
2. Redes y tecnología WDM

Always do what you are afraid to do.

Ralph Waldo Emerson

En este segundo capítulo se hará un breve repaso de la evolución de redes ópticas y se estudiarán los distintos componentes ópticos utilizados en aquellas redes multicanal basadas en la multiplexación por división en longitud de onda, discutiendo sus principios básicos y revisando el estado del arte de la tecnología.

2.1 Evolución de las redes WDM

A lo largo de los últimos años diversos factores han propiciado el importante desarrollo tecnológico de todos los equipos y servicios relacionados con las telecomunicaciones: grandes avances técnicos, liberalización del sector, crecimiento de la red Internet... Todos estos factores están convirtiendo nuestra era, en la era de la información y las comunicaciones. Esta revolución de las telecomunicaciones avanzadas, conocida por la *Sociedad de la Información*, *Autopistas de la Información* o *Aldea Global*, descentralizará y flexibilizará la economía, modificará los hábitos de vida de las personas y en definitiva, transformará radicalmente la sociedad [1].

Para que esta revolución tenga lugar, es necesario mejorar las infraestructuras que soportarán servicios multimedia de diversa índole. Así, el éxito de esta revolución global sin precedentes, depende en gran medida de la instalación de redes de gran capacidad y bajo coste, siendo la fibra óptica el medio elegido para los sistemas de telecomunicación.

En un principio la tecnología óptica fue implantada para sistemas de transmisión a

larga distancia, pero ahora está reemplazando al cable coaxial y de cobre de las redes telefónicas locales, de las redes de televisión por cable y de las redes de datos de área local. La completa explotación de todas las posibilidades que ofrece la fibra óptica no es sencilla, pero se ha progresado tremendamente en los últimos 20 años [2], durante los cuales la capacidad de las redes de largo recorrido se ha duplicado cada dos años. Considerando un crecimiento anual del 100 %, llegamos a que los requerimientos de capacidad para la próxima generación de equipos será del orden de terabits, para el periodo inmediatamente posterior al año 2010.

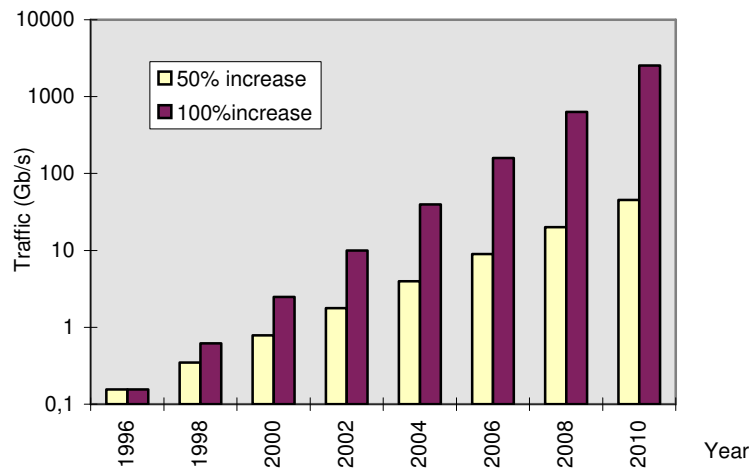


Figura 2.1: Incremento en capacidad de los enlaces de transmisión previsto para los próximos años [3].

Es interesante hacer un breve recordatorio de la historia de las tecnologías de redes transmisión. Tras evolucionar de las comunicaciones analógicas a las digitales, y de PDH a SDH, el objetivo está ahora en pasar de SDH a WDM. SONET¹ en Norte América y SDH² en Europa, son los estándares de transmisión digital a larga distancia que resuelven los problemas de gestión y mantenimiento de los equipos, así como en la inserción y

¹ Acrónimo de la expresión inglesa *Synchronous Digital NETWORK*, que se podría traducir como red digital síncrona.

² Acrónimo de la expresión inglesa *Synchronous Digital Hierarchy*, que se podría traducir como jerarquía digital síncrona.

extracción de las señales de jerarquías inferiores (de menor capacidad), presentados por su predecesor PDH³ [4].

La tecnología de transporte SDH permite diferentes tasas de bit o STM⁴, desde STM-1 (155 Mbps) hasta STM-64 (10 Gbps). La protección se ofrece a través de topologías en anillo, posibilitadas gracias a ADMs⁵, capaces de reconfigurarse del fallo de un enlace en menos de 50 ms [6]. Otras características importantes de SDH son la compatibilidad con la tecnología de transporte precedente (es decir, PDH), la posibilidad de transportar nuevos formatos de señales como ATM⁶, estandarización mundial, monitorización de errores y sus potente funcionalidad de administración.

Si consideramos la capacidad de las diferentes tecnologías como la tasa de transmisión de bits típica utilizada y el factor de multiplexación ofrecido por los nodos de conmutación y multiplexación, podemos ver una clara evolución:

- Inicialmente la transmisión digital era capaz de soportar 2 Mbps (en el primer nivel de multiplexación o multiplexores básicos), teniendo 64 Kbps cada una de las señales tributarias. Estos 64 Kbps conforman la tasa de bit de las redes telefónicas tradicionales.
- El siguiente paso fue mejorar la eficiencia en la transmisión, permitiendo tasas de bit más altas introduciendo *cross-connects*⁷ (principalmente manuales pero en

³ Acrónimo de la expresión inglesa *Plesiochronous Digital Hierarchy*, que se podría traducir como jerarquía digital plesiócrona.

⁴ Acrónimo de la expresión inglesa *Synchronous Transport Module*, que se podría traducir como módulo de transporte síncrono.

⁵ Acrónimo de la expresión inglesa *Add and Drop Multiplexers*, de difícil traducción. En textos de comunicaciones ópticas siempre se utiliza esta expresión. Su significado podría ser el de una arquitectura que permite tanto la extracción como la incorporación de señales ópticas que viajan por el sistema.

⁶ Acrónimo de la expresión inglesa *Asynchronous Transfer Mode*, que se puede traducir por modo de transferencia asíncrono.

⁷ Expresión inglesa de difícil traducción. Los equipos *cross-connect* son elementos de conmutación de señales entre puertos de entrada y de salida [5].

algunos países, como en Francia e Inglaterra, automáticos). La señal agregada pasó a tener una capacidad de 140 Mbps y un factor de multiplexación de 2 Mbps. Por supuesto también hay tasas de bit intermedias, tales como 8 Mbps o 34 Mbps. Esta tecnología es PDH.

- Una paso mayor, que está de hecho en desarrollo en todos los países del mundo, es la introducción de SDH. Actualmente el factor de multiplexación es de 150 Mbps y es posible una capacidad de 10 Gbps. Nótese, de nuevo, que son posibles otras tasas de bit intermedias.
- Una nueva etapa está en el uso generalizado de la WDM, que aún no ha sido totalmente estandarizado debido la rápida evolución de estos equipos, lo que imposibilita producir recomendaciones a tiempo y constituye una clara desventaja frente a SDH. Ya no se está lejos de alcanzar una capacidad de 320 Gbps (32 longitudes de onda), con un factor de multiplexación de 10 Gbps. No obstante, la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU) ha propuesto recientemente una primera recomendación importante para la disposición de las longitudes de onda a 1,6 nm (o múltiplos suyos), en el rango de 1.530 a 1.560, y se prevé que de aquí al año 2000 aparezcan un buen número de recomendaciones concernientes a esta nueva tecnología [3].
- El paso siguiente se dará posiblemente en torno al año 2010 [3] y requerirá grandes avances que superen las limitaciones de la WDM, consiguiendo incrementar el factor de multiplexación a 320 Gbps con una capacidad total de 10 Tbps, o quizás la combinación de WDM con el principio de TDM en el dominio óptico.

En efecto, la mejor técnica a corto plazo para llegar a aprovechar todo el ancho de banda ofrecido por una fibra óptica, sin necesidad de cambiar todos los equipos y enlaces existentes, es la WDM. La tecnología WDM es estos momentos, ampliamente utilizada en redes de cable de fibra óptica submarinos internacionales [7], consiguiendo unas capacidades y una funcionalidad inimaginables hace tan sólo cinco años.

Sistemas transoceánicos transportando más de 16 longitudes de onda ya son posibles a lo largo de distancias de 8.000 Km. Estos sistemas transportan un STM-16 (2,5 Gbps) en cada longitud de onda, soportando una capacidad máxima de 40 Gbps por fibra. También son posibles 6 canales a 5 Gbps sobre distancias similares. El principal reto en el diseño de estos sistemas es cómo conseguir un mayor número de longitudes de onda sobre distancias de alrededor de 12.000 Km. Se debe tener un especial cuidado seleccionando las características de dispersión de cada fibra y el espaciado entre longitudes de onda. En un futuro próximo se podrá incrementar la capacidad a un STM-64 (10 Gbps) por longitud de onda. Además, la seguridad y disponibilidad, son requerimientos absolutamente necesarios de las redes submarinas, por lo que muchos tramos utilizan componentes redundantes y topologías en anillo.

Actualmente hay varias redes transoceánicas en diseño y construcción. Una de estas redes es Africa ONE que fue el primer proyecto que planeó utilizar tecnología WDM, concebida como un anillo de cable de fibra óptica submarino dando acceso a más de 2,5 Gbps a toda la costa africana sobre más de 40.000 Km, aunque ha sufrido varios retrasos en el comienzo de su instalación.

Otro proyecto es Sea-Me-We-3, que a finales de 1998 cuando entre en servicio, será la primera red submarina que utilice encaminadores de longitudes de onda y multiplexores *add/drop*. Esta red será instalada con una capacidad superior a 8 longitudes de onda en cada fibra transportando cada fibra un STM-16. Sea-Me-We-3 conectará más de una docena de países entre el Sur y mitad Este de Asia y el Este de Europa.

Los tres sistemas WDM conocidos por Atlantis-2, Columbus-3 y Americas-II, formarán, cuando se finalicen a mediados de 1999, un anillo alrededor del Océano Atlántico Sur, conectando países de cuatro continentes. A diferencia de las redes Africa ONE y Sea-Me-We-3, permitirán que la capacidad y el encaminamiento del tráfico sea cambiada una vez que el sistema esté operativo, reduciendo el coste inicial por utilizar menos longitudes de onda de las que podrá soportar.

Las redes China-US y Atlantic Crossing-1 (AC-1), serán construidas con la más avanzada tecnología WDM disponible hoy en día, con el fin de conseguir la máxima capacidad posible en mayores distancias que las redes actualmente instaladas a lo largo del Pacífico y del Atlántico, es decir TAT-12/13 y TPC-5, completadas en 1996 [2]. Ambos sistemas están constituidos por redes en anillo apiladas WDM que transportan tráfico en pares de cuatro fibras. China-US está diseñada para transportar 8 longitudes de onda a 2,5 Gbps sobre una distancia máxima de 12.000 Km. AC-1 en cambio, transportará 4 longitudes de onda a 2,5 Gbps en cada fibra sobre un máximo de 7.000 Km. AC-1 conectará cuatro puntos costeros de distintos países mediante cuatro segmentos de cable separados: U.S.-U.K., U.K.-Países Bajos, Países Bajos-Alemania y Alemania-U.S.

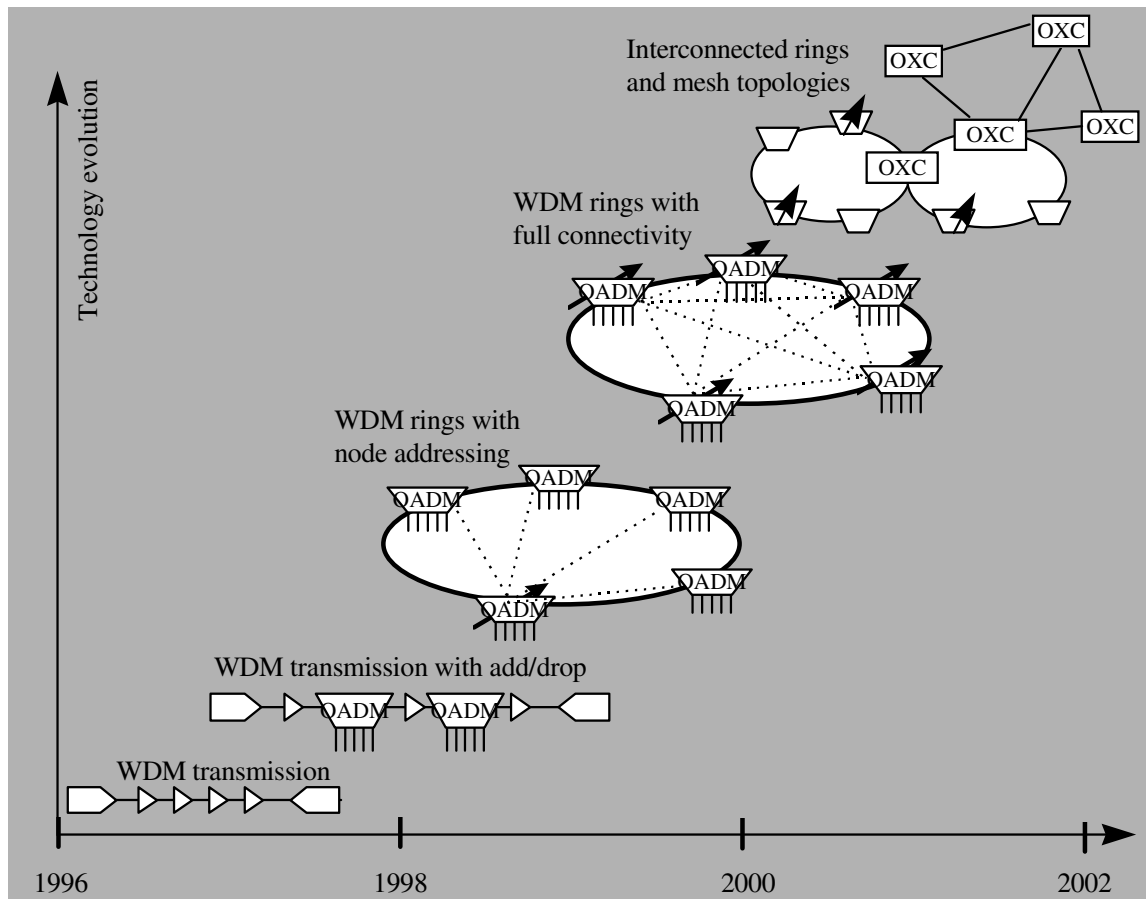


Figura 2.2: Evolución esperada en la arquitectura de las redes WDM [3].

Se prevé que a finales de 1999 todas estas redes submarinas estén ya finalizadas y operativas, conectando más de 90 países con 100.000 Km de cable submarino.

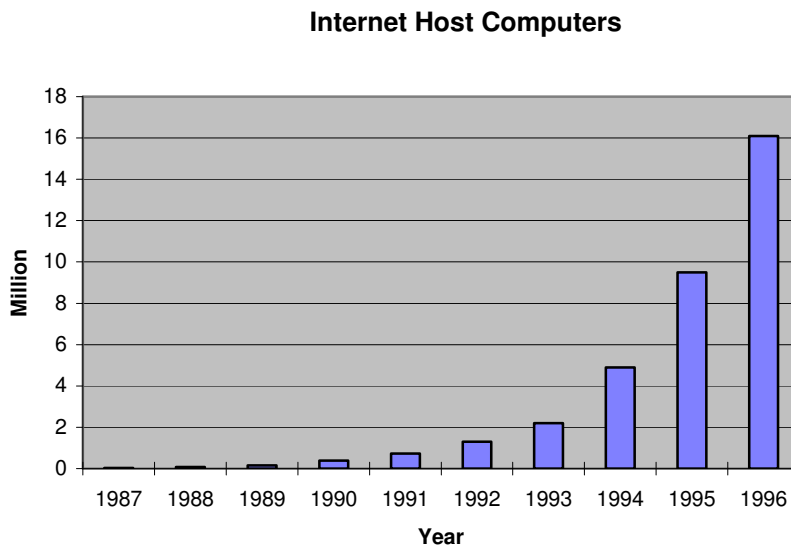


Figura 2.3: Crecimiento en número de ordenadores conectados a Internet, durante los últimos años [3].

La investigación y desarrollo de las redes WDM en redes regionales y MAN⁸ ha madurado considerablemente en pocos años, además de haberse incrementado el número de prototipos experimentales que actualmente están siendo probados en Europa [8], Estados Unidos [9] y Japón. La evolución esperada para las nuevas arquitecturas de red óptica WDM se espera que sea similar a la observada en las redes SDH, y se ilustra esquemáticamente en la Figura 2.2. Ya se ha anticipado que la próxima generación de Internet, red donde el crecimiento de usuarios ha sido especialmente espectacular, casi exponencial como muestran los datos de la Figura 2.3, empleará *backbones*⁹ ópticos basados en WDM.

En cuanto a los programas de investigación y desarrollo europeos a corto plazo, cabe destacar el ACT¹⁰ [10], cuyo principal objetivo es conseguir que la futura

⁸ Acrónimo de la expresión inglesa *Metropolitan Area Network*, que podría traducirse como red de área metropolitana.

⁹ Expresión inglesa de difícil traducción. Los *backbones* es el nombre que reciben las redes de tránsito de alta velocidad en Internet. Su misión principal es la de interconectar a nivel mundial las distintas redes de proveedores locales [11].

¹⁰ Acrónimo de la expresión inglesa *Advanced Communications Technologies and Services*, que podría

infraestructura de banda ancha se base en tecnologías de fibra óptica. Para ello se tratará de recurrir lo menos posible a la conversión entre los dominios eléctrico y fotónico, aprovechando al máximo a la dimensión de la longitud de onda. Actualmente hay dos proyectos ACTs que se ocupan en concreto del problema de redes de transporte ópticas transeuropeas utilizando WDM: OPEN¹¹ y PHOTON¹² [12].

El proyecto OPEN encabezado por Alcatel, trata aplicaciones submarinas con WDM. Por otro lado PHOTON, que engloba a empresas como Siemens, Deutsche Telekom, PTT Austria, Phillips, BCC y Telecom Austria, implementará una red basada en fibra estándar monomodo ya instalada, y demostrará transmisión WDM con velocidades superiores a 10 Gbps sobre más de 500 Km. Para ello tratará con amplificación, compensación de dispersión, encaminamiento de longitudes de onda y funciones de conexión de cruce.

De cualquier forma, la instalación de sistemas WDM está siendo realidad en tramos submarinos, mientras que el acercamiento de la fibra hasta la casa no será un hecho en un plazo más o menos corto [1], debido al compromiso entre el coste de la instalación y las ventajas que se podrán obtener. Sin embargo, varias previsiones señalan cifras que invitan a ser optimistas, diciendo que el mercado de multiplexores por división en longitud de onda, sólo en Estados Unidos, crecerá desde los 80 millones de dólares en el año pasado, hasta los 330 millones en el 2000 [2], mientras que en Europa las cifras son menores, partiendo de 400.000 dólares de ventas ese mismo año pasado, y llegando a los 238 millones de dólares para el año 2001. Y que la implantación de fibra óptica seguirá su expansión, creciendo desde los 22,8 millones de kilómetros en el año 1995, hasta los 63 millones en el año 2001 [3], con implantación mayoritaria en los Estados Unidos, Japón y China, con unas ventas de 100 millones de dólares en rejillas de Bragg.

Todas estas inversiones propiciarán que en unos cinco años, la red de transporte europea experimente un profundo cambio, posibilitado por las soluciones WDM ofrecidas

traducirse como servicios y tecnología de comunicaciones avanzadas.

¹¹ Acrónimo de la expresión inglesa *Optical Pan-European Network*, de difícil traducción.

¹² Acrónimo de la expresión inglesa *Pan-European Photonic Overlay Network*, de difícil traducción.

a los operadores europeos por los principales suministradores de dispositivos ópticos: Ericsson, Lucent, Pirelli, Ciena, GPT-Siemens, Alcatel, Nortel y DCS.

2.2 Dispositivos ópticos para redes WDM

A continuación se presentan los componentes básicos de las redes WDM, discutiendo varias de las soluciones disponibles, y vislumbrando sus cualidades y limitaciones.

En efecto, utilizando la multiplexación por división en longitud de onda se podrán conseguir anchos de banda del orden de los 50 THz [13], pero el éxito de las redes depende mucho de la tecnología de dispositivos ópticos. Por lo tanto, los diseñadores de la próxima generación de redes ópticas han de ser conscientes de las propiedades de las fibras y componentes ópticos actuales [5], con el fin de aprovechar el potencial total de la WDM.

2.2.1 Fuentes de luz

Las fuentes de luz utilizadas en óptica integrada son los fotodiodos emisores de luz y los láseres de inyección o diodos láser, o bien en una estructura simple de unión p-n, o en heteroestructuras [14]. Ambos tipos de fuentes tienen además la ventaja de que introduciendo impurezas o dopantes, se puede modificar la frecuencia de emisión. El compuesto más utilizado en el rango de longitudes de onda de 1,1 a 1,6 μm , es el InGaAsP.

Los diodos láser tienen como valores típicos, una potencia de salida de 20 mW, frecuencia de modulación de 10 GHz y anchura espectral de 0,7 nm. Por ser fuentes de luz coherentes, son necesarios para la utilización de detectores coherentes, los cuales dan lugar a una mejora de la sensibilidad y selectividad del sistema. Son utilizados en las fibras multimodo.

Los fotodiodos emisores de luz se caracterizan por una potencia de salida de 1mW,

frecuencia de modulación de 50 GHz y anchura espectral de 50 nm. Son siempre utilizados en fibras monomodo. Son más baratos que los LED¹³ y de momento, su tiempo de vida operativa es mayor. Los LED más utilizados son los de emisión superficial, que con un correcto diseño pueden utilizarse en sistemas de hasta 500 Mb/s, a costa de perder potencia de emisión. Los LED de emisión lateral, suponen una mejora de prestaciones, aumentando la potencia acoplada a la fibra y una reducción de la anchura espectral, presentando sin embargo inconvenientes como la complejidad de fabricación y alimentación de los diodos láser.

En ocasiones, cuando la fuente de luz no está directamente acoplada a la fibra a través del circuito integrado, el haz se focaliza por medio de lentes adecuadas que suelen ser objetivos de microscopio o lentes grin. También son utilizados prismas y redes de difracción y, sobre todo, acopladores direccionales para pasar luz de una fibra a otra.

Las fuentes de luz más utilizadas en las redes WDM son los láseres y en concreto los láseres sintonizables, que permiten emitir diferentes longitudes de onda. Los láseres sintonizables se basan en efectos mecánicos, acustoópticos o electroópticos.

Antes de explicar el principio de funcionamiento y características de los láseres sintonizables, se debe recordar que un láser consiste en dos espejos que forman una cavidad, un medio láser que ocupa la cavidad, y un dispositivo de excitación. El dispositivo de excitación inyecta una corriente en el medio láser, el cual está hecho de una sustancia cuasiestable. La corriente excita los electrones en los átomos del medio láser, y cuando un electrón retorna al estado menos energético, emite un fotón de luz. El fotón se reflejará en los espejos a ambos extremos de la cavidad y pasará de nuevo a través del medio. La emisión estimulada tiene lugar cuando el fotón pasa muy cerca de un electrón excitado.

Los láseres sintonizados mecánicamente utilizan una cavidad Fabry-Perot adyacente al medio de emisión del láser, con el fin de filtrar las longitudes de onda no

¹³ Acrónimo de la expresión inglesa *Light Emitting Diode*, que podría traducirse como diodo emisor de luz.

deseadas. La selección de la longitud de onda se lleva a cabo por el ajuste de la distancia entre los dos espejos en cada extremo de la cavidad externa, de forma que sólo la longitud de onda deseada interferirá constructivamente con sus múltiples reflexiones en la cavidad. Este método de selección resulta en un rango de sintonía que abarca completamente el espectro de ganancia útil del láser semiconductor, unos 500 nm, pero el tiempo de sintonía es del orden de 1 a 10 ms, originado por la naturaleza mecánica de la selección de la frecuencia de emisión y por la longitud de la cavidad. La longitud de la cavidad puede también limitar las tasas de transmisión, a menos que se utilice un modulador externo. Los láseres de cavidad externa suelen tener una estabilidad en la frecuencia de emisión muy buena.

En los láseres sintonizados acustoóptica o electroópticamente, el índice de refracción en la cavidad externa cambia utilizando ondas acústicas o corriente eléctrica, respectivamente. El cambio en el índice da lugar a la transmisión de luz a diferentes frecuencias. En estos tipos de láseres sintonizables, el tiempo de sintonía de la frecuencia de emisión deseada está limitado por el tiempo requerido por la luz para interferir constructivamente a la nueva frecuencia.

Los láseres acustoópticos combinan un rango de sintonía moderado, unos 83 nm, con un tiempo de sintonía también moderado, de alrededor de 10 μ s. No obstante, aunque este tiempo de respuesta no es suficiente para conmutación de paquetes con canales de multigigabits por segundo, supone una seria mejora sobre los láseres sintonizados mecánicamente. Los láseres electroópticos tienen tiempos de sintonía de 1 a 10 ns, pero el rango de sintonía es de sólo unos 7 nm.

Los láseres sintonizados por inyección de corriente forman una familia de transmisores que permiten la selección de la frecuencia de emisión a través de una rejilla de difracción. El DFB¹⁴ usa una rejilla de difracción dispuesta en el medio donde se produce el efecto láser. En general, la rejilla consiste en una guíaonda en la cual el índice de refracción alterna periódicamente entre dos valores. Sólo las longitudes de onda que se

¹⁴ Acrónimo de la expresión inglesa *Distributed Feedback Laser*, que podría traducirse como láser de realimentación distribuida.

corresponden con ése periodo de la rejilla sufrirán interferencia constructiva. El resto de frecuencias interferirán destructivamente y no se propagarán a través de la guíaonda. En concreto, la condición para la propagación viene dada por

$$D = \frac{\lambda}{2n} \quad (2.1)$$

donde D es el periodo de la rejilla. El láser se sintoniza inyectando una corriente que origina un cambio en el índice de refracción de la región de la rejilla.

Cuando la rejilla se mueve fuera del medio láser, el láser se denomina láser DBR¹⁵. La selección de la frecuencia de emisión en este tipo de láser es discreta, y los tiempos de sintonía son menores a 10 ns. Como consecuencia de que el cambio del índice de refracción en el láser DBR está limitado, este láser tiene un rango de sintonía bastante pequeño, unos 10 nm, el cual puede proporcionar alrededor de 25 canales.

La Figura 2.4 ilustra el concepto de multiplexación por división en longitud de onda utilizando o bien fuentes y receptores ópticos sintonizables, o bien una matriz de láseres fijos. Una matriz de láseres consiste en un cierto número de láseres que son integrados en un único componente, con cada láser operando a una frecuencia diferente. La ventaja de utilizar matrices de láseres es que cada una de las longitudes de onda de la matriz es modulada de manera independiente, con lo cual pueden tener lugar múltiples transmisiones simultáneamente. La desventaja es que el número de longitudes de onda disponibles en una matriz de láseres es fijo y actualmente está limitado a 20 [5].

En [15] se presenta un láser MFL¹⁶ capaz de producir una tasa conjunta de 10 Gbps (16×622 Mbps) en 16 canales consecutivos espaciados exactamente 200 GHz y se compara el MFL con una matriz de láseres DFB. Se llega a la conclusión de que para aplicaciones

¹⁵ Acrónimo de la expresión inglesa *Distributed Bragg Reflector*, que podría traducirse como reflector de Bragg distribuido.

¹⁶ Acrónimo de la expresión inglesa *Multi-Frequency Laser*, que podría traducirse como láser multifrecuencia.

con un pequeño número de canales es preferible la matriz de DFBs, pues son más compactos. Sin embargo, a medida que aumenta el número de canales o longitudes de onda, la posibilidad de controlar el espaciado entre los canales ópticos, y el bajo coste por longitud de onda, puede pesar sobre la desventaja del tamaño.

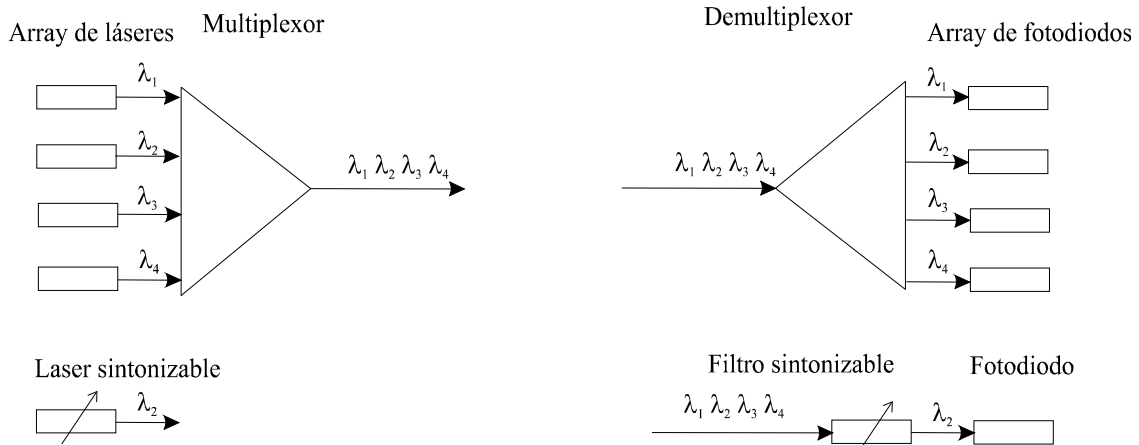


Figura 2.4: Láseres y fotodiodos utilizados en multiplexación por división en longitud de onda.

2.2.2 Fibra óptica

La fibra óptica [16], y en particular la fibra óptica monomodo, se ha convertido en el medio de transmisión más atractivo, debido entre otros motivos, a [17]:

- Bajas pérdidas de transmisión y alto ancho de banda. Mientras que parece que no puede rebasarse la capacidad de 1 GHz en el cable coaxial, a través de fibra óptica se podrán llegar a transmitir más de 1 THz¹⁷, en caso de que la tecnología llegue a proporcionar detectores suficientemente rápidos. La baja atenuación de la señal es otra ventaja, consiguiendo distancias entre repetidores superiores a 100 Km en tercera ventana. Las tasas de error de los sistemas de comunicaciones ópticas son menores de 10^{-11} . Por lo tanto, el cable de fibras ópticas puede

¹⁷ El máximo teórico es de 50 THz de ancho de banda, pero este máximo se ve limitado por las no linealidades de la fibra [13].

transportar más datos en mayores distancias, reduciendo el número de equipos, complejidad y coste del sistema.

- Pequeño tamaño y peso. Lo cual facilita la instalación y transporte, frente a los gruesos y pesados cables coaxiales.
- Inmunidad a interferencias. Las fibras ópticas, por su naturaleza dieléctrica, son insensibles a interferencias electromagnéticas.
- Aislamiento eléctrico. Puesto que las fibras ópticas se construyen a partir de silicio, que es un aislante eléctrico, no hay que preocuparse con llevarlos a tierra o por la diafonía eléctrica.
- Seguridad de la señal. La fibra óptica supone una mayor seguridad ante ataques de intrusos en busca de la información transmitida, pues la señal óptica queda muy bien confinada en las guías de ondas, y las pequeñas emanaciones son rápidamente absorbidas por un recubrimiento opaco alrededor de la fibra.
- Abundante presencia de los materiales en la naturaleza. El Silicio, material que principalmente constituye las fibras ópticas, es muy abundante y barato, ya que se encuentra en la arena ordinaria. Lo que si resulta caro es el proceso de purificación de dicho semiconductor [16].
- Posibilidad de integración. Se están consiguiendo grandes avances en la integración óptica, miniaturizando todos los componentes que componen el sistema de transmisión, e insertarlos en un chip o pastilla de alrededor de 1 cm^2 de un material adecuado [18].

Por el momento son las fibras ópticas los elementos que limitan la capacidad y longitud del sistema de comunicaciones. Se debe a tres efectos: la dispersión, las pérdidas y la no linealidad.

Los efectos no lineales [19] pueden tener un impacto significativo en el desarrollo de sistemas de comunicaciones ópticas WDM [5]. Es el fenómeno que peor se controla por la dependencia de la intensidad del pulso de luz que viaja a través de la fibra, es el ligero incremento (de alrededor de 10^{-7}) que un campo óptico produce en el índice de refracción de la fibra, que viene dado por $n = n_0 + 3,2 \cdot 10^{-16} \cdot I$, donde I es la intensidad de la señal óptica en cm^2/W y n_0 es el índice de refracción del núcleo. De esta forma, la no linealidad cambia la fase de la onda dependiendo de su intensidad y la distancia viajada, dando lugar, puesto que la frecuencia es la diferencial temporal de la fase, a la aparición de nuevas frecuencias en el pulso: menores frecuencias en su parte delantera y mayores en su parte trasera. Este fenómeno no lineal conocido por SPM¹⁸, limita la potencia de entrada a la fibra, $P_{in} \ll 45 \text{ mW}$, y produce un ensanchamiento espectral considerable de los pulsos que se propagan en ésta.

En las fibras ópticas de salto de índice, el índice de refracción del núcleo n_1 y el del revestimiento n_2 , ligeramente menor a n_1 , son constantes. Esto es, el perfil del índice de refracción para este tipo de fibras da un salto en la interfaz núcleo-revestimiento, como se muestra en la Figura 2.5. En la Figura 2.5(a) se presenta una fibra de salto de índice multimodo, es decir, que permite la propagación de varios modos¹⁹ a su través. El diámetro del núcleo en este tipo de fibras es de alrededor de $50 \mu\text{m}$ o mayor, frente a los 2 o $10 \mu\text{m}$ en las fibras monomodo. En ambos casos el revestimiento suele ser de $125 \mu\text{m}$. En las fibras monomodo sólo se propaga un modo transversal electromagnético, típicamente el HE_{11} o modo fundamental (en concreto se trata de un modo transversal eléctrico o TE, por ser nula la componente de campo eléctrico en la dirección de propagación), lo cual se refleja en la Figura 2.5(b) mediante la representación de un único rayo. Una fibra óptica de

¹⁸ Acrónimo de la expresión inglesa *Self-Phase Modulation*, que podría traducirse como automodulación de fase.

¹⁹ El campo de luz electromagnética que es guiado a través de una fibra óptica, puede ser representado por la superposición de modos guiados. Éstos no son más que un conjunto de configuraciones de campos electromagnéticos sencillas o soluciones parciales que dependen de la forma particular que toman los campos, los cuales forman un patrón de ondas estacionarias en la dirección transversal de la fibra [14].

índice gradual soporta un único modo si la frecuencia normalizada definida como

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} a \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (2.2)$$

siendo λ la longitud de onda de la luz en el vacío y a el radio del núcleo, es menor que 2,4048. El número de modos M que en una fibra multimodo viene dado aproximadamente por

$$M = \frac{1}{2} V^2 \quad (2.3)$$

La ventaja de las fibras ópticas monomodo es la baja dispersión intermodal (ensanchamiento de los pulsos transmitidos), ya que un sólo modo es transmitido, mientras que con una fibra multimodo de salto de índice se produce una dispersión considerable debido a las distintas velocidades de grupo de los modos propagativos. En las fibras monomodo la dispersión es debida al cambio del índice equivalente del modo fundamental con la longitud de onda, conocida por dispersión intramodal o cromática. La dispersión intermodal, va a suponer una seria restricción al ancho de banda: como la diferencia entre el tiempo de llegada de los diferentes modos es muy pequeña, se solapan unos con otros aunque el pulso de entrada a la fibra sea muy estrecho, siendo el resultado final un pulso ensanchado en el dominio del tiempo. A este fenómeno por el cual la velocidad de grupo²⁰ del modo fundamental depende de la frecuencia de modo que las diferentes componentes espectrales del pulso viajan a una velocidad diferente, se conoce por GVD²¹.

Una forma sencilla de reducir la dispersión intermodal es reducir el número de modos, lo cual se consigue disminuyendo el diámetro del núcleo, reduciendo la apertura numérica o incrementando la longitud de onda de la luz. No obstante, las fibras multimodo también presentan ventajas, como la posibilidad de utilizar fuentes ópticas incoherentes (la mayoría de los LED) cuya potencia no podría ser eficientemente acoplada a las fibras

²⁰ La velocidad de grupo de una onda, puede asociarse a la velocidad a la que se propaga la energía.

²¹ Acrónimo de la expresión inglesa *Group-Velocity Dispersion*, que podría traducirse como dispersión de velocidad de grupo.

monomodo; mayores aperturas numéricas así como diámetros del núcleo, facilitando el acoplamiento a la potencia de entrada emitida por las fuentes ópticas; menor coste; y finalmente, menores requerimientos de tolerancia en los conectores de fibra.

Ejemplos de aplicaciones de las fibras ópticas de salto de índice, son los cables submarinos en el caso de las monomodo y las redes de transmisión de datos, en el caso de las multimodo.

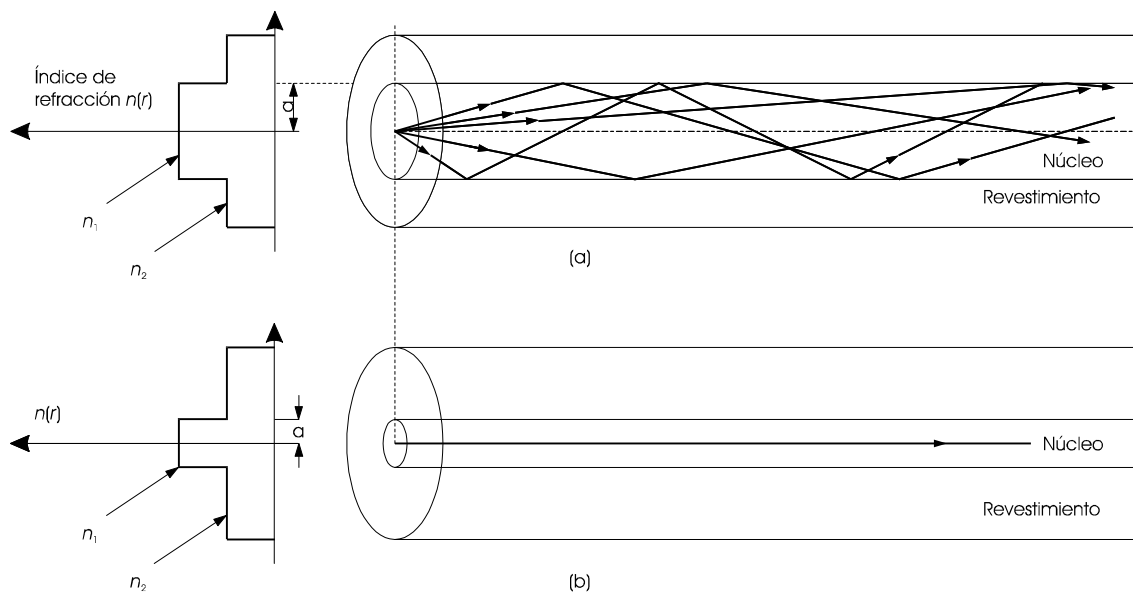


Figura 2.5. Perfiles del índice de refracción y transmisión de los rayos en fibras de salto de índice: (a) fibra multimodo de salto de índice; (b) fibra monomodo de salto de índice.

Para reducir la dispersión intermodal en fibras multimodo, se utilizan fibras cuyo núcleo no tiene un índice de refracción constante, sino que toma la forma

$$n(r) = \begin{cases} n_1 \sqrt{1 - 2\Delta \left(\frac{r}{a}\right)^\alpha} & r < a \quad (\text{núcleo}) \\ n_1 \sqrt{1 - 2\Delta} = n_2 & r \geq a \quad (\text{revestimiento}) \end{cases} \quad (2.4)$$

siendo Δ la diferencia relativa de índices de refracción y α un parámetro que determina la característica del perfil del índice de refracción en el núcleo de la fibra, como se muestra

en la Figura 2.6. Si α se ajusta convenientemente, puede conseguirse que los caminos ópticos de todos los rayos sean similares, ya que las trayectorias más largas pasan por lugares donde el índice de refracción es menor, con lo que la dispersión intermodal se hace mucho más pequeña que en las fibras de núcleo de índice constante. Este mecanismo es ilustrado en la Figura 2.7. Los mejores resultados se obtienen para un perfil de índice gradual parabólico, esto es, para $\alpha \approx 2$. Otra de las ventajas de este tipo de fibras es que reducen el ángulo crítico.

Un ejemplo de la aplicación de las fibras de índice gradual, es la unión de centrales telefónicas, siendo su principal desventaja frente a las fibras de salto de índice su mayor coste.

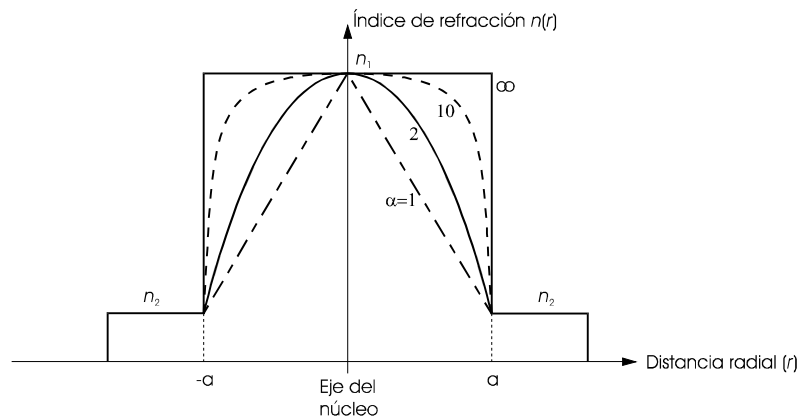


Figura 2.6: Perfiles posibles del índice de refracción para diferentes valores de α .

En [20] se presentan con más detalle las características más importantes y los principios de diseño de las fibras ópticas que se utilizan en los sistemas WDM: fibras monomodo estándar, de dispersión desplazada, de dispersión desplazada no nula, de compensación de la dispersión, y de dispersión aplanada.

Con las modernas fibras ópticas, es posible transmitir información sobre un amplio rango espectral. Actualmente se dispone de fibras ópticas monomodo hechas de silicio con pérdidas menores a $0,2 \text{ dB/Km}^{22}$ en la tercera ventana, correspondiente a una longitud de onda de $1,55 \mu\text{m}$. El problema histórico de estas fibras era la dispersión (cercana a los 17

²² El mínimo teórico es de $0,16 \text{ dB/Km}$ [21].

ps/nm·Km), la cual era nula en la segunda ventana, correspondiente a una longitud de onda de $1,31 \mu\text{m}$, pero con la desventaja de sufrir una mayor atenuación, unos $0,5 \text{ dB/Km}$, debido fundamentalmente al aumento de *scattering* Rayleigh a medida que disminuye la longitud de onda.

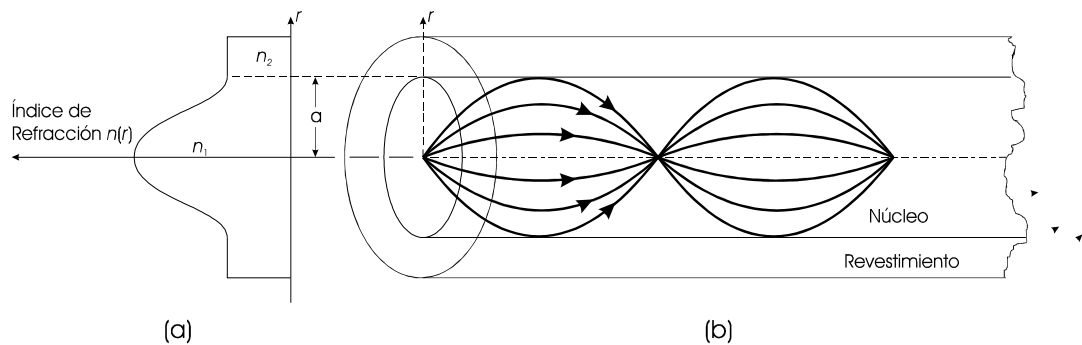


Figura 2.7: Perfil del índice de refracción (a) y transmisión de los rayos (b) en una fibra óptica de índice gradual multimodo.

Gracias a las fibras ópticas DSF²³, en las que mediante un índice de refracción escalonado desde el centro hasta los bordes, se consigue desplazar el mínimo de dispersión hasta la tercera ventana. El problema de utilizar fibras DSF es que no se comportan tan bien en sistemas WDM como en sistemas monocanal, debido al fenómeno conocido por FWM²⁴, producido por la combinación de dos o más portadoras ópticas que generan nuevas ondas a una frecuencia mezcla de las que ellas presentan. Este fenómeno originado de nuevo por la naturaleza no lineal del índice de refracción de la fibra, es más intenso si la dispersión es nula a la longitud de onda de operación, pues las señales indeseadas se moverán a la misma velocidad que las señales deseadas, dando lugar a una interferencia significativa y reduciendo considerablemente el rendimiento del sistema.

²³ Acrónimo de la expresión inglesa *Dispersion Shifted Fiber*, que podría traducirse como fibra de dispersión desplazada.

²⁴ Acrónimo de la expresión inglesa *Four-Wave Mixing*, que podría traducirse como combinación de cuatro ondas.

Otra solución mejor para afrontar el problema de la dispersión cromática es la utilización de rejillas de Bragg, más baratas y de menor tamaño y peso. Las componentes de longitudes de onda diferente, de un pulso ensanchado en las rejillas, se reflejan a posiciones específicas a lo largo del dispositivo. El resultado es un retardo de grupo diferencial, con el máximo retardo proporcional a la longitud de la rejilla. Su principal inconveniente es la dependencia de la temperatura, que además varía mucho para rejillas aparentemente similares, pero con pequeñas variaciones en sus materiales y técnica litográfica de fabricación.

Las fibras NZDSF²⁵, han sido diseñadas para reducir las no linealidades propias de los sistemas WDM. Su principio básico es hacer que la dispersión no sea nula en la banda de ganancia de los amplificadores dopados con Erblio, reduciendo el efecto del FWM, aunque lo suficientemente pequeña para no suponer restricciones en el ancho de banda debidas a la dispersión cromática.

Las fibras DCF²⁶, son fibras con una dispersión negativa muy grande, utilizadas para compensar la dispersión de las fibras monomodo estándar en la tercera ventana. Actualmente pueden invertir los efectos de la dispersión cromática sufrida por las señales en tercera ventana, utilizada como una especie de sintonización a priori y posteriori en la forma de un carrete de fibra de una determinada longitud, situada en el final de cada enlace entre repetidores.

Otra fibra interesante es la conocida como FDF²⁷, que presenta un mínimo de dispersión en 1.310 nm y 1.550 nm. Su relativamente alta atenuación, en torno a 0,28-0,3 dB/Km, y alto precio, está retrasando su utilización.

²⁵ Acrónimo de la expresión inglesa *Non-Zero Dispersion Shifted Fiber*, que podría traducirse como fibra de dispersión desplazada no nula.

²⁶ Acrónimo de la expresión inglesa *Dispersion Compensating Fiber*, que podría traducirse como fibra con compensación de la dispersión.

²⁷ Acrónimo de la expresión inglesa *Flattened Dispersion Fiber*, que se podría traducir como fibra de dispersión aplanada.

Los efectos de la no linealidad y la dispersión, dependen del formato de los pulsos ópticos, que por lo general es NRZ²⁸. Los sistemas NRZ necesitan una dispersión baja, o preferiblemente nula a la longitud de onda de operación. El problema de este requerimiento ya ha sido resaltado, y es que en los sistemas WDM la no linealidad tiene efectos más severos con dispersión cero.

Una propuesta tecnológica de futuro muy interesante, una vez se hallan resuelto ciertos problemas, es la utilización de solitones ópticos [19] para codificar los datos. Su origen está, en que los efectos del GVD y SPM, que actuando independientemente limitan el rendimiento de los sistemas de comunicaciones por fibra óptica, pueden ser compensados entre sí mediante pulsos con una forma, amplitud, anchura y potencia bien determinadas, conocidos por solitones. En la propagación de solitones, la velocidad de la mitad trasera del pulso en el dominio del tiempo tiende a incrementarse y la de la mitad delantera a decrementarse, por fenómenos físicos no lineales, compensándose. De este modo, una vez alcanzado el equilibrio entre dispersión y no linealidad, se puede mantener a lo largo de distancias de hasta millones de kilómetros, regenerando la señal mediante amplificadores ópticos, con lo cual los solitones viajan sin sufrir distorsión alguna.

La posibilidad de multiplexar solitones en bastantes longitudes de onda, sin sufrir la interacción entre canales de los pulsos NRZ, los hacen especialmente interesantes en los sistemas WDM [22]. Hasta hace poco, la capacidad total de transmisión de solitones WDM no había superado los 160 Gb/s, mientras que la máxima conseguida mediante codificación NRZ era de 100-160 Gb/s (con 5 Gb/s por canal). En [23] se demuestra por primera vez, la posibilidad de enviar 160 Gb/s de datos WDM (20 Gb/s×8 canales) codificados con solitones, sobre más de 10.000 Km, con una distancia entre amplificadores de 50 Km.

En óptica integrada [24], las señales luminosas viajan a través de guías de onda planas a modo de tiras microscópicas producidas en un substrato monolítico (monocristal), en general de Niobato de Litio (LiNbO₃) o Arseniuro de Galio (GaAs), tal y como se muestra en la Figura 2.8. La principal cuestión es que la guía sea transparente y que tenga

²⁸ Acrónimo de la expresión inglesa *Non Return to Zero*, que se podría traducir como no retorno a cero.

un índice de refracción mayor que todos los medios que la rodean, para que pueda conducir luz por diversas reflexiones totales.

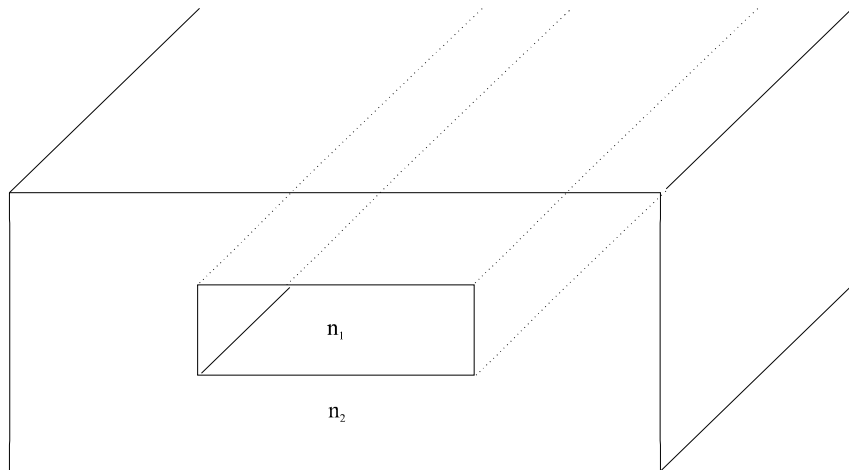


Figura 2.8: Guiondas planar simétrica.

Las fibras ópticas son dispuestas conjuntamente en cables [16], cuyo principio es similar al convencional para cables coaxiales. La diferencia fundamental es que, puesto que las fibras ópticas no son conductoras, no es necesario un aislamiento eléctrico entre ellas. Además, son cables más elásticos. Los cables son necesarios ya que, aunque aumentan el precio de la fibra, facilitan su manejo, protección, aumentan la resistencia a aplastamientos y la resistencia a la degradación por humedad y calor.

2.2.3 Acopladores

El término acoplador [24] abarca todos los dispositivos que combinan la luz en una fibra, o bien la separan de ésta.

Un divisor es un acoplador que divide la señal óptica procedente de una fibra en dos o más fibras. La razón de división es el porcentaje de la potencia que viaja por cada una de las salidas. Para un divisor de dos puertos, la razón de división más común es 50:50, aunque pueden ser fabricados divisores de cualquier razón.

Un combinador es el dispositivo inverso del divisor. Una señal de entrada al combinador sufre una pérdida de alrededor de 3 dB de potencia.

Un acoplador 2×2, en general, está constituido por un combinador 2×1 seguido por un divisor 1×2, cuyo efecto es dispersar las señales desde las dos fibras de entrada a las dos fibras de salida. Una implementación típica, es el acoplador en derivación bicónica fusionada, que consiste básicamente en dos fibras ópticas o guías de onda rectangulares fusionadas, como se ilustra en la Figura 2.9. Además de la división de potencia 50:50 en el acoplador, la señal experimenta ciertas pérdidas de retorno. Si la señal entra por una entrada del acoplador, alrededor de la mitad de la potencia de la señal va por cada una de las salidas. Sin embargo, una cantidad de potencia es devuelta por el acoplador, típicamente entre 40 y 50 dB. Otro tipo de pérdidas son las de inserción, que ocurre, por ejemplo, cuando los ejes del núcleo de la fibra y del acoplador no están alineados.

Los acopladores englobados en una configuración Mach-Zehnder, han sido muy utilizados en tecnologías comerciales como dispositivos de multiplexación en longitud de onda [25]. Estos dispositivos de multiplexación, al igual que los basados en rejillas de Bragg, son más baratos que otras tecnologías propuestas y son más fáciles de mejorar en cuanto a incrementos en el número de canales a multiplexar, porque emplean el mismo tipo de bloques para 4, 8, 16 y 32 canales [14].



Figura 2.9: Acoplador en derivación bicónica fusionada.

2.2.4 Moduladores

Para la transmisión de datos a través de una fibra óptica, la información ha de ser primero codificada, o modulada, en la señal láser. Las técnicas analógicas incluyen AM²⁹, FM³⁰, y PM³¹ [14]. Las técnicas digitales incluyen ASK³², FSK³³, y PSK³⁴ [14].

De estas técnicas, la ASK binaria es el método preferido de modulación digital debido a su simplicidad. En la ASK binaria, también conocida por OOK³⁵, la señal es conmutada entre dos niveles de potencia. El nivel de menor potencia representa el bit “0”, mientras que el nivel de mayor potencia representa el bit “1”.

En los sistemas que emplean OOK, la modulación de la señal puede conseguirse mediante el simple cambio del láser de activo a desactivo, lo cual se conoce por modulación directa. En general, sin embargo esto conduce a un *chirp*³⁶, cuando el láser está activo. Una solución más adecuada para tasas de bit muy altas (≥ 2 Gbps) es tener un modulador externo que modula la luz emitida por el láser. El modulador externo bloquea o deja pasar la luz dependiendo de la corriente que se le aplique.

El interferómetro Mach-Zehnder (MZ) puede ser utilizado como un dispositivo de modulación externa. Se aplica un voltaje a una de las dos guías, creando un campo

²⁹ Acrónimo de la expresión inglesa *Amplitude Modulation*, que podría traducirse como modulación de amplitud.

³⁰ Acrónimo de la expresión inglesa *Frequency Modulation*, que podría traducirse como modulación de frecuencia.

³¹ Acrónimo de la expresión inglesa *Phase Modulation*, que podría traducirse como modulación de fase.

³² Acrónimo de la expresión inglesa *Amplitude Shift Keying*, de difícil traducción.

³³ Acrónimo de la expresión inglesa *Frequency Shift Keying*, de difícil traducción.

³⁴ Acrónimo de la expresión inglesa *Phase Shift Keying*, de difícil traducción.

³⁵ Acrónimo de la expresión inglesa *On-Off Keying*, de difícil traducción.

³⁶ Expresión inglesa de difícil traducción. El *chirp* hace referencia a una variación de la amplitud y frecuencia de la señal emitida por el láser.

eléctrico que da lugar a que las señales en las guías estén en fase o desfasadas 180° , interfiriendo, respectivamente, de forma constructiva o destructiva. Así la luz que emite el láser pasará a través del dispositivo o será bloqueada. Actualmente hay disponibles moduladores de amplitud MZ de más de 75 GHz [26]. Una de las ventajas de utilizar dispositivos ópticos integrados como el interferómetro MZ es, que el láser y el modulador pueden ser integrados en una sola estructura, lo cual resulta más eficiente en coste. Además, integrando el láser con el modulador, se elimina la necesidad de controlar la polarización y resulta en un menor *chirp*.

2.2.5 Amplificadores

Los amplificadores ópticos [14] difieren de los amplificadores optoelectrónicos en que sólo actúan elevando la potencia de la señal, no reconstruyendo su forma temporal. De este modo, la amplificación óptica supone una total transparencia de los datos, es decir, es independiente del formato de modulación de la señal.

Las redes digitales actuales, como por ejemplo SONET y SDH, aunque utilizan la fibra óptica como único medio de transmisión, todavía se basan en amplificación optoelectrónica [12]. En ésta se detecta la señal luminosa para convertirla en corriente eléctrica, amplificándola por vía electrónica y luego, con esta corriente amplificada y filtrada, se modula un láser y se introduce la señal de nuevo en la fibra.

En un sistema WDM, cada longitud de onda necesitaría ser separada antes de ser amplificada electrónicamente, y después recombinada antes de ser retransmitida. Así, para eliminar la necesidad de multiplexores y demultiplexores ópticos en los amplificadores, los amplificadores ópticos deben regenerar la señal óptica sin convertirla previamente en una señal eléctrica. Además, gracias a su alta ganancia y potencia de salida, se consigue duplicar o triplicar la distancia óptima entre repetidores eléctricos. La desventaja es clara: se amplifica el ruido además de la señal, degradándose la relación señal a ruido en el receptor.

Los amplificadores ópticos utilizan el principio de la emisión estimulada. Los dos tipos básicos de amplificadores ópticos son los amplificadores láser semiconductores y los amplificadores dopados con tierras raras, que serán presentados a continuación. Las características más relevantes de estos amplificadores, se muestran en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1: Características típicas de los amplificadores ópticos [5].

Tipo de amplificador	Región de ganancia	Ancho de banda de ganancia	Ganancia
Semiconductor	cualquiera	40 nm	25 dB
EDFA	1.525-1560 nm	35 nm	25-51 dB
PDFFA	1.280-1.330 nm	50 nm	20-40 dB

Un amplificador de semiconductor láser consiste en un láser semiconductor modificado. Una señal débil es enviada a través de la región activa del semiconductor, que vía emisión estimulada, resulta en la emisión desde el semiconductor de una señal más potente.

Los tipos principales de amplificadores láser son, el amplificador Fabry-Perot, que es básicamente un semiconductor láser, y el TWA³⁷. La principal diferencia entre ambos amplificadores es la reflectividad de los espejos extremos, de alrededor de un 30 % en los Fabry-Perot y un 0,01 % en los TWA. Esto va a originar más resonancias en el amplificador Fabry-Perot, resultando en anchos pasos de banda de unos 5 GHz. Evidentemente, esto no es deseable en sistemas WDM, por lo que son más apropiados los TWAs.

Las ganancias que consiguen los amplificadores de semiconductor actuales son de alrededor de 25 dB, con una saturación de ganancia de 10 dBm. Tienen una sensibilidad a la polarización de 1 dB, y un ancho de banda de alrededor de 40 nm. La gran ventaja de estos amplificadores es que pueden integrarse con otros componentes.

³⁷ Acrónimo de la expresión inglesa *Travelling-Wave Amplifier*, que podría traducirse como amplificador de onda viajera.

Se están estudiando también los amplificadores láser basados en MQW³⁸, ya que presentan mayor ancho de banda y más ganancia de saturación que los dispositivos de volumen. A su vez proporcionan tiempos de conmutación más rápidos. La desventaja es su mayor sensibilidad a la polarización.

Los amplificadores de fibra dopada con tierras raras [20] son tramos de fibra dopados con un elemento capaz de amplificar la luz. El elemento más común es el Erblio, que proporciona ganancia en la región de 1.525-1.560 nm. En la parte final de la fibra, un láser transmite una señal bastante intensa a una longitud de onda menor, la cual excita los átomos dopantes transfiriéndolos a un estado de mayor energía. Esto permite que la señal óptica con los datos estimule los átomos excitados, produciendo emisión estimulada. La ganancia típica de los EDFA³⁹ está en torno a los 25 dB, aunque experimentalmente ya se ha demostrado la posibilidad de conseguir ganancias superiores a 51 dB. En general, los láseres de bombeo utilizados trabajan a 980 y 1.480 nm, con una eficiencia en ganancia de 10 dB/mW y 5 dB/mW, respectivamente. El ancho de banda de ganancia a 3 dB es de alrededor de 35 nm y la ganancia de saturación de unos 10 dBm. En la Figura 2.10 queda reflejado el esquema de un EDFA.

En segunda ventana, los amplificadores conocidos por PDFFA⁴⁰ [27], han acaparado recientemente una gran atención, pues tienen unas características de diafonía y de ruido muy bajas, y posibilitan altas ganancias. Son capaces de operar sobre un rango de unos 50 nm en la región de 1.280-1.330 nm.

Las limitaciones de la amplificación óptica son: el espectro de ganancias asimétrico de los amplificadores ópticos, es decir, no se amplifican todas las longitudes de onda por

³⁸ Acrónimo de la expresión inglesa *Multiple Quantum-Well*, que puede traducirse como pozo cuántico múltiple. Se trata de capas alternadas de materiales semiconductores, que crean barreras de potencial en los semiconductores, de modo que confinan los electrones y huecos en un menor número de estados energéticos.

³⁹ Acrónimo de la expresión inglesa *Erbium-Doped Fiber Amplifier*, que puede traducirse como amplificador de fibra dopada con erbio.

⁴⁰ Acrónimo de la expresión inglesa *Praseodymium-Doped Fluoride Fiber Amplifier*, de difícil traducción.

igual, y se amplifica por igual tanto señal como ruido. Además, la región activa del amplificador puede emitir fotones espontáneamente, lo cual constituye una fuente de ruido adicional. En definitiva, una señal óptica de múltiples longitudes de onda atravesando una serie de amplificadores ópticos, tendrá la potencia distribuida entre sus diferentes longitudes de onda, desequilibrándose progresivamente. No obstante, son muchas las propuestas para conseguir igualar esta ganancia [5].

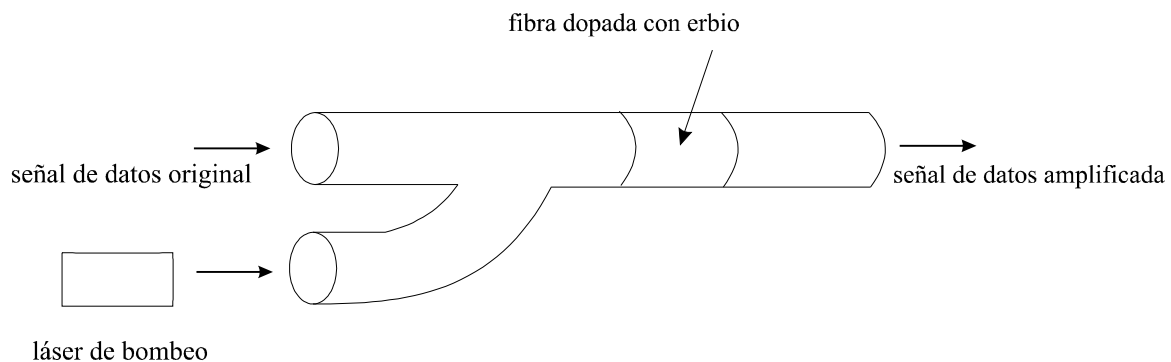


Figura 2.10: Esquema de un EDFA.

2.2.6 Conmutadores

Un conmutador [5] es un dispositivo que permite o impide totalmente la transferencia de luz de una guía a otra próxima.

Como ya se ha comentado, las redes actuales emplean un procesamiento electrónico y utilizan la fibra óptica sólo como un medio de transmisión. La conmutación y procesamiento de los datos se desarrollan convirtiendo la señal óptica de nuevo a su forma electrónica nativa. Tales redes se basan en conmutadores electrónicos.

Los conmutadores electrónicos presentan una alta flexibilidad en términos de funciones de encaminamiento y conmutación; la velocidad de la electrónica, sin embargo, es incapaz de aprovechar todo el ancho de banda ofrecido por la fibra óptica. Además, la conversión electroóptica en un nodo intermedio de la red introduce un retardo adicional.

Estos factores han impulsado el desarrollo de redes totalmente ópticas en las cuales los conmutadores ópticos son capaces de conmutar los datos ópticos de grandes anchos de banda, sin conversión electroóptica.

Los conmutadores pueden dividirse en dos grupos: dispositivos relacionales y dispositivos lógicos. Los dispositivos relacionales son necesarios para conmutación de circuitos y los lógicos para conmutación de paquetes.

La relación es una función de las señales de control aplicadas al conmutador y es independiente de los contenidos de las señales o datos a su entrada. Una propiedad de los dispositivos relacionales es que la información que entra y pasa a través de él, no puede cambiar o influir la relación actual entre las entradas y las salidas, es decir, hay transparencia de datos. La transparencia de datos puede considerarse una ventaja del dispositivo relacional, aunque la misma característica puede ser a su vez una debilidad, ya que origina una pérdida de flexibilidad (porciones individuales de las cadenas de datos no pueden ser conmutadas independientemente).

En un dispositivo lógico, la señal que transporta la información que llega al dispositivo, controla su estado. Para esta clase de dispositivos, al menos uno de los componentes dentro del sistema debe ser capaz de cambiar los estados o conmutar tan o más rápidamente que la tasa binaria de la señal. Esta capacidad da al dispositivo una flexibilidad añadida pero limita la máxima tasa binaria que puede ser utilizada.

Un equipo de conmutación relacional muy importante es el *cross-connect*. Es fácil describir los estados del dispositivo considerando el caso de un *cross-connect* 2x2. Éste presenta dos estados, el de cruce y el de barra. En el estado de cruce, la señal que entra por la entrada superior sale por la salida inferior, y la que entra por la entrada inferior sale por la salida superior. En el estado de barra, la señal que entra por la entrada superior sale por la salida superior, y la señal que entra por la entrada inferior sale por la salida inferior.

Los *cross-connects* ópticos siguen dos pautas tecnológicas [5]: el conmutador directivo genérico, en el cual la luz a través de alguna estructura es físicamente dirigida a

una de las dos salidas; y el conmutador de puerta, en el cual se utilizan puertas de amplificadores ópticos para seleccionar y filtrar las señales de entrada a puertos de salida específicos.

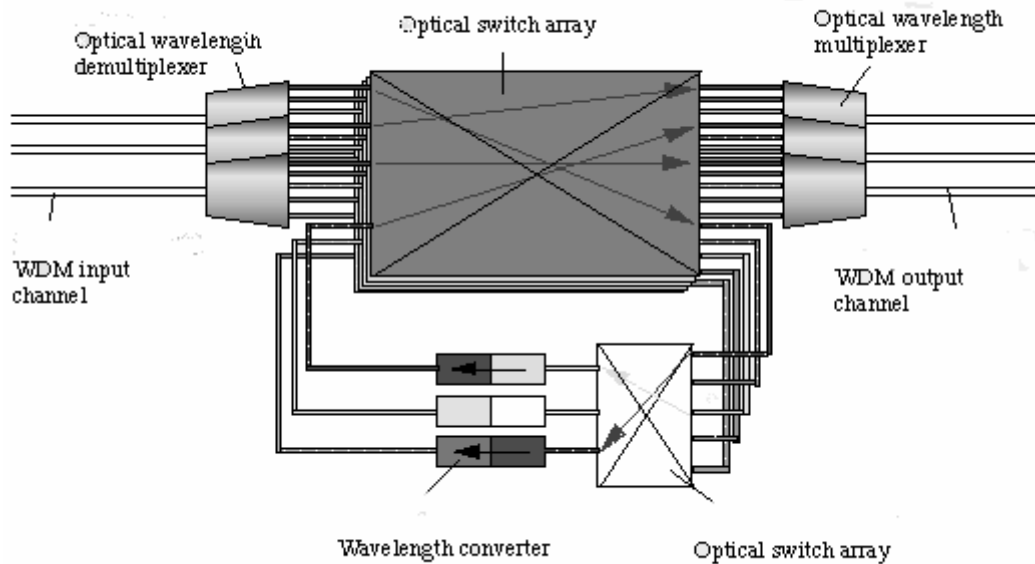


Figura 2.11: Esquema de un encaminador de longitudes de onda reconfigurable.

Un dispositivo lógico muy interesante es el encaminador de longitudes de onda. El encaminamiento de longitudes de onda se consigue demultiplexando las diferentes longitudes de cada puerto de entrada, opcionalmente conmutando cada longitud independientemente, y después multiplexando las longitudes de onda en cada puerto de salida.

El encaminador de longitudes de onda puede ser no configurable, en el caso de que no haya una etapa de conmutación entre los demultiplexores y los multiplexores y las rutas para las diferentes señales que llegan a cualquier puerto de entrada están fijadas; o reconfigurable, en el caso de que la función de encaminamiento del conmutador pueda ser controlada electrónicamente [5]. La Figura 2.11 muestra un esquema de un encaminador de longitudes de onda configurable.

El WGR⁴¹, también conocido por AWG⁴², es una implementación del encaminador de longitudes de onda [28]. Un WGR proporciona un encaminamiento fijo de una señal óptica desde un determinado puerto de entrada a un determinado puerto de salida, basándose en la longitud de onda de dicha señal. Es decir, cada señal entrando a través de un puerto de entrada será encaminada a un puerto de salida diferente, dependiendo de su longitud de onda. Además, diferentes señales a la misma longitud de onda pueden entrar simultáneamente a diferentes puertos de entrada y aún así no interferirán unas con otras en los puertos de salida.

En comparación con un acoplador en estrella pasivo, en el cual una longitud de onda dada sólo puede ser utilizada en un único puerto de entrada, el WGR con N puertos de entrada y N puertos de salida es capaz de encaminar un máximo de N^2 conexiones, frente al máximo de N conexiones en el caso del acoplador en estrella pasivo. Además, puesto que el WGR es un componente integrado, puede ser fácilmente fabricado a bajo coste. La desventaja del WGR es que es un dispositivo con una matriz de encaminamiento fija, y ésta no puede ser reconfigurada.

2.2.7 Detectores

La misión de un receptor óptico es convertir la señal óptica de nuevo al dominio eléctrico y recuperar los datos que son transmitidos a través del sistema de comunicaciones ópticas. Se distinguen dos tipos de detectores dependiendo de la naturaleza de la modulación de la señal óptica: los detectores incoherentes y los detectores coherentes.

En los receptores que emplean detección directa, o detectores incoherentes, un fotodetector convierte el haz de fotones que le llega, modulado en intensidad, en un haz de electrones. El haz de electrones es amplificado y pasa a través de un detector de umbral. El

⁴¹ Acrónimo de la expresión inglesa *Waveguide Grating Router*, que podría traducirse como encaminador de rejilla de guías de onda.

⁴² Acrónimo de la expresión inglesa *Arrayed Waveguide Grating*, que podría traducirse como rejilla de guías de onda en forma de matriz.

que un bit sea un cero lógico o un uno, depende de si el haz está por debajo o encima del umbral en el tiempo de duración de ese bit. Es decir, la decisión se hace en función de la ausencia o presencia de luz durante el tiempo de bit.

Los dispositivos básicos para la detección óptica son los fotodiodos PN (consistentes en una unión p-n) y el fotodiodo PIN (donde un material intrínseco se ubica entre las regiones p y n del material) [14]. En su forma más simple, el fotodiodo es básicamente una unión p-n en inversa. A través del efecto fotoeléctrico, la luz incidente en la unión originará la emisión de pares electrón-hueco tanto en las regiones n como la p del fotodiodo. Los electrones creados en la región p se dirigirán a la región n, y los huecos de la región n cruzarán ésta hasta la p, resultando en un flujo de corriente.

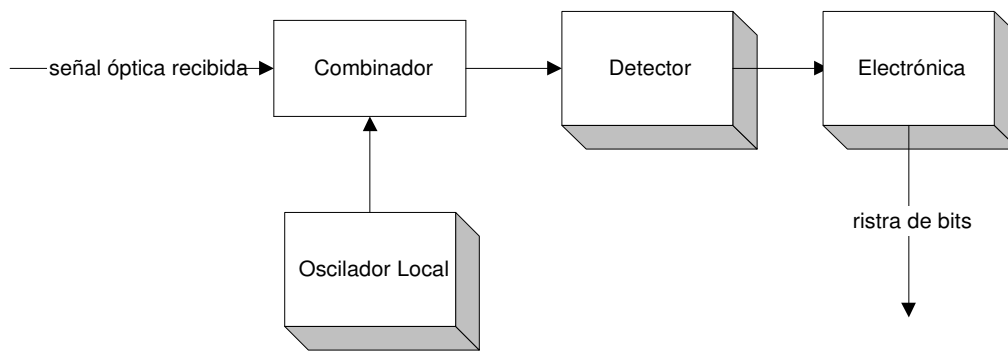


Figura 2.12: Esquema de detección coherente.

La otra forma alternativa a la detección directa es la detección coherente [14], presentada en la Figura 2.12, en la cual la información de fase es utilizada en la codificación y detección de las señales. Los receptores basados en detección coherente utilizan un láser monocromático como oscilador. La señal óptica de entrada se añade a la señal del oscilador, y la señal resultante es detectada por un fotodiodo. La salida del fotodiodo es integrada sobre el período de símbolo, y el umbral de detección es utilizado para conseguir el haz de bits.

Aunque la detección coherente es más compleja que la detección directa, permite la detección de señales débiles de un entorno ruidoso. En los sistemas ópticos, sin embargo, es difícil mantener la información de fase requerida para la detección coherente. Puesto

que los láseres emiten varias pequeñas bandas espectrales no nulas, la señal transmitida consiste en un número de frecuencias con fases y amplitudes variables. El efecto, es que la fase de la señal transmitida experimenta aleatorias y significativas fluctuaciones en torno a la fase deseada. Estas fluctuaciones de fase dificultan la reconstrucción de la información de fase a partir de la señal transmitida, limitando así la eficiencia de los sistemas de detección coherente.

Como quedó reflejado en la Figura 2.4, el bloque receptor puede consistir en un filtro sintonizable seguido de un único fotodetector, o de un demultiplexor seguido de una matriz de fotodetectores.

2.2.8 Filtros

Los filtros ópticos [13] se caracterizan por su rango de sintonía, o rango de longitudes de onda accesibles mediante el filtro, y por el tiempo de sintonía, o tiempo necesario para seleccionar la longitud de onda que dejará pasar el filtro. Otros parámetros importantes en ciertos filtros son:

- El FSR⁴³, que es el período con el que se repite la característica del filtro pasobanda. En general, depende de parámetros físicos en el dispositivo, como las longitudes de la cavidad o guíasondas.
- La *finesse*, que es la magnitud de la anchura de la función de transferencia. Es la razón entre la FSR y el ancho de banda del canal, donde éste último se define como el ancho de banda a 3 dB del canal.

El número de canales en un filtro óptico viene limitado por el FSR y la *finesse*. Todos los canales deben ubicarse dentro de un FSR. Si la *finesse* es grande, la función de transferencia es más estrecha, pudiendo insertar un mayor número de canales en una FSR. Con una *finesse* pequeña, los canales deberían espaciarse más para evitar la diafonía, lo

⁴³ Acrónimo de la expresión inglesa *Free Spectral Range*, que se podría traducir como rango espectral libre.

cual resulta en un menos canales. Una solución para incrementar el número de canales es poner en cascada varios filtros de diferentes FSR.

Uno de los filtros ópticos más utilizados es el Etalón. El Etalón consiste en una cavidad formada por dos espejos paralelos. La luz entra desde una fibra de entrada en la cavidad, y se refleja un cierto número de veces entre los espejos. Ajustando la distancia entre los espejos, se puede seleccionar una única longitud de onda para que se propague en la cavidad, mientras que el resto de longitudes de onda interfieren destructivamente. La distancia entre los espejos puede ser ajustada mecánica o físicamente, moviendo los espejos o cambiando el índice de refracción efectivo de la cavidad. Un ejemplo de Etalón sintonizado mecánicamente es el filtro Fabry Perot, que será descrito en el capítulo 3.

Otro tipo de filtro óptico es el interferómetro MZ, cuyo esquema se ilustra en la Figura 2.13. La longitud del camino óptico en una de las guíasondas, se controla mediante un retardo ajustable en una de las dos ramas del interferómetro, capaz de producir una diferencia de fase de 180° entre las dos señales cuando éstas se recombinan. Las longitudes de onda para las que la diferencia de fase es precisamente de 180° , son filtradas. Construyendo una cadena con estos elementos, se puede seleccionar la única longitud de onda deseada.

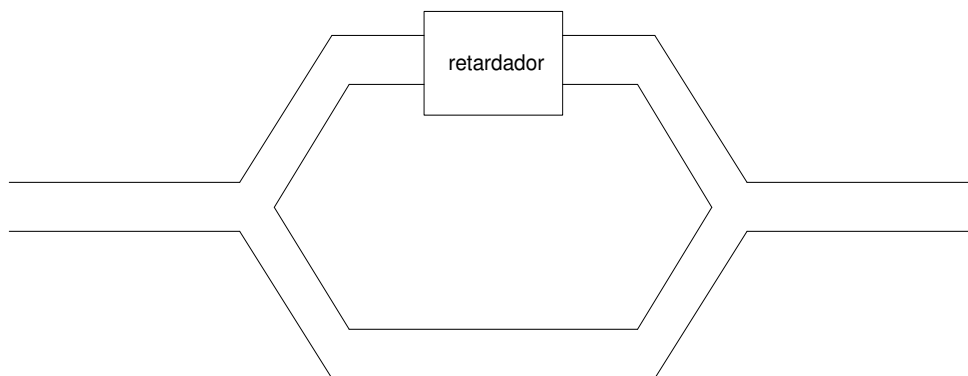


Figura 2.13: Estructura de un interferómetro MZ.

Aunque la cadena MZ promete ser un dispositivo de bajo coste, por poder fabricarse en material semiconductor, el tiempo de sintonía es todavía del orden de

milisegundos, debido a que los desfasadores se suelen basar en el efecto termoóptico y el control de la sintonía es complejo.

Mediante los filtros acustoópticos se consiguen tiempos de sintonía bastante pequeños. En éstos, ondas de radiofrecuencia pasan a través de un transductor, consistente en un cristal piezoeléctrico que convierte las ondas sonoras en un movimiento mecánico. Las ondas sonoras cambian el índice de refracción, lo cual posibilita al cristal actuar como una rejilla. La luz incidente en el transductor se difractará un ángulo que depende del ángulo de incidencia y la longitud de onda de la luz. Cambiando las ondas de radiofrecuencia, puede seleccionarse una única longitud de onda para que pase a través del material, mientras que el resto de longitudes interfieren destructivamente. Si se hace pasar más de una onda de radiofrecuencia simultáneamente a través de la rejilla, se pueden filtrar varias longitudes de onda.

El tiempo de sintonía del filtro acustoóptico es de unos 10 μ s y su rango de sintonía está entre los 1.300 y 1.560 nm, permitiendo ubicar unos 100 canales. Su principal inconveniente es su ancha función de transferencia, siendo incapaces de filtrar la diafonía entre canales adyacentes si los canales están muy juntos, limitando así el número de canales posibles.

Puesto que el tiempo de sintonía del filtro acustoóptico está limitado por la velocidad del sonido, son preferibles cristales con índices de refracción que cambian aplicando corrientes eléctricas. Para ello se utilizan electrodos sobre dicho cristal. Puesto que el tiempo de sintonía sólo está limitado por la velocidad de la electrónica, el tiempo de sintonía puede ser del orden de varios nanosegundos, pero el número de canales que se pueden seleccionar es muy pequeño, en torno a 10.

Los filtros de cristal líquido Fabry Perot, constituyen una prometedora línea de investigación tecnológica. El diseño de un filtro Fabry Perot LC⁴⁴ es similar al diseño de un filtro Fabry-Perot, pero la cavidad consiste en un LC. El índice de refracción del LC es

⁴⁴ Acrónimo de la expresión inglesa *Liquid Crystal*, que se podría traducir como cristal líquido.

modulado por una corriente eléctrica para filtrar la longitud de onda deseada, como en un filtro electroóptico. El tiempo de sintonía es del orden de milisegundos y el rango de sintonía de 10-40 nm. Estos filtros tienen bajos requerimientos de potencia y su fabricación es muy barata.

En la Tabla 2.2 se resumen las características de los receptores sintonizables actuales. Se puede ver como el rango y tiempo de sintonía son inversamente proporcionales, salvo para los filtros Fabry-Perot LC.

Tabla 2.2: Características típicas de los filtros ópticos sintonizables [5].

Tipo de filtro	Rango de sintonía aproximado (nm)	Tiempo de sintonía
Fabry-Perot	500	1-10 ms
Acustoóptico	250	10 μ s
Electroóptico	16	1-10 ns
Fabry-Perot LC	30	0,5-10 μ s

Una alternativa a los filtros sintonizables es la utilización de filtros fijos o dispositivos de rejilla. Los dispositivos de rejilla filtran, típicamente, una o más señales de longitud de onda diferente desde una única fibra. Tales dispositivos pueden ser utilizados para fabricar multiplexores ópticos.

La rejilla de difracción es la implementación más utilizada de los filtros ópticos. Se trata esencialmente de una capa plana de material transparente con una fila de surcos paralelos cortados en él. La rejilla separa la luz en sus distintas longitudes de onda mediante la reflexión de la luz incidente en los surcos en todos los ángulos. Para ciertos ángulos bien determinados, sólo una longitud de onda interfiere constructivamente y el resto de longitudes lo hace destructivamente. Esto permite seleccionar la longitud de onda deseada ubicando un filtro sintonizable a la longitud de onda adecuada en el ángulo apropiado.

En la fibra de rejilla de Bragg es fotoinducida una variación periódica del índice de refracción en el núcleo de una fibra óptica. La rejilla de Bragg reflejará una longitud de onda dada de la luz de vuelta a la fuente, mientras pasan el resto de longitudes de onda. Una desventaja de las rejillas de Bragg es, que el índice de refracción de la rejilla varía con la temperatura y al incrementarse ésta, son reflejadas más longitudes de onda. Las fibras de rejilla de Bragg pueden utilizarse como multiplexores o filtros sintonizables.

Otra alternativa para el filtrado de longitudes de onda son los filtros de interferencia de capa fina. Son filtros semejantes a los dispositivos de fibras de rejilla de Bragg, con la excepción de que son fabricados depositando capas alternadas de bajo y alto índice de refracción sobre una capa de sustrato. Esta tecnología tiene como inconvenientes: baja estabilidad térmica, altas pérdidas de inserción y pobre característica espectral.

2.3 Referencias

- [1] Servicio de Estudios BBV. “Telecomunicaciones”. Publicación de Situación, 1995.
- [2] Carlos Llorente. “Estudio y diseño de multiplexores por división en longitud de onda (WDM)”. Tesis Doctoral, Dpto. Teoría de la Señal y Comunicaciones e Ingeniería Telemática, Universidad de Valladolid, 1997.
- [3] ACTS. “Roadmap towards the optical communication age: An European view by the ACTS Photonic Domain”. Draft version 2, ch. 4, 1998.
- [4] C. G. Omidyar and A. Aldridge. “Introduction to SDH/SONET”. IEEE Communications Magazine, vol. 31, no. 9, pp. 30-33, 1993.
- [5] M. S. Borella, J. P. Jue, D. Banerjee, B. Ramamurthy and B. Mukherjee. “Optical components for WDM lightwave networks”. Proceedings of the IEEE, vol. 85, nº 8, p. 1.274-1.307, 1997.
- [6] M. Takatori, Y. Nakano, Y. Ashi, H. Fujita, M. Mizukami and K. Itoh. “A high performance switch for OC-12 SONET self-healing ring networks”. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 14, no. 2, pp. 353-360, 1993.

- [7] Patrick R. Trischitta and William C. Marra. “*Applying WDM technology to undersea cable networks*”. IEEE Communications Magazine, vol. 36, no. 2, pp. 62-66, 1998.
- [8] Ewart Lowe. “*Current European WDM deployment trends*”. IEEE Communications Magazine, vol. 36, no. 2, pp. 46-51, 1998.
- [9] John P. Ryan. “*WDM: North American deployment trends*”. IEEE Communications Magazine, vol. 36, no. 2, pp. 40-45, 1998.
- [10] B. Fabianek, K. Fitchew, S. Myken and A. Houghton. “*Optical network research and development in European Community Programs: From RACE to ACTS*”. IEEE Communications Magazine, vol. 35, no. 4, pp. 50-57, 1997.
- [11] Europa Management Consulting. “*Las tecnologías de la información en la empresa*”. Cuadernos de *Cinco Días*, cap. 9, 1996.
- [12] M. Berger, M. Chbat, P. Demeester, P. Gødsvang, B. Hein, M. Huber, A. Jourdan, A. Leclert, R. März, T. Olsen, M. Sotom, G. Tobolka, B. Van Caenegem and T. Van Broeck. “*Pan-European optical networking using wavelength division multiplexing*”. IEEE Communications Magazine, vol 35, no. 4, pp. 82-89, 1997.
- [1] C.T. Troy. *Fiber, fiber, who’s got the fiber?. Shortage hits builders, producers*. Photonics spectra Dec pp: 52-54. (1996).
- [2] L.A. Peach. *Wavelength division multiplexing declared a hot commodity*. Laser Focus World Dec pp: 47. (1996).
- [3] J.F. Morey. *Newport fiber optics conference draws 170 from 17 countries*. Photonics spectra Nov pp: 16. (1996).
- [13] Paul E. Green, Jr. “*Fiber optic networks*”. Prentice Hall, 1993.
- [14] Govind P. Agrawal. “*Fiber-optic communications systems*”. John Wiley & Sons, 1992.
- [15] Martin Zirngibl. “*Multifrequency lasers for dense WDM applications*”. (ECIO’97) 8th European Conference on Integrated Optics, pp. 254-259, 2-4 April 1997.
- [16] S. E. Miller and Ivan P. Kaminov (Editores). “*Optical fiber telecommunications II*”. Academic Press, John Wiley & Sons, ch. 5, 1988.
- [17] John M. Senior. “*Optical fiber communications. Principles and practice*”. Prentice Hall, 2nd ed, ch. 1, 1992.
- [18] Junichi Yoshida. “*Towards high-performance, low-cost optical integrated components for fiber-to-the-home systems*”. (ECIO’97) 8th European Conference on Integrated Optics, pp. 3-8, 2-4 April 1997.
- [19] Govind P. Agrawal. “*Nonlinear fiber-optics*”. Academic Press, 2^a ed., cap. 5, 1995.

- [20] M. J. Yadlowsky, E. M. Deliso and V. L. Da Silva. “*Optical fibers and amplifiers for WDM systems*”. Proceedings of the IEEE, vol. 85, nº 11, p. 1.765-1.779, 1997.
- [21] Gerd Keiser. “*Optical fiber communications*”. McGraw-Hill, 2ª ed., 1991.
- [22] Kai Choong Chan, Holden Ho Yuen Cheng, Hai Feng Liu and Khawaja Aamer Ahmed. “*Applications of optical solitons in high-speed and wavelength-division-multiplexed lightwave communication systems*”. Journal of High Speed Networks, no. 4, pp. 41-49, 1995.
- [23] M. Nakazawa, K. Suzuki, H. Kubota, A. Sahara and E. Yamada. “*160 Gbit/s WDM (20 Gbit/s×8 channels) soliton transmission over 10000 Km using synchronous modulation and optical filtering*”. Electronics Letters, vol. 34, no. 1, pp. 103-104, 1998.
- [24] Robert G. Hunsperger. “*Integrated optics. Theory and technology*”. Springer, 4ª ed., 1995.
- [25] Jean-Pierre Laude. “*Wavelength Division Multiplexing*”. Prentice Hall, ch. 9, 1993.
- [26] K. Noguchi, O. Mitomi, H. Miyazawa and S. Seki. “*A broadband Ti:LiNbO₃ optical modulator with a ridge structure*”. Journal of Lightwave Technology, vol. 13, no. 6, pp. 1.164-1.168, 1995.
- [27] T. J. Whitley. “*A review of recent system demonstrations incorporating 1.3- μ m praseodymium-doped fluoride fiber amplifiers*”. Journal of Lightwave Technology, vol. 13, pp. 744-760, 1995.
- [28] O. Ishida, H. Takanashi and Y. Inoue. “*Digitally tunable optical filters using arrayed-waveguide grating (AWG) multiplexers and optical switches*”. Journal of Lightwave Technology, vol. 15, no. 2, pp. 321-327, 1997.