial en las facetas que conciernen a los emisores y receptores hace que cualquier estudio sobre éstos pueda quedar rezagado rápidamente, a pesar de todo vamos a intentar clasificar los sistemas receptores más importantes en la actualidad y dejar para un desarrollo más amplio los tipos de emisor o Lasers propiamente dichos. Dentro de los sistemas receptores tenemos :

- Detección incoherente o directa.

El sistema completo estaría formado por el emisor Laser de amplitud modulada y transmitida directamente a un fotomultiplicador ( o algún otro tipo de fotodetector). Como la corriente en el fotomultiplicador es linealmente proporcional a la potencia de luz entrante, la corriente será modulada en frecuencia. La señal de salida del fotomultiplicador contiene la información deseada y puede ser recobrada por circuitos electrónicos convencionales.

- Detección coherente o heterodina.

Los detectores creados con esta filosofía son mejores que los anteriores y tienen una excelente detección de pico de señal además de una discriminación de señales indeseadas y ruido, combinando la ganancia de conversión con filtrado de frecuencias, por tanto el éxito de estos detectores fue un avance importante en las técnicas de comunicaciones ópticas. Básicamente el sistema sería :



Las principales condiciones las impone la mezcla, para que ésta sea óptima tenemos :

- Los anchos de las líneas de ambas señales (transmisor y oscilador local) deben ser pequeñas comparadas con la frecuencia que las separa.
- El fotodetector debe producir una salida significativa para esa frecuencia.

Como se puede ver estos receptores son básicamente los que constituían el estudio general que hicimos cuando hablamos de los sistemas de fibras ópticas y además coinciden en su filosofía con cualquier receptor de señales, recordemos la transmisión de señales MAP (modulación por amplitud de pulsos) por citar un ejemplo.

## 2.3.- tipos de Lasers

Como ya hemos insinuado en el capítulo anterior, las posibilidades de clasificación de los Lasers, no sólo se reducen a un estudio según las fuentes de excitación o bombeo, sino también al propio material que constituye el sustrato o incluso según sea el modelo de onda emitida. Para seguir un modelo más generalizado y poder construir una clasificación deductiva, vamos a adoptar una distribución según sea el material Laser y a partir de ahí bajar a delimitaciones más específicas.

Siguiendo esta asimilación los tipos de Lasers serían :

### 2.3.1.- Lasers Sólidos

Este tipo de Lasers es normalmente bombeado ópticamente y se compone de cristales, principalmente sólidos o iónicos. Lógicamente los cristales precisan una preparación, necesitan "construirse" para aprovechar mejor sus cualidades naturales. Los métodos de fabricación son :

- Método de Bridgman.

Este método se basa normalmente en la utilización de la técnica de dos zonas. La zona superior estaría a una temperatura mayor que la del punto de fusión del material y la inferior por debajo de ésta. Para la preparación del material se va pasando el cristal lentamente de la zona superior a la inferior.

- Método de haz de electrones.

Se pone el material en el vacío y se enfoca la parte

baja del núcleo para crear una zona fundida. Esta zona es obligada entonces a moverse a lo largo del corazón quedando así preparada para la emisión estimulada. Este método también se utiliza como ayuda para el postcalentamiento de otros métodos y reducir el gradiente térmico evitando las impurezas térmicas.

- Método de Czochzalski.

Este método se basa en la introducción de una sencilla semilla especial determinada en función del cristal. La semilla se va retirando a medida que el cristal va creciendo pero siempre dependiendo de los gradientes de temperatura y del material.

- Método de Verneuil.

Se deja caer el material en una llama de hidrógeno desde la cual crece el cristal.

- Soluciones de alta temperatura.

Se suelen utilizar cuando hay una transición por debajo del punto de fusión. Se basa en aplicar muy altas temperaturas al cristal para su formación.

El principal problema en la búsqueda de cristales de Laser reside en obtenerlos sin dispersión. Hay dos tipos de núcleos que podemos encontrar en los Lasers sólidos :

- Con planos normales para emitir ondas planas con estrecha extensión angular.
- Tipo cono-focal, denominado así por caracterizarse al tener o dar un foco en forma de cono. Este tipo de Lasers emite unos frentes de onda esféricos.

Ya hemos visto cuales son los distintos métodos más usuales de fabricación de los Lasers y como al fin y a la postre todos nos van a dar básicamente dos tipos de núcleos diferentes cubiertos con las superficies de abrigo pertinentes.

Normalmente el corazón, o núcleo, se abriga con un material totalmente reflectante en un extremo y en el otro con una superficie de un índice de transmisión del 1 al 10%.

Los materiales más utilizados para la constitución de los Lasers son, el ya citado rubí, el neodymium dopado, el fluoruro de calcio, el dysprosium dopado, ...etc.

Estos elementos son bombeados de alguna manera especial que depende del propio esquema de características del material y que normalmente coincide con algunas de las expuesta anteriormente aunque las fuentes usadas con mayor asiduidad sean los tubos de flash-Xenón, los arcos de Xenón porque aportan una mejor relación "emisión-absorción" entre la lámpara y el cristal, los arcos de Mercurio e incluso el Sol. Como se ve, y como ya habíamos adelantado, las fuentes de bombeo van a ser siempre, salvo raras excepciones, de tipo óptico.

La configuración fundamental que rodea al Laser sólido, en cuanto a la parte de la excitación y bombeo, va a venir marcada en dos direcciones según los modelos. Un primer tipo de configuración incluiría un tubo espiral flash rodeando el núcleo Laser, una segunda posibilidad acudiría a una cavidad óptica, cilíndrica o elíptica con el núcleo Laser en un foco y la fuente de radiación lineal en el otro.

Otra de las configuraciones usadas se basa en la utilización de un sistema de intersección de varios cilindros cono-focales.

La configuración elíptica, antes citada, por el hecho de utilizar tubos de flash desnudos suele necesitar bajas energías umbral, menores incluso que los tubos de espiral flash también usados, ya que la energía es enfocada eficientemente dentro del filamento del núcleo Laser. De todas maneras ambos sistemas son muy efectivos pues dan una alta potencia de salida y los anchos de haces son considerablemente estrechos.

El bombeo de los Lasers sólidos suele llevar el apoyo de inyección de especies ópticas activas, en relativa baja concentración. La estructura de funcionamiento de los Lasers de este tipo (sólidos) está apoyada en los sistemas de tres y cuatro niveles fundamentalmente.

Existen dos limitaciones, hoy en día casi superadas, en el desarrollo de estos Lasers, el calentamiento del material y la dispersión del Laser por el propio sustrato. Últimamente se está consiguiendo que la impedancia térmica del material limite las variaciones por calentamiento, y los abrigos, cada vez mejores, están aportando excelentes resultados en la erradicación de las dispersiones a través del elemento base del Laser.

Cuando con estos Lasers sólidos se pretenden conseguir grandes potencias de pico en pulsos de poca duración, se usa la cavidad óptica "Q". Los modelos de Lasers "Q-switched" forman junto con otros como los de onda continua

"CW",...etc, variaciones que como hemos dicho en muchas ocasiones sirven como modelo genérico de clasificación de los Lasers. Nosotros hemos adoptado un camino distinto, pero no por ello vamos a dejar de explicar estos importantes modelos de Lasers, y vamos a aprovechar, ya que en su mayoría se aplican a Lasers sólidos, para tratarlos ahora y que queden claros :

- CW (Onda continua).

Son de gran importancia. Aunque requieren un bajo umbral son muy selectivos en cuanto a las características termofísicas del cristal. Hay, aproximadamente, unos 30 cristales capaces de generar este tipo de modo y sus frecuencias Lasers van desde 0,4963 a 2,613  $\mu\text{m}$ . Son de especial interés para las comunicaciones, sobre todo los excitados por energía solar. Podemos distinguir dos variantes :

: CW "Smooth" (onda continua lisa)

Este sistema se fundamenta en la generación por parte del oscilador de una o más líneas espectrales extremadamente agudas, cada una con una potencia casi constante. Bajo condiciones en las que se presenten más de una frecuencia de oscilación, las interferencias pueden ser observadas.

: CW "Skiping" (onda continua a saltos)

Se caracteriza por una sucesión de pulsos agudos o "spikes" de microsegundos de duración, los cuales ocurren a intervalos más o menos casuales y con intensidades de pico variables, dependiendo de las condiciones más precisas bajo las cuales debe operar el oscilador.

Los intervalos entre los "spikes" variará en un rango de 3 a 10 veces la duración del propio "spike".

- "Smooth pulsed" (lisa pulsado)

Se refieren, simplemente a emisiones del oscilador sobre intervalos. En realidad no tienen mucha importancia, pero siempre es necesario incluir todas las posibilidades.

- "Spiking pulsed" (pulsado a saltos)

Son emisiones de tiempos limitados durante las cuales el tiempo de salida se asemeja bastante a los casos de onda continua.

- "Q- switched"

Se pueden definir como la figura que resulta comparando la energía almacenada y la energía perdida durante el periodo de oscilación.

Mc. Clung y Hellwarth trataron de generar un Laser usando una cavidad óptica controlada por el factor "Q" y descubrieron este nuevo tipo. Su modo de operación se basa en la acumulación de energía de excitaciones en el estado metaestable. Son muy importantes sobre todo en micromecánica, radar óptico, cirugía, fotografía de alta velocidad,...etc.

Su uso con el Laser de rubí puede generar pulsos de luz monocromática con una potencia de pico de  $10^9$  w. y una energía de 300 J. Esta característica, a pesar de ser de gran importancia por su utilidad, lo es porque representa una limitación, pues reduce la aplicación de este método a aquellos materiales Lasers capaces de almacenar una cantidad sustancial de energía, para poder guardar toda la que no va siendo radiada.

En este método la oscilación se ejecuta a propósito, por uno de los medios normalmente utilizado, y de los cuales ya hemos hablado, envolviendo la distorsión de los circuitos ópticos durante el periodo de bombeo. Tras haber mantenido al circuito con una configuración invertida de alto nivel de población, en el momento deseado se hace retornar al circuito al modo normal y resulta un pulso gigante, el cual saca fuera el exceso de inversión.

En general la principal desventaja que presentan los Lasers sólidos es su pobre eficiencia de luz de salida, comparada con la de entrada o bombeo (1%).

### 2.3.2.- Lasers gaseosos o en fase gaseosa

Los Lasers más utilizados para lograr una emisión estimulada son : He-Ne, Ne-O, Ar, Kr, Xenón, He o He-Xe y dióxido de carbono, aunque se ha operado con más de diez gases diferentes para obtener, por emisión estimulada, más de 100 longitudes de onda distintas. El primero de estos gases fue el He-Ne descubierto por Javon, Bennet y Herriot en 1960.

Este tipo de Lasers gaseosos es la pura encarnación de la teoría Laser, son los más fieles a los estudios teóricos. Esto se debe principalmente a la homogeneidad intrínseca del gas, que contrasta con sólidos o líquidos donde el circuito óptico está distorsionando la emisión, por variaciones en el índice de refracción.

Otra de las ventajas de los Lasers de gas es que producen espectros más estrechos y los haces espaciales son más

angostos, por lo que son muy utilizados en comunicaciones.

Con pocas excepciones todos los materiales que constituyen el medio para Lasers gaseosos están cortamente ionizados, es decir, la inversión se crea y mantiene por una de las muchas interacciones entre las partículas del gas. La gran excepción es el Laser de vapor Cs.

En la fase gaseosa donde los átomos o electrones están libres para moverse, pueden darse una gran cantidad de interacciones, ocurriendo excitaciones por colisiones del segundo tipo, excitaciones que ocurren a través de la directa interacción entre átomos de gas o moléculas y los electrones en el plasma, y por disociación molecular.

Por lo teórico de su funcionamiento, vamos a ver cuales son los principales métodos de bombeo de los Lasers de gas.

#### 2.3.2.1.- Bombeo por colisiones del segundo tipo

En una descarga eléctrica de gas, la excitación e ionización de los átomos del gas se producen por la colisión no elástica con electrones no energéticos. Otro importante proceso para la excitación de los átomos de un gas es la "colisión de segundo tipo". Aquí el sistema de electrones excitado del átomo es apagado, reducido al estado de menor energía, y con la diferencia energética aparece una excitación del sistema electrónico del átomo antes en "reposo".

Vamos a ilustrar el proceso porque es bastante importante. Supongamos dos tipos de átomos "A" y "B" en el plasma

ionizado, "A" posee una alta concentración y tiene en su configuración un metaestable, "B" no tiene nivel metaestable por lo que sería excitado fácilmente por una colisión del segundo tipo con los átomos "A" muy próximos. Si a este estímulo unimos las inversiones producidas por las interacciones de los electrones del plasma con "B", ya tendríamos interesantísimos niveles de inversión.

Con este tipo de bombeos se consiguen Lasers muy útiles en interfotometría, como herramienta de alineamiento óptico, en diagnósticos de plasma, ...etc.

#### 2.3.2.2.- Bombeo por disociación molecular

Existen dos tipos de estados para la molécula : estable e inestable, en cuyo caso tiende a disociarse es sus constituyentes. Esta disociación puede dirigir las partículas a un estado electrónico excitado.

Este proceso permite la inversión en algunas moléculas de gases como :  $O_2$  ,  $N_2$  ,  $SF_6$  , y  $CO_2$  . Los mecanismos por los cuales las moléculas se excitan para la disociación pueden ser muchos. En el caso del  $O_2$  su excitación se provoca por átomos de Ne o Ar metaestable y aparece cuando se da una descarga de éstos en una mezcla de  $O_2$  y gas noble.

Cuando el gas se recombina en moléculas los estados menores de energía de la partícula disociada presentan más baja concentración, lo que hace que al intentar llenarlos se produzca la emisión Laser.

### 2.3.2.3.- Bombeo por excitación directa del electrón

El aprovechar la colisión de un electrón con átomos de un gas en el plasma no es un medio muy eficaz para producir y mantener la inversión, aunque en ocasiones puede servir.

Normalmente se utilizan gases puros ( Ne, Ar, Kr, Xe) y a bajas presiones, para, con un alto potencial aplicado, poder conseguir inversiones apropiadas como ya demostrara Bridges y Bennet.

Hay Lasers de gas que emiten en régimen continuo, y otros en régimen pulsado, obtenidos de sistemas atómicos, moleculares o iónicos.

Los principales problemas de los Lasers gaseosos se presentan en los combinados de gases ya que los que entren en la mezcla pueden tener distintas necesidades de absorción, presión,...etc. Normalmente para sacar un mejor partido se recargan los gases con lo que se mantiene su eficiencia.

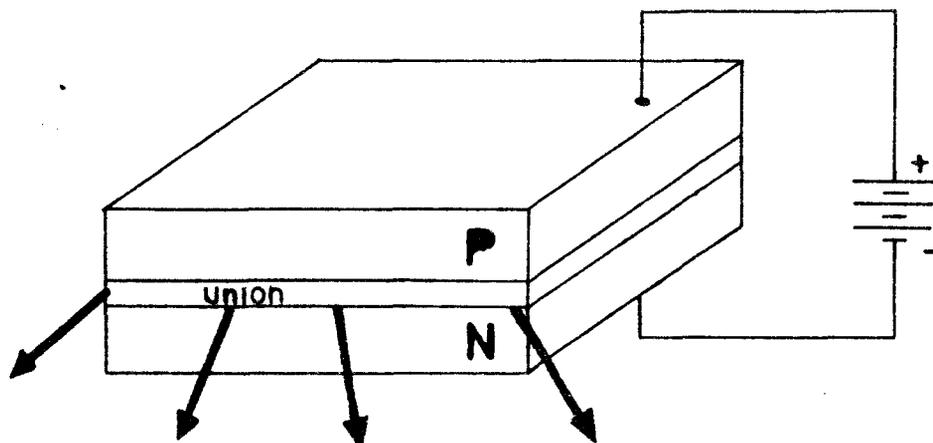
### 2.3.3.- Lasers de uniones semiconductores

Son quizá los más simples. Estan basados en una recombinación radiactiva de carga y fueron demostrados en 1962. Simplemente se necesita un diodo preparado ya que la inversión es creada y mantenida únicamente por la inyección de electrones o huecos en la región de deflexión separando las regiones fuertemente dopadas "p" y "n", es decir, por una corriente eléctrica.

La preparación de estos Lasers es similar a la de los

semiconductores, uniones "p-n" que todos conocemos.

El área de emisión es bastante pequeña, normalmente  $50 \times 10^3$  micras.



Desde que se demostró la acción de los Lasers por junta con "GaAs" por el grupo General Electric Hall ( Fenner, Kingsley, Soltys y Carlson), otros materiales semiconductores han sido preparados para producir efectos similares.

Aunque se pueden obtener oscilaciones Laser pulsadas a temperatura ambiente, la alta eficiencia y modos de operación de onda continua sólo han sido obtenidos a la temperatura de  $\approx 77^\circ\text{K}$

Las principales características o propiedades que aportan son la estrechez de sus líneas espectrales ( $1,2$  o  $5 \text{ \AA}$  ) aunque operando cuidadosamente se pueden mejorar, tienen una alta velocidad y gran facilidad de construcción además de no requerir bombeo auxiliar.

#### 2.3.4.- Lasers químicos

Las reacciones químicas pueden producir grandes poblaciones de átomos o moléculas excitados, por lo que pueden ser usadas para bombear Lasers. Son de considerable importancia sobre todo para los estudios de los propios fenómenos químicos, pues las distintas emisiones pueden definirnos las características de los compuestos. Los Lasers químicos se basan en la conveniente conversión o cambio de la energía de la propia reacción por la excitación específica y emisión Laser.

Para resumir toda esta clasificación que hemos visto vamos a elaborar un cuadro en el que aparezcan las características de los Lasers más importantes. Este cuadro se encuentra en el apéndice B figura 2 y es recomendable consultarlo para comprobar las diferencias y semejanzas que puedan existir entre ellos y para tener siempre en cuenta todos los posibles según el trabajo que vayamos a realizar.

## 2.4.- Aplicaciones

En cuanto a las aplicaciones de los Lasers hay que decir que sus posibilidades son incalculables y para demostrarlo quizá bastaría con decir que , en principio, se pueden acomodar, sin demasiado esfuerzo, 80 millones de canales de televisión en una región de longitud de onda visible del espectro..

Para los más escépticos vamos a exponer a continuación una serie de posibilidades reales de utilización de los Lasers :

- Como oscilador
- Como amplificador.

Estas aplicaciones van desde :

- Usos mecánicos o industriales, proyectando una gran cantidad de energía sobre un área muy reducida para iluminarla, derretirla, soldarla, perforarla, o para inducir específicas reacciones químicas.
- Para determinar el espectro de elementos, materiales y sustancias.
- Evitando la caída de satélites, mediante el envío de una proyección Laser sobre éste, siendo lo suficientemente fuerte como para colocarlo en una órbita mayor (como si fuera un dedo gigante).
- LIDAR ( Light detection and ranging). Básicamente se trata de obtener datos de las distintas dispersiones en diferentes capas de la atmósfera.
- Grandes avances en "scopios" y espectroscopios que permiten

estudios de las fuentes coherentes y transiciones de pico

- En el campo militar, no sólo se le utiliza como arma en si o como herramienta de trabajo para la fabricación de éstas, sino que además tienen una gran importancia en la determinación de blancos con extremada exactitud incluso de la distancia a la que se encuentra.
- Se utiliza incluso para la producción de vitamina "D".
- En estudios de bacterias y visualización de partes internas biológicamente inaccesibles hasta ahora.
- En la lucha contra el cáncer (micro-irradiación)
- En fotografía y microfotografía
- Para lograr precisión en grandes estructuras como turbinas y aceleradores.
- En el terreno de las comunicaciones es quizá donde más nos interese ver las ventajas que pueden aportar los Lasers.

Los haces de Lasers tienen la posibilidad de llevar tremendas cantidades de información simultáneamente, y es aquí donde vuelven a entrar las fibras ópticas, pero sigamos. La capacidad de los canales de comunicación muchas veces está definida y determinada por el ancho de banda o rango de frecuencias en la que se puede imponer. Los Lasers tienen capacidad de transporte de frecuencias de  $10^{14}$  c/sg. Con esto se puede conseguir transmitir más de 12.000 voces simultáneamente, siempre que las frecuencias de transmisión y recepción estén en haces separados, pero se puede mejorar la eficiencia llegando a conseguir que transporte más de  $8 \times 10^8$  canales de voz.

Este sistema lógicamente tiene limitaciones. Si se utiliza directamente, sin canal físico, la atmósfera puede producir severas malformaciones y deterioros de la información. La fabricación de un modulador de banda tan extremadamente ancha también puede presentar problemas, al igual que la detección.

Las comunicaciones por Laser sin medio físico, sin utilizar las fibras ópticas como canal, únicamente tienen su campo en el espacio, donde bajo esas condiciones especiales, sin atmósfera, la hacen especialmente atractivas para comunicaciones entre satélites. Incluso la NASA ya en 1967 trabajaba en proyectos de transmisión de información del rango de la voz humana a 30.000 km de distancia por Laser potenciados con células solares y preparan trabajos para conseguir un mínimo de 100 millones de Kilómetros.

Hay que mencionar dentro de las comunicaciones, la técnica del multiplexado, ya que permite la transmisión simultánea de muchos mensajes de un modo muy económico.

No solamente las comunicaciones de mensajes de voz o visuales, sino también los datos digitales son utilizados con Lasers. Es muy sencillo definir los estados por luz (1) o no luz (0). Este método óptico aporta una gran velocidad de entrada-salida, sobre todo para uso en computadoras, además de un gran almacenaje.

Aprovechando el alto brillo de los diodos Lasers también se pueden utilizar éstos para construir "displays" de alta eficiencia y pequeño tamaño. Una matriz de diodos Lasers puede ser utilizada en muchos campos y activada de muchas maneras.

No sólo se pueden crear matrices para "displays", sino que aprovechando la deflección de los haces se puede llegar incluso a  $10^{10}$  posiciones diferentes.

En general la inclusión de los Lasers en el campo de las comunicaciones a permitido :

- Aumentar el número de "bits", al tener mayor número de frecuencias.
- Carencia de acumulación de cargas de efectos inductivos y capacitivos generales.
- Alta capacidad de almacenamiento inherente a la gran resolución de sistemas ópticos.
- El enlace directo que permite compatibilidades visuales con la operación.
- Transmisión de muchísimos canales de audio o UHF.

El uso de los Lasers en el mundo de las computadoras viene marcado por la necesidad de una transferencia externa de datos (computadora-memoria-otro ordenador), y por la transferencia interna de información usando, claro está, fibras de cristal.

Aunque ya hemos hablado de ello no está de más exponer ejemplos como el seguido en la ciudad de Atlanta, Georgia, donde en 1978 se comenzó una red de fibras ópticas de 0,5 pulgadas de diámetro y con tecnología Laser siendo capaz hoy de soportar más de 5000 llamadas telefónicas.

Actualmente se están consiguiendo niveles de ruido inferiores a 1 dB/ km y pronto se alcanzarán los 0,1 dB/ km.

Los Lasers también están alcanzando altas cotas de calidad en facetas como la de la grabación y lectura de siste-

mas visuales y sonoros. Los video-discos, grabados y leídos a través de un haz de Laser están inundando el mercado en los Estados Unidos y revolucionan el mundo de las artes gráficas, periódicos, fotografías,...etc. Ya no existen los ruidos ni las interferencias o imperfecciones, la vida de los discos y los aparatos es ilimitada.

El pasado, presente y futuro de los Lasers está marcado por la efectividad, resolución, rapidez, calidad y un sin fin de adjetivos que pueden parecer pretenciosos pero que reflejan la realidad de esta nueva fuente.

En 1970 sólo en los Estados Unidos los estudios y trabajos destinados al Laser pasaron en costo el billón de dólares. Ya en 1967 se había conseguido que la descarga de un Laser actuara sobre un transformador que puede así operar sin electrodos ni pérdidas de potencia, sin limitaciones de corriente.

Los avances en medicina y comunicaciones están demostrando que los esfuerzos no son inútiles y las metas a copar son cada día más importantes. En la actualidad se busca lo que en un futuro no muy lejano serán importantísimos logros. Los Lasers regulables aportarán al hombre un dominio total sobre la emisión, controlando incluso la frecuencia, que ya no dependerá de las características del material y su utilización, sino de los resultados que queramos obtener.

El gran "boom" de los Lasers se dará con la obtención de los Lasers de emisión no estimulada, es decir de Lasers que no precisen corriente eléctrica, ni ningún otro tipo de bombeo para la emisión.

En definitiva el mundo cada vez se hace más pequeño, se nos queda más chico, pero no debemos preocuparnos, más bien al contrario, pues los avances en temas tan importantes como el de los Lasers y fibras ópticas, que aquí hemos tratado de explicar, y en general en toda la tecnología, nos permiten acceder y conseguir la llave del Universo, la energía.

## BIBLIOGRAFIA

En este apartado normalmente se hace una referencia a todos los libros y artículos que han servido para desarrollar el trabajo. Nosotros hemos pensado que tendría una mayor utilidad el especificar además de los datos correspondientes al texto, una breve sinopsis de lo más interesante de su contenido y en este sentido en que aspectos nos ha sido de auténtica validez.

Teniendo en cuenta esto vamos a comenzar por los más interesantes desde el punto de vista técnico y a continuación expondremos los que sirviendo también para la consecución de la información que compone el trabajo presentan un menor interés.

- "Beam and Fiber Optics" de Jacques A. Arnaud (New York Academic Press). 1976.

Interesantísimo tratado sobre fibras ópticas hace especial incapié en los tipos de fibras y materiales para la fabricación de las mismas. También aporta una visión interesante sobre las pérdidas por ensanchamiento de pulsos.

- "Fiber Optics" de Lisitsa, Berezhinskii y volaKh (Israel Program for Scientific Translation, New York)

Quizá sea este libro el que más haya influido en la redacción del trabajo. Aunque algo profundo en su entendimiento y además de descuidar partes tan importantes como las pérdidas y los tipos de fibras ópticas, de él se extrajeron los principios fundamentales de fibras ópticas.

- "Fiber Optics" de Waldo T. Boyd ( Howard W. Sams and Co., Inc., Indiana ). 1982.

Un libro mucho más básico que los anteriores va encaminado más al desarrollo de proyectos prácticos que a una explicación coherente sobre fibras ópticas, sin embargo sus gráficos esquemáticos y algunas de sus explicaciones sencillas aclaran algunas ideas.

- " Integrated Optics" de T. Tamir (Springer-Verlog , New York )

Libro básico en la consecución de información sobre los tipos de conexiones posibles para la combinación fuente-integrado-fibra, aporta además algunas ideas sobre moduladores y switches.

- "Integrated Optics" de Dietrich Marcuse (IEEE Press, New York).

Este libro define con gran pureza científica los modelos de fabricación de integrados ópticos así como los tipos de pérdidas y conceptos básicos de funcionamiento.

- "Optical Communication Theory" de R.O. Harger (Dowden, Hutchinson and Ross, Halsted Press, New York). 1977.

Este tratado es de gran utilidad en lo que respecta a todo lo concerniente a la recepción. Se podría decir que fue la base del apartado dedicado a los receptores.

- "Orbit optimization and Laser application" creado y editado por North Atlantic Treaty Organization, Advisory Group for Aerospace Research and Development".

Libro muy completo que ha aportado algo a todos los

apartados dentro de los Lasers, desde los conceptos teóricos hasta los receptores Lasers pasando por los subtipos y tipos de "pump".

- "Crystal: physics and properties" de Aleksandr Aleksandrovich Kaminskii (Springer-Verlog, New York).1979.

Importante fuente para conocer la filosofía de funcionamiento del Laser y algunas de las características de la emisión estimulada.

- "Masers and Lasers, How they work, what they do" de Manfred Brotherton. (Mc Graw-Hill, New York)

Importante en cuanto a su aportación al conocimiento de los primeros Lasers de rubí y a su funcionamiento.

- "Lasers systems and applications" de Herbert A. Elion (Pergamon Press, New York)

Tiene interesantes explicaciones de las posibles aplicaciones destinadas a los Lasers y una clasificación de éstos que hemos tenido que cumplimentar pero manteniendo parte de su estructura.

- "Industrial Applications of Lasers" de John F. Ready (Academic Press, New York)

Como su título indica una disertación sobre las aplicaciones de los Lasers.

- "Electron beam and Laser beam Technology" de L. Marton y A.B. El-Kareh (Academic Press, New York)

Libro éste que por lo complicado de sus argumentos apenas nos sirvió para el desarrollo del trabajo a no ser por la parte dedicada al Laser de rubí y a las aplicaciones.

- "Fiber optics in communications systems" de Glenn R. Elion  
(M. Dekker, New York). 1978.
- "Optoelectronics division. Applications." de la Hewlett-Packard Company (Mc. Graw-Hill, New York). 1981.
- "Fiber optics, principles and applications" de N.S. Kapany  
(Academic Press, New York)
- "Optical fibers for transmission" de John E. Midwinter  
(Wiley, New York). 1979.
- "Optical fiber telecommunications" de Steward E. Miller y Alan G. Chynoweth (Academic Press, New York). 1979.
- "Optical fiber technology" de Detlef Gloge (IEEE Press, New York)
- "Optical communication" de Robert M. Gagliardi (Wiley, New York)
- "Handbook of fiber optic communication" de Helmut F. Wolf  
(Garland Publications, New York). 1979.
- "Laser receivers, devices, techniques, systems" de Ross Marte (Wiley, New York)
- "Lasers and their applications" de M.J. Beesley (Barnes and Noble, New York)
- "Optical Masers" de George Birnbaum (Academic Press, New York). 1964.
- "Applications of the Lasers" de Leon Goldman (CRC Press, New York, Cleveland). 1973
- "The Laser" de William Vick Smith (Mc. Graw-Hill, New York)
- "Optical fibre communications: devices, circuits and systems" de M.J. Howes y D.V. Morgan (Wiley, New York)

**APENDICE A**

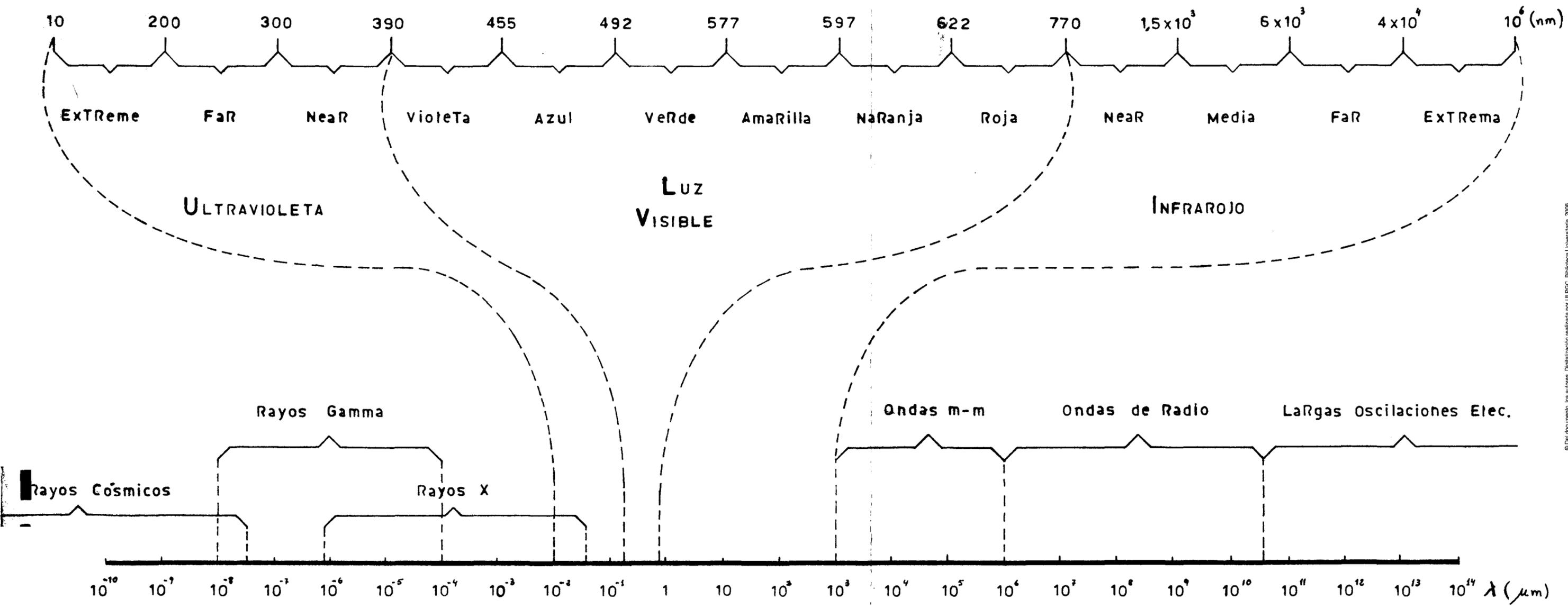


fig 1

# Fuentes de Radiación Universal

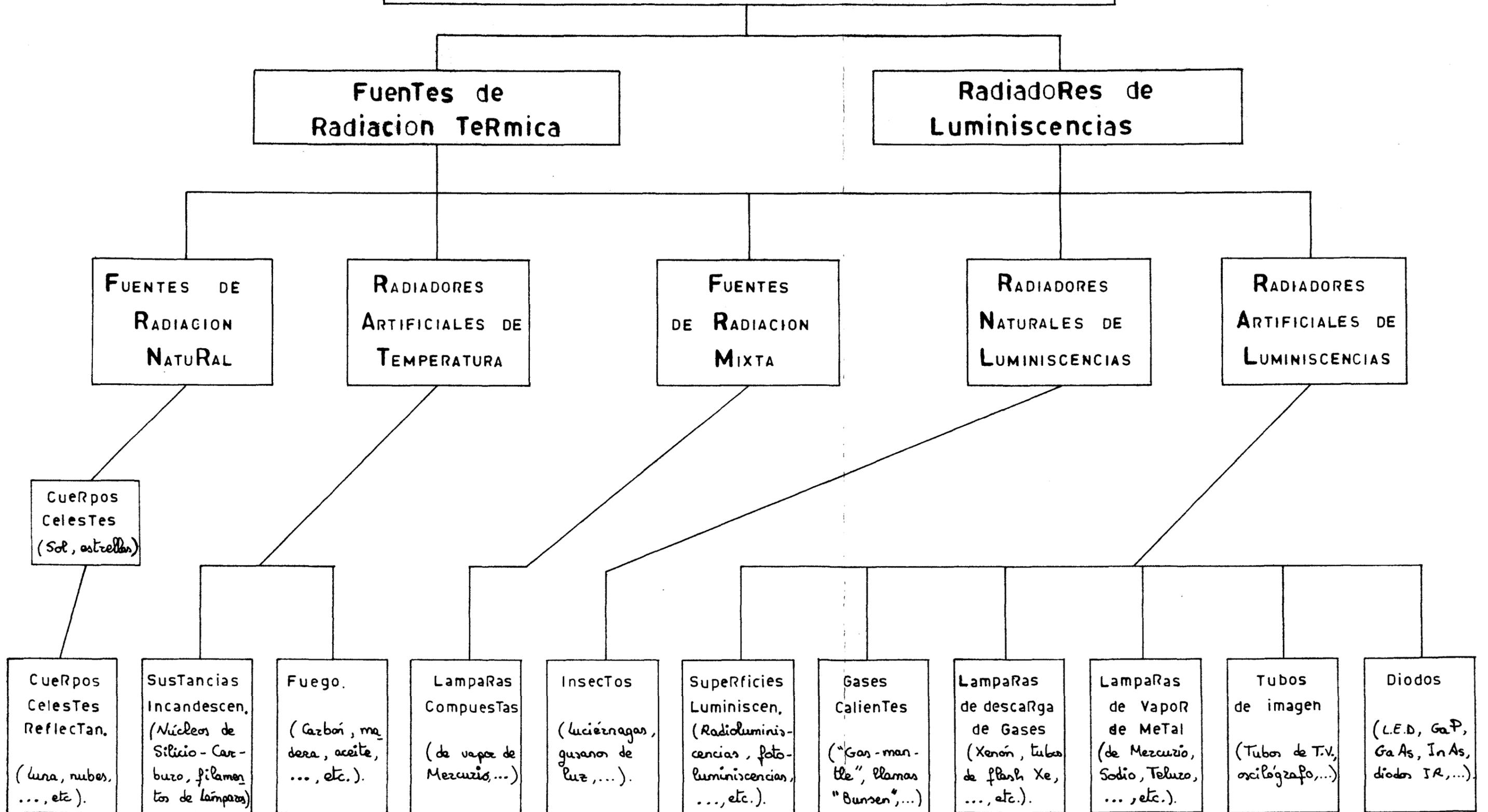


fig 2 :

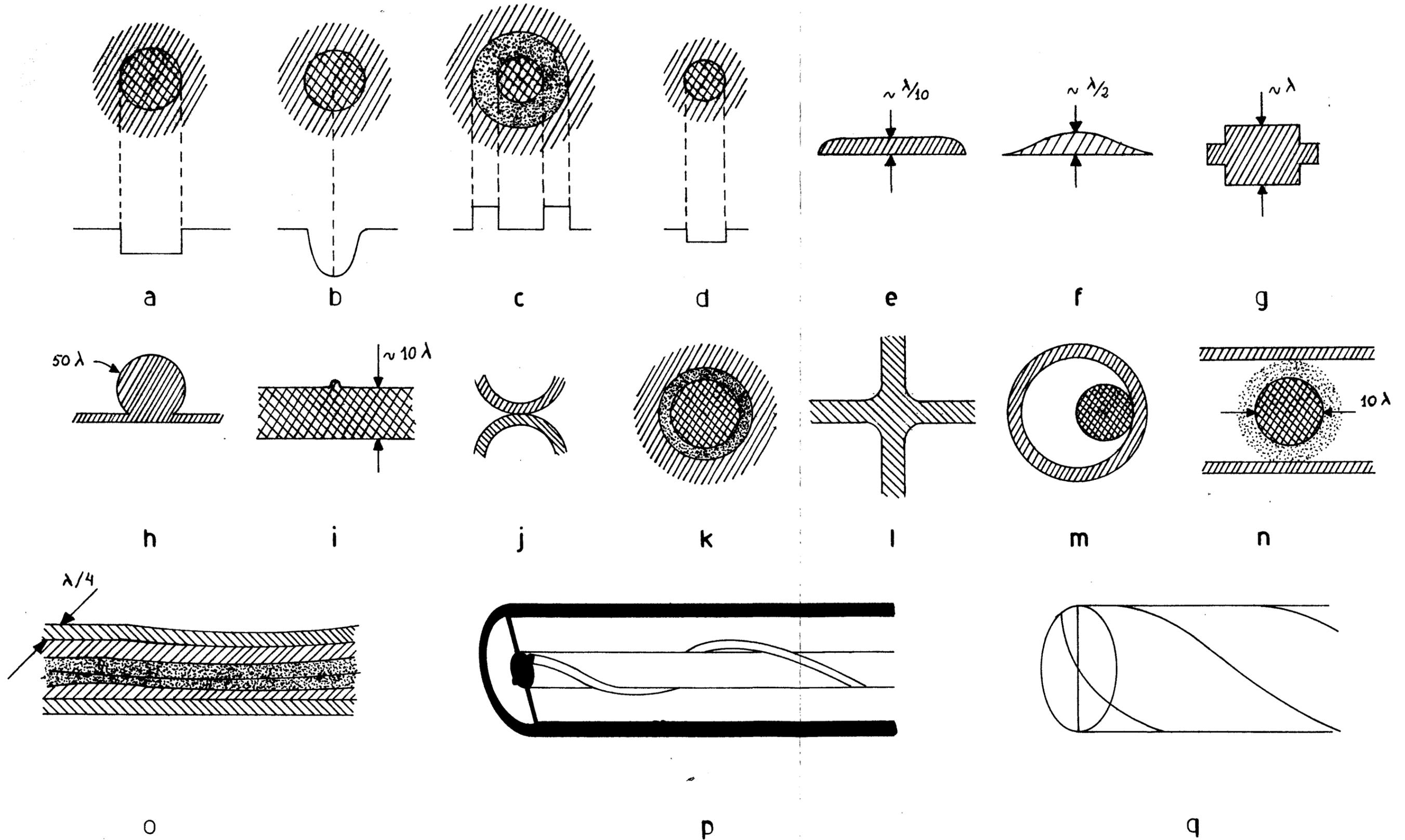
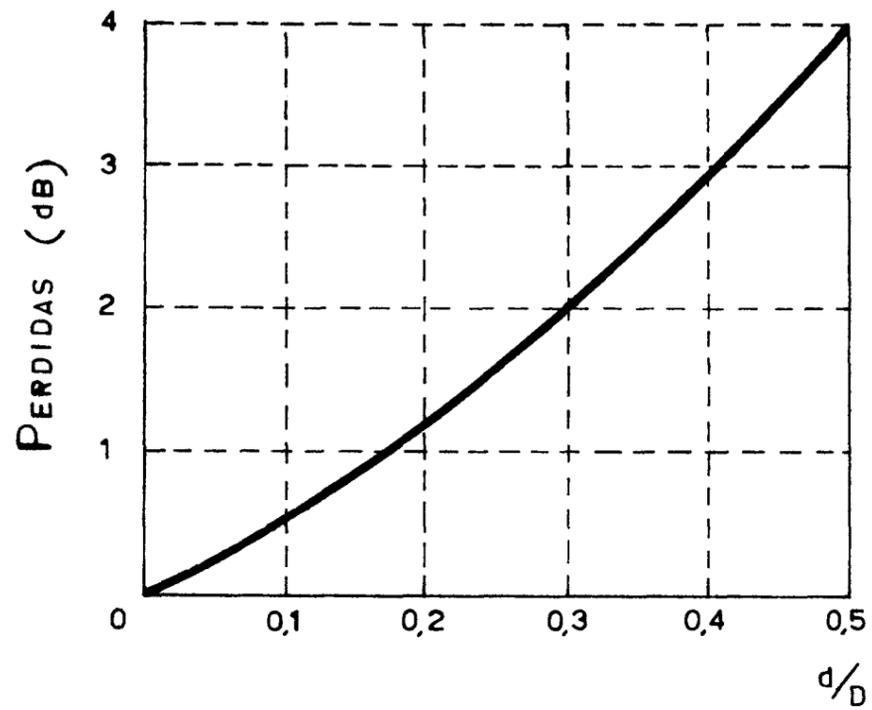
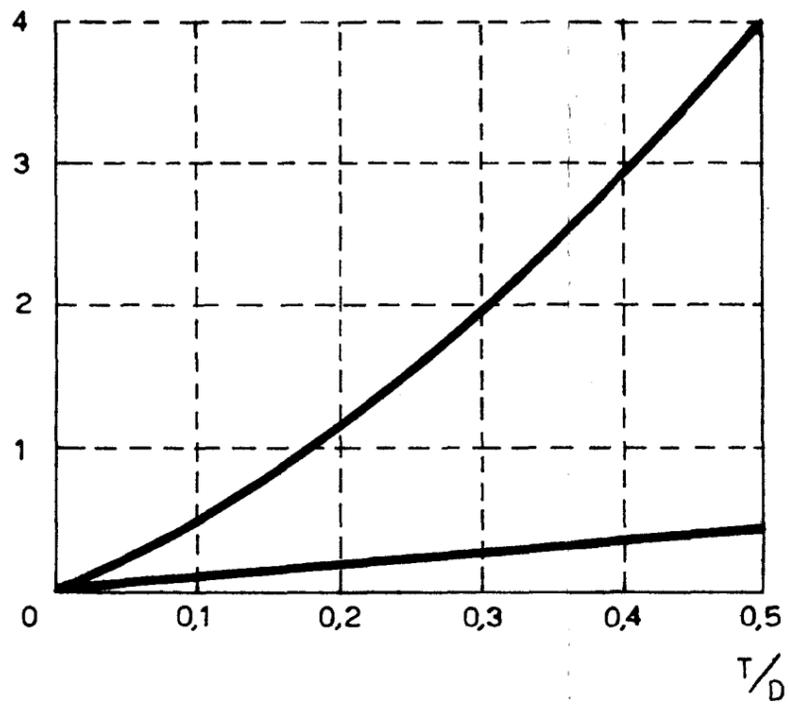


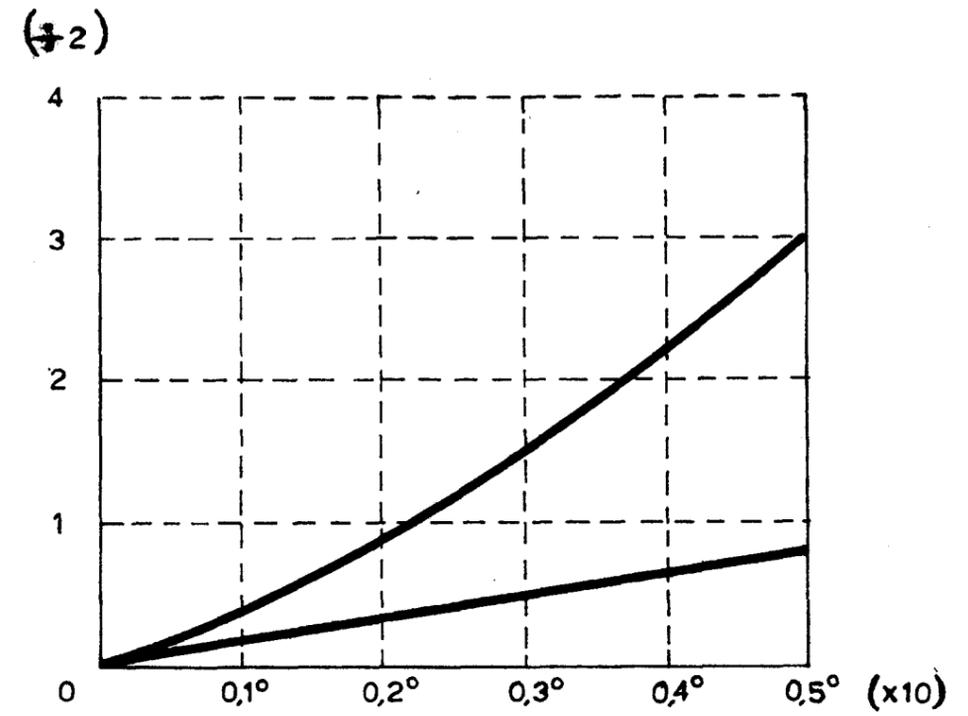
fig 3



Desplazamiento Axial



Separación entre los Extremos



Desplazamiento Angular

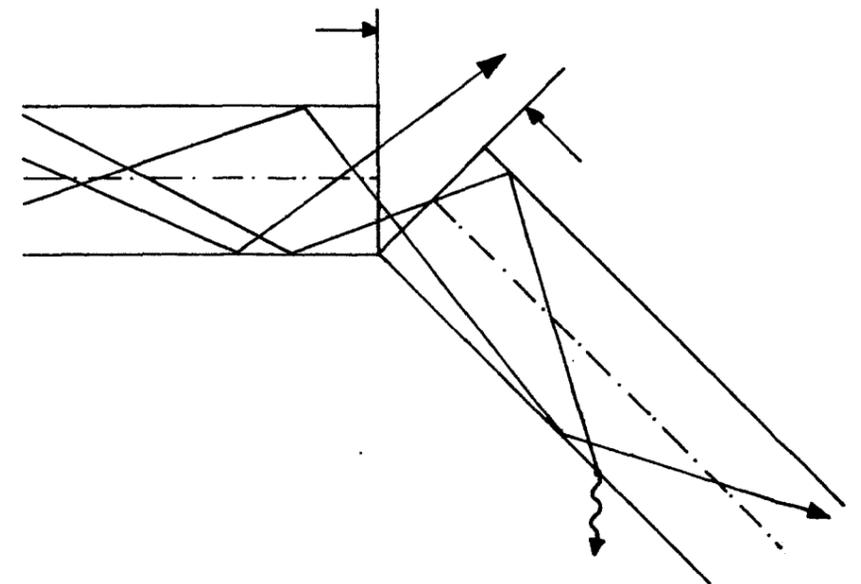
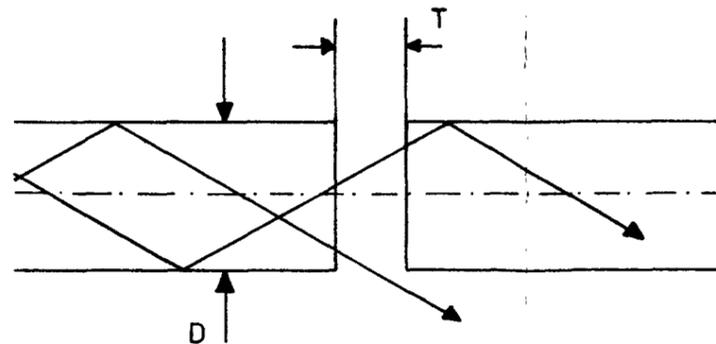
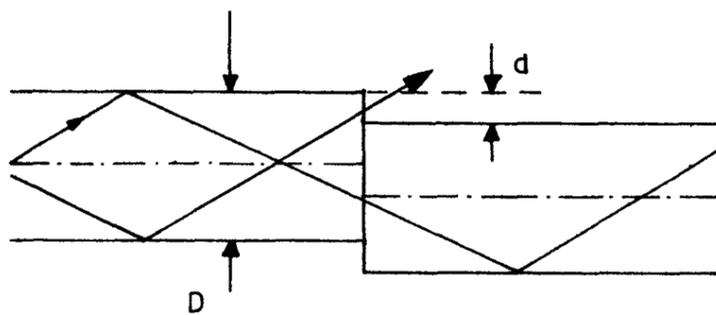


fig 4

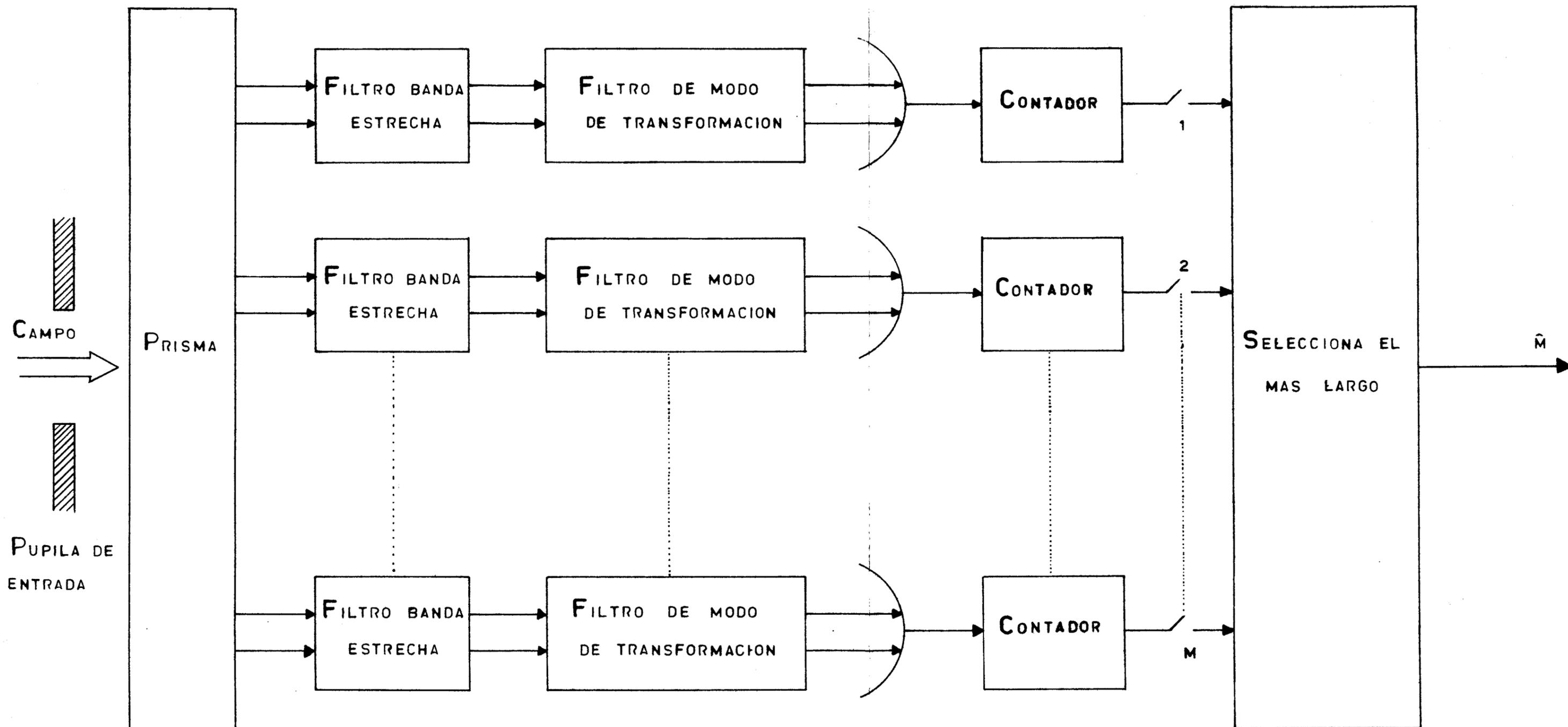


fig 5

# Receptor Básico

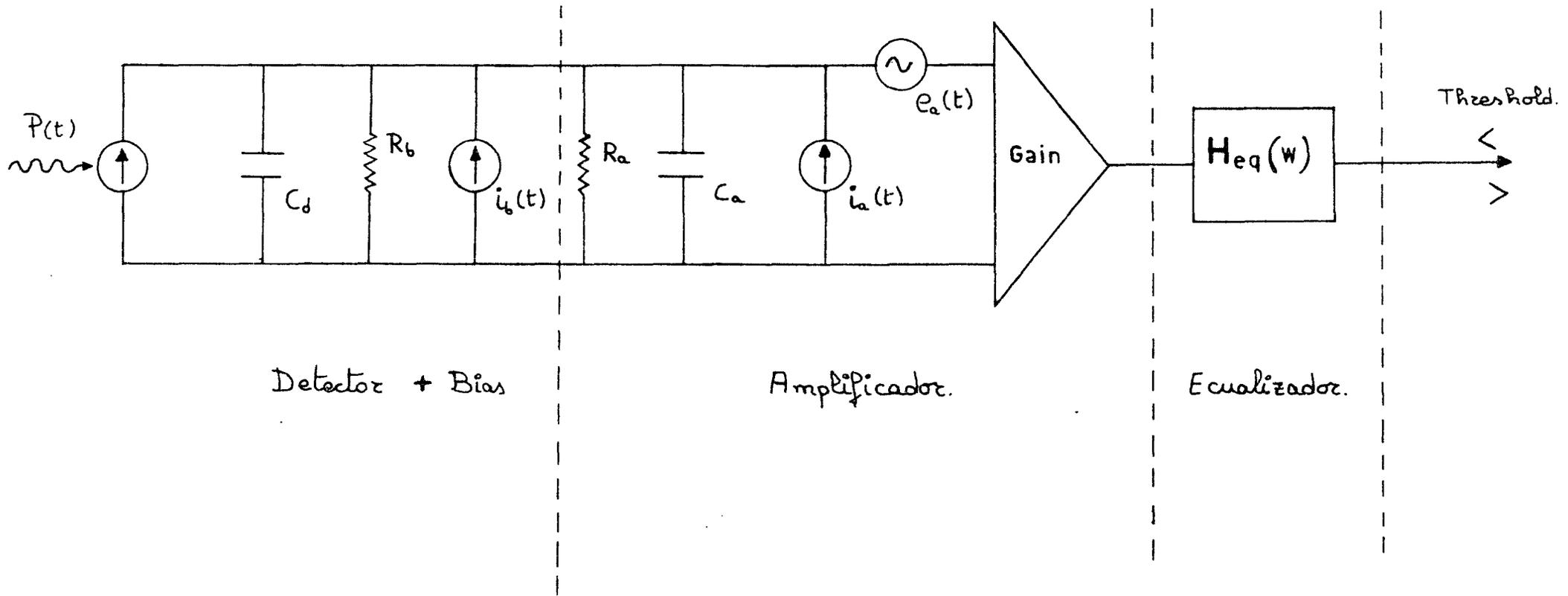


fig 6

**APENDICE B**

## Esquemas de Excitación

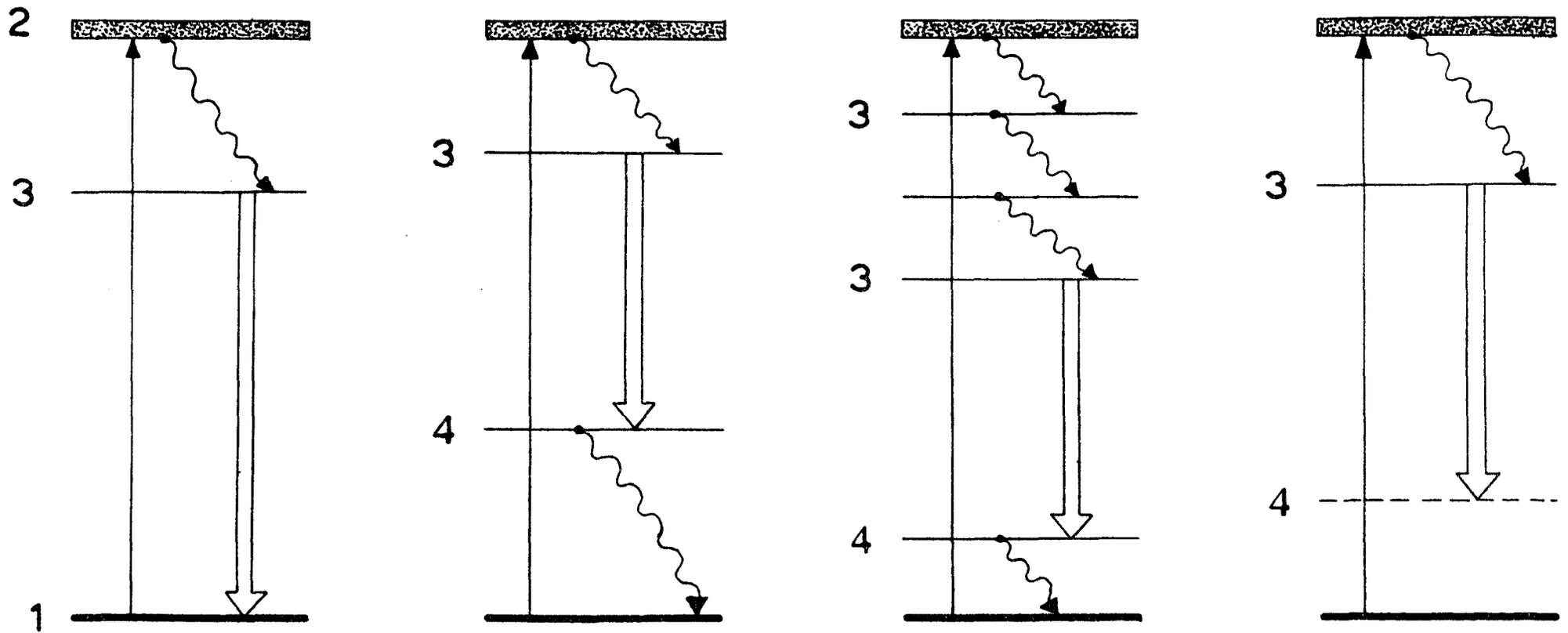


fig 1

TIPOS	MeTodo de ExiTacion	MODO TIME-WISE	PoTencia SaLida	Radiacion	Eficiencia	Ancho EspectRal	EJEMPLOS
GASES	DESCARGA ELECTRICA PUMPING OPTICO	C.W. SMOOTH	$< 1$	$\approx 5 \times 10^5$	$10^{-5}$	1 Kc	HE-NE $0.63 \mu$
		PULSED SMOOTH	$\approx 10^{-2}$	?	$10^{-4}$	?	A <sup>T</sup> $0.47 \mu$
		C.W. SMOOTH	$\approx 10^{-6}$	?	$10^{-9}$	?	CS $3.1 \mu$
SOLIDOS Y LIQUIDOS	PUMPING OPTICO	PULSED SPIKING	$> 10^9$	$\approx 10^{13}$	$5 \times 10^{-4}$	1 Gc	RUBI, Q-SWITCH
		C.W. SPIKING	$\approx 1$	$\approx 3 \times 10^5$	$10^{-4}$	1 Gc	RUBI, $80^\circ K$
SEMI-CONDUCTOR	ELECTRICO	C.W. SMOOTH	3	$10^8$	46 %	$10^3$ Gc	GAA <sub>s</sub> $20^\circ K$
		PULSED SMOOTH	$\approx 10^2$	?	?	?	GAA <sub>s</sub> $20^\circ K$

fig 2