

## INDICE

|                                |               |
|--------------------------------|---------------|
| <b>Capítulo I</b>              | <b>Página</b> |
| <b>Introducción</b>            | <b>2</b>      |
| <b>Capítulo II</b>             | <b>Página</b> |
| <b>Fibras Ópticas</b>          | <b>6</b>      |
| <b>Capítulo III</b>            | <b>Página</b> |
| <b>Fuentes Luminosas</b>       | <b>13</b>     |
| <b>Capítulo IV</b>             | <b>Página</b> |
| <b>Detectores y Receptores</b> | <b>16</b>     |
|                                | <b>Página</b> |
| <b>Conclusiones</b>            | <b>20</b>     |
|                                | <b>Página</b> |
| <b>Ilustraciones</b>           | <b>21</b>     |
|                                | <b>Página</b> |
| <b>Bibliografía Consultada</b> | <b>25</b>     |

### Capítulo I

#### **Introducción**

#### **Fibras Ópticas: Introducción a**

#### **los Sistemas de Comunicaciones Ópticas**

Frente al limitado espectro de frecuencias de las microondas y a la susceptibilidad al debilitamiento que representa el medio radio, la fibra óptica, o la tecnología óptica, se convierte rápidamente en el método preferido para la transmisión digital. Las fibras ópticas superan las desventajas de las microondas. No resulta caro fabricarlas, presentan un gran ancho de banda, no son susceptibles ni a las interferencias ni al debilitamiento y las comunicaciones pueden conducirse sobre un sistema de fibra óptica con la casi completa garantía de seguridad.

El cable de fibra óptica supone también un apropiado sustituto a los cables de pares debido a su mayor capacidad y su más pequeño diámetro. El diámetro es una característica importante cuando las vías de comunicación resultan congestionadas y deben ser aumentadas para contener mas cables portadores. Sustituyendo un único cable de cobre por fibra óptica se puede, generalmente obtener la suficiente capacidad para prevenir los incrementos de vías de comunicación en el futuro. Quizás la principal desventaja sea mantener la fibra libre de daños. Al igual que los cables de cobre, las fibras ópticas pueden deteriorarse por las excavaciones, corrimientos de tierras, etc.

Conceptualmente, y en determinados aspectos, un sistema por fibra óptica es similar a un sistema de microondas. Las principales excepciones son: el medio de transmisión para las ondas luminosas, es una

pequeña guía-onda de vidrio, el lugar del espacio libre, y que la transmisión tiene lugar a frecuencias ópticas, que tienen una longitud de onda más corta que las microondas. Mientras que a las microondas se las designa generalmente por su banda de frecuencias, a las ondas luminosas se las referencia por su longitud de onda, que está relacionada con la frecuencia mediante la expresión:

Donde  $\lambda$  es la longitud de onda,  $c$  indica la velocidad de la luz y  $f$  representa la frecuencia.

A las frecuencias de la luz, la longitud de onda es tan corta que la unidad utilizada es el nanómetro (nm). En el estado actual de la tecnología, el espectro de comunicaciones ópticas útil se extiende, aproximadamente, desde los 800nm hasta los 1600nm.

### **Tecnología**

La comunicación óptica es una idea que ha estado rondando durante mas de un siglo, pero sólo se hizo factible en los últimos años. Alexander Graham Bell, en la primera aplicación óptica conocida, obtuvo una patente para su **fotófono** en el año 1880. El fotófono era un equipo que modulaba un rayo de luz enfocado procedente del sol, y radiado al espacio libre hacia un receptor próximo. El sistema funcionó bien, pero la radiación de la luz en el espacio libre presenta varias dificultades que podrían no haber sido vencidas con los equipos disponibles en aquel tiempo. Como muchas otras ideas, ésta se situó por encima de su tiempo. La comunicación luminosa en el espacio libre es ahora factible si la aplicación puede tolerar perturbaciones ocasionales causadas por la niebla, el polvo, turbulencias y cualquier otro elemento perturbador.

Dos desarrollos en el campo de las comunicaciones ópticas pasaron desde la teoría a la práctica. El primero de ellos tuvo lugar en 1960 con la invención del **rayo laser**. Un laser produce un inmenso haz de luz casi coherente, es decir, sus rayos viajan por caminos paralelos. El segundo acontecimiento que impulsó las comunicaciones ópticas fue el desarrollo de fibra de vidrio, de tal pureza que solamente es atenuada una pequeña porción de la señal luminosa emitida. Con una fuente laser disparada a alta velocidad, los cero y los unos de una comunicación digital pueden transmitirse hacia un detector, que generalmente se trata de un **fotodiodo de avalan (APD)** o de un **diodo PIN**. El detector convierte los impulsos de luz recibidos en pulsos eléctricos, y los acopla al equipo receptor. Dependiendo de las pérdidas en la fibra y de la ganancia del sistema, se determinará el espaciamiento apropiado entre repetidores o regeneradores de señal. La ganancia de un sistema por fibra óptica es un concepto similar al de la ganancia en un sistema de microondas.

Como en cualquier sistema de comunicaciones, en las de comunicaciones ópticas existen canales de reserva que asumen la carga de tráfico cuando el canal en servicio falla. Tanto el cable, como el equipo terminal y los repetidores se encuentran simultáneamente relacionados con el canal de reserva, para mantener en todo momento y en cualquier circunstancia la supervivencia de las comunicaciones.

Las ventajas de las comunicaciones ópticas tomaron incremento gracias a la protección que ofrece la fibra como medio de transmisión. Estas pequeñas guías de ondas aíslan la señal digital de características típicas del espacio libre: el debilitamiento de la señal o **fading** y las interferencias. La fibra óptica atenúa la señal luminosa, aunque, y a diferencia de las microondas, las pérdidas en el medio de transmisión no son lineales a lo largo del espectro. Así una fibra óptica típica presenta tres ventanas de transmisión situadas en 800–900nm, 1200–1300nm y 1500–1600nm.

Los primeros sistemas por fibra óptica se implantaron a 850nm, ya que los lasers apropiados y disponibles comercialmente trabajaban en esa longitud de onda. A medida que se fue disponiendo de lasers de 1300nm, las aplicaciones se desplazaron hacia esa longitud de onda, debido a las pérdidas más bajas que presentaban pérdidas ligeramente inferiores en la tercera ventana, alrededor de los 1550nm. El primer sistema comercial de fibra óptica instalado en 1977, operó a 45Mbps (45.000.000 bits por segundo) con repetidores separados a intervalos de 6,4Km. Los actuales sistemas trabajan con velocidades superiores a los 560Mbps y actualmente compañías como Lucent Technologies están desarrollando sistemas que operan a velocidades superiores a los

2Gbps (2.000 Mbps). A estas velocidades, un par de fibra, una para transmisión y otra para recepción, pueden alojar alrededor 30.000 canales de voz. A 560 Mbps los repetidores pueden ser separados hasta 50Km y transportar mas de 8000 canales de voz.

### ***Elementos básicos constitutivos de un sistema de fibra óptica***

Los sistemas de fibra óptica están diseñados con fibras separadas para la transmisión (**TX**) y la recepción (**RX**), cuyos extremos se encuentran terminados en un transmisor y un receptor de luz. El transmisor puede emplear o un diodo emisor de luz (**LED=Ligth Emisor Diode**) o un laser como elemento de salida. A estos elementos se les denomina convertidores electro-ópticos (**E/O**), encargados de convertir la señal eléctrica en óptica. Los lasers presentan una mayor ganancia del sistema que los diodos LED debido a su mayor potencia de salida y a un mejor acoplamiento de la señal luminosa dentro de la fibra. La principal ventaja del diodo LED es su bajo costo.

En aplicaciones donde la ganancia del sistema no es un factor importante, el ahorro en el costo puede ser un factor determinante en la elección de los diodos LED como transmisores.

El cable de fibra óptica se acopla al transmisor a través de un conector de precisión. La mayor parte de los sistemas por fibra óptica utilizan modulación digital, la modulación analógica se logra variando la intensidad de la señal luminosa, o modulando el ancho del impulso. La modulación analógica es apropiada para la transmisión de una señal de video y se utiliza en los sistemas de televisión por cable.

El receptor consiste en un diodo PIN o un APD, que se acopla a la fibra óptica. El diodo convierte los impulsos de luz en impulsos eléctricos, denominándoseles convertidor opto-eléctrico (**O/E**)

Como la señal óptica se propaga a través de la fibra óptica, se ve degradada por la atenuación y la restricción de anchura de banda de la fibra. Por esta razón, es necesario regenerar la señal transmitida. La forma más apropiada de realizar esta tarea es tratando la señal en forma eléctrica. DE aquí que los convertidores O/E y E/O sean componentes indispensables en un repetidor óptico. El amplificador e igualador de la señal eléctrica son similares en los sistemas de transmisión convencionales.

Los sistemas por fibra óptica aceptan a su entrada señales digitales normalizadas, pero cada fabricante desarrolla su propia velocidad de la señal de salida. Los bits de protección contra errores y de los códigos de línea se insertan para mantener la sincronización y supervisar la probabilidad de errores **VER (Bit Error Rate)**, de tal forma que se determine el momento adecuado para utilizar el canal de reserva. Debido a las diferencias en las señales en línea, los sistemas correspondientes a distintos fabricantes no suelen ser compatibles entre sí.

### ***Análisis de oportunidad de un sistema de fibra óptica***

La oportunidad en la utilización de un sistema de fibra óptica viene representada por las principales ventajas que se obtienen con el uso de la fibra óptica.

- **Menores pérdidas de potencia**, gracias a esta propiedad se logran mayores distancias de repetición (eventualmente puede no ser necesario incorporar repetidores), reduciendo así los costos del sistema, de su mantenimiento y aumentando la fiabilidad del mismo.
- **Inmunidad al ruido**, gracias a que la fibra óptica es totalmente dieléctrica, es inmune a las interferencias de radiofrecuencia. Asimismo no genera interferencias ni genera diafonía en otros equipos de comunicación y por lo tanto no son necesarios apantallamientos especiales.
- **Dimensiones reducidas y bajo peso**, este aspecto, junto a la gran flexibilidad hace que la instalación de los cables ópticos sea comparativamente sencilla.
- **Seguridad**, es prácticamente imposible interceptar la señal que viaja por una fibra sin ser detectada.

- **Aislamiento eléctrico**, al ser dieléctrica la fibra asegura el aislamiento eléctrico entre emisor y receptor, evitando así las puestas a tierra.
- **Gran ancho de banda**, esto permite la transmisión de mucha información simultáneamente, reduciendo la necesidad de cambiar el cable al aumentar el tráfico. Mediante el uso de técnicas de multiplexación especiales, la potencialidad de la fibra óptica se ve notablemente incrementada.
- **Rápida reducción de costos y mejoramiento de la calidad**, al igual que en todas las modernas tecnologías, existe un gran interés en la investigación de nuevas técnicas para obtener una mayor eficiencia y reducción de costos.

¿Cuál es el costo de un sistema de comunicación por fibra óptica comparado con el de un sistema convencional? Aunque un estudio económico debería basarse en las necesidades del usuario, es posible dar una idea general de los costos actuales, hoy en día gracias a la disminución de precios, tanto de la fibra óptica como de los componentes optoelectrónicos el costo de montar un sistema basado en fibra se ha tornado tan accesible como montar un sistema tradicional por pares cobre. En muchos casos la diferencia de costos con un sistema tradicional es muy pequeña, la factibilidad económica del proyecto de un sistema optoelectrónico depende, en última instancia, del alcance de su aplicación. Los sistemas optoelectrónicos se están convirtiendo día a día en una realidad cada vez mas atractiva, siendo hoy la solución tecnológica más conveniente en muchos casos.

Como conclusión se puede decir que la fibra óptica ha revolucionado el mundo de las telecomunicaciones. Hoy son la selección predominante en transmisiones de larga distancia.

## *Capítulo II*

### **Fibras Ópticas**

#### **Introducción**

En la primera etapa de estudios sobre fibras ópticas no se las consideró apropiadas como medio de transmisión, debido a los altos valores de atenuación. En 1966 se demostró que la atenuación estaba relacionada con el material utilizado, y que era posible reducirla eliminando las impurezas de la fibra de vidrio.

Fue en 1972 cuando los laboratorios americanos de Corning Glass Works anunciaron la puesta a punto de fibras ópticas de sílice dopado monomodo, cuya atenuación no superaba los 20db/Km. A partir de entonces ya fue posible desarrollar los sistemas de fibra óptica, y hoy en día vemos con sorpresa los grandes progresos conseguidos en tan poco tiempo.

#### **Principios Básicos**

La fibra óptica consiste en tres partes: la interior, denominada **núcleo**, la exterior, llamada **revestimiento** y un recubrimiento de protección alrededor del revestimiento. Tanto el núcleo como el revestimiento son de vidrio, cada uno con un **índice de refracción** ( $n_c$  y  $n_r$  para el núcleo y revestimiento, respectivamente). El núcleo tiene un índice de refracción superior al del revestimiento. Debido a esta diferencia de índices, la luz transmitida se mantiene y propaga a través del núcleo, satisfaciéndose el principio de **reflexión total interna**.

La luz que entra en la fibra óptica se propaga a través del núcleo en **modos**, que representan a los diferentes caminos posibles de las ondas luminosas.

Para entender los parámetros modales que determinan las características de propagación de la luz en una guía de ondas como es la fibra óptica, es necesario examinar las ecuaciones de Maxwell referidas a las condiciones de contorno cilíndricas de una fibra. Este examen es lo suficientemente complicado como para describirlo en

este trabajo. Como conclusión del análisis de las ecuaciones mencionadas se define un parámetro característico de las guías de ondas y que representa una constante para todos los modos. Nos referimos al denominado **parámetro V** que caracterizado por la expresión:  $V^2 = (2\pi a \lambda_0)^2 * (n_c^2 - n_r^2)$

donde **a** es el radio del núcleo de la fibra,  $\lambda_0$  representa la longitud de onda en el vacío, **nc** es el índice de refracción del núcleo y **nr** es el índice de refracción del revestimiento.

El parámetro **V** puede ser utilizado para identificar el número de modos en una guía de ondas. Así, para fibras en las que la diferencia de índices de refracción entre el núcleo y el revestimiento es un  $\delta n$ , se demuestra que para valores de **V** interiores a 2,405 existe un único modo, denominado **HE11**, mientras que para valores de **V** superiores a los 2,405 otros modos son posibles dentro de la fibra. Estos modos son doblemente degenerados. Degeneración que resulta del hecho que en las guías de ondas circulares, como la fibra óptica, todas las orientaciones son equivalentes, permitiendo la coexistencia de dos modos de polarización ortogonales con el mismo número de onda. Así, **HE11** es doblemente degenerado en polarización.

Haciendo diferentes combinaciones entre el tamaño del núcleo y la diferencia de índices entre el núcleo y el revestimiento, se pueden obtener diferentes fibras en las que existe un único modo de propagación, manteniendo la relación **V < 2,405**.

Las ondas luminosas deben entrar en la fibra dentro de cierto ángulo, llamado **ángulo de aceptación**. Cualquier onda que entre según un ángulo mayor a través del revestimiento. Este ángulo está definido por la **apertura numérica NA**. El concepto de apertura numérica es ampliamente utilizado para describir la potencia colectora de luz de fibra y para calcular la eficiencia de acople fuente/fibra y esta definido por:

$$NA = \sin \alpha_{max} = \sqrt{n_c^2 - n_r^2}$$

Donde  $\alpha_{max}$ , representa el máximo ángulo de aceptación. Como se puede apreciar de la expresión anterior, la apertura numérica es función de los índices de refracción de los materiales de la fibra.

### **Clasificación de las fibras**

Atendiendo a las propiedades modales de las fibras ópticas, se las puede agrupar en dos categorías: **monomodo** y **multimodo**. En una fibra monomodo, la luz puede tomar un único camino a través del núcleo, que mide alrededor de 10 micrómetros de diámetro. Las fibras multimodo tienen núcleos de entre 50 y 200 micrómetros de diámetro. Las fibras monomodo son más eficaces a largas distancias, pero el pequeño diámetro del núcleo requiere un alto grado de precisión en la fabricación, empalme y terminación de la fibra.

La fibra óptica también se clasifica en función del índice de refracción, siendo dos los tipos: **salto de índice** e **índice gradual**. En las fibras de salto de índice, el índice de refracción es uniforme a lo largo del diámetro del núcleo. En las fibras de índice gradual, el índice de refracción es inferior en las proximidades del revestimiento que en el eje de la fibra. Las ondas luminosas se propagan ligeramente más lentas en las proximidades del eje del núcleo que cerca del revestimiento.

Tres son los tipos básicos de fibras ópticas, y que se engloban dentro de las 2 clasificaciones generales mencionadas anteriormente: a) Fibras multimodo de salto de índice, b) Fibras multimodo de índice gradual, c) Fibras monomodo de salto de índice.

#### **• Fibras multimodo de salto de índice**

En este tipo de fibras, los rayos de luz son guiados por reflexión total en la frontera núcleo–revestimiento. El índice de refracción presenta un perfil definido, por ejemplo, por la expresión siguiente:

$$n_c = n_r (1 + \Delta)$$

siendo  $\Delta$  el índice de refracción relativo.

La apertura numérica  $NA$  se puede aproximar a la expresión

$$NA \approx n_c \sqrt{2\Delta}$$

Valores típicos de  $NA$  se encuentran entre 0,2 y 0,5.

Por otro lado, el número de modos guiados crece rápidamente para valores de  $V$  superiores a 2,405. Aproximadamente, el número de modos guiados  $N$  es proporcional a  $V^2/2$ .

#### • **Fibra multimodo de índice gradual**

El índice de refracción cambia gradualmente en el núcleo. Esta variación del índice del perfil de la fibra da lugar a que la luz se propague según la trayectoria curva, en lugar de a tramos rectos como en las fibras de salto de índice. Mientras más alto es el índice de refracción, más baja es la velocidad de propagación, según se desprende de la expresión siguiente:

$$V = \frac{c}{n}$$

Donde  $v$  es la velocidad del haz luminoso y  $c$  representa a la velocidad de la luz en el vacío.

Teniendo en cuenta esta relación es posible hacer iguales los tiempos de propagación a través de cada trayecto de luz, controlando el índice de refracción.

De lo anterior se desprende que la fibra del índice gradual actúa como un medio óptico que continuamente enfoca el haz de luz que viaja a lo largo de la fibra.

Un perfil de índice de tipo parabólico vendría expresado por  $n_c = n [1 - \Delta(r/a)^\alpha]$

0 ≤ r ≤ a

Donde  $\alpha$  toma un valor próximo a 2 para el máximo ancho de banda de la fibra.

La apertura numérica  $NA$  de las fibras de índice gradual es una función que depende de la posición a lo largo del núcleo y no es una constante como el caso de una fibra de salto de índice. Partiendo de la óptica geométrica se deduce que la luz incidente sobre el núcleo de la fibra en una posición  $r$  se propagará como un modo guiado, sólo si se encuentra dentro de la apertura numérica  $NA(r)$ , que se define como:

$$N = (k \cdot a \cdot n_c)^2 \cdot \frac{\Delta\alpha}{2 + \alpha}$$

Una fibra de salto de índice, con unos  $\delta$  y radio determinados, tendrá el doble de modos que una fibra de índice gradual ( $\delta=2$ ), con el mismo valor de pico de  $\delta$  e igual radio.

#### • **Fibras monomodo de salto de índice**

Estas fibras, en su construcción más simple, son iguales a las multimodo de salto de índice, sólo que el diámetro del núcleo es mucho más pequeño, pudiéndose propagar un solo modo. La propagación monomodo se consigue diseñando fibras con núcleos cuyos tamaños sean equivalentes a pocas longitudes de onda, y con

pequeñas diferencias entre los índices de refracción, de tal manera que se mantenga el valor  $V$  por debajo de 2,405.

### ***Propiedades de las fibras ópticas***

Además de las propiedades modales ya mencionadas, existen otras que caracterizan a las fibras ópticas. Ahora nos referimos a aspectos relacionados con la atenuación y la capacidad de transmisión de información, íntimamente ligada con las propiedades dispersivas y el ancho de banda de la fibra.

#### **• Atenuación**

La primera característica de interés es la atenuación, particularmente en fibras de bajas pérdidas. La atenuación es debida, en parte a la **absorción** intrínseca a los átomos que constituyen la fibra, absorción por defectos atómicos en los centros de color y la absorción de impurezas extrínsecas. El otro factor que contribuye a la atenuación es la **difusión o dispersión (scattering)** debida a las inhomogeneidades en el índice de refracción y en la forma de la fibra.

Las bandas de absorción intrínseca limitan las ventanas transparentes del material y establecen la región espectral de trabajo.

Trabajando dentro de la región intrínseca, los centros de color y las impurezas deben eliminarse tanto como sea posible, con el fin de minimizar las pérdidas. La absorción por impurezas crece, principalmente, debido a iones metálicos como hierro, cromo, cobalto, cobre y por iones  $\text{OH}^-$  resultantes de las impurezas de agua. Si se quiere que la contribución a la atenuación producida por estas causas sea pequeña, el nivel de impurezas no debe ser superior a unas cuantas decenas por cada mil millones.

La atenuación debida al scattering se atribuye, principalmente, a la **dispersión de Rayleigh**. Un rayo de luz se dispersa parcialmente en muchas direcciones y se pierde energía luminosa. La atenuación causada por este efecto decrece cuanto mayor es la longitud, siendo proporcional a  $(1/\lambda^4)$ . Su magnitud varía de un tipo de vidrio a otro, haciendo que en unos casos las pérdidas sean menores que en otros. Entre los 400 nm y 1100nm, la atenuación en la fibra se debe principalmente a la dispersión de Rayleigh favorece la utilización de longitudes de onda lo mayores posibles.

Una fuente adicional de pérdidas en las fibras es la resultante de las **microcurvas o micropliegues** causados por el cableado de la fibra o por el arrollamiento de fibras alrededor de tambores. Este tipo de pérdidas son producidas por el acoplo entre los modos guiados y por la radiación de los modos. Lo anteriormente expuesto indica que las pérdidas en las fibras no son necesariamente estáticas en su naturaleza (intrínsecas), sino que pueden ser afectadas por factores externos a las fibras. Una segunda causa externa de pérdidas puede atribuirse a la radiación existente en el entorno en que se encuentra la fibra. Se estima que las guías de ondas ópticas pueden ser vulnerables a la radiación nuclear. En general, fibras dopadas con silicio y de alta pureza tienden a ser mas resistentes a la radiación que los compuestos de vidrios silicatados.

Una característica importante en la atenuación de las fibras es su no dependencia con la frecuencia en el rango de las frecuencias de las frecuencias de información de interés. Así, en transmisión de UHF y VHF, la atenuación en las fibras ópticas no depende del ancho de banda de modulación, al contrario de lo que ocurre en las guías de ondas coaxiales convencionales. Esta independencia se extiende hasta la región de las microondas y es debida al hecho de que la frecuencia portadora es varias órdenes de magnitud superior a las frecuencias de modulación.

#### **• Capacidad de información y ancho de banda de las fibras**

La capacidad de información de las fibras ópticas está limitada por la distorsión de la señal, que se manifiesta

como ensanchamiento del pulso transmitido. Este ensanchamiento es un resultado de las características dispersivas del material de una fibra, de la estructura de las imperfecciones mecánicas dentro de la fibra, y de las discontinuidades inducidas de fatiga que pueden surgir en el proceso de cableado. Ambos efectos, mecánico y de fatiga, incrementan la mezcla modal y las pérdidas radiación que pueden causar una dispersión, que no depende linealmente de la longitud y es sensible a las condiciones de partida.

Un pulso de luz, a medida que viaja por la fibra, se va ensanchando. Este fenómeno se denomina dispersión del pulso y limita la cantidad de información que se puede transmitir.

Hay tres causas principales de dispersión en una fibra: efectos en la guía de onda, dispersión en el material y dispersión modal. Todos los efectos de la dispersión pueden ser caracterizados en el dominio del tiempo ( $\text{ns/Km} = 10^{-9} \text{ s/Km}$ ), o en el dominio de la frecuencia ( $\text{MHz} \times \text{Km}$ ).

### *b.1 Dispersión de guía de onda*

Esta causa de dispersión en una fibra óptica surge del hecho de que el número de modos  $V$  depende de la longitud de onda. La dispersión en la guía de onda para modos guiados en una fibra multimodo es sensiblemente pequeña para todos los modos alejados del corte (la longitud de corte es aquella a partir de la cual se transmite más de un modo). Ya que los modos próximos al corte, generalmente, transportan una fracción pequeña de la potencia total y suelen sufrir pérdidas más elevadas, la contribución a la dispersión por esta causa puede ser omitida.

### *b.2 Dispersión en el material*

La dispersión en el material, denominada también **dispersión intramodal**, es particularmente significativa en las fibras monomodo. Este tipo de dispersión se debe al conjunto de longitudes de onda contenido en un pulso. Puesto que el índice de refracción varía con la longitud de onda, la velocidad de grupo  $v_g$  de un modo será función de la longitud de onda. Ya que las fuentes de luz tienen diferentes componentes en su espectro, cada una tardará distinto tiempo en la transmisión, debido a las diferentes velocidades a las que viajan, lo que producirá un ensanchamiento del pulso emitido. El ensanchamiento del pulso sobre una fibra de longitud  $L$  puede aproximarse por la expresión siguiente:

$$\frac{\tau}{L} = \frac{1}{v_g} = \frac{1}{c} \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \lambda^2 \frac{d^2 n}{d\lambda^2}$$

donde  $\Delta\lambda/\lambda$  representa el ancho espectral relativo de la fuente de luz, y el término  $d^2 n/d\lambda^2$  caracteriza a la dispersión en el material.

A título de ejemplo, para lasers de inyección monomodo el valor de  $\tau/L$  es menor que  $10^{-3} \text{ ns/Km}$ , lo que indica que señales en banda base dentro de la región de las microondas pueden transmitirse sobre fibras monomodo a longitudes determinadas por la atenuación y no por la dispersión.

La dispersión en el material es el principal factor inhibidor del uso de velocidades dentro del margen de 1Gbps y 2Gbps. Para lograr estas altas velocidades se requiere un laser que emita con un ancho de banda estrecho.

### *b.3 Dispersión modal*

La dispersión modal, o **dispersión intermodal**, determina la capacidad de ancho de banda de las fibras multimodo. Las velocidades de grupo de los diferentes modos varían y conducen a un ensanchamiento del retardo de grupo o dispersión intermodal. El máximo retardo viene dado por la expresión:

$$\frac{\tau}{L} = \frac{\Delta n}{2c} = \frac{(NA)^2}{2nc}$$

Los límites de la dispersión son proporcionales, por tanto, al cuadro de la apertura numérica. Para fibras de índice gradual con perfil parabólico, el valor máximo está dado por:

$$\frac{\tau}{L} = \frac{n\Delta^2}{2c} = \frac{[NA(o)]^4}{8n^3c}$$

Para este tipo de fibras, la capacidad limitada por la dispersión es  $2/\delta$  veces mayor que para fibras de salto de índice con el mismo valor de  $\delta$ . Ya que  $\delta$  es aproximadamente próximo al 1 por ciento, la capacidad de las fibras de índice gradual puede ser dos órdenes de magnitud superior a la de fibras de salto de índice. Las capacidades expresadas para fibras multimodo representan el peor de los casos estimados. La pérdida modal diferencial y el acoplamiento modal son causas que hacen improbable el cumplimiento de las expresiones mencionadas. Los modos de orden superior sufren una atenuación diferencial mayor debido a la mayor radiación del acoplamiento de modos. Esto reduce la apertura numérica efectiva, disminuyendo la dispersión modal. La mezcla de modos es un efecto debido a las imperfecciones estructurales, inhomogeneidades del índice de refracción, fluctuaciones en el diámetro y extrañas birefringencia, y todo ello conduce a una ecualización de la velocidad modal. El acoplamiento modal reduce el ensanchamiento de las velocidades en la medida en que los modos acoplados tienden a poseer una velocidad promedio común de propagación. En las fibras de índice gradual, las velocidades modales están casi ecualizados. La mezcla modal y las pérdidas diferenciales tienen un pequeño efecto sobre la expresión que representa a la dispersión.

#### • *Material de las fibras*

La elección de los materiales para las fibras es un factor importante en el aspecto de la atenuación.

Los principales materiales utilizados son el silicio de alta pureza, el vidrio compuesto y los compuestos moleculares de orden elevado. Entre estos materiales, el silicio se beneficia de técnicas de refinamiento más avanzadas. Por tanto, el silicio de alto grado se considera generalmente el material más adecuado para fibras ópticas en telecomunicaciones. A esta base de silicio se añaden boro, germanio, fósforo y aluminio, en el núcleo y en el revestimiento, para controlar el perfil de índice de refracción.

#### *Proceso de fabricación*

La deposición de vapor químico (**CVD**) fue uno de los primeros métodos para producir fibras de bajas pérdidas. Un segundo método para producir fibras es aquel que implica la utilización de un doble crisol. El método CVD se utilizó por Corning Glass para demostrar bajas pérdidas de propagación en las fibras cuando, en 1970, se realizó la primera fibra con 20dB/Km. Una versión modificada del CVD (**MCVD**) se utiliza actualmente en la que la deposición de vapor químico se realiza en el interior de un tubo de silicio de alta capacidad.

#### • *Proceso de deposición de vapor químico modificado (MCVD)*

La fabricación de fibras ópticas consta esencialmente de dos etapas: la fabricación de la preforma y el estirado y recubrimiento de la fibra.

El proceso comienza con un tubo de silicio de unos 2 metros de largo y 4cm de diámetro. El tubo se hace rotar y se calienta, mientras se hace pasar por él una mezcla de gases de alta pureza. Cerca de la zona caliente tiene lugar una reacción química y se deposita un material muy puro. Desplazando dicha zona a lo largo del tubo, queda adherida una capa uniforme a su superficie interior. Mediante sucesivos pases se consiguen capas con

el espesor y composición requeridos.

Después de colapsa el tubo a temperatura más elevada en una varilla maciza o **preforma** en cuyo centro, la capa de vidrio depositada forma un filamento con el perfil de índice de refracción que requiere la fibra. Esta preforma se monta luego en una **torre de estirado** y se mete en un horno, estirándose la fibra desde su extremo reblandecido y aplicando sobre su superficie capas de polímeros que la protegen y hacen más manejable.

En la cadena de vaporizadores para la producción de preformas se incluyen vaporizadores de fuente líquida, fuentes gaseosas, suministros de gas portador y una línea de cloro para fabricación de vidrio con bajo contenido de OH<sup>-</sup>.

#### • **Proceso de doble crisol**

El material del núcleo, de índice más elevado, se coloca en el crisol interior. Concéntrico a este crisol se encuentra un segundo, dentro del cual se introduce el material del revestimiento. Ambos crisoles se calientan por inducción. Un calibrador permite controlar las dimensiones de la fibra. Durante un proceso, se aplica un recubrimiento de protección, normalmente un polímero. La fibra se enrolla sobre un tambor a una velocidad controlada.

Una primera desventaja del método de doble crisol es la presencia de sustancias contaminantes procedentes de los crisoles, haciendo difícil la realización de fibras de muy bajas pérdidas.

#### **Cables de fibra óptica**

Para poder manipular la fibra óptica sin inconveniente es necesario protegerla e incorporarla a una estructura que asegure la invariabilidad de sus características ópticas y mecánicas. Tendremos así un cable óptico.

Los cables ópticos pueden presentar numerosas configuraciones en función del tipo de empleo, número de fibras, condiciones de ejercicio. Para dar solidez al cable, se emplean elementos como alambres y/o cuerdas de acero, hilados sintéticos, fibras de vidrio, etc. Para cada aplicación y en función de las necesidades del caso, se puede diseñar el cable que mejor resuelva el problema específico.

En la mayor parte de los casos, el principal beneficio que se obtiene al utilizar fibras ópticas es la posibilidad de transferir señales a una velocidad que es decenas de veces superior a la soportada por líneas de transmisión eléctricas, donde las restricciones vienen impuestas por el tamaño y el peso. La reducción del peso es un factor importante para la utilización de fibras ópticas en cables, a bordo de aviones, reforzados con materiales ligeros como Kevlar, S-Glass (fibra de vidrio y matriz epoxy) y grafito.

Cuando es necesario empaquetar múltiples líneas de transmisión dentro de un único cables, los efectos de inducción entre líneas, que pueden representar un serio problema en cables eléctricos de gran longitud, es inapreciable en líneas de fibra óptica.

A la hora del diseño de un cable es interesante tener presente las siguientes propiedades: 1) Alta resistencia a la tensión, 2) Estanqueidad, 3) Estabilidad térmica a temperaturas de trabajo, 4) Flexibilidad, 5) Resistencia química, 6) Facilidad de terminación y de instalación y 7) Bajo costo y facilidad de mantenimiento.

### **Capítulo III**

#### **Fuentes Luminosas**

##### **Introducción**

El laser de semiconductores (diodo laser) y el LED (diodo electroluminiscente) se usan universalmente como fuentes luminosas en los sistemas de comunicaciones ópticas, debido a ningún otro tipo de fuente óptica puede modularse directamente a las altas velocidades de transmisión requeridas, con tan baja excitación y tan baja salida. La elección entre el laser y el LED es función del sistema: para anchos de banda grandes y largos enlaces, el laser ofrece un mejor rendimiento. Para distancias cortas y medias con anchos de banda escasos, en donde la baja potencia de salida, la respuesta en frecuencia o la gran anchura espectral no sean factores limitativos, se suele escoger el LED, ya que tanto el circuito de ataque como el de control son más sencillos.

Los componentes utilizados para emitir luz en la ventana de los 850nm son Galio, Aluminio, Arsénico (GA, AL, AS); si agregamos Indio (In) y fósforo (P) podemos emitir en las ventanas de los 1300nm y 1500nm.

### ***Diodo emisor de luz (LED)***

Los dos tipos básicos de LED utilizados para extraer luz de una unión **pn** son los de **emisión de superficie** y los de **emisión de borde**. Los primeros han estado produciéndose desde principios de la década de los 70. Su área activa productiva de luz está definida por una superficie de contacto óxido-metal aislado, la luz se emite perpendicularmente al plano de la unión **pn**, a través de la superficie, por lo que gran parte de la radiación queda absorbida en el sustrato, y la emisión del diodo es de ángulo grande (**lambertiana**). Se deben procurar, pues, procedimientos de acoplamiento eficaz con las fibras ópticas, particularmente si éstas son de apertura numérica pequeña.

En el LED de emisión de bordes (**ELED**), la luz se emite en el plano de la unión, con lo que la absorción es muy pequeña. La emisión de bordes es direccional si se usa geometría de franja. Esta estructura permite un mejor rendimiento cuántico externo y un acoplamiento a las fibras más eficaz.

#### **• Proceso de emisión**

El proceso de generación de la luz en un LED se basa en la recombinación de electrones y huecos en una unión **pn**, lo que provoca emisión de fotones. A este efecto se le llama **electroluminiscencia**. La longitud de onda de la luz emitida depende de la diferencia de energía **E** entre los niveles energéticos:

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

donde **h** es la constante de **Plank** y **c** la velocidad de la luz. En un LED la luz se emite según los 360° que se corresponden en una radiación esférica, pero en la práctica esto queda limitado por la contrucción mecánica del diodo, la reflexión de la luz en el material metalizado y la absorción en el metal semiconductor.

La apertura numérica puede variar desde 0,9 para un LED de gran ángulo hasta 0,2 para uno de estrecho ángulo. Aunque la apertura numérica de 0,2 es bastante pequeña, el área de emisión es grande comparada con la de un laser. La baja densidad de potencia resultante reduce enormemente la potencia que se puede acoplar a una fibra de índice gradual y hace casi imposible el acoplo a una fibra monomodo.

Un ancho de banda típico para un buen diodo es de 200Mhz. Rendimientos de 50 ðW/mA son usuales, y no se requiere corriente umbral.

La luz del diodo puede filtrarse, de modo que solamente parte del espectro total pase a la fibra, pero esto se hace a costa de una disminución de la potencia disponible de la fuente de luz.

#### **• Espectro de emisión**

Los LED presentan un espectro más ancho que los lasers. Así, un LED de 850nm tiene un ancho entre 30 y 50nm.

#### • **LED de emisión de bordes (ELED)**

Como se mencionó anteriormente, en el **ELED** la luz se emite en el plano de la unión, con lo que la absorción es muy pequeña. El **ELED** utiliza la misma geometría que el laser de franja, con modificaciones sustanciales a fin de impedir la acción del láser. Combina las ventajas de los emisores convencionales de superficie, tales como facilidad de operación y bajo ruido, con potencias de salida considerables, y con eficacia de acoplamiento y velocidades de modulación que se aproximan a las del laser. Estas presentaciones hacen a los ELED muy superiores en alcance y ancho de banda con respecto a los emisores de superficie. Son adecuados, pues, para una amplia gama de enlaces de capacidad y alcance medios, tanto analógicos como digitales.

Existe una versión de ELED de Galio, Arsénico/Galio, Aluminio y Arsénico, que trabaja en la zona de los 850nm, diseñada para acoplar el máximo posible de potencia en una fibra de pequeño núcleo. A 100mA ofrece potencias de salida en la fibra de 300mW, adecuadas para comunicaciones digitales con velocidades de 70Mbps y alcances de hasta 7Km.

Un segundo tipo de ELED está diseñado para dar rendimiento suficiente al sistema, con la mínima corriente de excitación posible. Con corrientes de 10mA puede llegar a los 45Mbps.

Un factor fundamental en el desarrollo de los ELED ha sido la alta fiabilidad del propio dispositivo y de su encapsulado, actualmente disponibles como conjunto hermético, provisto de un tallo de fibra.

#### **Diodo Laser**

Actualmente existe una gran variedad de lasers semiconductores para trabajar a longitudes de onda de 850nm. La pérdida considerablemente más baja, así como la mejor disposición de fibras ópticas de 1300nm y 1500nm han adelantado el rápido desarrollo de lasers que operen a esas longitudes de onda. Los de mayor éxito se basan en aleaciones de semiconductores de los grupos II-V, InP/Ga In As P.

#### • **Proceso de emisión**

El proceso de generación de luz es similar al del LED. Las diferencias radican en el volumen de generación, más pequeño en los diodos laser, y en una alta concentración de portadores inyectados. Se consigue así una ganancia óptica alta y un espectro muy estrecho que da lugar a **luz coherente**. La pastilla láser suele tener una longitud de 300μm, con dos caras cuidadosamente cortadas en ambos extremos a modo de espejos. El origen de la emisión de fotones es la recombinación directa electrón-hueco en la capa activa.

En el plano vertical, confinamiento óptico y de los portadores se obtiene revistiendo la capa activa con capas pasivas (de tipo **p** y de tipo **n**). Estas capas poseen un intervalo entre bandas superior al de la capa activa, formando así un pozo de potencial que impide a los portadores inyectados el escapar mediante difusión. Así mismo, las capas pasivas tienen un índice de refracción inferior al de la capa activa, con lo que se forma una guía de ondas ópticas que confina la luz en el plano de la capa activa, al propagarse entre los espejos. Esta estructura da lugar a que la corriente en los laterales de la zona activa sea muy pequeña. La zona activa tiene unas dimensiones típicas de 5nm a 10nm de ancho y 0,1nm a 0,2nm de espesor. En la región de **emisión espontánea** el espectro de un laser es muy parecido al de un LED, siendo la ganancia típica de 5mW/mA, menor que la ganancia típica de un LED.

A partir de una cierta densidad de corriente en la zona activa, la ganancia óptica excede a las pérdidas y la emisión pasa de espontánea a **estimulada**. La corriente a la que se produce el cambio se denomina **umbral**. Esta corriente es baja en lasers e heteroestructura, entre 50mA y 150mA.

La luz de este tipo de lasers puede acoplarse fácilmente a una fibra multimodo juntando simplemente a tope un extremo de la raya del laser contra el extremo del núcleo de la fibra, que tienen un diámetro mucho mayor. También puede acoplarse a una fibra monomodo. El problema principal consiste en que la unión laser tiende a ser tan fina que la luz diverge al salir del extremo. Este problema puede solucionarse mediante una diminuta lente cilíndrica que reorienta la luz a lo largo de la fibra.

- ***Espectro de emisión***

Por encima de la corriente umbral, el espectro de los lasers es, aproximadamente, de unos 2nm. Por debajo de la corriente umbral, las características espectrales de los lasers son similares a las del LED.

### ***Características del transmisor***

Cuando se hable de un transmisor (emisor de luz con sus circuitos polarizadores) se deben tener en cuenta algunas consideraciones importantes para evaluar su aplicabilidad. En primer lugar puntualicemos la diferencia entre transmisores digitales y analógicos, por ejemplo, en sistemas CATV, donde las señales son moduladas en FM. Para transistores analógicos, ***linealidad o distorsión*** (modificación de la señal transmitida respecto a la original) y el ***ancho de banda*** son factores muy importantes. Para un transmisor digital, este último parámetro está relacionado con la ***velocidad de transmisión máxima***, que, a su vez, lo está con la máxima cantidad de información que se transmite en una unidad de tiempo. La linealidad no es crítica en una transmisión digital.

Para cualquier transmisor un factor importante es el ***ruido*** (señales aleatorias indeseables que se suman a la señal debido al emisor de luz y los circuitos electrónicos) y la ***relación señal-ruido (S/N)***. Las fibras ópticas son casi inmunes a todo tipo de interferencias, sin embargo, no así el transmisor y por ello debe ser diseñado con sumo cuidado para evitar este fenómeno.

Además, cuando se elige un transmisor es importante que las características eléctricas de ingreso (tales como la codificación de las señales digitales o los niveles de ingreso de entrada de las señales analógicas) coincidan con las del sistema a usar. Es conveniente también que las características del emisor de luz estén de acuerdo con las características eléctricas. Otras consideraciones a tener en cuenta son: longitud de onda (para elegir la fibra adecuada), ancho espectral (para considerar la dispersión), potencia óptica emitida y tipo de encapsulado (para considerar la eficiencia de acoplamiento).

## Capítulo IV

### ***Detectores y receptores***

#### ***Introducción***

El fotodetector, un componente crítico en cualquier sistema de comunicaciones por fibra óptica, ha sido menospreciado, algunas veces, en la reciente tendencia de concentrarse en las mejoras de los transmisores laser y en las mismas fibras ópticas. Simplemente con cambiar de un tipo de fotodetector a otro se puede incrementar la capacidad de un sistema óptico en un orden de magnitud sin tocar ningún otro componente.

Aunque existen varios tipos de fotodetectores, usualmente sólo se consideran tres para la detección directa de señales digitales en comunicaciones ópticas: el ***fotodiodo***, el ***diodo PIN*** y el ***fotodiodo de avalancha (APD)***. La mayor parte de los sistemas instalados en el mundo utilizan fotodiodos PIN, muchos de ellos son de silicio y se usan en sistemas de longitudes de onda corta (800nm y 900 nm) para comunicaciones a corta distancia. Al fin y al cabo los diodos PIN, con su gran ancho de banda y bajo ruido, son la promesa futura para conseguir una generación de detectores ópticos completamente integrados.

Básicamente, el detector es un dispositivo que convierte fotones en electrones, un receptor se compone de un detector y de los circuitos necesarios asociados que lo capaciten para funcionar en un sistema de comunicaciones ópticas, transformando señales de frecuencias ópticas a frecuencias inferiores, con la mínima adición de ruido indeseable y con un ancho de banda suficiente para no distorsionar la información contenida en la señal (analógica o digital).

### ***Diodo PIN***

El fotodiodo **PIN** es el detector más importante utilizado en los sistemas de comunicación óptica. Es relativamente fácil de fabricar, altamente fiable, tiene bajo ruido y es compatible con circuitos amplificadores de baja tensión. Además, es sensible a un gran ancho de banda debido a que no tiene mecanismo de ganancia. Unas zonas **p** y **n** altamente conductivas junto a otra intrínseca poco conductiva, caracterizan al diodo PIN. Los fotones entran a la zona intrínseca generando pares electrón–hueco. El diodo se polariza inversamente con el fin de que las cargas generadas en la zona intrínseca sean aceleradas por el campo eléctrico presente.

Una típica estructura p–i–n planar tiene, como material absorbente de luz, a un compuesto de In Ga As. La región de absorción es fina, siendo, generalmente, un material tipo **n** sobre un sustrato tipo **n** de indio fosforoso. La superficie superior está recubierta de un fino aislante, o capa pasiva, para proteger la superficie y reducir la recombinación de electrones y huecos en dicha superficie.

Cuando un fotón entra en la zona de depleción, es absorbido y genera un par electrón–hueco, los cuales son dirigidos hacia los electrodos opuestos. Allí se recogen y aparecen como corriente en el circuito exterior. Puesto el par de portadores es separado en mucho menos tiempo que el tomado para su recombinación, el proceso de detección es rápido y eficiente.

Debido a que no existe mecanismo de ganancia en un fotodiodo p–i–n, la máxima eficiencia del detector es la unidad y producto ganancia  $\times$  ancho de banda coincide con esta última. El ancho de banda de un diodo p–i–n está limitado por el tiempo tomado en colector las cargas. Este tiempo es inversamente proporcional al ancho de la zona de depleción y directamente proporcional a la velocidad de los portadores de cargas en la región de alto campo eléctrico.

La principal fuente de ruido en un fotodiodo p–i–n es el **ruido de granalla** (shot noise), producido en la zona de depleción de la unión **p–n** inversamente polarizada, generado por el proceso estadístico de los electrones atravesando la unión **p–n**.

### ***Fotodiodo de avalancha (APD)***

Los **APD** son similares a los diodos PIN en cuanto a que trabajan polarizados en inversa, en ausencia de grandes corrientes de oscuridad.

A diferencia de los diodos PIN los APD operan a tensiones inversas lo suficientemente elevadas como para que cuando los portadores sean en el campo eléctrico, colisiones con otros átomos que componen la estructura cristalina del semiconductor. Las colisiones ionizan los átomos, produciéndose nuevos pares electrón–hueco. Esta ionización por impacto nos determina la ganancia interna del dispositivo o **ganancia de avalancha**.

#### **• Proceso de avalancha**

Con polarización directa (es decir, la región **p** positiva y la región **n** negativa), el diodo está preparado para conducir corriente limitada por la resistencia del dispositivo. En polarización inversa, la unión **p–n** forma una barrera y sólo la puede atravesar una corriente muy pequeña, normalmente causada por generación térmica (ya que los átomos de la red cristalina están en constante vibración) y por la separación debida al campo eléctrico que existe en la región de depleción. Esta corriente se denomina **corriente de oscuridad**, puesto que existe

incluso en ausencia de luz incidente: está presente en todos los diodos en mayor o menor grado y suele ser característica del material usado en la construcción del diodo.

Si la polarización es negativa se aumenta la corriente de oscuridad también crece gradualmente por ensancharse la región de depleción y exponer así una parte mayor del volumen del diodo a la capacitación de portadores generados térmicamente. Con polarización inversa suficientemente grande, el campo eléctrico en la zona **p-n** puede hacerse tan intenso que acelere los pares electrón-hueco generados térmicamente, con energía suficiente como para crear más de estos pares por colisiones con los átomos de la estructura. Estos pares, ionizados por impacto, son a su vez acelerados, junto con los portadores de carga fotogenerados primariamente, para colisionar con más átomos de la red y producir nuevos portadores de carga. De esta manera se puede amplificar la corriente primaria, aumentando su ganancia con la polarización. Finalmente, se alcanza un voltaje para el cual la ganancia de multiplicación de la corriente de oscuridad se aproxima a infinito. A este valor se lo denomina **tensión de ruptura** del diodo.

Cuando se ilumina el diodo, se producen muchos más pares electrón-hueco, generándose en él una fotocorriente. A una polarización suficientemente baja (alrededor del 10% de la tensión de ruptura) se puede suponer que no hay ganancia de avalancha de la fotocorriente. Es decir, la fotocorriente es la corriente total generada en el diodo menos la corriente de oscuridad correspondiente a esa tensión. Para un voltaje mayor (90% de la tensión de ruptura), se produce una ganancia finita, tanto de la fotocorriente como de la corriente de oscuridad. La ganancia neta es entonces la fotocorriente a esa tensión dividida por la fotocorriente sin amplificar. La máxima ganancia se alcanza justo antes de la tensión de ruptura; sin embargo, el factor de ruido es también máximo en este punto. La ganancia óptima cuando se emplea un APD, en un receptor óptico corresponde a un valor inferior al máximo, en el cual el ruido después de la multiplicación coincide con el ruido del amplificador.

El factor de multiplicación depende fuertemente del voltaje inverso aplicado y de la temperatura, lo que hace difícil alcanzar una ganancia estable. Un compromiso típico entre ganancia y estabilidad es un valor del factor de multiplicación entre 50 y 150. La corriente de oscuridad también es muy sensible a la temperatura. En los diodos de Silicio, la corriente se dobla cada 8° C, en los de Germanio cada 9° C a 10° C. A 25° C la corriente de oscuridad típica de un APD de silicio con 0,1mm de diámetro de área activa es de 1nA a 10nA, para un valor de factor de multiplicación de 100.

#### • **Ancho de banda de un APD y su respuesta en el tiempo**

Una última consideración con respecto a la ganancia de avalancha es su efecto en el ancho de banda del receptor. En un detector de avalancha, el máximo ancho de banda obtenible (para ganancia igual a 1) está, en último caso, limitado por el tiempo de tránsito de los portadores en la región de depleción, al igual que en los fotodiodos p-i-n. En presencia de ganancia el ancho de banda se reduce, debido al tiempo necesario para formarse la avalancha.

El tiempo de respuesta de un APD también depende del coeficiente de ionización. Después que la avalancha comienza, la señal continúa hasta que alguna fluctuación en la densidad de los portadores en la región de depleción hace finalizar el proceso.

El producto ganancia por ancho de banda en un APD es máximo en dispositivos y materiales, en los que el tiempo de tránsito efectivo es menor.

#### **Receptores**

Al igual que con los transmisores, debemos considerar los mismos parámetros básicos para diferenciar las características de los receptores analógicos y digitales. Los parámetros de los receptores analógicos son la **linealidad** o **distorsión** y el **ancho de banda**, mientras que para receptores digitales la linealidad no es

importante y el ancho de banda se reemplaza por la máxima velocidad de transmisión. La **potencia de ruido equivalente** de un receptor es generalmente mayor que en la de un fotodetector sólo. Otras consideraciones son la **relación señal/ruido** para los receptores analógicos y la **tasa de errores** (número de bits equivocados recibidos) para receptores digitales. Se debe notar que la fuente principal de ruido en el receptor es la etapa amplificadora que sigue al fotodetector.

Debemos considerar las características eléctricas de salida (codificación para transmisores digitales y nivel e impedancia de salida para las analógicas). Muchos receptores tienen circuitos de **control automático de ganancia (CAG)** para mantener el mismo nivel de salida cualquiera sea el nivel de entrada. Dado que el rango del nivel de entrada está limitado por el fotodetector, hay una potencia máxima sobre la cual se satura y una potencia mínima que representa la mínima detectable. Esta última es importante para determinar la máxima longitud de fibra que se puede usar sin repetidores. Otras características ópticas de los fotodetectores tales como el rango de longitudes de onda de trabajo y el tipo de encapsulado deben ser considerados al elegir.

Los receptores ópticos actuales se basan en uno de los dos tipos de detectores: el fotodiodo de avalancha APD y el diodo PIN seguido por un preamplificador de entrada **FET (Transistor de Efecto de Campo)**. Para señales digitales binarias, el caso más común basta con 22Db de relación señal/ruido. Un APD de calidad (de bajo ruido) podría dar una sensibilidad superior. Las relaciones señal eficaz de portadora/ruido eficaz en señales analógicas han de estar entre los 30dB y los 65dB.

Si las señales están moduladas en intensidad, el ruido dominante es el granular (**shot**) asociado a la corriente media de la señal, para relaciones portadora/ruido mayores de unos 40dB. En estos casos la mejor opción son los receptores **PIN-FET**.

#### • **Ruido en los receptores ópticos**

La capacidad de un receptor óptico para detectar señales de luz débiles depende de su sensibilidad y en particular del ruido propio. Los agentes causantes del ruido son la señal óptica, el diodo en sí y el circuito eléctrico que le sigue. El límite en cuanto a detección se da cuando la suma de todas las corrientes de ruido (cuántico, de la corriente de oscuridad, granular, térmico) iguala a la corriente de la señal a la salida del receptor. Esta potencia equivalente al ruido suele ser sin embargo menos importante que la potencia óptica (mínima) requerida para garantizar la deseada relación señal/ruido o tasa de error.

Pueden presentarse alguna o todas las fuentes de ruido siguientes:

- Ruido granular en la corriente media de la señal.
- Exceso de ruido granular en la corriente media de la señal, debido al ruido en la multiplicación de avalancha.
- Ruido creado por la corriente de oscuridad del detector.
- Ruido procedente del amplificador.

Incluso con un APD perfecto, hay un límite fundamental en el cual el rendimiento sólo depende del ruido granular en la corriente media de la señal. Corrientemente se le denomina **límite cuántico**, ya que los electrones de la corriente de señal están relacionados directamente con los fotones ópticos. Se puede demostrar que deben recibirse al menos 21 fotones para un 1 si se quiere obtener una tasa de error de  $10^{-9}$  en sistemas digitales.

## **Capítulo V**

### **Conclusiones**

La tecnología de fibras ópticas ha cambiado rápidamente a través de las dos generaciones de sistemas (índice

gradual a 850nm y monomodo a 1300nm), junto con algunas generaciones parciales intermedias. Se han establecido firmemente en la producción y están desempeñando grandes mercados de producción. Por otro lado, la investigación y el desarrollo han demostrado que existen capacidades adicionales sustanciales, ya sea para ampliar la distancia entre repetidores o la velocidad de transmisión o ambas cosas. Las necesidades de los diversos mercados de gran cobertura (redes de comunicaciones) están conduciendo al desarrollo de sistemas de altas prestaciones que satisfagan sus requisitos especiales. El interés de la investigación se ha centrado en gran medida en las telecomunicaciones y la transmisión de datos, los éxitos de la tecnología pueden aplicarse para proporcionar una buena relación efectividad/costo, ancho de banda y comunicaciones versátiles directamente ligadas a las premisas del usuario.

En mercados donde ya existe solución para los principales problemas en curso, la viabilidad económica junto con el potencial crecimiento tienden a determinar la utilización de la tecnología. La industria de las telecomunicaciones, el usuario potencial mas importante de las fibras ópticas, representa un mercado establecido y asentado. Se han realizado enormes inversiones en tecnología de cable convencional, haciendo poco aconsejable el que una nueva tecnología altere lo ya implantado.

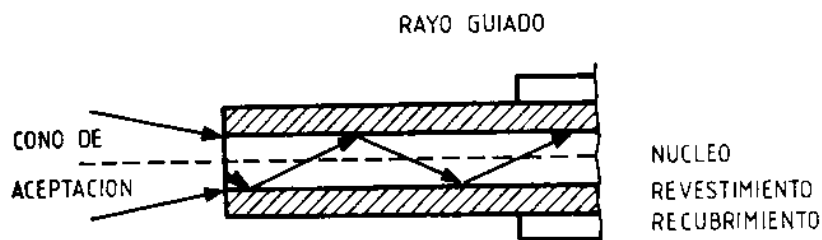
Adicionalmente los problemas que resultan de la necesidad de incrementar la capacidad pueden ser resueltos utilizando otras tecnologías, distintas a las que implican fibra óptica, como por ejemplo satélites y microondas. La entrada de las fibras ópticas en el mercado de las telecomunicaciones puede ser más lenta de lo que la tecnología puede permitir, y su impacto en el mercado esta determinado por el costo y las prestaciones de los sistemas por fibra óptica.

**Lic. Jorge A. Villafañe**

### ***Ilustraciones***

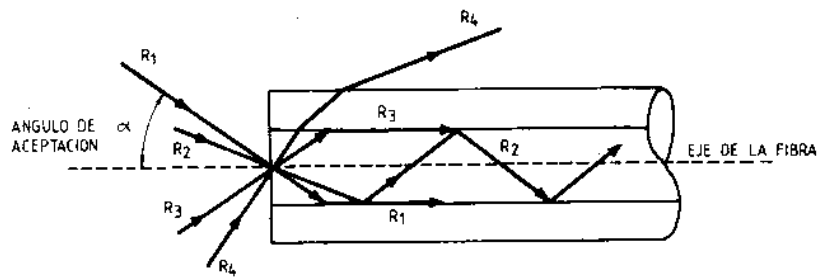
#### ***Parte I***

El siguiente gráfico nos muestra la estructura de una fibra óptica. En el mismo se ve como circula el rayo de luz dentro de la misma.



● Fig. 1.--Capas de una fibra óptica. Camino seguido por un rayo de luz a través de una fibra.

En este gráfico vemos como se propagan los rayos dentro de la fibra y sus ángulos de aceptación



● Fig. 3.—Sección lateral de una fibra óptica. Todos los rayos incidentes entre  $R_1$  y  $R_3$  (dentro del ángulo máximo de aceptación) se propagarán por la fibra.

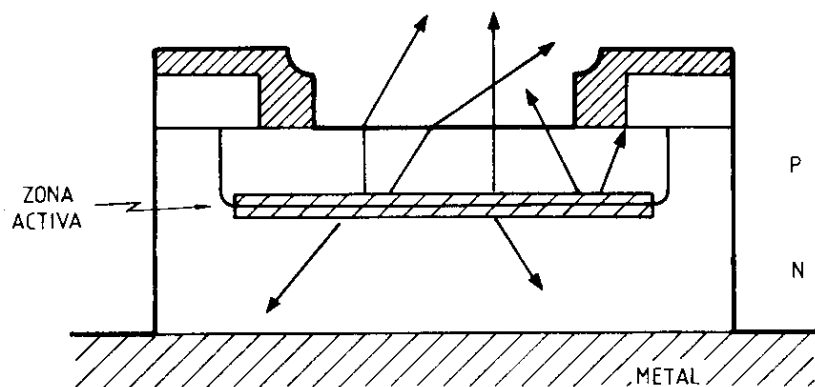
En esta gráfica vemos los caminos que toma el haz de luz dependiendo del tipo de fibra óptica.

| SECCION DE FIBRA | PERFIL DEL INDICE DE REFRACCION | CAMINOS DE LOS RAYOS DE LUZ |
|------------------|---------------------------------|-----------------------------|
| a.)              |                                 |                             |
| b.)              |                                 |                             |
| c.)              |                                 |                             |

Fig. 4.—Tipos de fibra óptica: a) fibra multimodo de salto de índice, b) fibra multimodo de índice gradual y c) fibra monomodo.

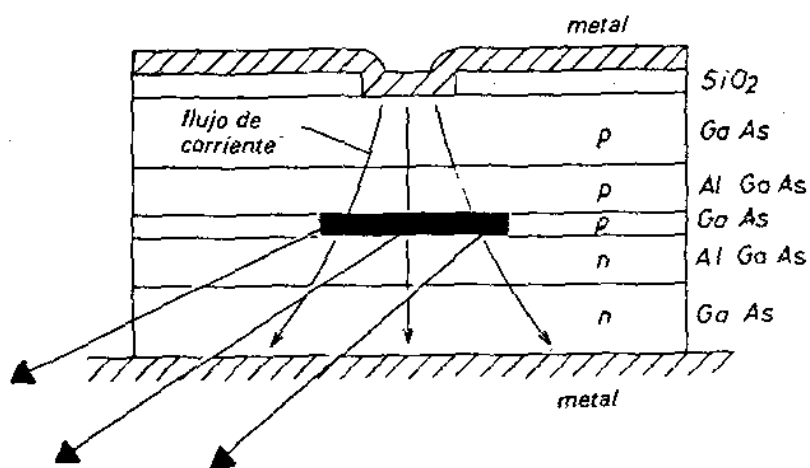
### Parte III

La figura siguiente muestra la estructura de un diodo LED (Diodo Emisor de Luz)



● Fig. 1.—Estructura de un LED.

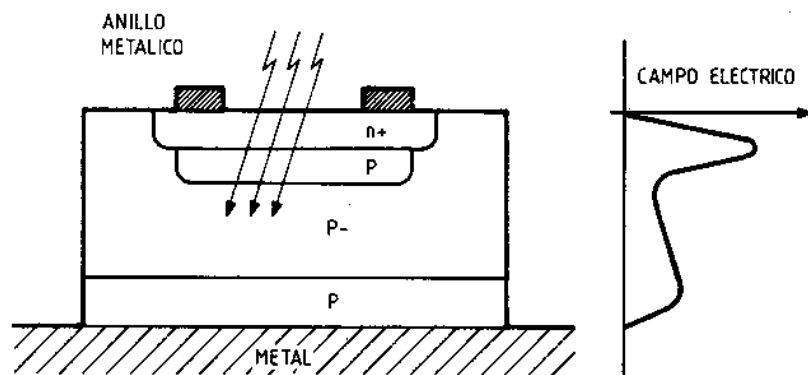
**Diodo GaAlAs que permite trabajar en ventanas del orden de los 850n,**



● Fig. 4.—Diodo láser de doble heteroestructura de GaAlAs, para trabajar a 850 nm.

#### Parte IV

**En el siguiente gráfico se muestra como se mantiene un campo eléctrico en un APD**



● Fig. 2.—Estructura de un APD. Se mantiene un campo eléctrico elevado en la unión polarizada inversamente.

### ***Bibliografía Consultada***

- ***Manual de Fibras Ópticas. Hentschel, C.***
- ***Optical Communications Research and Technology. Giallorenzi, T. G.***
- ***Tecnología de la fibra óptica: Fuentes luminosas de semiconductores. Davies – Goodwin – Kirkby – Murison.***
- ***Optical Detectors: Three contenders. Forrest, S.***

### ***Fibras Ópticas: Principio de Funcionamiento***

***Página 1 de 25***

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

•