

## TECNOLOGÍAS FOTÓNICAS Y COMUNICACIONES ÓPTICAS

*M.A. Rebolledo<sup>(1)</sup>, E. Bernabeu<sup>(2)</sup>, J.M. Álvarez<sup>(1)</sup>, J.M. López-Higuera<sup>(3)</sup>,  
M. Andrés<sup>(4)</sup>, F. Escribano<sup>(5)</sup>, C. Domínguez<sup>(6)</sup>, M. López-Amo<sup>(7)</sup>, J. Peláyo<sup>(1)</sup>,  
J. Capmany<sup>(8)</sup> y W. Warzanskyj<sup>(9)</sup>.*

(1) Universidad de Zaragoza; (2) Universidad Complutense de Madrid; (3) Universidad de Cantabria; (4) Universidad de Valencia; (5) BICC Cables de Comunicaciones; (6) DMB-CNM (CSIC); (7) Universidad Pública de Navarra; (8) Universidad Politécnica de Valencia; (9) Telefónica Investigación y Desarrollo

### INTRODUCCIÓN

La creciente necesidad de utilizar ondas electromagnéticas en el dominio óptico, como medio para transmitir información de muy diversa índole, ha motivado la dedicación de importantes esfuerzos en investigación de fuentes de luz, detectores, fibras ópticas, guías integradas y dispositivos diversos. Todo ello ha conducido a importantes desarrollos tecnológicos, que se reúnen bajo el denominador común de «Tecnologías Fotónicas», aplicables en dominios muy variados: telecomunicaciones ópticas y sensores ópticos por ejemplo.

El presente trabajo tiene como objetivo presentar una visión de las tecnologías fotónicas, orientada fundamentalmente a su aplicación en telecomunicaciones. La organización temática coincide con la desarrollada en un curso, organizado por el primer autor en la Universidad de Verano de Teruel, con el título «Tecnologías fotónicas y comunicaciones ópticas: estado actual y perspectivas». Los autores que siguen fueron los profesores de este curso y están ordenados en relación a los diez apartados en que se divide este artículo.

Los tres primeros apartados se corresponden con los tres elementos básicos para la transmisión de información (fuente, línea de transmisión y detector) y van seguidos de un apartado dedicado a los dispositivos pasivos que ayudan a estos elementos básicos a cumplir su misión. Les siguen dos apartados que presentan la tecnología de las fibras y los dispositivos de óptica integrada. Dado su creciente desarrollo y aplicabilidad, se tratan los amplificadores ópticos a continuación. Todos los constituyentes de la red (fuentes, fibras, detectores, dispositivos pasivos y activos) deben tener características bien controladas, lo que motiva el apartado de metrología de fibras y dispositivos. Finalmente se revisan las redes de comunicaciones ópticas en dos apartados, uno dedicado a los fundamentos y otro a las aplicaciones.

# 1. TRANSMISIÓN DE LA LUZ POR FIBRAS ÓPTICAS

## Guiado de luz en fibras ópticas: modos discretos de propagación

Una primera aproximación a la fenomenología asociada al confinamiento de luz, puede llevarse a cabo considerando la propagación de ondas planas (cuya dirección se supone contenida en el plano yz) entre dos superficies planas reflectantes de extensión infinita (espejos ideales con  $R=1$ ) separadas una distancia  $d$  sobre el eje  $y$ . La propagación resulta restringida a ondas que satisfagan una condición de autoconsistencia (interferencia constructiva) que obliga a que el ángulo  $\theta$  formado por la dirección de la onda con el eje  $y$  cumpla la condición  $\text{sen} \theta_m = m\lambda / 2d$  ( $m = 1, 2, \dots$ ). Ello implica que la componente  $x$  del vector de ondas esté discretizada, pues  $k_{x,m} = k \text{sen} \theta_m$ . Por tanto, la componente  $z$  del vector de ondas será  $k_{z,m} = k \text{cos} \theta_m$ , y tomará el valor

$$k_{z,m}^2 = k^2 - k_{y,m}^2 = k^2 - m^2 \pi^2 / d^2 = \omega^2 / c^2 - m^2 \pi^2 / d^2 \quad (1)$$

Cada valor de  $m$  corresponde a un modo discreto de propagación que tiene una determinada distribución espacial del campo electromagnético. Puesto que  $\text{sen} \theta_m < 1$ , el modo más alto que se propagará será el del entero  $m=M$  más próximo por defecto a  $2d/\lambda$ . Por eso cuando aumenta la frecuencia  $\nu$  crece el número de modos.

Es bien conocido que la velocidad de grupo según la dirección  $z$  viene dada por

$$v_z = \frac{d\omega}{dk_z} \quad (2)$$

donde  $\omega$  es la pulsación. Según (1),  $k_z^2 = (\omega/c)^2 - m^2 \pi^2 / d^2$  y, por tanto,  $v_{z,m} = c \text{cos} \theta_m$ , por lo que cada modo tendrá distinta velocidad de propagación.

Una fibra óptica es un medio confinador de simetría cilíndrica, cuya estructura de índice de refracción puede ser de escalón (homogénea) o gradual (inhomogénea). De acuerdo a las consideraciones anteriores el cambio de simetría conserva cualitativamente las características del confinamiento ideal analizado, pero en este caso de simetría cilíndrica en medios reales los posibles modos de propagación dependen de dos índices enteros correlativos  $m$  y  $l$ . La condición de continuidad de las derivadas de la distribución radial en la frontera permite establecer una ecuación característica, basada en funciones de Bessel, que da cuenta de los posibles modos de propagación.

## Dispersión modal

La dispersión modal se produce en las fibras multimodo como resultado de las diferentes velocidades de propagación de cada modo (dispersión intermodal). Para un pulso simple que entra en una fibra multimodo en  $z = 0$ , al cabo de una longitud  $L$  aparece un retardo temporal para los diferentes modos tal que  $\tau_g = L/v_g$ . Se estima que la «dispersión temporal» del pulso es  $\sigma_t = (L/v_{\text{min}} - L/v_{\text{max}})/2$ . Como  $v_{\text{min}} \approx v_d(1-\Delta)$  y  $v_{\text{max}} \approx v_d [\Delta = (n_r - n_0)/n_0]$ , con  $n_d$  y  $n_0$  los índices de refracción del revestimiento y el núcleo de la fibra, respectivamente] y puesto que  $(1-\Delta)^{-1} \approx 1 + \Delta$ , se tiene que  $\sigma_t \approx (L/2)\Delta/2$ . Sin embargo para una fibra óptica de gradiente de índice de refracción óptimo  $\sigma_t \approx (L/2)\Delta/4$ , por lo que tienen menor «dispersión temporal».

## Fibras ópticas monomodo: parámetros optogeométricos

La característica esencial es que propagan un sólo modo, por lo que no existe dispersión intermodal. Ello tiene una importancia considerable en la transmisión a larga distancia. También conservan la coherencia temporal de la luz.

Una fibra monomodo de salto de índice y radio  $a$  de núcleo debe cumplir:  $V = ak_0(n_1^2 - n_2^2)^{1/2} < 2.405$ , para luz con número de ondas  $k_0$  en el vacío. En estas condiciones la distribución radial del campo se ajusta bien a una gaussiana y las dimensiones geométricas reducidas hacen que los efectos difraccionales no sean despreciables y se manifiestan en una divergencia de la luz emitida por la fibra, en forma también de dependencia gaussiana.

Por otro lado, la propia cota  $V < 2.405$  impone un valor mínimo para la longitud de onda, llamado longitud de onda de corte, que viene dado por:  $\lambda_c = n_0 \sqrt{2\Delta} 2\pi a / 2.405$ . Es decir, que el modo LP<sub>11</sub> no se transmite y la fibra será monomodo.

## Dispersión cromática

Como los materiales ópticos son dispersivos  $n = n(\lambda)$  y la velocidad de grupo viene dada por

$$v_g = c \left( n - \lambda_0 \frac{dn}{d\lambda_0} \right)^{-1} \quad (3)$$

cuando un pulso de luz, compuesto de distintas longitudes de onda, se propaga se expande. Si la anchura espectral del pulso óptico es  $\sigma_\lambda$ (nm), después de atravesar una distancia  $L$ , la anchura temporal será

$$\sigma_t = |D_\lambda| \sigma_\lambda L \quad (4)$$

donde  $D_\lambda = -\frac{\lambda_0}{c_0} \frac{d^2 n}{d\lambda_0^2}$  es el coeficiente de dispersión del material. A esta dispersión cromática se le conoce como dispersión del material.

Además, aunque la fibra sea monomodo, esta introduce dispersión adicional. A esta dispersión se le conoce como dispersión de onda guiada y, al igual que la dispersión del material, puede expresarse como

$$\sigma_t = |D_\omega| \sigma_\omega L \quad (5)$$

$$\text{siendo } D_\omega = -\frac{\omega}{\lambda_0} \frac{d}{d\omega} \left( \frac{1}{v_g} \right) = -\left( \frac{1}{2\pi c} \right) V^2 \frac{d^2 k}{dV^2}$$

El ajuste de los parámetros  $\Delta$  y  $a$  permite disminuir la dispersión cromática  $\sigma_t$ , incluso, anularla para una longitud de onda concreta por compensación entre la dispersión del material y la de onda guiada.

## Atenuación espectral

La difusión de la luz y la absorción son dos fenómenos ligados a la naturaleza del material que limitan la propagación de la luz, excluidas las rugosidades superficiales y curvaturas de las fibras. La absorción es debida al concurso de tres términos:

- Las transiciones electromagnéticas que se sitúan en el U.V., por lo que las fibras de sílice no transmiten en esta región.
- En el infrarrojo, debido a vibraciones moleculares, hay atenuaciones fuertes a partir de 1.7  $\mu\text{m}$ . Vidrios más pesados, con fluoruros, alcanzan una transmisión mayor en el I.R.
- Diversas impurezas y presencia de agua —en concreto de enlaces OH— explican la existencia de un fuerte pico en 1.39  $\mu\text{m}$ .

La difusión de Rayleigh es debida a las variaciones locales de densidad que se traducen en inhomogeneidades en el índice de refracción. Su dependencia en intensidad es proporcional a  $\omega^4$ , por lo que la difusión de luz es más fuerte en longitudes de onda cortas.

De forma general la atenuación se expresa por un coeficiente  $\alpha$ , tal que

$$\alpha = \frac{1}{L} 10 \log \frac{1}{\tau} \quad (6)$$

Generalmente las fibras monomodo presentan coeficientes de atenuación más bajos. Las microcurvaturas influyen tanto por la amplitud de sus deformaciones como por su distribución espacial. Normalmente las pérdidas aumentan con la tensión aplicada a la fibra, pero dependen igualmente de cómo la tensión aplicada induce la deformación.

La figura 1 recoge las curvas de atenuación típicas para los tres tipos de fibras ópticas comerciales hoy existentes: plásticas, de vidrio y mixtas (núcleo de vidrio y revestimiento de plástico). La tabla I resume las características técnicas, así como sus principales ámbitos de aplicación de los tipos de fibra óptica más característicos.

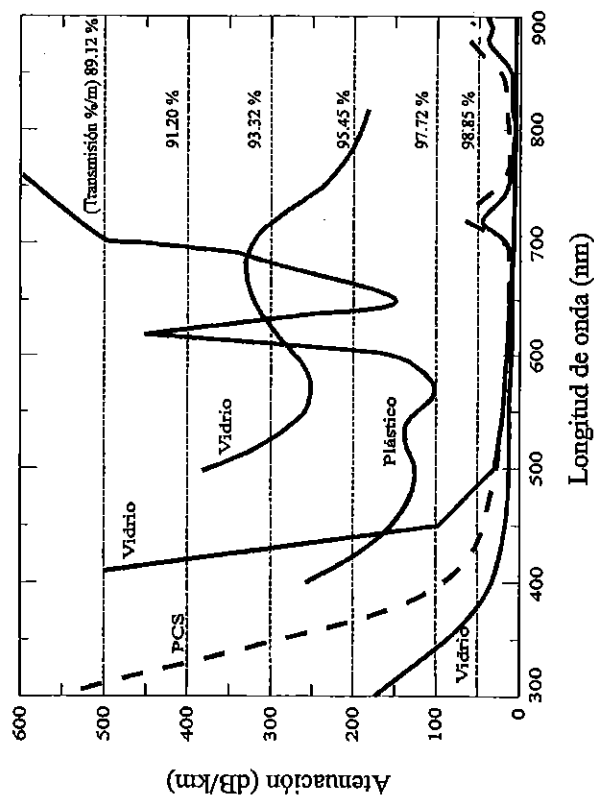


FIGURA 1. Curvas de atenuación para fibras de vidrio, plástico y mixtas (FCS).

TABLA I  
Características técnicas y aplicaciones de diferentes tipos de fibra óptica

Material	Plástico	Sílice/silicona	Sílice (núcleo dopado con Ge)	Vidrios fluorados	Calcogenuros (compuestos de S, Se, Te)
Clase de fibra	Multimodo de salto de índice	Multimodo de salto de índice	Multimodo (salto y gradiente de índice) Monomodo	Multimodo de salto de índice Monomodo	Multimodo de salto de índice Monomodo
Ventana de transmisión Atenuación mínima	Visible >100 dB/km	8.8 a 0.9 $\mu\text{m}$ 3-6 dB/km	8.8 a 1.6 $\mu\text{m}$ 0.2-2 dB/km (mínimo en 1.55 $\mu\text{m}$ )	2 a 4 $\mu\text{m}$ 1-10 dB/km teórico <0.01 dB/km	2 a 4 $\mu\text{m}$ = 1 dB/km
Temperatura de utilización	< 80°	<100°	Según revestimiento	Bastante elevada	< 100°
Resistencia mecánica	Buena	Buena	Muy buena	Débil	
Resistencia a la radiación	Media	Buena	Mala	Buena	
Coste	Bajo	Bajo	Bajo (según tipos)	Elevado	Muy elevado Poca disponibilidad
Aplicaciones	Iluminación Sensores Transporte de imagen Señalización Instrumentación científica	Transmisión a cortas distancias Señalización Iluminación	Transmisión a media y larga distancia	Transporte infrarrojo	Transmisión cortas distancias Biomedicina

## 2. FUENTES DE LUZ

Las fuentes ópticas se consideran a menudo como las componentes activas en un sistema de comunicación por fibras ópticas. Su función fundamental es convertir energía eléctrica en luz con una eficiencia suficiente que nos permita acoplarla en la fibra óptica. Los diodos fotoemisores son las mejores fuentes a utilizar en aquellos sistemas de comunicaciones ópticas que requieren menor velocidad que 100 ó 200 Mbs<sup>-1</sup>, junto con un acoplamiento de potencia de decenas de microvatios en una fibra óptica multimodo. Su limitación básica es su anchura espectral relativamente grande (~100 nm en la banda 1.3 a 1.6  $\mu\text{m}$ ).

Para aquellos sistemas que requieren anchura de banda mayores de 200MHz, el láser de inyección es preferible sobre el LED. Estos láseres tienen típicamente tiempos de respuesta menores de 1ns, presentando anchuras de banda ópticas de 0.5GHz o mayores, y, en general, son

capaces de acoplar varios milivatios de potencia luminosa dentro de fibras monomodo. Su principal inconveniente su sensibilidad a las variaciones de temperatura.

### Diodos fotoemisores

Los diodos fotoemisores son una unión p-n con polarización directa, que inyecta portadores en una región en torno a la unión denominada zona activa, produciéndose luz por emisión espontánea debido a la recombinación de electrones y huecos en dicha zona. El flujo de fotones  $\Phi$  internos que se generan en la zona activa es  $\Phi = \eta_i I/e$ ; siendo  $I$  la corriente de polarización y  $\eta_i$  la eficiencia cuántica interna, definida como el cociente entre el número de recombinaciones radiativas electrón-hueco producidas y el número total de pares de portadores inyectados. Este parámetro determinará el funcionamiento del transductor electrón-fotón, y para asegurar un valor alto se usan semiconductores de gap directo ( $\eta_i \approx 0.5$ ).

La densidad espectral de la luz de electroluminiscencia vendrá dada por la expresión correspondiente de la emisión espontánea. La frecuencia del pico de emisión es  $h\nu_0 = E_g + K_B T/2$ , siendo  $E_g$  la energía de la banda prohibida, y su anchura a media altura es  $\Delta\lambda \approx 1.45 \lambda_p^2 K_B T$  (expresando  $\lambda$  en  $\mu\text{m}$  y  $K_B T$  en eV).

El flujo de fotones generados en la zona activa se radian uniformemente en todas las direcciones, por lo tanto el flujo de fotones en la dirección de emisión del diodo es  $\Phi_0 = \eta_e \Phi = \eta_{ex} I/e$ ; con la eficiencia cuántica externa  $\eta_{ex} = \eta_e \eta_i$ , siendo  $\eta_e$  la eficiencia de transmisión total ( $\eta_{ex} \approx 0.01$ ). La potencia de emisión del LED viene dada por  $P_0 = h\nu\Phi_0 = \eta_{ex} hv I/e$ . La eficiencia cuántica total se define por  $\eta = P_0/I V = \eta_{ex} hv/eV$ , donde  $V$  es el voltaje de caída en el dispositivo. En los diodos reales la potencia de emisión es proporcional a la corriente de inyección únicamente en un rango restringido de valores, para altas corrientes de funcionamiento la sensibilidad disminuye conforme se aumenta la corriente (figura 2). La sensibilidad  $S$  se define como  $S = P_0/I = \eta_{ex} 1.24/\lambda$ ; con  $\lambda$  en  $\mu\text{m}$ . Típicamente, para  $\lambda = 1.24 \mu\text{m}$ ,  $S \approx 10$  a  $50 \mu\text{W}/\text{mA}$ .

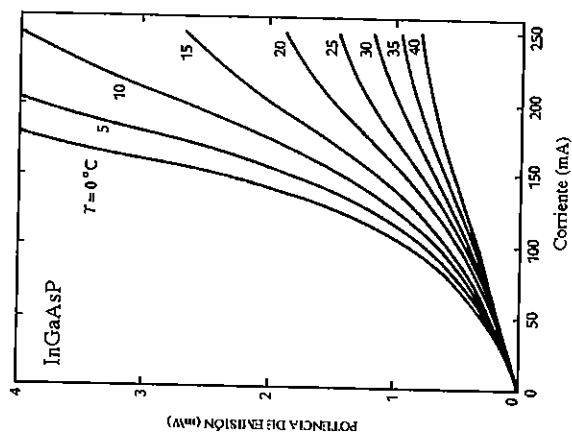


FIGURA 2. Curvas de sensibilidad del LED InGaAsP y su dependencia con la temperatura.

La respuesta temporal de un LED está limitada principalmente por el tiempo medio de recombinación  $\tau$ . Para un bombeo bajo la respuesta es lineal, siendo el tiempo de respuesta de  $\tau$  segundos y su anchura de banda  $B = 1/2\pi\tau$ . Valores típicos de 1 a 50 ns corresponden a anchuras de banda de cientos de MHz.

Los LED pueden operar desde el UV cercano hasta el IR. En el infrarrojo cercano suelen utilizarse semiconductores binarios para su construcción. También suelen usarse compuestos ternarios y cuaternarios, igualmente de gap directo, que presentan la particularidad que su longitud de onda de emisión puede sintonizarse variando su composición. Particularmente importantes son los compuestos ternarios AlGa<sub>1-x</sub>As (0.75 a 0.87  $\mu\text{m}$ ) y cuaternarios In<sub>1-x</sub>Ga<sub>x</sub>As<sub>1-y</sub>P<sub>y</sub> (1.1 a 1.6  $\mu\text{m}$ ). Para longitudes de ondas cortas se usan materiales con gap indirecto (GaN, GaP y GaAs<sub>1-x</sub>P<sub>x</sub>) que suelen doparse para producir centros de recombinación radiativa. Los LED pueden construirse en configuraciones que emiten por la superficie o por el borde de la zona activa, incrementándose en el uso de los primeros por su mayor eficiencia. Se utiliza una geometría de heteroestructuras y doble heteroestructuras.

### Láseres de inyección

Si incidimos con un haz colimado de fotones sobre la zona activa de un diodo fotoemisor, dicho haz será atenuado por absorción y amplificado por emisión estimulada. La variación del número de fotones del haz es

$$d\Phi_\nu(z)/dz = (\lambda^2/8\pi\tau_p)\rho_\nu(v)f_\nu(v)\Phi_\nu(z) = \gamma_\nu(v)\Phi_\nu(z) \quad (7)$$

donde  $f_\nu(v)$  es el factor de inversión de Fermi,  $\rho_\nu(v)$  la densidad espectral de estados de la unión y  $\tau_p$  tiempo de recombinación radiativa. Si  $f_\nu(v)$  es negativo,  $\alpha_\nu(v) = -\gamma_\nu(v)$  es el coeficiente de absorción del medio y el haz de luz es atenuado. Si  $f_\nu(v)$  es positivo, hay inversión de población y  $\gamma_\nu(v)$  se denomina coeficiente de ganancia y la luz es amplificada. Puesto que puede conseguirse una inversión de población completa, el amplificador se comporta como un sistema de cuatro niveles.

El valor máximo del coeficiente de ganancia es  $\gamma_p = \alpha (M_T - 1)$ , donde  $M_T$  es la intensidad de transparencia y  $\alpha$  el coeficiente de absorción. Si queremos construir amplificadores con valores de  $M_T$  bajos deberemos producir zonas activas muy estrechas; lo que induce a construir dispositivos con heteroestructuras.

Un láser de inyección semiconductor es un amplificador introducido en un resonador óptico. Estos resonadores se obtienen normalmente tallando las caras perpendiculares a la unión, presentando un factor de reflexión  $\mathcal{R}$  que depende del índice de refracción del medio ( $\mathcal{R} \approx 30\%$ ). La oscilación láser se consigue cuando la ganancia del medio es superior a las pérdidas logarítmicas totales. Las pérdidas totales por paso de la luz en el resonador vendrán dadas por  $\alpha_t = \alpha_i + \alpha_r$ , siendo  $\alpha_i = (1/2d) \ln(1/\mathcal{R}_0)$  las pérdidas medias de los espejos por transmisión y  $\alpha_r$  son las pérdidas internas, cuyo valor se incrementa con la concentración de impurezas. La difusión de la energía óptica fuera de la zona activa hace necesario la introducción de un factor de confinamiento  $\Gamma$ , de modo que la ganancia de la luz por paso sea  $\Gamma_p$  (el confinamiento de la luz en la zona activa puede conseguirse con heteroestructuras). La condición umbral es  $\Gamma_p = \alpha_t \Rightarrow \Gamma_i = (1 + \alpha_r / \Gamma \alpha)$ , donde  $\Gamma_i$  es la intensidad umbral, los láseres funcionan mejor cuanto menor sea esta intensidad. Los láseres de inyección con un resonador que presente grandes pérdidas, de modo que la corriente umbral sea alta, se llaman LED superluminescentes.

La potencia interna del láser viene dada por  $P = (1.24/\lambda_0)\eta_i(I-I_0)$ , con  $\lambda_0$  en  $\mu\text{m}$ ,  $I$  en amperios y  $P$  en vatios. Su potencia de emisión es  $P_0 = (1.24/\lambda_0)\eta_d(I-I_0)$ , con  $\eta_d = \eta_e \eta_i$ ; donde  $\eta_d$  es la

eficiencia cuántica diferencial externa y  $\eta_e = \alpha_n / \alpha_i$  la eficiencia de emisión a través del espejo de salida. La eficiencia total del láser  $\eta = P_o / IV = \eta_{in}(1 - I_f)hv / eV$ , presenta valores típicos del orden del 50%. La distribución espacial de la luz emitida depende de la forma de los modos transversales, que serán modos de la guía de onda dieléctrica creada por las diferentes capas del diodo semiconductor.

### Características de los emisores fotónicos

El comportamiento dinámico de los láseres de inyección es crítico, especialmente cuando se usan bandas muy anchas en los sistemas de comunicaciones de fibras ópticas. La aplicación de un escalón de intensidad al dispositivo, produce un retardo seguido a menudo por una oscilación de alta frecuencia (del orden de 10 GHz) conocida como oscilación de relajación. En velocidades de datos por encima de 100 Mbits<sup>-1</sup> este comportamiento puede producir serios deterioros en la forma de los pulsos.

Para obtener una velocidad alta en la transmisión de datos por fibras se hace necesario la utilización de láseres monomodo. Para ello se utilizan redes Bragg paralelas a la zona activa (DBR) y estructuras con guías especialmente deformadas que actúan como un reflector distribuido a lo largo de la guía (DFB). Otra alternativa es la utilización de dos cavidades láser alineadas y con dimensiones tales que permitan la oscilación de un único modo, estos son los láseres C<sup>3</sup> (cleaved-coupled-cavity).

Si la zona activa en una doble heteroestructura tiene una energía de la banda prohibida menor que la de las capas que la rodean, la estructura actúa frente a los electrones como un pozo cuántico, lo que modifica el perfil de la densidad de estados y el coeficiente de ganancia. Así actúan los láseres de pozos cuánticos (QW), presentando unos valores típicos de  $I_c = 0.5$  mA y  $P_o \leq 100$  mW. Estos dispositivos pueden conseguir frecuencias de modulación superiores y reducir la influencia de la temperatura en el dispositivo. El uso de estas estructuras apiladas dan lugar a potencias de emisión del orden de 50W. La utilización de regiones activas tan estrechas puede dar lugar a otro importante efecto como son los láseres de capa tensionada. Una geometría con más auge son los láseres que emiten por superficie (VCSEL), que presentan una distribución angular de campo simétrica y por tanto una mayor eficiencia de acoplamiento con una fibra óptica.

Una de las mayores dificultades del uso de los láseres en los sistemas de comunicación para fibras ópticas, es la eficiencia de acoplamiento de la luz emitida por el láser en la fibra. La técnica de sinuar la fibra lo más cerca posible de la superficie de emisión del láser, consigue la máxima potencia que se puede acoplar si el área de la superficie emisora es mayor que el área del núcleo de la fibra, si bien produce reflexiones que se acoplan con el láser generando ruido. Las eficiencias que se consiguen con esta técnica son del 30%. Sin embargo, si el área de la fuente emisora es menor, deberemos colocar entre ella y la fibra lentes minúsculas para mejorar la eficiencia de acoplamiento de potencia, obteniéndose eficiencias hasta del 65%.

Este problema puede obviarse con la construcción de láseres de fibra óptica. Su estructura básica consta de una fibra monomodo cuyo núcleo se ha dopado con tierras raras (neodimio o erbio, generalmente) cuyos extremos finales están enfrentados perpendicularmente a través de factores de reflexión altos. La luz de bombeo puede introducirse longitudinalmente a través de uno de los espejos, que deberá ser transparente para la longitud de onda de bombeo. Igualmente pueden utilizarse espejos todo fibra para hacer el resonador e introducir el bombeo con un acoplador selectivo a la longitud de onda. El láser Er<sup>3+</sup>:vidrio de sílice es el más utilizado, ya que presenta una transición láser muy ensanchada ( $\Delta\nu = 4$  THz) en torno a 1.55  $\mu$ m, que coincide con la

longitud de onda de máxima transparencia para la fibra de sílice. El bombeo se realiza con láseres de inyección de 0.98  $\mu$ m y 1.48  $\mu$ m con unas potencias de algunos milivatios. La potencia umbral de estos láseres depende principalmente de la longitud de la fibra, presentando valores umbrales de 1 a 2 mW y una eficiencia del 50%.

Los dispositivos emisores fotónicos de semiconductores son fuentes convenientes para aplicaciones analógicas de banda ancha. Estos dispositivos suelen usarse con modulación directa de intensidad en torno a un valor fijo de la intensidad de polarización. La modulación debe confinarse en la región lineal de la curva de eficiencia para evitar las distorsiones. La no linealidad del dispositivo creará componentes de frecuencia en la señal de salida que no se encuentra en la entrada. Las dos distorsiones más importantes son la distorsión armónica y la de intermodulación. Las curvas de respuesta en frecuencias para un LED y un láser son totalmente diferentes como muestra la figura 3.

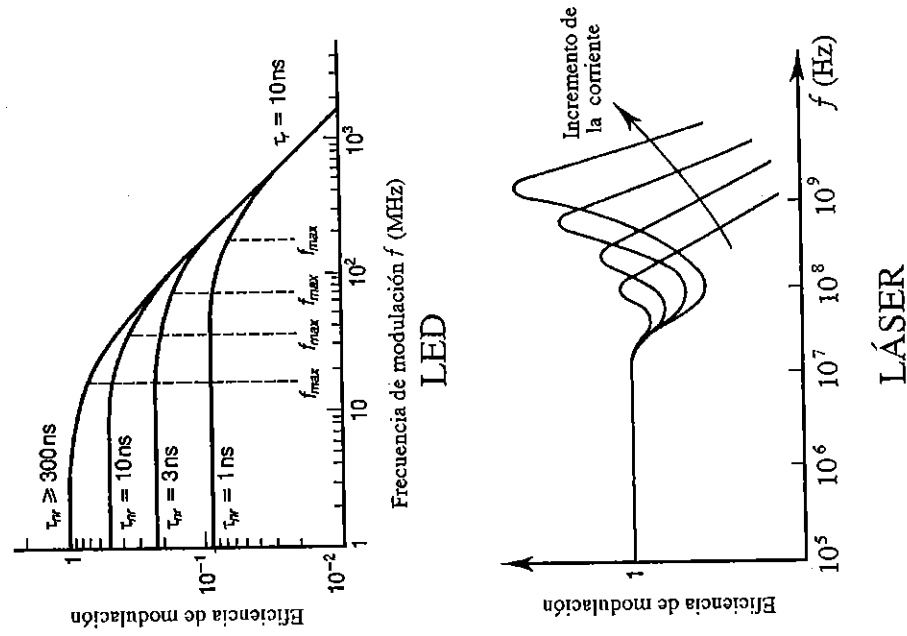


FIGURA 3. Respuesta en frecuencias de un LED y un láser.

### 3. FOTODETECTORES PARA COMUNICACIONES ÓPTICAS

Es conocida la existencia de diferentes técnicas para realizar sistemas de comunicaciones ópticas, y que en todas ellas, en base, están formadas por tres grandes bloques. Los transmisores, los canales, y los receptores ópticos.

La señal analógica o digital, en el dominio eléctrico, en el transmisor se acondiciona, se trata, y, finalmente, modula la portadora óptica. La portadora óptica con la información se transmite a través del canal óptico de transmisión, y tras su viaje (que puede ser muy largo) en el receptor óptico, la información ha de ser detectada y transducida del dominio fotónico al eléctrico. De ello se deduce que, independientemente de la tecnología en la que se base el sistema, al final, siempre se genera la necesidad de detectar la señal fotónica y tratar, convenientemente, la señal eléctrica resultante. Es decir se necesitan dispositivos optoelectrónicos conocidos como detectores, dentro de los equipos receptores. En los temas precedentes se han abordado contenidos que hacen referencia al transmisor y al canal guiado a través de fibra óptica. En este tema y teniendo en cuenta el espacio asignado, se tratarán, brevemente, fundamentos en los que se basan los dispositivos fotodetectores bajo un punto de vista de su utilización en sistemas de comunicaciones ópticas.

#### Conceptos generales sobre fotodetectores

Como es conocido, la interacción de la luz con la materia se produce de acuerdo a la teoría cuántica en paquetes de energía discretos, conocidos como fotones. Es por ello por lo que los procesos de emisión y absorción de la luz por la materia, se efectúan cuánticamente. Es decir, si un átomo puede tener dos niveles de energía permitidos  $E_1$  y  $E_2$ , y recibe un fotón de energía:  $hf = E_2 - E_1$ , puede suceder que un instante después la energía del fotón sea absorbida produciéndose una transición del electrón del nivel inferior al superior. Se diría que el fotón ha sido absorbido. Es, asimismo, conocido que cuando los átomos se «reúnen» para formar los sólidos, interaccionan y los niveles de energía de los átomos aislados se convierten en bandas discretas de energía, posibilitándose absorciones de fotones más energéticos ( $hf \geq E_c$ ) o que inciden con energía superior que la anchura de banda prohibida del material.

En numerosos supuestos interesa «traducir» las señales fotónicas al dominio eléctrico, denominándose a los dispositivos o «ingenios» que realizan esta función fotodetectores. No obstante, de nada serviría un fotodetector si después de «convertir» los fotones en electrones, éstos no son forzados a formar corriente eléctrica; a través, por ejemplo, de un «arrastré» producido por un campo eléctrico. Esto es, surge la necesidad de polarizar el dispositivo, de tal manera que los fotones incidentes que se fotodetecten resultarán arrastrados por el campo eléctrico, originándose una corriente eléctrica  $I_0$ .

$$I_0 = R \cdot P_0 \quad (8)$$

que se sumará a la corriente de polarización  $I_p$  (existente sin radiación luminosa), siendo la constante de proporcionalidad  $R$  una «figura de mérito» del fotodetector, que recibe el nombre de Responsividad que puede escribirse:

$$R = \frac{I_0}{P_0} \cdot \lambda \quad (9)$$

La responsividad de un fotodetector es función de la eficiencia  $\eta$ , y, linealmente dependiente, de la longitud de onda, que presentará un rango de detección cuyo valor máximo se conoce como

longitud de onda de corte debido a que se ha de cumplir que  $h \cdot \frac{c}{\lambda} \geq E_c$ , lo que indica que la energía, vendrá fijada por el ancho de banda prohibida del material fotodetector. Asimismo, se desprende que para optimizar el proceso de detección se ha de conseguir que el «ingenio» detector presente una máxima eficiencia  $\eta$ , que depende de la reflectividad  $\gamma$  en la entrada del mismo, y del coeficiente de absorción óptica del material  $\alpha_n$ , lo que explica que en la entrada de los fotodetectores, se deben situar capas antirreflexivas para tratar de minimizar la reflectividad  $\gamma$ , e interesando que el coeficiente de absorción del material empleado sea lo más grande posible.

De lo anterior se deduce que la selección del material es de vital importancia a la hora de realizar detectores optimizados, y justifica que para sistemas de comunicaciones por fibra óptica, se utilicen detectores realizados con Silicio o AsGa para la primera ventana, y de Ge o de compuestos ternarios, o cuaternarios para las ventanas segunda y tercera.

#### Detectores fotoconductorivos

A pesar de que este tipo de detectores no se utilizaba en sistemas de comunicaciones ópticas desde hace mucho tiempo, fundamentalmente por su poca velocidad, los avances tecnológicos de los últimos tiempos han permitido conseguir características que pueden hacer que se utilicen en lo sucesivo. En la actualidad, anchos de banda de hasta 500 Mhz han sido obtenidos con ganancias inferiores a 100, utilizando substratos fotoconductorivos ternarios a base de AsInGa, lo que supone tiempos de tránsito de algunos picosegundos. Sin embargo, en substratos de Si los tiempos de transición son menores que un  $\mu$ seg, por lo que el ancho de banda se reduce muy significativamente.

#### Diodos fotodetectores semiconductores

La existencia de una corriente de polarización de los fotodetectores conductivos relativamente alta, invitó a buscar soluciones alternativas que, en primera aproximación, se consiguió con uniones PN semiconductoras.

Al polarizar en inverso una unión PN, la corriente de polarización resultante es la inversa de saturación, que es pequeña; la zona de transición se ensancha con la polarización en inverso (lo que mejora la responsividad y sensibilidad), lo que unido al hecho de que los campos intensos habidos en la referida zona mejoran los tiempos de tránsito de los portadores fotogenerados se reduce, permitiendo mayores anchos de banda, explican, en síntesis, sus ventajas sobre fotodetectores fotoconductorivos.

Es conocido que la corriente que circula por un diodo fotodetector se puede escribir, en primera aproximación, según la expresión

$$I_0 = I_s \cdot (e^{\frac{qV}{kT}} - 1) - I_0 \quad (10)$$

en la que  $I_0$  es proporcional a la potencia óptica incidente como se expresó en (8). No obstante, como interesa que las fotogeneraciones se realicen sólo en la zona de transición, tanto para mejorar la eficiencia como para ampliar el rango espectral de la radiación que es detectable, es deseable que la anchura de la zona de carga espacial, se amplíe, sin que ello suponga un aumento de la corriente de polarización. Por estas razones se decidió introducir, entre las zonas P y N, una región intrínseca, lo que supuso el nacimiento de los diodos fotodetectores PIN.

### 3. FOTODETECTORES PARA COMUNICACIONES ÓPTICAS

Es conocida la existencia de diferentes técnicas para realizar sistemas de comunicaciones ópticas, y que en todas ellas, en base, están formadas por tres grandes bloques. Los transmisores, los canales, y los receptores ópticos.

La señal analógica o digital, en el dominio eléctrico, en el transmisor se acondiciona, se trata, y, finalmente, modula la portadora óptica. La portadora óptica con la información se transmite a través del canal óptico de transmisión, y tras su viaje (que puede ser muy largo) en el receptor óptico, la información ha de ser detectada y transducida del dominio fotónico al eléctrico. De ello se deduce que, independientemente de la tecnología en la que se base el sistema, al final, siempre se genera la necesidad de detectar la señal fotónica y tratar, convenientemente, la señal eléctrica resultante. Es decir se necesitan dispositivos optoelectrónicos conocidos como detectores, dentro de los equipos receptores. En los temas precedentes se han abordado contenidos que hacen referencia al transmisor y al canal guiado a través de fibra óptica. En este tema y teniendo en cuenta el espacio asignado, se tratarán, brevemente, fundamentos en los que se basan los dispositivos fotodetectores bajo un punto de vista de su utilización en sistemas de comunicaciones ópticas.

#### Conceptos generales sobre fotodetectores

Como es conocido, la interacción de la luz con la materia se produce de acuerdo a la teoría cuántica en paquetes de energía discretos, conocidos como fotones. Es por ello por lo que los procesos de emisión y absorción de la luz por la materia, se efectúan cuánticamente. Es decir, si un átomo puede tener dos niveles de energía permitidos  $E_1$  y  $E_2$ , y recibe un fotón de energía:  $hf = E_2 - E_1$ , puede suceder que un instante después la energía del fotón sea absorbida produciéndose una transición del electrón del nivel inferior al superior. Se diría que el fotón ha sido absorbido. Es, asimismo, conocido que cuando los átomos se «reúnen» para formar los sólidos, interaccionan y los niveles de energía de los átomos aislados se convierten en bandas discretas de energía, posibilitándose absorciones de fotones más energéticos ( $hf \geq E_0$ ) o que inciden con energía superior que la anchura de banda prohibida del material.

En numerosos supuestos interesa «traducir» las señales fotónicas al dominio eléctrico, denominándose a los dispositivos o «ingenios» que realizan esta función fotodetectores. No obstante, de nada serviría un fotodetector si después de «convertir» los fotones en electrones, éstos no son forzados a formar corriente eléctrica; a través, por ejemplo, de un «arrastré» producido por un campo eléctrico. Esto es, surge la necesidad de polarizar el dispositivo, de tal manera que los fotones incidentes que se fotodetecten resultarán arrastrados por el campo eléctrico, originándose una corriente eléctrica  $I_0$

$$I_0 = R \cdot P_0 \quad (8)$$

que se sumará a la corriente de polarización  $I_p$  (existente sin radiación luminosa), siendo la constante de proporcionalidad  $R$  una «figura de mérito» del fotodetector, que recibe el nombre de Responsividad que puede escribirse:

$$R = \frac{\eta q \cdot \lambda}{hc} \quad (9)$$

La responsividad de un fotodetector es función de la eficiencia  $\eta$ , y, linealmente dependiente, de la longitud de onda, que presentará un rango de detección cuyo valor máximo se conoce como

longitud de onda de corte debido a que se ha de cumplir que  $h \cdot \frac{c}{\lambda} \geq E_0$ , lo que indica que la citada, vendrá fijada por el ancho de banda prohibida del material fotodetector. Asimismo, se desprende que para optimizar el proceso de detección se ha de conseguir que el «ingenio» detector presente una máxima eficiencia  $\eta$ , que depende de la reflectividad  $\gamma$  en la entrada del mismo, y del coeficiente de absorción óptica del material  $\alpha_p$ , lo que explica que en la entrada de los fotodetectores, se deben situar capas antirreflexivas para tratar de minimizar la reflectividad  $\gamma$ , e interesando que el coeficiente de absorción del material empleado sea lo más grande posible.

De lo anterior se deduce que la selección del material es de vital importancia a la hora de realizar detectores optimizados, y justifica que para sistemas de comunicaciones por fibra óptica, se utilicen detectores realizados con Silicio o AsGa para la primera ventana, y de Ge o de compuestos ternarios, o cuaternarios para las ventanas segunda y tercera.

#### Detectores fotoconductorivos

A pesar de que este tipo de detectores no se utilizaba en sistemas de comunicaciones ópticas desde hace mucho tiempo, fundamentalmente por su poca velocidad, los avances tecnológicos de los últimos tiempos han permitido conseguir características que pueden hacer que se utilicen en lo sucesivo. En la actualidad, anchos de banda de hasta 500 Mhz han sido obtenidos con ganancias inferiores a 100, utilizando substratos fotoconductorivos ternarios a base de AsInGa, lo que supone tiempos de tránsito de algunos picosegundos. Sin embargo, en substratos de Si los tiempos de transición son menores que un  $\mu$ seg, por lo que el ancho de banda se reduce muy significativamente.

#### Diodos fotodetectores semiconductorivos

La existencia de una corriente de polarización de los fotodetectores conductorivos relativamente alta, invitó a buscar soluciones alternativas que, en primera aproximación, se consiguió con uniones PN semiconductorivas.

Al polarizar en inverso una unión PN, la corriente de polarización resultante es la inversa de saturación, que es pequeña; la zona de transición se ensancha con la polarización en inverso (lo que mejora la responsividad y sensibilidad), lo que unido al hecho de que los campos intensos habidos en la referida zona mejoran los tiempos de tránsito de los portadores fotogenerados se reduce, permitiendo mayores anchos de banda, explican, en síntesis, sus ventajas sobre fotodetectores fotoconductorivos.

Es conocido que la corriente que circula por un diodo fotodetector se puede escribir, en primera aproximación, según la expresión

$$I_0 = I_s \cdot (e^{\frac{qV}{kT}} - 1) - I_0 \quad (10)$$

en la que  $I_0$  es proporcional a la potencia óptica incidente como se expresó en (8). No obstante, como interesa que las fotogeneraciones se realicen sólo en la zona de transición, tanto para mejorar la eficiencia como para ampliar el rango espectral de la radiación que es detectable, es deseable que la anchura de la zona de carga espacial, se amplíe, sin que ello suponga un aumento de la corriente de polarización. Por estas razones se decidió introducir, entre las zonas P y N, una región intrínseca, lo que supuso el nacimiento de los diodos fotodetectores PIN.

Las estructuras de los diodos PIN presentan anchuras de la zona de transición fuertemente ensanchadas como consecuencia de la introducción del material intrínseco y fuertes dopados de las zonas P y N lo que origina respecto de la estructura anterior:

- a) Un campo eléctrico mayor en la zona de transición.
- b) Como consecuencia de los fuertes dopados, se reducen las concentraciones de minoritarios, y, consecuentemente, la corriente inversa de saturación o de polarización.

Lo que, en definitiva, contribuye a ofrecer las ventajas de tener mayores rangos espectrales de fotodetección; un menor porcentaje de fotodetecciones en zonas neutras; una mayor sensibilidad y eficiencia y, finalmente, una mayor velocidad, íntimamente relacionada con el ancho de banda del dispositivo.

Al analizar este último parámetro, se desprende, que al depender la respuesta temporal de la corriente fotodetectada de los tiempos de tránsito de sus portadores, que la corriente citada fluye en una estructura que presenta, intrínsecamente, una capacidad de transición, y a través de las resistencias de las zonas neutras que no son despreciables, y que en definitiva, para realizar el dispositivo, éste se ha tenido que introducir en una cápsula, que, finalmente, para que funcione, se ha tenido que polarizar externamente, se puede interpretar que la respuesta global del fotodetector es equivalente a una cascada de dos subsistemas: el intrínseco de fotodetección, y el que considera los efectos, no deseados, mencionados anteriormente. Todo ello se sintetiza en la figura 4, de la que se deduce que como la corriente eléctrica fotodetectada  $I_e(f)$  fluye a través de la impedancia equivalente de  $Z(f)$ , se puede escribir:

$$\frac{V_s(f)}{V_s(o)} = \frac{I_e(f)}{I_e(o)} \cdot \frac{Z(f)}{Z(o)} = \frac{1}{1 + j\omega k_1 t_1} \cdot \frac{1}{1 + j\omega t} \quad (11)$$

De la que se deduce que aparecen dos «posibles» frecuencias de corte, una propia del proceso de fotodetección dependiente de los tiempos de transición ( $\omega_{ct} = \frac{1}{k_1 t_1}$ ) que es limitada por el tiempo

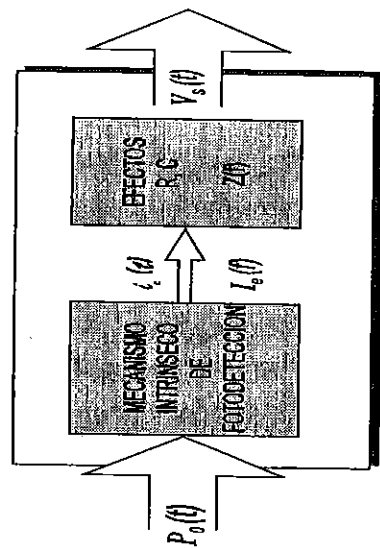


FIGURA 4. Subsistemas en fotodetectores.

de transición más lento, y la segunda, que es inherente a la red RC adicional ( $\omega_{ct} = \frac{1}{RC}$ ). De todo ello, se desprende que dependiendo de sus valores relativos, el ancho de banda a 3 dB quedará limitado por una o por la otra o por el compuesto de ambas.

Diodos fotodetectores APD

En el apartado anterior, se ha visto que los PIN presentan importantes ventajas respecto de los fotodiodos de unión PN simple y sobre los fotoconductores, pero sin embargo, no presentan ganancia, lo que dio lugar a la idea de modificar la estructura de un PIN para conseguir un efecto de ganancia a través de un efecto de avalancha. Es este efecto lo que originó el diodo fotodetector APD.

El funcionamiento de la estructura es similar al de un PIN pero con la diferencia de que cuando los portadores fotogenerados en la zona intrínseca se introducen en la zona PN<sup>+</sup>, se encuentran con un campo eléctrico intenso y se origina un efecto de avalancha, que introduce un efecto multiplicador M, ampliando M veces la responsividad ( $R_{APD} = M \cdot R_{PIN}$ ) y, consecuentemente, produce una ganancia.

Este factor multiplicador depende de los coeficientes de ionización por impacto de electrones y huecos,  $\alpha_n$ ,  $\alpha_p$ , respectivamente, (que son función del material, del campo eléctrico y de la temperatura), y de la relación entre ellos. Estudios complejos de la mencionada dependencia indican que si la avalancha se origina por un solo tipo de portador, esta puede ser controlada con más precisión a costa de tener que utilizar fuentes de alimentación de mayor tensión de salida. Sin embargo, si ambos coeficientes de ionización  $\alpha_n$  y  $\alpha_p$  son similares y suficientemente grandes, se puede entrar en un proceso de avalancha que puede automatizarse, tendiendo en estos supuestos, el factor multiplicador hacia el infinito, situación no deseable y ruidosa. Este fenómeno produciría el conocido efecto de tensión de ruptura de una unión PN inversamente polarizada ( $V_{RG}$ ).

El factor multiplicador, conjuntamente con el tiempo efectivo de transición de la zona de avalancha influye inversamente en el ancho banda que a 3 dB pudiéndose dar el caso de que si la avalancha se produce, fundamentalmente, por un tipo de portador cuyo tiempo de tránsito es  $\tau_c$  su relación con el ancho de banda se puede aproximar por la expresión

$$2\pi \cdot \Delta f_{3dB} \cdot \tau_c \approx 2 \quad (12)$$

que es muy socorrida para diseños no muy precisos.

Ruidos en fotodetectores

En el proceso de fotodetección junto con los electrones que «siguen» la señal fotónica incidente, aparecen otros que, en definitiva, integran una señal de ruido. En la figura 5 se pretende ilustrar las causas que contribuyen a introducir «ruido» a la señal deseada. Como el modelo generalizado de diodos fotodetectores se puede considerar formado por los fenómenos que ocurren en los procesos de fotodetección propiamente dichos y, si se tiene proceso multiplicador por avalancha, hay que añadirle los efectos que ésta introduce, es posible considerar que en el proceso de fotodetección pueden aparecer los siguientes tipos de ruido:

- a) Ruido de fondo: Debido a que junto con la señal óptica deseada, puede incidir otra no deseada o de fondo, que el fotodetector trata como deseada, dando lugar a una corriente eléctrica media de valor  $I_{of}$  siendo en realidad un ruido, por presentar una componente aleatoria  $i_{of}$



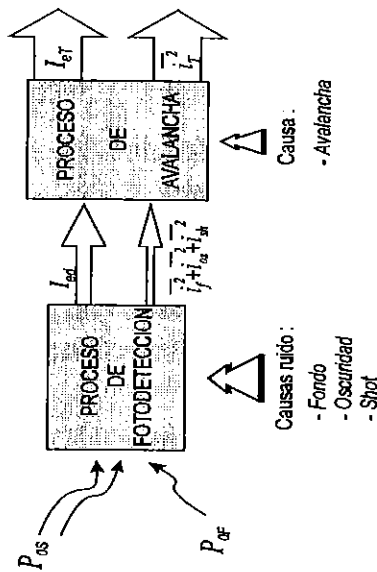


FIGURA 5. Factores que introducen ruido en el proceso de fotodetección.

- b) Ruido de oscuridad: Si no existe radiación óptica incidente alguna, la corriente en la salida del fotodetector será su corriente de polarización,  $I_p$ , que en realidad es la corriente inversa de saturación, que representa una componente alterna  $i_{os}$  aleatoria.
- c) Ruido shot o de disparo: Debido a que la fotogeneración es cuántica, en torno al valor de fotones detectados que corresponden a la señal óptica de valor medio  $I_p$ , con una variación aleatoria que constituye la señal de ruido  $i_{sa}$ .

Los tres ruidos mencionados pueden interpretarse como ruidos de disparo siendo sus valores cuadráticos medios proporcionales al valor medio de la corriente fotodetectada y al ancho de banda considerado, lo que unido a su naturaleza aleatoria, hace que si se producen conjuntamente, se sumen en potencia lo que puede expresarse:

$$I_{rt}^2 = I_{of}^2 + I_{os}^2 + I_{sa}^2 = 2 \cdot q \cdot B \cdot (I_{of} + I_p + I_{os}) = 2 \cdot q \cdot B \cdot I_T \quad (13)$$

Con el ánimo de generalizar se admite que en un APD, este ruido penetra en la zona de avalancha, produciéndose un exceso de ruido que se refleja mediante su factor F, resultando el ruido total a la salida del detector:

$$I_{rt}^2 = 2 \cdot q \cdot B \cdot I_T \cdot M^2 \cdot F \quad (14)$$

expresión que puede considerarse como general de un detector, particularizándola para un PIN haciendo  $M = 1$  y  $F = 1$ . Como el factor, en exceso, de ruido F es dependiente del factor multiplicador M y de los coeficientes de ionización, se puede deducir que el valor de ruido más bajo se consigue cuando la ionización por avalancha se realiza por un sólo tipo de portador.

### Resumen y conclusiones

De lo anterior se concluye que los detectores fotoconductivos pueden ser utilizados si no se requieren altas velocidades y/o altos anchos de banda. Sin embargo, su sensibilidad y velocidad pueden ser mejoradas con fotodetectores de unión PN, PIN o APD. En general, los APD presentan sensibilidades superiores que los PIN, (cifrada entre 5-17 dB) así como mayor rango dinámico. No obstante los APD son dispositivos más complicados de fabricar, lo que redunda en su mayor

costo, pueden presentar más ruido —como consecuencia de la naturaleza aleatoria del efecto de avalancha— lo que implica la necesidad de fuentes de alimentación mucho más precisas, con menos ruido y con tensiones de alimentación más altas (entre 40 y 400 V.) y, además, presentan dependencia de la ganancia con la temperatura, lo que añade la necesidad de su estabilización.

Todo ello induce a pensar que siempre que sea posible técnicamente, se deben seleccionar fotodetectores PIN, para los receptores de sistemas de comunicaciones ópticas, salvo que necesi- dades técnicas relacionadas con sensibilidades altas, justifiquen la complejidad técnica y el mayor costo de la utilización de APD.

### 4. DISPOSITIVOS ÓPTICOS PASIVOS

El conjunto de dispositivos ópticos pasivos es muy extenso, tanto por la variedad de configura- ciones posibles como por los fundamentos físicos subyacentes en cada familia de dispositivos. Nuestro estudio tiene que limitarse a una parte de ellos, necesariamente. Hemos reducido nuestro campo a los dispositivos pasivos de fibra óptica [9,10] y, entre ellos, a los dispositivos que se fundamentan en el acoplo entre modos de la estructura guiadora. Esta elección nos conduce a una familia de dispositivos de diseño muy flexible, con múltiples aplicaciones y que se emplean de forma habitual. Esta familia de dispositivos crece y se diversifica continuamente, y son muchas las posibilidades nuevas que se están desarrollando actualmente.

Así pues, nos vamos a referir a dispositivos tales como los divisores de potencia, separadores y filtros de longitud de onda, separadores y filtros de polarización, moduladores, conmutadores, atenuadores, etc. Todos ellos fundamentados en el acoplo entre modos de fibras distintas o modos de una sola fibra, y por tanto sus propiedades pueden describirse mediante la teoría de modos acoplados. Esta teoría tiene un carácter muy general y nos permitirá comprender el fundamento de los distintos dispositivos, así como prever el comportamiento que presentarán cuando se precise extender su empleo fuera de las condiciones nominales de su diseño.

Cabe mencionar en esta introducción que el interés en fabricar y emplear dispositivos de fibra óptica es múltiple. Por una parte reduce las pérdidas de potencia asociadas a la inserción del dispositivo y, por otra parte, son dispositivos robustos que pueden soportar densidades de energía relativamente elevadas.

### Teoría de modos acoplados

Sea un sistema de transmisión sin pérdidas formado por dos fibras monomodo (también podría tratarse del caso de la propagación de dos modos en la misma fibra), cuyos modos representare- mos mediante las amplitudes complejas  $a_1(z) = A_1 \exp(-i\beta_1 z)$  y  $a_2(z) = A_2 \exp(-i\beta_2 z)$ . Hablaremos de sistema débilmente acoplado en el caso de que la propagación de los modos en cada fibra se vea perturbada ligeramente por la presencia de la otra. En este caso, la variación de la amplitud compleja de un modo a lo largo del sistema, o sea con z, presentará una pequeña dependencia con la amplitud del otro modo:

$$\frac{da_1(z)}{dz} = -i\beta_1 a_1(z) + ik_{12} a_2(z) \quad (15)$$

$$\frac{da_2(z)}{dz} = -i\beta_2 a_2(z) + ik_{21} a_1(z)$$

donde  $k_{12}$  y  $k_{21}$  son los coeficientes de acoplo. Estas ecuaciones conllevan que las amplitudes  $A_1$  y  $A_2$  pasen a ser función de z, reflejando el trasvase de potencia entre los modos.

La teoría de modos acoplados permite una evaluación teórica de los coeficientes de acoplamiento  $k_{pq}$  introducidos en las ecuaciones anteriores, mediante expresiones del tipo:

$$k_{pq} = -(\omega \epsilon_0 / 4) \int (n^2(x,y) - n_q^2(x,y)) E_y^{(p)} E_y^{(q)} dx dy \quad (16)$$

donde la integración se extiende a toda la sección transversal del sistema y donde  $n_q(x,y)$  y  $n(x,y)$  son los índices de refracción que definen a la guía  $q$  y al sistema acoplado resultante, y  $E_y^{(p)}$  y  $E_y^{(q)}$  son los campos normalizados de los modos de las guías  $p$  y  $q$ .

La conservación de la energía implica  $k_{21} = k_{12}^*$ , y en el caso de coeficientes de acoplamiento reales:  $k_{21} = k_{12} = k$ . El sistema acoplado constituye un sistema de transmisión cuyos modos serán las soluciones de las ecuaciones (15) con factor de propagación  $\gamma$ ,  $a(z) = A \exp(-i\gamma z)$ . La ecuación que determina los valores de  $\gamma$  se reduce a  $(\beta_1 - \gamma)(\beta_2 - \gamma) = k^2$ , resultando dos soluciones,  $\gamma = \beta_a$  y  $\gamma = \beta_b$ .

El dispositivo fundamental es el acoplador 2x2 construido con dos fibras idénticas. En este caso los factores de propagación del sistema acoplado resultan ser  $\beta_{ab} = \beta_1 \pm k$ , y las amplitudes:

$$a_1(z) = [a_{10} \cos(kz) + i a_{20} \sin(kz)] \exp(-i\beta_1 z) \quad (17)$$

$$a_2(z) = [i a_{10} \sin(kz) + a_{20} \cos(kz)] \exp(-i\beta_1 z)$$

siendo  $a_{10}$  y  $a_{20}$  las amplitudes de los modos en  $z=0$ , donde podemos suponer que se inicia el acoplamiento. Si la región de acoplamiento tiene una longitud  $L$ , las amplitudes en la salida,  $z=L$ , pueden expresarse de forma matricial:

$$\begin{pmatrix} a_1(L) \\ a_2(L) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha & i\beta \\ i\beta & \alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_{10} \\ a_{20} \end{pmatrix} \quad (18)$$

siendo  $\alpha = \cos(kL)$  y  $\beta = \sin(kL)$  los llamados coeficientes característicos del acoplador.

### Técnicas de fabricación

Las distintas técnicas de fabricación de acopladores de fibra óptica tienen como objetivo conseguir acoplar dos o más modos de fibras ópticas distintas o de una misma fibra, con coeficientes de acoplamiento significativos y controlados.

En primer lugar, nos centraremos en el caso del acoplamiento entre dos fibras. En esencia se ha de conseguir que los campos de una fibra interactúen con los de la otra y para ello se emplean fundamentalmente dos técnicas, que dan lugar a los dispositivos de fibra pulida y a los dispositivos de fibra fundida (figura 6). Los dispositivos de fibra pulida se fundamentan en eliminar una parte sustancial de la cubierta, puliendo lateralmente las fibras. La unión de dos bloques pulidos simétricamente sitúa los corazones de las fibras a distancias de varias micras, lo que da lugar al acoplamiento deseado. Los dispositivos de fibra fundida se fundamentan en ahusar las fibras mediante un proceso combinado de fusión y estiramiento. Esta reducción de las dimensiones de la fibra conlleva una transformación modal: los campos ligados al corazón en una fibra normal ahora se extienden por la cubierta. Con ello se consigue el acoplamiento entre las dos fibras, que además tienen sus corazones relativamente próximos en la zona fundida.

En segundo lugar, consideraremos el caso de los dispositivos fundamentados en el acoplamiento entre modos de una misma fibra. En este caso la técnica más versátil consiste en grabar una modulación del índice de refracción a lo largo del eje longitudinal de la fibra, lo que constituye una red de fase. Para ello se emplean fibras especiales fotosensibles, en las que la modulación del índice se graba mediante luz ultravioleta. El acoplamiento entre modos generado en estos dispositivos

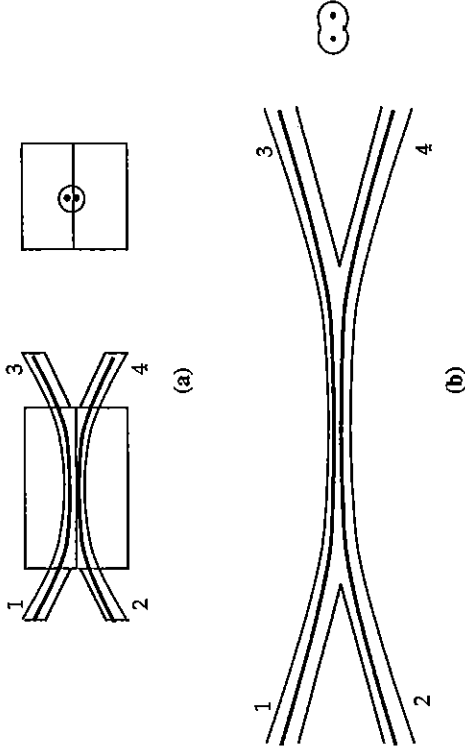


FIGURA 6. Esquema de las secciones longitudinal y transversal de un acoplador de fibra pulida (a) y de un acoplador de fibra fundida (b).

puede describirse mediante el fenómeno de dispersión de Bragg, en donde la periodicidad espacial de la red determina la diferencia del factor de fase entre los modos acoplados.

### Aplicaciones

La ecuación (18) nos describe un acoplador 2x2. Este dispositivo constituye un divisor de potencia, de acuerdo con:

$$\alpha^2 = \frac{P_3}{P_3 + P_4} \quad \beta^2 = \frac{P_4}{P_3 + P_4} \quad (19)$$

Los divisores de potencia NxN pueden construirse combinando acopladores 2x2, o bien, en el caso de emplear la técnica de fibra fundida, fundiendo 3 o más fibras.

El coeficiente de acoplamiento entre dos fibras, ecuación (16), es función de la longitud de onda. En algunos casos se desea minimizar esa dependencia con  $\lambda$ , pero en otros casos puede aprovecharse para conseguir que dos longitudes de onda  $\lambda_1$  y  $\lambda_2$  presenten coeficientes de acoplamiento  $\alpha_1=0$  y  $\alpha_2=1$ . Con ello el acoplador se comportará como un separador/combinador de longitudes de onda  $\lambda_1$  y  $\lambda_2$  (figura 7).

Análogamente, dos polarizaciones ortogonales presentarán coeficientes de acoplamiento distintos y puede conseguirse que sus coeficientes de acoplamiento sean 0 y 1. Consecuente, con ello, diseñar dispositivos separadores/combinadores de polarizaciones ortogonales.

Debemos destacar, en este apartado, las aplicaciones de los dispositivos fabricados mediante la grabación de una red de fase en la propia fibra óptica. Estos dispositivos constituyen de forma natural filtros en longitud de onda de características únicas. Las redes de período corto pueden diseñarse para definir un filtro muy selectivo en reflexión, mientras que las redes de período largo pueden definir filtros de transmisión estrechos. Estos dispositivos pueden fabricarse con período y amplitud de modulación no constantes, lo que permite diseñar filtros de anchura controlada y lo

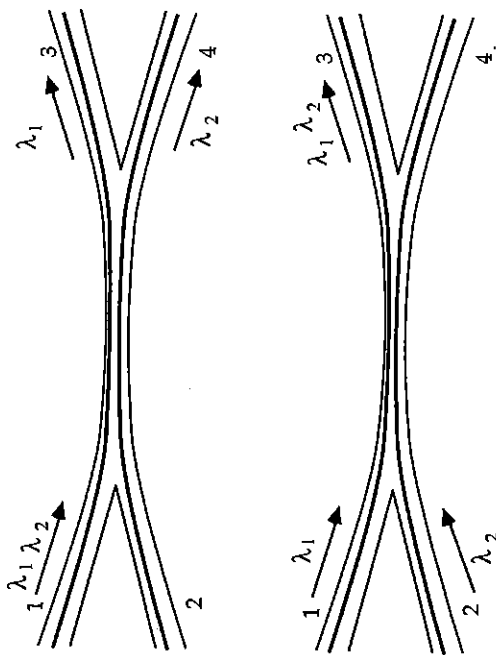


FIGURA 7. Esquema de funcionamiento de un separador/combinador de dos longitudes de onda  $\lambda_1$  y  $\lambda_2$ .

que es, si cabe, más importante dispositivos cuyo retardo varía con la longitud de onda, esto es dispositivos de dispersión controlada.

La combinación de los componentes descritos anteriormente, acopladores y redes de fase, permite diseñar sistemas de fibra óptica de forma muy flexible. Fácilmente podemos pensar en el montaje de pequeños interferómetros Mach-Zehnder, Michelson, Fabry-Perot y en anillo. Con ellos se diseñan moduladores, conmutadores y atenuadores.

La fibra óptica permite introducir con precisión retardos temporales entre señales distintas (aproximadamente 5 ns/m). Esta idea tan simple, combinada con divisores de potencia en sistemas no interferométricos, permite aplicar las técnicas existentes de diseño de filtros de radiofrecuencia y microondas para producir filtros en los que una portadora óptica se modula en amplitud con la señal de radiofrecuencia.

Tal vez debamos finalizar este apartado mencionando la existencia de dispositivos en los que existe un gran interés en poder fabricarlos en tecnología de fibra óptica y que, sin embargo, sólo se pueden construir mediante el empleo de componentes discretos. Podemos mencionar dispositivos fundamentados en los efectos electroópticos y magnetoópticos, como los aisladores ópticos que resultan imprescindibles en cualquier aplicación optoelectrónica.

## 5. TECNOLOGÍA DE FIBRAS Y CABLES

### Fibra óptica: Fabricación y materiales

El material dieléctrico necesario en la fabricación de fibra para comunicaciones debe cumplir: transparencia a las longitudes de onda de trabajo, estabilidad química, facilidad de procesado y buenas características mecánicas. El material principal es sílice ( $\text{SiO}_2$ ) puro o dopado, también se fabrica FO de vidrios multicomponentes, y en las comunicaciones intra-edificios se espera utilizar fibras poliméricas (PolieStireno, PoliMetilMetAcrilato) o de sílice/silicona.

La fibra de vidrio multicomponentes se obtiene a partir de óxidos y carbonatos de elevada pureza, por fusión en crisoles de sílice pura y atmósfera sin contaminación. Posteriormente, las barras de los vidrios base se funden en un doble crisol formado por dos contenedores cilíndricos muy concéntricos, cuya parte inferior es cónica con un orificio de salida. El contenedor interno proporciona vidrio para el núcleo y el externo para el revestimiento. Controlando la zona de contacto de los vidrios se obtienen fibras de salto de índice, y si las barras contienen los dopantes se produce una difusión de iones que permite obtener el índice gradual.

La fibra de silicio dopada se obtiene principalmente por métodos de deposición de vapor: deposición química de vapor CVD, deposición interna de vapor IVD, deposición externa OVD, y deposición axial VAD. En el principal procedimiento, CVD, el  $\text{SiO}_2$  y los óxidos de los dopantes se sintetizan por oxidación a alta temperatura T. Los haluros de elevada pureza de los elementos deseados, localizados en la zona de alta T, se vaporizan en presencia de oxígeno muy puro dando lugar a finísimo polvo de óxido que se deposita en el sustrato, y que por calentamiento se transforma en un sólido poroso que formará posteriormente la preforma. Los dopantes más utilizados son: Ge y B. Hay dos métodos de deposición: interna y externa. En la Interna, inicialmente se depositan las finas capas de  $\text{SiO}_2$  en el interior de un tubo de silicio de buenas características geométricas formándose una barrera que previene la contaminación. Ciertas modificaciones en la T y presiones del vapor dan lugar al denominado MCVD (modified CVD). Otra variante, en el que las reacciones se estimulan en un plasma no isotermo, es la deposición por plasma activado (PCVD). En la deposición externa el polvo se deposita en el exterior de un cilindro de grafito o sílice (sustrato). Los vapores se expulsan desde un quemador que se mueve axial y longitudinalmente al sustrato. La concentración de dopantes puede variarse en cada una de las capas depositadas. Posteriormente, tras extraer el sustrato, se consolida la preforma en un horno a alta T. En la variante denominada de deposición axial VAD, el quemador-expulsor está fijo, y la preforma porosa crece en dirección axial.

De la preforma, de unos 20-30mm de diámetro y aproximadamente 1m de longitud, las fibras se obtienen mediante el estirado hasta casi un centenar de km. de FO monomodo, cuyo perfil de índice es análogo al de la preforma original. En la misma columna de estirado se aplica el recubrimiento con espesor del orden de micras, para evitar deterioros ambientales en la superficie de la FO, pérdida de propiedades mecánicas, o daños por su manipulación posterior.

### Los cables de fibra óptica

Las propiedades mecánicas de la FO obtenida tras el estirado no le permiten ser utilizada directamente. Las aplicaciones pueden requerir entre una y mas de mil fibras, habrá que reunir las y organizarlas dentro de una estructura o cable, cuya instalación puede ser muy diversa: bajo tierra, bajo agua, aérea, y en interiores. Sobre la FO recubierta, y para confeccionar el cable, es obligado el proceso de protección secundaria, tras el cual las fibras se organizan en unidades para formar el núcleo del cable. Por último, una serie de cubiertas ópticas de la FO y confiere propiedades mecánicas para su instalación y vida operativa no inferior a 40 años.

Los Parámetros de diseño del cable dependen de varios factores relacionados con las propiedades de la FO. Uno es la sensibilidad a las curvaturas, la FO curvada incrementa su atenuación por radiación hacia el exterior, atenuación inapreciable hasta los 60 ó 100mm de radio de curvatura Rc para 1310 ó 1550 nm respectivamente, y que varía exponencialmente con Rc a partir de ese Rc crítico. Además de las macrocurvaturas, pueden aparecer microcurvaturas, debidas a esfuerzos laterales a lo largo de la FO, irregularidades de fabricación, cambios dimensionales en proteccio-

nes por temperatura, etc., que provocan una fuerza radial inversamente proporcional al radio de curvatura, y directamente al módulo de Young y al momento de inercia de la FO. La atenuación por microcurvaturas, depende de su periodicidad y de su amplitud. Para reducir la sensibilidad a curvaturas se modifican: diámetro del revestimiento de la FO, paso de cableado o radio de curvatura continuo por cableado, módulo elástico y espesores de recubrimiento y protección secundaria, y la tensión residual en la FO pos fabricación/instalación. Otros factores son la resistencia mecánica de la FO y su fatiga estática en el cable instalado. La resistencia de la FO con protección primaria, 30 a 50 N/mm<sup>2</sup>, se aleja del teórico 350N/mm<sup>2</sup>, por la aparición de microfisuras en el revestimiento. La probabilidad de rotura aumenta exponencialmente con la tracción y su resistencia disminuye con la longitud. La vida útil, o tiempo a rotura, depende de la tensión y permanente a que está sometida la FO. Si esta tensión es inferior al 20% de la resistencia inicial, el efecto de la fatiga estática es despreciable, pero al superar el 30%, la vida útil será de días. Por último, el coeficiente de dilatación de la FO es del orden de 10<sup>-6</sup>, y en los termoplásticos de protecciones de 10<sup>-4</sup>. Es necesario compensar la diferencia para lograr una ventana térmica de operación del cable no inferior a 100°C.

Existen dos estructuras para el núcleo del cable: una basada en la casi total eliminación de los esfuerzos externos sobre la FO, estructura holgada, y otra que intenta minimizar los efectos mecánicos utilizando materiales amortiguadores, estructura ajustada. Se elige una u otra estructura así como el tipo de cubierta, dependiendo de la instalación del cable. Los distintos protecciones secundarias PS pueden verse en las figuras 8, 9 y 10. Tanto en la ajustada como en las cintas, es crítico el tipo de material como su aplicación por estar en contacto directo con la FO. La PS ajustada admite una cubierta simple de hilaturas de aramida (tracción) y termoplástico para formar cables monofibra o bifibra de interior (Fig. 11), típicos en conexión de equipos. Los cables que requieren instalación necesitan una estructura mas compleja con elementos de refuerzo (Fig. 12). Las fibras con PS ajustada se cablean en torno al refuerzo central metálico o dieléctrico, la PS holgada permite además por sí misma constituir el núcleo del cable. Las cintas se cablean sobre un elemento ranurado (Fig. 13), o bien se protegen mediante tubo holgado para ser cableadas o constituir el núcleo del cable. La estructura del cable puede tener refuerzo central (Figs. 12 y 13) o exterior en cubierta, o bien en ambos. Las fibras deben ser cableadas, dispuestas en hélice, para

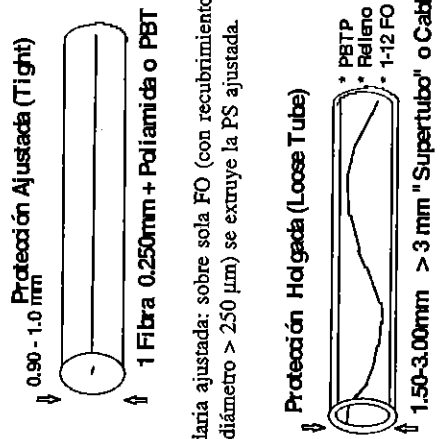


FIGURA 8. Protección secundaria ajustada: sobre sola FO (con recubrimiento primario, coloreado o no, de acrilato-multicapa y con un diámetro > 250 µm) se extruye la PS ajustada.

FIGURA 9. PS holgada: sobre múltiples fibras o cintas se extruye el tubo a la vez que se aplica el relleno o gel tixotrópico, hidrófugo, donde la FO con sobre-exceso «flota».

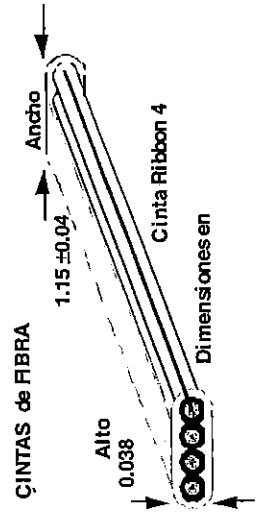


FIGURA 10. Cinta o matriz de FO: el array lineal de 2 a 16 FO se envuelve con una capa de acrilato similar al del recubrimiento primario. Las FO se manejan por paquetes.

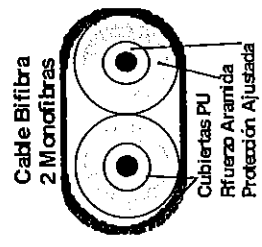
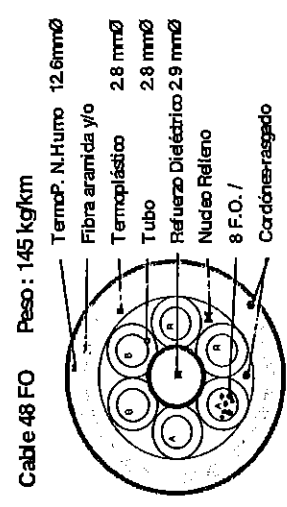


FIGURA 11. Cable de interior o de interconexión, compuesto por dos cordones monofibra paralelos.



Cubiertas: PKP, PKCP, PESP, PKESP

FIGURA 12. Cable holgado de exterior. Instalación bajo ductos, enterrado, aéreo. Con cubierta externa ignífuga es válido para interiores.

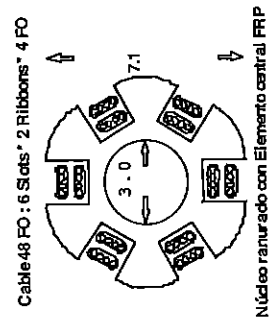


FIGURA 13. Núcleo de cable de cintas con canales rectangulares en hélice, permite elevar la densidad de fibras en el cable.

que el cable pueda ser flectado sin afectar a la FO. Los refuerzos han evolucionado desde el acero a los composites (fibras de vidrio con resinas epoxi), o a las fibras aramida, material dieléctrico con módulo elástico cercano al del acero y relación módulo/peso mucho menor. Los composites, al igual que el acero, por su bajo coef. de dilatación ayudan a compensar térmicamente el cable, las aramidas, con coef. negativo de dilatación, requieren mayor precaución en el diseño. Dentro del núcleo existen otros elementos, destinados a barrera térmica, protección contra ingreso/propagación de agua y humedad, y no generación o evacuación de Hidrógeno.

### Métodos de conexión

La conexión óptica de la FO puede ser de tipo permanente, empalmes por fusión, pegado, o por procedimientos mecánicos, o bien de tipo temporal, conectores ópticos, y empalmes de baja reutilización en base a manguitos elastoméricos o rígidos.

En la conexión de dos FO aparecen pérdidas de potencia. Las pérdidas extrínsecas, asociadas exclusivamente a la conexión, se deben al desalineamiento angular y lateral (o error de concentricidad del núcleo), y a la separación entre las FO. Factores suficientes en el caso de conectores con terminación o pulido de las superficies enfrentadas, a los que hay que añadir, en el caso de los empalmes, posibles defectos originados por el corte. Las pérdidas intrínsecas, son debidas a la inevitable distinta naturaleza de las FO a conectar (lote, método de fabricación, tolerancias), y a las pérdidas de retorno originadas por reflexiones (Fresnel) en las caras enfrentadas. En el caso ideal de contacto físico estas últimas pérdidas serían nulas. En la práctica es aconsejable una separación de superficies en torno a 5µm para evitar problemas mecánicos, siendo posible con esto obtener valores cercanos a los -60dB para las pérdidas de retorno mediante pulido convexo, que pueden mejorarse optimizando el ángulo pulido de las superficies en torno a 8-9° (1310nm) o 12° (1550nm), es el caso de los conectores angulares o APC angular physical contact.

En el empalme por fusión la calidad de la soldadura depende en gran grado de la calidad del corte de los extremos a soldar. El corte ha de ser perpendicular, completamente plano y liso. La prefusión y fusión se realizan mediante arco voltaico controlando corriente y tiempos. Previo posicionamiento, alineación en 2D, y estimación de pérdidas, se obtiene pérdidas inferiores a 0.1 ó 0.2 dB, según tipo de FO, y pérdidas de retorno prácticamente despreciables en FO monomodo.

Los conectores ópticos o conexión desmontable de alta repetibilidad, o bajas pérdidas tras cientos de ciclos de conexión/desconexión, se caracteriza por sus pérdidas de inserción, pérdidas de retorno, y por la calidad mecánica de la unión. La conexión es siempre mediante conectores macho y una doble hembra o guía de enfrentamiento (sleeve). El conector consta de un conjunto de piezas: casquillo (ferrule), cuerpo del conector (housing), manguito, elementos de retención, etc., que se fijan en los extremos del cable o fibras a conectar. El cuerpo determina el tipo o nombre que lo identifica: SMA, ST, FC, SC. Las tendencias son: no utilización de medio de adaptación, alineamiento mediante ferrule cerámica y cilíndrica 2.5 mm de diámetro (una FO) con orificio central de precisión, o plano-rectangulares con orificios de precisión o con canales en V (cintas). No se descarta la evolución hacia materiales epoxi o poliméricos para uso doméstico.

## 6. TECNOLOGÍA DE DISPOSITIVOS INTEGRADOS

### Óptica integrada

Al principio de la década de los sesenta comienzan a realizarse los primeros experimentos sobre confinamiento y guiado de luz a través de capas dieléctricas delgadas, lo que inspira la idea

de obtener circuitos ópticos miniaturizados, definidos mediante técnicas fotolitográficas sobre substratos planos. Esta idea se acuñó bajo el concepto de «Óptica Integrada». En la actualidad, la óptica integrada es un término genérico que abarca una amplia variedad de materiales y tecnologías (opto-electrónica, fotónica, micro-óptica, electro-óptica, electro-óptica,...).

La óptica integrada aúna a las ventajas inherentes de la integración: tamaño reducido, robustez, compactibilidad, mejora de la fiabilidad, fabricación de circuitería compleja a bajos costes, bajo consumo de los dispositivos activos y el potencial de la fabricación en masa; el disponer de una mayor anchura de banda e inmunidad a las interferencias electromagnéticas, ventajas derivadas de utilizar elementos ópticos. Además el circuito óptico así realizado no precisa un ulterior alineamiento, como es necesario en los sistemas ópticos fabricados con componentes discretos.

El componente básico de la óptica integrada es la guía en canal, que consiste en una tira dieléctrica, de forma rectangular y alto índice, depositada sobre un substrato de índice inferior. El número de modos guiados depende de las dimensiones, del índice de refracción efectivo y de la longitud de onda; siendo necesario en el caso de guías multimodo conocer el comportamiento de cada modo a la hora de diseñar la estructura.

Dependiendo del comportamiento durante su funcionamiento, las estructuras guías pueden clasificarse en: pasivas, cuando realizan una función manteniendo sus propiedades fijas; pasivas dinámicas, que varían su comportamiento en función de una influencia externa (efecto electro-óptico, acusto-óptico, termo-óptico,...), y activas o guías que pueden generar luz o servir como amplificadores de la señal óptica. Los componentes ópticos a los que dan lugar vienen recogidos en la tabla II.

La integración de los circuitos ópticos difiere de la obtenida con los circuitos electrónicos; sobre todo, porque es preciso combinar diferentes componentes funcionales e incluso materiales. Por ello, dos tipos de integración han sido explorados: la monolítica y la híbrida.

La técnica de integración híbrida, la más utilizada durante muchos años, incorpora dispositivos discretos, encapsulados individualmente, y cableados entre sí. La hibridación convencional no cubre los objetivos de velocidad, funcionalidad, tamaño y coste que precisan los sistemas actuales, por lo que se están explorando nuevas técnicas de hibridación, derivadas de la tecnología electrónica de módulos multi chip (MCM).

Para la integración monolítica es necesario un desarrollo sustancial sobre un amplio rango de procesos de fabricación. Será entonces cuando podrán incorporarse circuitos de altas prestaciones y funcionalidad en un mismo substrato.

TABLA II

Dispositivos ópticos integrados que pueden obtenerse a partir de las características en funcionamiento de las estructuras guía

Componentes	Dispositivos
Pasivos	divisores, cruces, curvaturas, lentes, acopladores, espejos
Pasivos dinámicos	moduladores de fase, amplitud y frecuencia, conversores y divisores TE/TM, interruptores
Activos	fuentes, amplificadores

## Tecnología óptica integrada

Los materiales más utilizados como sustratos en óptica integrada pertenecen a las siguientes clases:

- Cristales ferro-eléctricos, tales como el niobato de litio, con buenas propiedades electro-ópticas y piezo-eléctricas, lo que permite realizar dispositivos ópticos pasivos dinámicos.
- Semiconductores; por un lado los semiconductores compuestos por elementos de los grupos III-V y II-VI, que poseen el potencial de la integración monolítica de fuentes, detectores y guías ópticas junto a dispositivos electrónicos. Por otro lado el silicio y sus compuestos derivados que permiten la integración conjunta de componentes ópticos y electrónicos, pero que debido a sus propiedades ópticas no posibilitan la realización de componentes activos.
- Vidrios, materiales asequibles que han sido utilizados para la fabricación de componentes pasivos de bajo coste.
- Materiales orgánicos, tanto poliméricos como cristalinos, que poseen propiedades electro-ópticas y piezo-eléctricas, con coeficientes mayores que los del niobato de litio. La fabricación de estructuras es muy sencilla y fácil de implementar en líneas de fabricación, pero sólo pueden realizarse componentes pasivos dinámicos.

Diferentes tecnologías se han desarrollado con el fin de obtener circuitos ópticos integrados. Si bien existen una serie de técnicas básicas en la realización de los componentes ópticos, derivadas de la tecnología microelectrónica como puede ser la fotolitografía y el grabado para definición de los motivos, otras son específicas del tipo de material base que se utiliza. Así tenemos en el caso

TABLA III

Técnicas de obtención y características en propagación de las estructuras guía obtenidas a partir de diferentes materiales derivados del silicio

Material	Método de obtención	Índice de refracción	Espesor del núcleo (µm)	Pérdidas en propagación (dB/cm)
SiO <sub>2</sub>	oxidación térmica	1.464	15	0.3
PSG	LPCVD	1.54	4	0.07
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	LPCVD	2.10	0.16	0.1
SiON	PECVD	1.50	0.35	0.7-1.2
VTMS <sup>(1)</sup>	polimerización por plasma	1.53	4	0.04
HMDS <sup>(2)</sup>	polimerización por plasma	1.488	4	0.04
SiO <sub>2</sub> /TiO <sub>2</sub>	hidrólisis por llama	1.465	8	0.03
SiO <sub>2</sub> /TiO <sub>2</sub>	sol-gel	1.597	0.3-0.6	<0.2
SiO <sub>2</sub> /TiO <sub>2</sub>	SOG	1.49	4	2.4
PUR <sup>(3)</sup>	inmersión	1.56	0.5	<1
A-PUR <sup>(4)</sup>	centrifugación	1.595	—	6

(1) precursor viniltrimetilsilano

(3) poliuretano

(2) precursor hexameditiloxano

(4) poliéster acrílico

del niobato de litio o del vidrio las técnicas de difusión e intercambio de protones, los compuestos III-V y el silicio hacen uso de la deposición química (CVD) y física (MBE) en sus múltiples variantes y en los materiales poliméricos predominan el recubrimiento por centrifugación o inmersión. La tabla III es un ejemplo de la variedad de técnicas que pueden utilizarse para obtener los materiales que conforman la guías, derivados de un mismo sustrato.

## Empaquetado

La función principal de un empaquetado es proporcionar un entorno estable y proteger al dispositivo durante la vida media del mismo, permitiendo simultáneamente la comunicación con el exterior, vía conexión óptica o eléctrica. En este tipo de empaquetado hay que tener en cuenta dos requerimientos: la fiabilidad en largos tiempos de operación de los componentes y que el propio empaquetado no degrade las características intrínseca de los componentes.

La utilización de empaquetados completamente herméticos, que permitan vidas medias largas, requiere: sellar las áreas sensibles con un encapsulante transparente a las longitudes de onda de trabajo, cuidando de no provocar efectos ópticos no deseados en el camino óptico; usar cápsulas herméticas con ventanas transparentes selladas, o utilizar pasantes de fibra o guías herméticas. Los empaquetados herméticos han de diseñarse cuidadosamente para evitar fallos debidos a tensiones producidas por ciclos térmicos o de presión, que pueden provocar deformación de los materiales o desalineamiento entre los dispositivos. Asimismo se ha de suministrar una buena disipación del calor, de la zona donde haya dispositivos activos.

Desde la perspectiva de funcionamiento hay que considerar que la anchura de banda de las señales ópticas es muy grande y el empaquetado no debe contribuir a limitarla. Las líneas de propagación de las señales han de optimizarse para controlar, o minimizar, los efectos de interferencia, reflexión o polarización. Asimismo, el funcionamiento de la parte electrónica no debe restringirse por el empaquetado, máxime teniendo en cuenta que en bastantes aplicaciones es necesario utilizar componentes de alta velocidad donde el control de parámetros tales como retraso en la propagación, latencia de la señal y corrimiento de fase es vital.

Al nivel del módulo los distintos componentes activos y pasivos individuales se integran en una unidad funcional. Dados conteniendo subsistemas optoelectrónicos y electrónicos se montan directamente sobre la plataforma del módulo junto a componentes ópticos. La utilización de conjuntos monolíticos reduce el tamaño y el coste de ensamblado.

La plataforma de integración ha de satisfacer una serie de requerimientos mecánicos, eléctricos y térmicos que permitan ensambalar los componentes y el medio de interconexión.

Existen diversos materiales que cumplen los criterios para una encapsulación efectiva. Los materiales cerámicos, utilizados como plataformas debido a su bajo precio y elevada resistencia mecánica, utilizan una tecnología de capa gruesa, con anchuras y espaciados de línea superiores a 100 µm. El silicio que aún la posibilidad de utilizar la tecnología microelectrónica para obtener interconexión con dimensiones reducidas y buen control, a ser un material robusto, mecánicamente muy resistente, con una gran inercia química, elevada conductividad térmica, un coeficiente de expansión térmico que ajuste perfectamente con los circuitos integrados electrónicos que se hayan de ensamblar y una baja constante dieléctrica para aislantes de capa delgada. Además, desde el punto de vista óptico, permite la obtención en el mismo sustrato de guías dieléctricas realizadas a partir de sus compuestos derivados (óxido y nitruro) y de micromecanizado de estructuras en V, grabadas en la superficie del mismo con el fin de integrar fibras, lentes, etc., permitiendo el alineamiento entre componentes con resoluciones propias de las técnicas fotolitográficas.

Está previsto que la integración ayude a manejar la complejidad de los sistemas ópticos. Áreas de aplicación dónde se utiliza o está propuesto utilizar la óptica integrada, son: la transmisión óptica punto a punto, las memorias ópticas y discos compactos, los sensores, el interconexiónado, el procesado y los computadores ópticos. Esta lista está ordenada de menor a mayor complejidad del sistema. Así, los sistemas de transmisión son relativamente sencillos; sin embargo, la complejidad tiende a crecer a medida que la tecnología madura. De todas estas aplicaciones sólo la interconexión óptica y los sensores son hoy día una realidad.

## 7. AMPLIFICADORES ÓPTICOS

### Introducción

Desde 1970, en que se demostró el funcionamiento del primer láser de semiconductor a temperatura ambiente, la mayor parte de los esfuerzos para conseguir amplificadores ópticos a modo de sus equivalentes electrónicos se centró en la realización de amplificadores láser de semiconductor. Los problemas surgidos en cuanto a sus niveles de ruido y conexión a fibra óptica hacen que en la actualidad los amplificadores de fibra óptica dopada con tierras raras desplacen a aquellos en interés.

Los amplificadores de fibra dopada han supuesto una revolución para los sistemas que utilizan fibra óptica. Como prueba de ello, la mayor parte de los enlaces por fibra óptica submarinos que están siendo instalados en la actualidad incluyen amplificadores de fibra dopada con Erblio. También se empiezan a utilizar en enlaces terrestres troncales o en redes de distribución de TV por fibra.

Las funciones de los amplificadores ópticos en las redes de comunicaciones por fibra, y el la fotónica en general son muy diversas. En un sistema de comunicaciones ópticas se pueden emplear tanto en emisión, como en detección y sobre todo, en el interior de la red de fibra óptica. Así en el sistema transmisor, los amplificadores pueden incrementar la potencia óptica de salida de las fuentes de luz y compensar las pérdidas producidas por las conexiones con posibles moduladores externos. En recepción de señales ópticas, los amplificadores pueden actuar como etapa de preamplificación, aumentando el alcance de los sistemas de banda ancha. Por último, los amplificadores ópticos están llamados a jugar un importante papel en el interior de una red de fibra, dado que permiten compensar pérdidas producidas a lo largo del recorrido por la atenuación de la fibra o por bifurcaciones debidas a acopladores.

Adicionalmente, la amplificación óptica está llamada a jugar un papel similar al conseguido por la amplificación electrónica. Así, puede asentar tecnologías como la conmutación fotónica, los láseres de fibra óptica o el procesado de la señal. Una peculiaridad de la amplificación mediante fibra óptica dopada con tierras raras es la capacidad de distribución de la amplificación a lo largo de muchos kilómetros. La amplificación distribuida puede jugar un importante papel en el diseño de redes de transmisión por cable submarino, redes de área local o transmisión de solitones ópticos. Como ventaja adicional de los amplificadores ópticos cabe destacar que son transparentes al tipo de codificación y régimen binario y que permiten la amplificación simultánea de múltiples señales soportadas sobre diferentes longitudes de onda. Sus inconvenientes principales son el efecto acumulativo de la dispersión a lo largo del sistema, dado que no regeneran la señal, y una tecnología en proceso de maduración. De estos aspectos se hablará brevemente a continuación.

## Clasificación y parámetros característicos de los amplificadores ópticos

La amplificación óptica es un fenómeno producido por la emisión estimulada en un medio material en el que se ha conseguido una inversión de población, o bien por dispersión (scattering) no lineal en una fibra óptica. La amplificación por emisión estimulada es un concepto aplicable a los amplificadores de semiconductor y a los de fibra dopada con tierras raras (Er, Pr, Nd, etc.), mientras que el segundo corresponde a los amplificadores que hacen uso del efecto Raman o Brillouin.

En cualquier caso, la clasificación habitual de los amplificadores ópticos se realiza en función del tipo de guionada en el que se realiza la amplificación. Así, podemos dividir a los amplificadores en a) optoelectrónicos o integrados y b) amplificadores de fibra óptica. Los primeros tienen dimensiones mucho más reducidas que los segundos y utilizan típicamente materiales semiconductores para su realización, aunque también se fabrican dopando guionadas realizadas sobre sustratos de sílice o LiNbO<sub>3</sub>. Los segundos se fabrican utilizando fibras de sílice u otros materiales que se dopan con tierras raras o que hacen uso de la dispersión Raman o Brillouin, como ya se ha dicho. Las longitudes de los amplificadores de fibra óptica van desde los pocos metros hasta los kilómetros de fibra en el caso de la amplificación distribuida.

Se ha comenzado a regular las prestaciones de los amplificadores, clasificándolos en tres categorías (ITU-T recomendación G.OA2):

1. Amplificador de potencia
2. Amplificador de línea
3. Preamplificador

Indica la clasificación que estas unidades de amplificación se pueden disponer:

- A continuación de la fuente de luz del sistema, incrementando la potencia óptica entregada a la red), y disminuyendo a veces el «precio por fotón» entregado a la red.
- Dentro de un enlace de fibra en el que la señal ha sufrido una atenuación, incrementando el valor de la señal hasta 40 dB.
- Inmediatamente antes del receptor para aumentar el nivel de señal recibido.

Son parámetros esenciales de los amplificadores ópticos:

1. Ganancia, o incremento de la señal de salida del amplificador respecto de la entrada. Normalmente se mide en dB.
2. Potencia de saturación: Potencia óptica para la cual la ganancia media del amplificador decrece 3 dB.
3. Figura de ruido: Deterioro de la relación señal a ruido de salida frente a la de entrada del amplificador. También se mide normalmente en dB.
4. Ancho de banda o espectro óptico en el que se produce el fenómeno de la amplificación (nm o GHz).
5. Potencia de bombeo o corriente de inyección (mW o mA).

A continuación se describen brevemente los amplificadores de una y otra familia.

La gran ventaja de estos amplificadores es su reducido tamaño y su capacidad para ser integrados junto con fuentes de luz, detectores y cualquier dispositivo de guía de onda óptica, pudiendo generar estructuras aptas para la conmutación o procesado óptico de la señal de tamaño reducido.

Como defecto tienen su difícil conexión a fibra óptica y unos niveles de ruido habitualmente superiores a los de los otros amplificadores. También suelen ser más dependientes del estado de polarización de la señal incidente.

Los más habituales, que son los fabricados sobre material semiconductor tienen como ventaja adicional un ancho de banda normalmente superior al de los amplificadores de fibra, y un consumo más reducido.

Estos últimos, a su vez, se dividen en amplificadores de onda progresiva (*travelling wave*) o tipo Fabry-Perot, que son las familias más frecuentes. La diferencia básica entre los dos tipos de amplificadores de semiconductor reside en el modo de producirse la amplificación. Así, en los amplificadores de onda progresiva, la amplificación se produce en un único paso de la señal óptica por la guía de onda amplificadora, mientras que en los tipo Fabry-Perot la señal se amplifica en una cavidad resonante.

Los amplificadores fabricados sobre sustratos electroópticos como el LiNbO<sub>3</sub> o pasivos como el SiO<sub>2</sub> están, de momento, en fase experimental. Su principio de funcionamiento es similar a los amplificadores de fibra dopada, presentando como ventaja sus reducidas dimensiones y su capacidad de integración junto con otras estructuras aptas para el procesado de la señal óptica (moduladores, conmutadores, etc.).

#### Amplificadores de fibra óptica

El material base de los principales amplificadores ópticos comercializados es la sílice, que dopada con iones de Erblio y bombeada a longitudes de onda de 980 o 1480 nm, sirve para amplificar señales correspondientes a la tercera ventana de comunicaciones ópticas. En la actualidad existen múltiples empresas comercializando este tipo de amplificadores, que empiezan a emplearse, como ya se ha dicho, en enlaces en los que la fiabilidad es esencial, que es el caso de los enlaces submarinos.

Aunque la tercera ventana de comunicaciones ópticas es la óptima para la utilización de los amplificadores ópticos, existen muchos kilómetros de fibra optimizada en segunda ventana tendidos en el mundo y que pueden reutilizarse para nuevas aplicaciones. Por ello, en numerosos centros de investigación se ha trabajado en la obtención de amplificadores con una banda de amplificación centrada en 1300 nm. La solución adoptada (y ya comercializada) por varios fabricantes ha sido la de utilizar la fibra de ZBLAN, dopada con iones de Praseodimio.

En el terreno experimental, se está produciendo una fuente avance en la realización de amplificadores de fibra para la primera ventana de comunicaciones ópticas. El Tulio y el Erblio son las tierras raras más adecuadas para la realización de dichos amplificadores.

El esquema básico adoptado para la realización de los amplificadores es la utilización de unos metros (típicamente entre 20 y 40) de fibra dopada, un láser de bombeo que aporta potencias entre 10 y 100 mW para conseguir la inversión de población en el núcleo de la fibra óptica dopada y un multiplexor en longitud de onda que mezcla la señal a amplificar junto con la de bombeo en la fibra amplificadora. Adicionalmente se incluyen aisladores ópticos y filtros en longitud de onda a la salida del sistema para eliminar el bombeo residual.

En los últimos años han surgido numerosas empresas dedicadas a la fabricación de amplificadores ópticos realizados con fibra dopada con tierras raras. La razón es que estos componentes permiten la amplificación de la señal óptica de un enlace de fibra independientemente de su formato, y permite la utilización de la técnica de multiplexación en longitudes de onda, facilitando la transparencia de la red. Existen en el mercado dos familias de estos amplificadores, los diseñados para utilizar la segunda ventana de comunicaciones ópticas (1300 nm de longitud de onda) y los diseñados para la tercera ventana (1550 nm).

Estos últimos son los más abundantes en el mercado, por razones históricas. Los precios de comercialización de estos amplificadores dependen de la utilización y prestaciones. Así, existen unidades de amplificación desde 2.5 millones de pesetas (Litton Systems) hasta los 10 millones de pesetas.

Los amplificadores para la segunda ventana de comunicaciones ópticas son de aparición más reciente. Se tienen noticias de dos suministradores, BTD y NIT, estos últimos ofreciendo unidades a un precio que oscila entre los 10 millones de pesetas hasta los 17 millones, y ganancias desde los 17 dB hasta los 35 dB. La razón de la aparición de amplificadores comerciales en esta ventana es que la mayor parte de la fibra instalada esta optimizada para 1300 nm de longitud de onda.

Debido a la necesidad de redes transparentes en entornos de área local, se ha comenzado a investigar en amplificadores ópticos para la primera ventana (850 nm). Ya se han conseguido en laboratorio amplificadores de ganancias superiores a los 25 dB utilizando Tulio y Erblio como dopantes de fibras de ZBLAN.

Los amplificadores de fibras convencionales de sílice que utilizan el efecto Raman están también próximos a comercializarse, presentando ganancias cercanas a los 30 dB.

No se dispone de datos de las ventas globales de amplificadores de fibra dopada. Un dato significativo es que la empresa Pirelli comercializó 1000 amplificadores de fibra dopada de su modelo T30 hasta finales de 1994.

#### Otras aplicaciones de los amplificadores ópticos. Tendencias

Además de las mencionadas inicialmente en transmisión de datos, se están realizando experiencias en la aplicación de amplificación distribuida en redes de área local y de sensores de fibra óptica. Adicionalmente, se han realizado experiencias en la fabricación de procesadores de señal óptica utilizando estos amplificadores. Estos procesadores «transportan» conceptos como el de realimentación a estructuras fotónicas, produciendo paradójicamente procesadores de señales eléctricas de muy buenas prestaciones.

También deben mencionarse los esfuerzos que en la actualidad realizan diversos investigadores para la realización de amplificadores que presenten un espectro de amplificación «plano». La equalización de este espectro es fundamental para sistemas multiplexados en longitud de onda.

#### 8. METROLOGÍA DE FIBRAS Y DISPOSITIVOS

La capacidad de transmisión de información, (tasa de transmisión)  $\times$  (distancia), de una línea por fibra óptica está condicionada fundamentalmente por dos tipos de efectos que afectan a la señal: efectos de pérdida de potencia óptica (atenuación) y de redistribución de potencia en el dominio temporal o demodulación de señal (efectos dispersivos). Además de los parámetros necesarios para caracterizar la magnitud de tales efectos asociados a la propagación de una señal por la fibra óptica, las características propias de dispositivos y componentes (conectores,



acopladores, etc.) que incorpora necesariamente cualquier línea de transmisión constituyen los datos básicos imprescindibles para el diseño de un sistema de comunicaciones ópticas. La especificación de parámetros característicos de fibras, cables ópticos y componentes asociados, y la definición de procedimientos experimentales para su medida, representan distintas facetas de un problema metodológico de gran importancia tanto desde el punto de vista de la fabricación de elementos como de la operación de sistemas de comunicaciones ópticas. En la presente sección se describen y analizan algunos aspectos fundamentales de este problema [20].

### Medidas en fibras y cables

El parámetro de atenuación,  $\alpha(\lambda)$ , de la potencia óptica  $P$  a una determinada longitud de onda  $\lambda$  en una longitud  $L$  de fibra o cable óptico, definido por

$$\alpha(\lambda) \text{ (dB/km)} = \frac{-10}{L(\text{km})} \log \left( \frac{P(\lambda)}{P_{ref}(\lambda)} \right) \quad (20)$$

constituye, sin duda, la característica básica más importante para el diseño de una línea de transmisión.

Las medidas de atenuación se pueden llevar a cabo bien por técnicas de reflectometría óptica en el dominio temporal (OTDR), descritas después, bien por técnicas de medida directa de potencia transmitida e inyectada [21]. En este último caso, la potencia de referencia inyectada  $P_{ref}$  ha de obtenerse mediante corte (cut-back) de la fibra para condiciones de inyección fijas.

Las posibilidades en cuanto a instrumentación para medida directa de potencia quedan esencialmente determinadas por los niveles de potencia disponibles a partir de diferentes tipos de fuentes y los umbrales de detección alcanzables mediante diferentes técnicas de medida, tal como se ilustra en la figura 14.

La medida de potencia óptica retrodifundida en función del tiempo, durante la propagación de un pulso luminoso a lo largo de una línea de fibra óptica, es el fundamento de las técnicas de reflectometría óptica en el dominio temporal (OTDR). En una señal de OTDR se tiene información sobre posición de cualquier tipo de discontinuidad en la línea, así como la atenuación en la misma y sus posibles variaciones en diferentes segmentos [21,22]. Además de constituir la princi-

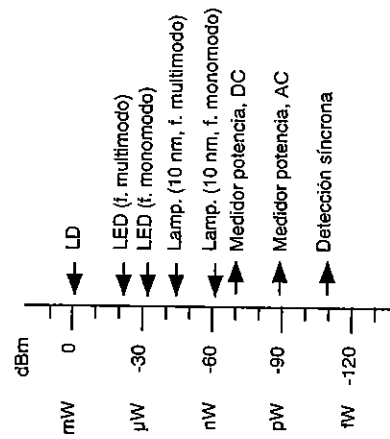


FIGURA 14. Niveles típicos de potencia óptica para diferentes tipos de fuentes y sistemas de detección.

pal herramienta para el diagnóstico de redes de fibra óptica, las medidas de OTDR representan, dada su facilidad de uso, una herramienta fundamental para la caracterización de fibras y cables ópticos en el proceso de fabricación.

En el caso de fibra multimodo la limitación principal sobre el ancho de banda soportado en la línea de transmisión tiene su origen en los efectos de dispersión intermodal. Para llevar a cabo medidas de caracterización de estos efectos se requiere, por tanto, asegurar mediante un procedimiento adecuado unas condiciones de excitación modal perfectamente reproducibles y análogas en lo posible a las que tengan lugar en la utilización de la fibra. La medida en sí se puede efectuar sobre el incremento de anchura de un pulso luminoso en su propagación (dominio temporal) o sobre el factor de modulación de una señal periódica en función de su frecuencia (dominio de frecuencias) [21,23].

El primer parámetro característico a considerar en el caso de fibra monomodo es precisamente aquel que define su carácter monomodal en unas determinadas condiciones de operación: la longitud de onda de corte. La longitud de onda de corte de una fibra se define, a efectos de su medida, como aquella para que la atenuación debida a pérdidas por curvatura del segundo modo de la fibra (modo  $LP_{11}$ ), en un bucle de 28 cm de diámetro, determina una diferencia de potencia de 0.1 dB respecto a una medida de referencia en la misma muestra de fibra con un bucle de pequeño diámetro (unos 3 cm) que filtra perfectamente la potencia en el segundo modo. La instrumentación necesaria para la medida de este parámetro es esencialmente la misma requerida para medidas de atenuación espectral, típicamente basada en un sistema de iluminación con lámpara halógena y monocromador, y detección con amplificación sincrona mediante un amplificador 'lock-in'.

Las tolerancias en empalmes y conectores de fibras ópticas están determinadas por el diámetro de la distribución de campo en el modo fundamental [22,23]. Además, el diámetro de campo modal informa sobre capacidad de guiado e, indirectamente, sobre otras características de la fibra. Las muy diversas posibilidades de tipo experimental para obtener distribuciones de campo (campo próximo, campo difractado o lejano, etc.) requiere la definición precisa de un parámetro de diámetro efectivo  $2\bar{w}$  (definición de Peterman-II),

$$\bar{w}^2 = 2 \int_0^\infty \psi^2(r) r dr / \int_0^\infty (\partial\psi/\partial r)^2 r dr, \quad \Psi(r): \text{campo próximo} \quad (21)$$

susceptible de comparación entre diferentes clases de medida. En efecto, el diámetro de campo modal definido por la expresión anterior, se relaciona simplemente,  $\bar{w} = \lambda / \pi \overline{w}_g$ , con la distribución de potencia óptica observable en campo lejano:

$$\bar{w}_g^2 = 2 \int_0^\infty |\Psi(\theta)|^2 \sin^2 \theta d(\text{sen}^2 \theta) / \int_0^\infty |\Psi(\theta)|^2 d(\text{sen}^2 \theta), \quad \Psi(\theta): \text{campo lejano} \quad (22)$$

Entre las técnicas más usuales de medida de distribución de campo se pueden mencionar las de barrido en campo lejano, medidas mediante pupila variable y medidas en campo próximo mediante un sistema de formación de imagen.

El estudio de los fenómenos dispersivos en las fibras ópticas ha seguido unos pasos muy concretos, siempre al compás marcado por el estado de la tecnología en cada momento. Si inicialmente eran los fenómenos de dispersión intermodal en fibras multimodo los que demandaban la mayor atención, tras la universalización de las fibras ópticas monomodales (para transmisiones de elevado producto capacidad-distancia), los efectos de dispersión cromática constituyeron

ron el principal objeto de atención en cuanto a características a controlar en las fibras. Hoy en día, los valores específicos de dispersión cromática de una determinada fibra se encuentran entre los parámetros característicos sujetos a especificación estricta. Más recientemente, la atención se ha desplazado hacia los efectos de dispersión de polarización modal (PMD), que son objeto actualmente de intenso estudio, de manera que, en breve, parámetros característicos de la magnitud de estos efectos pasarán a ser incluidos también en el conjunto de especificaciones a verificar en una fibra o un cable óptico.

De cara a un futuro inmediato, la utilización de elevados niveles de potencia óptica en las redes, obtenidos mediante amplificación óptica, determinará previsiblemente la necesidad de controlar la magnitud de los diversos efectos dispersivos originados por el comportamiento ópticamente no lineal del medio de transmisión.

El coeficiente de dispersión cromática  $D(\lambda)$  de una fibra óptica está determinado por las variaciones en longitud de onda del tiempo de vuelo unitario (inverso de la velocidad de grupo) para un pulso luminoso. Las relaciones entre índice efectivo de propagación,  $n_e(\lambda)$ , tiempo de vuelo,  $\tau(\lambda)$ , y dispersión,  $D(\lambda)$ ,

$$\tau(\lambda) = \frac{1}{c} \left( n_e - \lambda \frac{dn_e}{d\lambda} \right), \quad D(\lambda) = \frac{d\tau}{d\lambda} \quad (23)$$

proporcionan el fundamento de las distintas técnicas de medida disponibles para esta magnitud.

Son dos, fundamentalmente, los tipos de técnica de medida que se utilizan para la medida de valores de dispersión cromática en fibras ópticas: medidas de tipo interferométrico, que aportan información sobre  $n_e(\lambda)$ , si se analiza la fase de la señal de interferencia, o sobre  $\tau(\lambda)$ , si se analiza la envolvente de la señal, y medidas sobre desfases introducidos por la fibra en la propagación de una señal modulada a alta frecuencia, que se relacionan directamente con  $\tau(\lambda)$ .

Tal como se ha mencionado anteriormente, la caracterización de los efectos de dispersión de polarización en fibras ópticas es objeto actualmente de un intenso debate que concierne tanto a la parametrización más adecuada de los efectos como a la interpretación precisa de los resultados experimentales obtenidos con diferente técnicas de medida. Las líneas fundamentales de este debate se plantean en referencia a las dos principales técnicas de medida para las que existe instrumentación comercialmente disponible. Los sistemas de medida de tipo polarimétrico se basan en el análisis de la evolución del estado de polarización de la luz a la salida de la fibra problema en función de la longitud de onda. La velocidad de rotación de dicho estado de polarización en la esfera de Poincaré se corresponde con el retardo temporal entre señales con polarizaciones ortogonales. Por otra parte, en los sistemas de medida de tipo interferométrico, los retardos entre polarizaciones ortogonales en la fibra problema son compensados por longitudes de camino óptico diferentes en un interferómetro. La longitud necesaria para la compensación, detectada a través de la correlación entre ondas de distinta polarización originadas por una fuente de baja coherencia, es una medida, por tanto, de los retardos asociados a la dispersión de polarización.

### Caracterización de dispositivos y componentes

Además de todas las características de una fibra o cable óptico consideradas hasta el momento, relacionadas con la capacidad global de transmisión de un sistema de comunicaciones, es preciso mencionar también la medida de características locales de una fibra, tales como el perfil de índice de refracción y su geometría, considerando la fibra, en una sección arbitraria, como un componente individual del sistema.

La medida del perfil de índice de refracción de una fibra se lleva a cabo habitualmente en longitudes de onda correspondientes al visible (normalmente, con láser de He-Ne,  $\lambda = 633 \text{ nm}$ ) mediante técnicas como la de 'campo próximo refractado' [21]. Las características geométricas (diámetro de núcleo y revestimiento, concentricidad y circularidad del núcleo, etc.) están sometidas a requisitos muy estrictos, dada su influencia en cuanto a pérdidas en empalmes y conexiones. Su medida se lleva a cabo mediante técnicas de microscopía óptica convencional.

Las reflexiones en discontinuidades de una línea de fibra óptica pueden tener efectos muy negativos sobre el rendimiento global del sistema, al generar señales espúreas en el detector, degradar el comportamiento de fuentes láser, etc. En sistemas con amplificación óptica, estos efectos negativos se ven lógicamente agravados. Es necesario, por tanto, un estricto control de los retornos por reflexión en conectores. La medida se lleva a cabo utilizando un acoplador de fibra óptica, previamente calibrado, como divisor de haz. En uno de sus extremos se sitúa el dispositivo problema, mientras que en el otro se aseguran unas condiciones de retorno muy inferiores a las del dispositivo problema.

La utilización cada vez más extendida en redes de banda ancha [24] de dispositivos pasivos para el reparto o la concentración de múltiples señales en diferentes líneas de fibra óptica, demanda el desarrollo de técnicas específicas de caracterización para este tipo de componentes. Los parámetros fundamentales a controlar son los elementos de una matriz de razones de acople, cocientes entre potencia disponible en una determinada puerta de salida y potencia inyectada en una puerta de entrada dada (figura 15); tanto su magnitud absoluta como su dependencia con la longitud de onda, polarización de la luz, etc. Además, las pérdidas globales en el dispositivo, ya

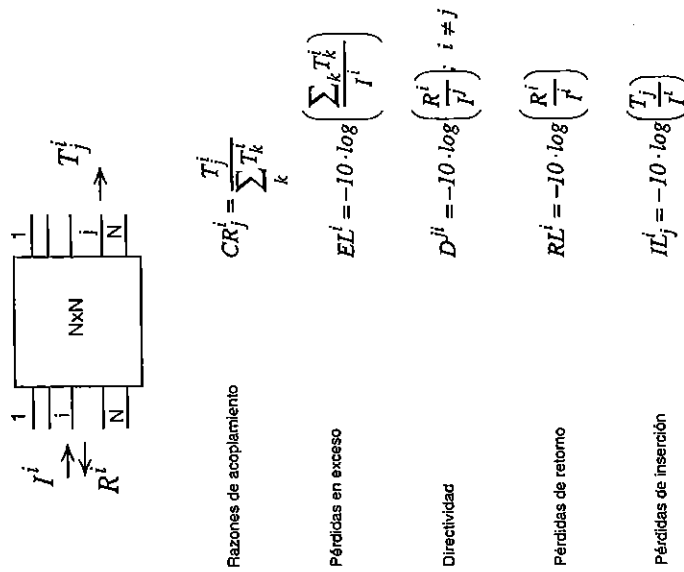


FIGURA 15. Definiciones de parámetros característicos de un acoplador  $N \times N$ .

sean por radiación, absorción o por reflexión (pérdidas en exceso) y las reflexiones en la puerta de entrada, requieren una caracterización adecuada, dado que, en definitiva, son las pérdidas de inserción globales en una determinada línea de transmisión las que condicionan su diseño.

## 9. REDES DE COMUNICACIONES ÓPTICAS: FUNDAMENTOS

Del contenido de las secciones anteriores, es patente que el desarrollo de componentes para aplicaciones de transmisión por fibra óptica ha experimentado avances substanciales desde finales de la década anterior hasta nuestros días. Hoy en día, es posible disponer de componentes comerciales de características muy aceptables, susceptibles de instalación tanto en experimentos de campo (field trials) como en sistemas reales.

La lógica pauta de evolución, una vez conseguida la transmisión punto a punto con altos niveles de calidad es, al igual que ha ocurrido con otros sistemas de telecomunicación basados en otras tecnologías, el desarrollo de las comunicaciones multipunto y multicanal en sentido amplio, es decir las redes de comunicaciones ópticas.

Son muy diversos los aspectos que hay que cubrir, y muy reducido el número de líneas para explicarlas con detenimiento. No obstante, es posible proporcionar una panorámica resumida que ayude al lector a comprender, tanto el nivel de complejidad del problema, su estado del arte, así como los elementos esenciales que han de tenerse en cuenta.

El desarrollo de las redes de comunicaciones ópticas operativas requiere la consideración y resolución de tres áreas esenciales.

- 1) Desarrollo de tecnologías habilitadoras (Enabling Technologies).
- 2) Técnicas de acceso al medio y multiplexación de recursos.
- 3) Gestión: Operación administración y mantenimiento de redes.

En los siguientes apartados se describe, resumidamente que se entiende por objetivos de cada una de dichas áreas, así como los avances fundamentales que se han producido a lo largo de los últimos años.

### Desarrollo de tecnologías habilitadoras

La implementación de redes ópticas requiere el empleo de componentes especializados para la realización de funciones propias, tales como la división de señal, el filtrado, la amplificación, compensación de dispersión, multiplexación, demultiplexación y conmutación. El lector ya ha podido adquirir una idea del estado de las diversas tecnologías y componentes disponibles en secciones anteriores. No obstante, debe aclararse en este punto que las tecnologías seleccionadas, deben de ser capaces de producir componentes a gran escala y bajo coste para aplicaciones de red de acceso (entre abonado y central), mientras que para la red de transporte (entre centrales) es preferible disponer de componentes de gran calidad y fiabilidad, aunque sean más costosos. Las tecnologías más prometedoras (aunque no las únicas), son las de fibra óptica, y la de óptica integrada en dos vertientes: a) dispositivos basados en guías de onda de silicio sobre sustrato de silicio) y la de InP. Merece la pena señalar en este punto, que las futuras aplicaciones de componentes disponibles hoy en día para transmisión punto a punto a redes de comunicaciones ópticas está llamada a modificar su diseño actual e ingeniería. Es el caso por ejemplo de los amplificadores ópticos de segunda generación, donde se exige que su ganancia espectral sea plana dentro del margen de frecuencias que ocupan los canales ópticos que hay que transmitir, para

evitar fenómenos de saturación, así como la presencia de filtros ópticos para prevenir el crecimiento desmesurado de la emisión espontánea amplificada (ASE) fuera de la banda de información. En la actualidad es posible disponer de todos los componentes y subsistemas necesarios para la transmisión multicanal a velocidades de 2.5 Gb/s por canal. En el instante actual se está desarrollando la tecnología para subir dichas tasas a 10, 20 y 40 Gb/s por canal.

### Técnicas de acceso al medio y multiplexación de recursos

Las redes ópticas posibilitan, la transmisión de múltiples canales y servicios de telecomunicación. Cada usuario dispone de uno o más canales que puede emplear para transmitir información a cualquier otro u otros de la red. La asignación o acceso a la disponibilidad de un canal puede ser rígida o flexible y, en todo caso, debe de responder a algún mecanismo de control y/o gestión (técnicas de acceso múltiple). Existen diferentes técnicas de acceso múltiple que son de uso corriente en redes de cable coaxial, par trenzado o radio, que pueden adaptarse de forma inmediata a una red óptica. Este tipo de técnicas se basan en la multiplexación de señales eléctricas y en la consideración de la fibra óptica como un medio de transmisión pasivo de banda ancha. El empleo de estas técnicas supone el no aprovechar plenamente las características de las señales ópticas que se transmiten, ya que éstas actúan como meras portadoras de la señal eléctrica multiplexada, y la realización de todas las tareas de multiplexación y demultiplexación en el dominio electrónico.

El empleo de las señales ópticas para la transmisión multicanal junto con el desarrollo de componentes y dispositivos capaces de procesarlas directamente sin necesidad de convertirlas previamente a señales eléctricas permite la implementación de técnicas de acceso completamente ópticas, donde los diferentes canales que se desean transmitir se pueden combinar, filtrar, añadir y extraer directamente en el dominio óptico. Ello comporta una ventaja substancial frente a las técnicas de acceso electrónicas, ya que en éstas últimas, la capacidad de la red viene determinada en último término por la máxima velocidad o ancho de banda del procesador electrónico, que es sensiblemente inferior a la que puede conseguirse mediante el empleo de procesadores ópticos.

Durante los últimos años, ha existido una cierta controversia sobre la técnica de acceso más adecuada. La solución a este problema, no es sencilla pues depende de factores tanto tecnológicos como económicos, así como de si su aplicación es para la red de transporte o la de abonado. Hoy en día son dos las más consideradas, la multiplexación por división de longitud de onda (WDM) y la multiplexación por división de subportadoras (SCM).

En el primer caso, el acceso al medio se basa en la asignación de una longitud de onda diferente para cada usuario de la red. Las señales que provienen de los diferentes usuarios se combinan o multiplexan para formar una banda óptica compuesta, mediante un acoplador en estrella o un multiplexor y se envían a través de una o varias fibras ópticas a los usuarios de la red. Cada usuario puede seleccionar un canal cualquiera de los emitidos por la red bien por medio de un filtro óptico situado con anterioridad al fotodetector, o bien mediante el empleo de demultiplexores de longitud de onda. Existen diversas formas de implementar una red según se empleen emisores sintonizables, receptores sintonizables, demultiplexores de longitud de onda o conversión optoelectrónica y electroóptica intermedia. Si la transmisión y encaminamiento de la señal de un usuario origen a otro usuario destino se realiza completamente en el dominio óptico la red es de tipo monosalto (single hop), mientras que si existen conversiones eléctricas intermedias, la red es de tipo multisalto.

Una variante de este tipo de redes es aquella en la que se evitan las operaciones de filtrado empleando un encaminamiento completamente óptico basado en la longitud de onda de la señal

por medio de conmutadores de longitud de onda. La necesidad de realizar la conmutación de canal a velocidades compatibles con las propias de las señales que se transmiten (típicamente de 2.5 a 10 Gb/s por canal) ha llevado consigo al desarrollo de un nuevo componente óptico, el convector de longitud de onda, basado en un amplificador óptico de láser de semiconductor.

En cuanto a la técnica de acceso SCM, ésta, se emplea mayoritariamente para la transmisión de canales analógicos y/o digitales de TV en redes ópticas (CATV). A cada canal se le asigna una portadora eléctrica diferente (denominada subportadora para distinguirla de la portadora óptica que se emplea posteriormente). Los canales se multiplexan en frecuencia en el dominio eléctrico para formar una banda compuesta de RF que modula a un transmisor óptico (portadora óptica). La señal óptica se transmite por la red y se difunde a todos los usuarios. Cada uno de ellos posee un receptor óptico que transforma la señal óptica recibida en eléctrica. El usuario selecciona el canal deseado electrónicamente. El número de canales que se pueden transmitir está limitado por el ancho de banda del transmisor y receptor óptico.

### Gestión: Operación administración y mantenimiento de redes

El funcionamiento completo de una red de comunicaciones requiere la existencia de otra «red» paralela de control que gestione los recursos, el acceso y dote a ésta de protecciones frente a averías. En el caso de las redes de comunicaciones ópticas, parte del medio físico es óptico, lo que necesariamente repercute en la necesidad de controlar los parámetros propios de dicho dominio. Un ejemplo conocido es el de la estabilización de las longitudes de onda de los diferentes emisores que forman parte de una red WDM para que la deriva en la longitud de onda de un transmisor no le haga coincidir con la correspondiente a otro. Otros ejemplos de interés son la sincronización de señales de activación de los conmutadores ópticos, actividad crítica, sobre todo si se pretende realizar conmutación de paquetes y la monitorización de la potencia de bombeo y de salida de los amplificadores ópticos.

Gran parte de las actividades de gestión, operación y mantenimiento de las redes ópticas dependerán de la normativa generada por los diferentes organismos de estandarización. En este sentido, es pertinente recalcar que la Unión Internacional de Telecomunicaciones UIT-T ha comenzado a generar los primeros estándares que regulan la transmisión multicanal con o sin amplificadores ópticos empleando WDM. Los próximos años verán sin duda la consolidación de dichas normas y la generación de otras nuevas, que vendrán a clarificar el actual panorama.

### 10. REDES DE COMUNICACIONES ÓPTICAS: APLICACIONES

El término redes de comunicaciones ópticas engloba dos campos diferentes: las redes de transmisión y las de acceso. En las primeras la información se transmite entre dos elementos de red, o equipos pertenecientes al operador de la red. Normalmente entre estos elementos se transmiten simultáneamente señales multiplexadas provenientes de un número elevado de usuarios. En las redes de acceso la comunicación se establece entre un elemento de red y un usuario o cliente, que puede ser un abonado aislado, una centralita privada, una red de área local de una empresa, etc.

Este apartado se centra en las redes de transmisión. Se comienza con una breve descripción de la situación actual con la Jerarquía Digital Síncrona, y se sigue con la evolución hacia la introducción de una subcapa óptica. Se comentan algunos conceptos de protección y supervisión de redes, y se finaliza con la descripción de un enlace experimental de 10 Gbit/s con técnicas de solitones actualmente en preparación.

### Red de transmisión: de la JDS a la introducción de una subcapa óptica

Los equipos que se instalan en la actualidad en la red de transmisión se basan en el estándar denominado Jerarquía Digital Síncrona (JDS). Desde el punto de vista particular de este documento, la JDS se caracteriza por los siguientes aspectos:

- Salvo aplicaciones específicas, la JDS implantada actualmente utiliza transmisión óptica, con modulación de intensidad en transmisión y detección directa en recepción.
- En la JDS están definidas tres velocidades de transmisión, cada una asociada a un nivel de multiplexación. Su denominación se muestra en la Tabla IV.
- En cada nivel de la JDS se multiplexa información de señal, denominada carga útil y que constituye el 96.3% del multiplex, e información de control y gestión, o cabecera, el 3.7% restante. Una de las ventajas de la JDS sobre sistemas de multiplexación anteriores es que la información disponible en la cabecera permite insertar y extraer tributarios con facilidad. También, en la cabecera se incluyen canales de control, canales dedicados a protección, canales de Operación, Administración y Mantenimiento (OAM), etc.

De la exposición anterior se pueden destacar dos aspectos: la parte óptica de la red de transmisión JDS, que de ahora en adelante denominaremos red de transmisión convencional, consiste en la planta exterior de fibra con sus elementos de conexión, diodos láseres en los equipos transmisores y fotodetectores en los receptores. Además, la velocidad de transmisión máxima por enlace es aproximadamente 2.5 Gbit/s.

Desde esta situación actual, la red de transmisión ha comenzado una evolución siguiendo las dos pautas siguientes:

- Incremento de la velocidad de transmisión por enlace de los 2.5 Gbit/s actuales a al menos 10 y 20 Gbit/s, utilizando técnicas de transmisión multiportadora.
- Aumento de la transparencia de la red de transmisión, mediante la utilización de amplificadores ópticos de línea en vez de regeneradores.

Se prevé que estas dos pautas se complementen con una tercera: la paulatina incorporación a la red de transmisión de funciones de proceso de señal a nivel óptico, entre las que cabe destacar la extracción e inserción de portadoras y el reencaminamiento y cross-conexión mediante el uso de matrices ópticas de conmutación.

Al conjunto de elementos de red que procesan la señal a nivel óptico sin conversiones electroópticas intermedias se le denomina subcapa óptica. Esta subcapa óptica se irá introduciendo paulatinamente en las redes de transmisión a medida que el aumento de tráfico de comunica-

Tabla IV  
Velocidades de transmisión en la JDS

Nivel de la JDS	Velocidad de transmisión (Mbit/s)
MTS-1	155.520
MTS-4	4 x 155.520 = 622.080
MTS-16	16 x 155.520 = 2488.320

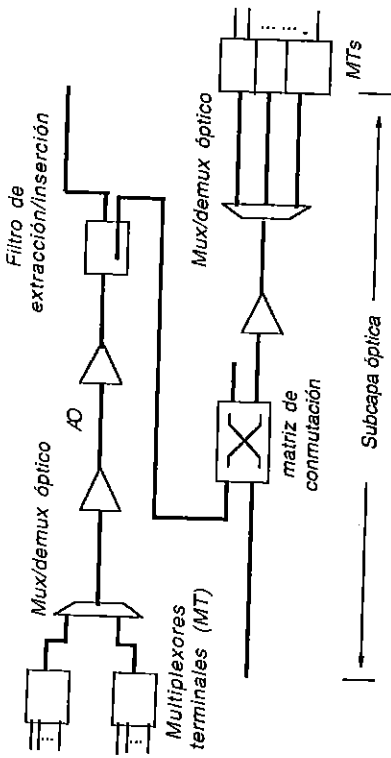


FIGURA 16. Diagrama genérico de subcapa óptica. Los elementos terminales son multiplexores eléctricos con salida óptica.

ciones vaya exigiendo velocidades de transmisión por enlace superiores a 2.5 Gbit/s. En la figura 16 se muestra un diagrama general de subcapa óptica.

Un aspecto esencial en el uso de amplificadores ópticos de línea es el relativo a su supervisión. El operador debe conocer en todo momento el estado del amplificador, así como estar informado de cualquier avería que pueda surgir.

El mecanismo escogido por los operadores, fabricantes y organismos internacionales de estandarización para supervisar los amplificadores es implementar un canal de servicio que se transmite por las mismas fibras ópticas del enlace sobre una longitud de onda auxiliar. La longitud de onda elegida es  $1510 \pm 10$  nm, fuera de la banda de ganancia de los amplificadores en fibra dopados con erbio (1530-1560 nm) pero dentro de la ventana de transmisión de pérdidas mínimas de la fibra. El canal de servicio se detecta, regenera y procesa en un módulo asociado a cada amplificador.

### Mecanismos de protección y anillos ópticos

Los sistemas de transmisión incorporan con frecuencia mecanismos de protección. De entre todos los existentes se destaca como ejemplo significativo el denominado sistema de protección 1+1. Se basa en enviar una señal entre dos puntos A y B por dos rutas distintas simultáneamente, una de estado normal y otra de reserva. En funcionamiento normal la señal se extrae de los receptores conectados a la línea en estado normal, y cuando esta falla de los conectados a la de reserva. Si en los puntos A y B se encuentran instalados multiplexores, el mecanismo se denomina de protección a nivel de sección de multiplexación.

En la figura 17 se muestra un ejemplo del sistema de protección aplicado a un anillo óptico. Por anillo óptico se entiende un conjunto de nodos de red conectados entre sí por cable de fibra según una topología en anillo. Se tiende hacia una proliferación de este tipo de redes por su facilidad de protección y restauración en caso de rotura de cable. Tal como se ve en la figura, el anillo incluye dos fibras, una para operación en estado normal y otra de reserva. En caso de rotura del cable óptico los multiplexores instalados en los nodos adyacentes a la sección averiada reencaminan el tráfico por la fibra de reserva.

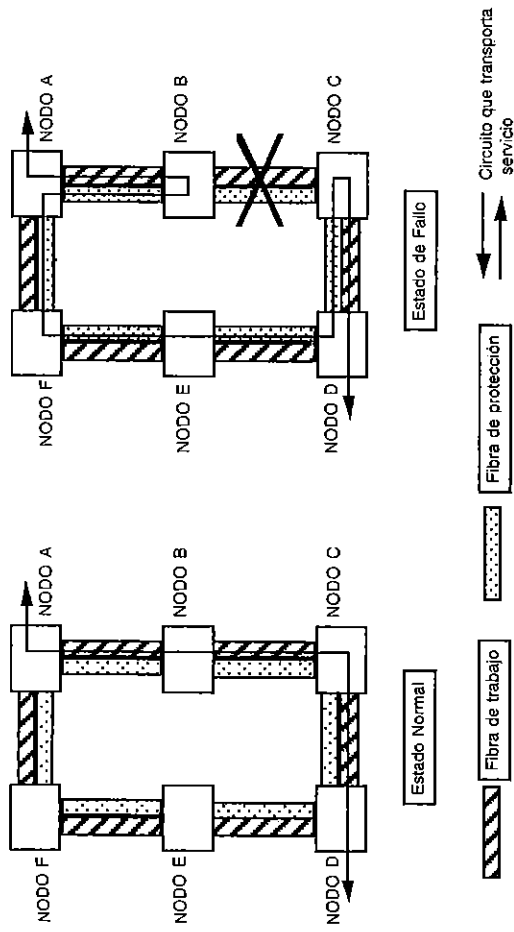


FIGURA 17. Anillo con protección de sección de multiplexación.

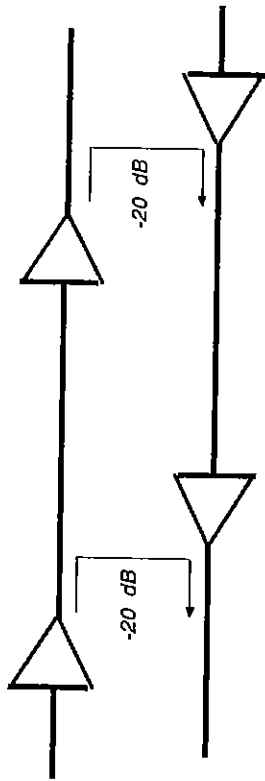
### Enlaces submarinos

Un caso singular de enlaces son los submarinos. Los enlaces submarinos se suelen encargar llave en mano, y normalmente incorporan los últimos avances tecnológicos. Una consideración especial en los cables es su fiabilidad: un cable submarino, con sus elementos de línea, se suele diseñar para una vida de al menos 20 años.

Los cables submarinos que se instalan en la actualidad incorporan amplificadores ópticos en vez de regeneradores. En estos momentos transportan una única portadora óptica, con potencias de salida de cada amplificador de aproximadamente  $\pm 4$  dBm y pérdidas de vano entre amplificadores de 7 dB, equivalentes a unos 30 km de fibra. Sin embargo, antes de ponerlos en funcionamiento se suelen realizar sobre ellos pruebas de transmisión multiportadora, verificándose que esta tecnología es viable en estos enlaces. Está previsto que algunos cables ópticos de la próxima generación (a partir de 1998) transmitan cuatro u ocho portadoras, cada una modulada a 2.5 Gbit/s.

El problema básico con el que se encuentran los cables submarinos con amplificadores es la dispersión cromática del enlace. En enlaces de varios miles de kilómetros de longitud, como son los transatlánticos o transpacificos, la dispersión de la fibra debe ser prácticamente nula. Como a efectos prácticos no es posible fabricar miles de kilómetros de fibra sin desviaciones en la longitud de onda de dispersión nula, el procedimiento utilizado para contrarrestar el efecto de la dispersión es ir alternando secciones con coeficiente de dispersión cromática de segundo orden pequeño pero positivo con otros de coeficiente negativo. Pequeñas desviaciones de la dispersión de una sección con respecto a su valor nominal se pueden compensar con desviaciones de otra sección. A este procedimiento se le denomina gestión de la dispersión.

Los enlaces submarinos presentan otras características especiales cuyo análisis se sale del ámbito de este trabajo. Una que por su singularidad sí merece la pena destacar es la relativa a su sistema de supervisión. En los cables submarinos los requisitos de sencillez, bajo consumo y fiabilidad priman sobre los de funcionalidad del sistema de supervisión: básicamente su único



Subportadora modulada en FM. Identificación del estado de cada vano por análisis digital de la señal de retorno.

FIGURA 18. Mecanismo de supervisión en enlaces submarinos.

requisito es la identificación, en caso de pérdida de enlace, del tramo entre amplificadores entre los que se produce la rotura de un cable, o bien la identificación del repetidor averiado. Para ello se implementa un mecanismo peculiar de supervisión, que se ilustra en la figura 18.

El mecanismo consiste en derivar por la fibra de retorno una pequeña muestra de la señal de salida de cada amplificador. Si sobre la portadora de señal se superpone una señal auxiliar de prueba (normalmente una modulación adicional a los impulsos de señal con un índice de modulación del 1%), desde la cabecera del enlace se puede averiguar mediante un proceso digital de la señal de retorno el vano en el que se ha producido la rotura del enlace. Dado que la potencia de la señal auxiliar es muy baja, la identificación del vano puede llevar varias horas.

#### Enlaces experimentales: el Proyecto UPGRADE

Como colofón de este documento se presenta un enlace experimental de 10 Gbit/s utilizando técnicas de transmisión por solitones en la segunda ventana de transmisión. Este enlace se enmarca dentro del proyecto UPGRADE del programa europeo ACTS II. A lo largo del proyecto, y culminando en 1998, se pondrá en marcha un enlace de 700 km de longitud entre Madrid y Lisboa.

Los solitones son impulsos de luz muy intensos y muy cortos, tal como se puede observar en la figura 19. Son lo suficientemente intensos como para provocar por medio de un efecto no lineal

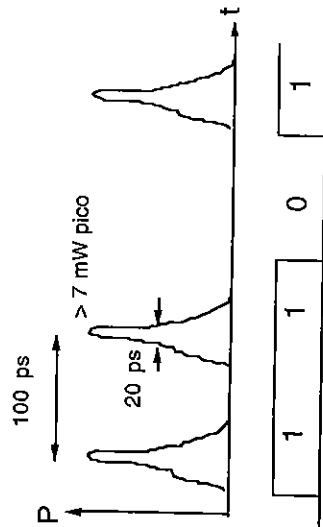


FIGURA 19. Representación esquemática de un solitón.

de la fibra (efecto Kerr) una dispersión cromática de magnitud igual pero de sentido opuesto a la dispersión cromática propia de la fibra. El resultado es que los solitones se pueden transmitir por enlaces de hasta varios miles de km de longitud sin sufrir deformaciones. Por supuesto, las pérdidas de la fibra deben compensarse periódicamente mediante amplificadores ópticos. Además, el ruido de emisión espontánea que generan los amplificadores degrada la calidad del enlace, y de hecho limita la máxima distancia a la que se puede transmitir el solitón. Esta distancia depende de las características detalladas del enlace, como tipo de fibra, distancia entre amplificadores, su figura de ruido, etc.

#### Conclusiones

En estos momentos la situación que se puede denominar convencional en la red de transmisión es la de enlaces por fibra óptica punto a punto entre regeneradores con velocidades de transmisión de hasta 2.5 Gbit/s basados en la Jerarquía Digital Síncrona (JDS). Desde esta situación convencional ha comenzado la evolución hacia enlaces multiportadora con amplificadores ópticos en los que cada portadora soporta un enlace JDS diferente. Los enlaces multiportadora con amplificadores son a su vez un primer paso en la introducción de la llamada subcapa óptica, o conjunto de elementos de red que sin conversiones electroópticas amplifican, encaminan, extraen y, en general procesan comunicaciones ópticas de gran capacidad. La subcapa óptica se irá introduciendo en las redes de forma gradual, a medida que la demanda de capacidad de transmisión requiera enlaces de más de 2.5 Gbit/s.

#### BIBLIOGRAFÍA

1. F.C. ALLARD: *Fiber Optics Handbook*, McGraw-Hill (1990).
2. B.E.A. SALEH and M.C. TEICH: *Fundamentals of Photonics*, John Wiley & Sons (1991).
3. P. LECOY: *Télécommunications optique*, Hermès (1992).
4. H. GUERRERO, J. ZOIDO, J.L. ESCUDERO y E. BERNABEU: «Characterization and Sensor Applications of Polycarbonate Optical Fibers», *Fiber and Integrated Optics*, 12, 257-268 (1993).
5. J. WILSON and J.F.B. HAWKER: *Laser: Principles and Applications*, Prentice Hall (1993).
6. J.M. SENIOR: *Optical Fiber Communications: Principles and Practice* (2ª edición), Prentice Hall (1994).
7. D. WOOD: *Optoelectronic Semiconductor Devices*, Prentice Hall (1994).
8. W.W. CHOW, S.W. KOCH and M. SARGENT III: *Semiconductor-Laser Physics*, Springer-Verlag (1993).
9. N. KASHINA: *Passive Optical Components for Optical Fiber Transmission*, Artech House (1995).
10. I. ANDONOVIC and D. UTTAMCHANDANI: *Principles of Modern Optical Systems*, Artech House (1989).
11. B. RUBIO: *Introducción a la Ingeniería de la Fibra Óptica*, Ra-Ma. (1994).
12. *Optical Fibre Planning Guide For Power Utilities*, by Study Committee 35 WG 04 (Draft to be approved by the SC 35 meeting in Paris' Sept'92), J. Martin and U. Hanselmann as Convener, I. Lehmusvuori Secr., CIGRE, Aug. 92.
13. R.J. HOSS: *Fiber Optical Communications*. Design Handbook, Prentice Hall (1990).
14. S. SHIMADA and H. ISHO: *Optical amplifiers and their applications*, John Wiley & Sons (1992).

15. E. DESURVIRE: *Erbium Doped Fiber Amplifiers. Principles and Applications*, John Wiley & Sons (1994).
16. S. POOLE: *Fiber amplifier use expands as functionality increases*, *Laser Focus world*, p. 111, Octubre (1994).
17. P. URQUHART: «ZBLAN amplifiers open new telecoms windows», *Opto & Laser Europe*, 13, pp. 27-29, Septiembre (1994).
18. A. BJARKLEV: *Optical fiber amplifiers: Design and system applications*, Artech House (1993).
19. J. BELL: «New fibres offer highest gain in 1,3  $\mu\text{m}$  window», *Opto & Laser Europe*, 22, pp. 17-18 Julio (1995).
20. *Optical Fibre Measurement Conference (OFMC) Technical Digests*, (1991), (1993), (1995).
21. J. GOWAR: *Optical Communication Systems*, (2nd ed.), Prentice Hall (1993).
22. E.-G. NEUMANN: *Single-Mode Fibers*, Springer-Verlag (1988).
23. G. KEISER: *Optical Fiber Communications*, (2nd ed.), McGraw-Hill (1991).
24. N. KASHIMA: *Optical Transmission for the Subscriber Loop*, Artech House (1993).
25. P.E. GREEN: *Fiber Optic Networks*, Prentice Hall (1993).
26. D.J.G. MESTDAGH: *Fundamentals of Multiaccess Optical Fiber Networks*, Artech House (1995).
27. D. M. SPIRIT and M. O'MAHONY: *High Capacity Optical Transmission Explained*, John Wiley & Sons (1995).