

EVOLUCIÓN DE LA FIBRA ÓPTICA

CAROLINA HERNÁNDEZ RINCÓN
CODIGO: 42163424

CARLOS HERNANDO BEDOYA DUQUE
CODIGO: 1088240027

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE TECNOLOGÍAS
PROGRAMA DE TECNOLOGÍA ELÉCTRICA
PEREIRA
2008

EVOLUCIÓN DE LA FIBRA ÓPTICA

CAROLINA HERNANDEZ RINCÓN
CÓDIGO: 42163424
CARLOS HERNANDO BEDOYA DUQUE
CÓDIGO: 1088240027

Proyecto de grado
Para optar al título de
Tecnólogo en Electricidad

Director:
Ing. Hugo Baldomiro Cano
Docente Escuela de Tecnología Eléctrica

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE TECNOLOGÍAS
PROGRAMA DE TECNOLOGÍA ELÉCTRICA
PEREIRA
2008

RESUMEN

La fibra óptica son filamentos de vidrio (compuestos de cristales naturales) o cristales artificiales (entre 10 y 300 micrones). Llevan mensajes en forma de haces de luz que realmente pasan a través de ellos de un extremo a otro, donde quiera que el filamento vaya (incluyendo curvas y esquinas) sin interrupción.

Las fibras ópticas pueden ahora usarse como los alambres de cobre convencionales, tanto en pequeños ambientes autónomos (tales como sistemas de procesamiento de datos de aviones), como en grandes redes geográficas (como los sistemas de largas líneas urbanas mantenidos por compañías telefónicas).

El principio en que se basa la transmisión de luz por la fibra es la reflexión interna total; la luz que viaja por el centro o núcleo de la fibra incide sobre la superficie externa con un ángulo mayor que el ángulo crítico, de forma que toda la luz se refleja sin pérdidas hacia el interior de la fibra. Así, la luz puede transmitirse a larga distancia reflejándose miles de veces. Para evitar pérdidas por dispersión de luz debida a impurezas de la superficie de la fibra, el núcleo de la fibra óptica está recubierto por una capa de vidrio con un índice de refracción mucho menor; las reflexiones se producen en la superficie que separa la fibra de vidrio y el recubrimiento.

La Fibra Óptica consiste en una guía de luz con materiales mucho mejores que lo anterior en varios aspectos. A esto se le puede añadir que en la fibra óptica la señal no se atenúa tanto como en el cobre, ya que en las fibras no se pierde información por refracción o dispersión de luz consiguiéndose así buenos rendimientos, en el cobre, sin embargo, las señales se ven atenuadas por la resistencia del material a la propagación de las ondas electromagnéticas de forma mayor. Además, se pueden emitir a la vez por el cable varias señales diferentes con distintas frecuencias para distinguirlas, lo que en telefonía se llama unir o multiplexar diferentes conversaciones eléctricas. También se puede usar la fibra óptica para transmitir luz directamente y otro tipo de ventajas.

En un principio, el espectro que relaciona la longitud de onda con la atenuación solo era subutilizada debido a que no en todas las ventanas se podía transmitir por la alta atenuación de las mismas haciendo que la utilización del espectro fuera dividido. Este problema incentivo a los fabricantes a investigar la solución al problema planteado. Ellos encontraron la mejor manera de reprimir los picos de

agua donde existía alta atenuación por medio de diferentes componentes químicos (dopajes), logrando optimizar el espectro.

De esta manera se han logrado desarrollar nuevas aplicaciones con estas ventanas y nuevos componentes para una utilización eficaz.

INTRODUCCIÓN

A través de la historia de la humanidad, el hombre ha utilizado diferentes formas de comunicarse, desde la comunicación con señas, hasta la comunicación a distancia por medio de dispositivos tecnológicos avanzados.

Los avances logrados en el área de telecomunicaciones han permitido que el hombre se desempeñe de una manera más eficiente, y es esta eficiencia lo que en gran medida, ha motivado a empresas nuevas que día a día exigen mayores retos a quienes lo desarrollan.

De esta forma, se ha llegado a alternativas de gran impacto a través del tiempo como son: Internet (correo electrónico), tren rápido, avión, cables de comunicación (ejemplo: fibra óptica), telefonía celular, televisión por cable, etc. Al comenzar el tercer milenio, la humanidad está creando una red global de transmisión instantánea de información, de ideas y de juicios de valor en la ciencia, el comercio, la educación, el entretenimiento, la política, el arte, la religión, y en todos los demás campos. En esta red ya se puede ver en tiempo real, el sentir de la humanidad, pero al mismo tiempo también es posible tergiversar, manipular o frivolar este sentir; es decir, paradójicamente, los medios de comunicación también pueden usarse para separar y aislar.

Así, el mundo de la información es, tal vez, uno de los ámbitos que ha sufrido cambios más veloces en el mundo actual.

En base a lo anterior, el presente trabajo pretende explicar el cómo ha ido cambiando los avances tecnológicos. Además de explicar, también pretende analizar estos cambios a partir de lo que son la comunicación, sus funciones y objetivos, así como también lo que es la información y su trascendencia dentro de la comunicación, logrando de esta forma dilucidar las consecuencias que estos cambios han producido en la comunicación y, en general, en la realidad de la humanidad del siglo XXI; un mundo inmerso en un proceso de globalización y modernidad o postmodernidad, que lo han llevado a ser lo que hoy es.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Recopilar información sobre el estado del arte de la fibra óptica para la elaboración de un documento educativo.

3.2 Objetivos Específicos

- Encontrar documentos relacionados acerca de las nuevas tendencias de la fibra óptica.
- Analizar documentos de la evolución de la fibra óptica en países desarrollados.
- Elaborar un documento educativo con las nuevas tendencias de la fibra óptica.

Nota de Aceptación

Presidente del Jurado

Jurado

Jurado

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Reflexión de la luz.	9
Figura 2. Reflexión de un rayo en una superficie plana y lisa.	10
Figura 3. Reflexión Especular en una superficie rugosa.	10
Figura 4. Reflejado y Refractado entre dos medios distintos	11
Figura 5. Conducción de la luz en un conductor de fibra óptica.	12
Figura 6. Perfil de índices de refracción de un conductor de fibra óptica.	16
Figura 7. Conductor de fibra óptica con perfil escalonado.	17
Figura 8. Conductor de fibra óptica monomodo.	19
Figura 9. Distribución radial del campo del modo fundamental LP_{01}	20
Figura 10. Conductor de fibra óptica con perfil gradual.	21
Figura 11. Diagrama del espacio de fibra óptica con perfil gradual.	22
Figura 12. Diagrama del espacio de fibra óptica con perfil escalonado.	22
Figura 13. Dispersión cromática en función de la longitud de onda.	24
Figura 14. Perfil escalonado normal.	24
Figura 15. Perfil escalonado con índice de refracción rebajado en el recubrimiento	25
Figura 16. Perfil segmentado con núcleo triangular.	25
Figura 17. Perfil triangular.	25
Figura 18. Perfil segmentado con doble escalón del índice de refracción en el recubrimiento.	26
Figura 19. Perfil segmentado con cuatro escalones del índice de refracción en el recubrimiento.	26
Figura 20. Perfil W.	26
Figura 21. Distribución de la energía del modo fundamental a dos longitudes de onda diferentes.	29
Figura 22. Curvas de dispersión de un conductor de fibra óptica monomodo	30
Figura 23. Atenuación de la fibra óptica.	31
Figura 24. Diagrama en bloques de un modulo láser.	39
Figura 25. Coeficientes de absorción para varios materiales semiconductores.	40
Figura 26. Esquema de un fotodiodo pin.	41
Figura 27. Variación de la viscosidad del vidrio de cuarzo en función de la temperatura.	45

Figura 28. Índice de refracción de SiO ₂ en función de los diferentes elementos dopantes.	48
Figura 29. Configuración experimental.	58
Figura 30. Ganancias (a) y NFS (b) para la bomba NZDF con potencias de 1,9 (triángulos), 1,2 (círculos) y 0.7W (cuadrados).	59
Figura 31. Diagrama de energía de 1 Tm ³⁺ y un sistema de bombeo con emisión de fotones más altos.	61
Figura 32. Características de las ganancias de TDFA.	62
Figura 33. Alta concentración en el dopaje.	64
Figura 34. Características en la ganancia de GS-TD usando alta concentración en el dopaje.	64
Figura 35. WDM se consigue usando un multiplexor para combinar longitudes de onda en una sola fibra.	70
Figura 36. Esquema experimental de la puesta en marcha por la generación súper continua y de pulsos Raman.	78
Figura 37. Fotografía de la puesta en marcha experimental usando un láser de fibra Yb como fuente.	78
Figura 38. Espectro de la generación súper continua con laser de fibra Yb.	79
Figura 39. Espectro de generación de los pulsos Raman con láseres de fibra Yb para diferentes entradas de potencias.	80
Figura 40. Orientación de los ejes y sus índices de refracción.	90
Figura 41. Cristal de Niobato de Litio LiNbO ₃ y Cambio de la constante de propagación.	91
Figura 42. Jerarquía de la red óptica.	92
Figura 43. Segmentos de red.	94
Figura 44. Funcionalidad del WXC.	97
Figura 45. Redes con diferentes rutas entre anillos interconectados o arquitecturas en malla.	99

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Se resumen los valores característicos típicos.	36
Tabla 2. Valores Característicos de diodos láser.	38
Tabla 3. Valores característicos de elementos receptores.	42
Tabla 4. Temperaturas características del vidrio interpretadas con ayuda del log η .	46
Tabla 5. Características del vidrio de cuarzo.	48
Tabla 6. Nueva definición de bandas de operación para los sistemas ópticos.	57

AGRADECIMIENTOS

Al ingeniero Hugo Baldomiro Cano Garzón por ser nuestro guía y asesorarnos en el desarrollo de este trabajo.

Al ingeniero Alexander Quintero por asesorarnos en la investigación y construcción de este proyecto.

Al ingeniero Edison Duque por su colaboración y disponibilidad en la realización y calificación de este proyecto.

A nuestras familias, les agradecemos su apoyo, paciencia y fortaleza espiritual que nos proporcionaron.

TABLAS DE CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN	III
INTRODUCCIÓN	IV
OBJETIVOS	V
LISTA DE FIGURAS	VII
LISTA DE TABLAS	IX
AGRADECIMIENTOS	X
TABLA DE CONTENIDO	XI
CAPITULOS	
CAPITULO 1- FUNDAMENTOS CARACTERISTICOS DE LOS MEDIOS DE TRANSMISIÓN ÓPTICA.	
1.1 Ley de Snell	1
1.2 Reflexión	1
1.3 Refracción	2
1.3.1 Índice de Refracción	3
1.4 Perfiles de la fibra óptica	6
1.4.1 Perfil escalonado	9
1.4.2 Perfil gradual	12
1.4.3 Perfil múltiple	15
1.5 Dispersiones	19
1.5.1 Dispersión cromática	19
1.5.2 Dispersión Rayleigh	23
1.5.3 Dispersión modal	23
1.5.4 Dispersión Intramodal de la guía de onda	24
1.6 Materiales	25
1.6.1 Elementos activos	26
1.6.1.2 Elementos Emisores	26
1.6.1.3 Diodo emisor de luz (LED)	26

1.6.2 Conformación y valores característicos	27
1.6.2.1 Diodo de GaAs para longitudes de onda de 880-950 nm	28
1.6.2.2 Diodo de potencia AlGaAs (Burrus) para longitudes de onda de 880 a 950 nm	28
1.6.2.3 Diodo de potencia InGaAsP/InP para longitudes de onda de 1300 a 1550 nm	29
1.6.3 Conformación y valores característicos	29
1.6.3.1 Módulo láser	30
1.6.3.2 Elementos receptores	31
1.6.3.3 Fotodiodo PIN	33
1.6.3.4 Fotodiodos de silicio para longitudes de onda de hasta 1100 nm	33
1.6.3.5 Fotodiodo de avalancha	33
1.6.3.6 Fotodiodo de avalancha (APD o FDA) de silicio para Longitudes de onda de hasta 1100 nm	34
1.6.3.7 Fotodiodo de avalancha de InGaAs/InP para 1300	34
 CAPITULOS 2- PRINCIPIOS QUIMICOS DEL CONDUCTOR DE FIBRA OPTICA	
2. Componentes de los medios ópticos	35
2.1 Materiales	35
2.1.2 Vidrio de cuarzo	35
2.2 Fabricación	36
2.3 Propiedades del material	39
2.4 Procesos de fabricación	40
2.5 Fabricación de la preforma	40
2.5.1 Método M.V.C.D. (Modified Chemical Vapor Deposition)	40
2.5.2 Método V.A.D. (Vapor Axial Deposition)	41
2.5.3 Método O.V.D. (Outside Vapor Deposition)	41
2.5.4 Método P.C.V.D (Plasma Chemical Vapor Deposition)	42
 CAPITULO 3- EVOLUCION DE LA FIBRA OPTICA	
3. Evolución de la fibra óptica	52
3.1 La importancia del "pico de agua" en fibras G.655	52
3.1.2 Importancia del envejecimiento del hidrogeno	53
3.1.3 Impacto de la supresión del pico de agua en un alto rango de datos, diseño de sistema de largo recorrido	53
3.1.4 Impulso de la adopción del mercado de 40 Gb/s es cada vez	

mayor	54
3.2 Nuevas tecnologías de fibras ópticas	55
3.2.1 Amplificación óptica	56
3.2.2 Banda "E" (Extended, Extendida)	57
3.2.3 Banda "S" (Short, Corta)	60
3.2.3.1 TDFA	60
3.2.3.3 Amplificadores Raman	65
3.3 Principales características optoelectrónicas a considerar en nuevos desarrollos de fibras ópticas	66
3.3.1 Diámetro del campo modal y área efectiva	66
3.3.2 Dispersión por modo de polarización (PDM)	66
3.4 Fibras de nueva generación y aspectos normativos	69
3.4.1 Fibras ZWPF (Zero Water Peak Fibers) con atenuación plana en el pico de agua	69
3.4.2 Multiplexación por división de longitud de onda aproximada (CDWM)	69
3.4.2.1 Hardware menos costoso	71
3.4.2.2 Fibras de nueva generación hasta 16 longitudes de onda	72
3.4.2.3 Normas de marcha	72
3.5 Algunos fabricación	74
3.5.1 Allwave	74
3.5.2 Comm Scope	75
3.6 Nuevas Técnicas	76
3.6.1 Fibras óptica acompañadas con filtros y películas de metal depositados en terminales de línea de fibra retardados para la detección de paquetes ópticos de dirección	76
3.6.2 Sintonizable longitud de onda generada por un pulso en la región de 1400-1600 nm utilizando un láser de fibra Yb	76
3.6.2.1 Montaje del experimento	77
3.6.2.2 Resultado	78
3.7 Aplicaciones de la fibra óptica	81
3.7.1 Internet	81
3.7.2 Redes	81
3.7.3 Telefonía	82
3.7.4 Otras aplicaciones	83
3.7.5 Áreas de aplicación	83
3.7.5.1 Instrumentación óptica	84
3.7.5.2 Comunicaciones ópticas	84
3.7.5.3 Metrología óptica	84
3.7.5.4 Óptica de frontera	85

3.8 Aplicaciones de la fotónica	86
3.9 Niobato de Litio	90
3.9.1 Componentes ópticos pasivos	91
3.9.1.2 Modulador óptico	91
3.9.1.3 Acoplador Direccional	92
3.9.1.4 switch	92
CAPITULO 4- ESTADO DE LAS REDES OPTICAS	
4. Estado de las redes ópticas	84
4.1 Jerarquía de la red óptica	85
4.2 Redes de largo alcance	85
4.3 Redes metropolitanas	86
4.4 Redes de acceso	87
4.5 Diferentes generaciones de redes DWDM	88
4.6 Implementación de DWDM en las redes metropolitanas	90
CONCLUSIONES	92
BIBLIOGRAFIA	93

CAPITULO 1

1. FUNDAMENTOS CARACTERISTICOS DE LOS MEDIOS DE TRANSMISIÓN ÓPTICA

1.1 LEY DE SNELL

La ley de Snell es una fórmula simple utilizada para calcular el ángulo de reflexión de la luz al atravesar una superficie de separación entre dos medios con índice de refracción distinto. El nombre proviene de su descubridor, el matemático holandés Willebrord van Roijen Snell (1580-1626).

La ley de Snell dice que el producto del índice de refracción por el seno del ángulo de incidencia es constante para cualquier rayo de luz incidiendo sobre la superficie separatriz de dos medios. Aunque la ley de Snell fue formulada para explicar los fenómenos de refracción de la luz se puede aplicar a todo tipo de ondas atravesando una superficie de separación entre dos medios en los que la velocidad de propagación de la onda varíe. [1]

1.2 REFLEXIÓN

Cuando un rayo de luz que viaja en un medio encuentra una frontera que conduce a un segundo medio, parte de la luz incidente se refleja. La figura (2) presenta varios rayos de un haz de luz incidente sobre una superficie reflectora lisa, similar a un espejo. Los rayos reflejados son paralelos entre si, como se indica en la figura (1). La dirección de un rayo reflejado esta en el plano perpendicular a la superficie reflectora que contiene el rayo incidente. La reflexión de la luz a partir de dicha superficie lisa recibe el nombre de **reflexión especular**. Si la superficie reflejante es rugosa, como se muestra en la figura (3), la superficie refleja los rayos no como un conjunto paralelo sino en varias direcciones. La reflexión en cualquier superficie rugosa se conoce como **reflexión difusa**. Una superficie se comporta como una superficie lisa siempre que las variaciones en la misma sean más pequeñas que la longitud de onda de la luz incidente. [2]

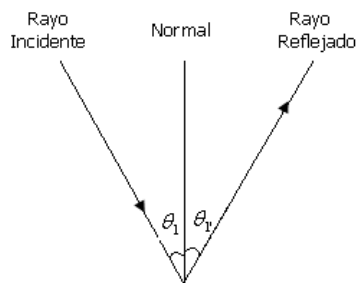


Figura 1. Reflexión de la luz

Considere un rayo de luz que viaja en el aire y que incide a cierto ángulo sobre una superficie plana y lisa, como se muestra en la figura (2). Los rayos incidentes y reflejado forman un ángulo θ_1 y θ_1' , respectivamente donde los ángulos estén medidos desde la normal a los rayos. (La normal es una línea dibujada perpendicular a la superficie en el punto donde los rayos incidentes golpean a la superficie.) Los experimentos y la teoría muestran que **el ángulo de reflexión es igual que al ángulo incidente:**

$$\theta_1 = \theta_1'$$

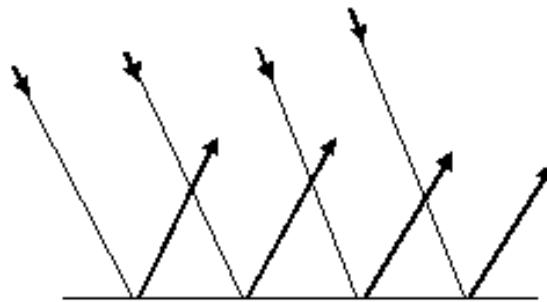


Figura 2. Reflexión de un rayo en una superficie plana y lisa

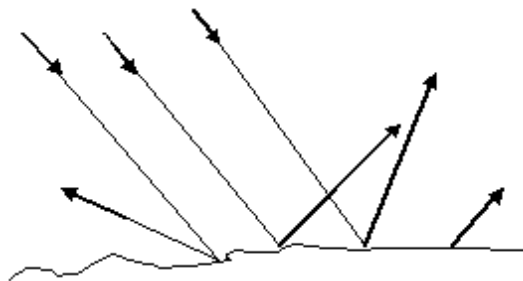


Figura 3. Reflexión Especular en una superficie rugosa

1.3 REFRACCIÓN

Cuando un rayo de luz que viaja a través de un medio transparente, encuentra una frontera que lleva a otro medio transparente, como se muestra en la figura (4), parte del rayo se refleja y parte entra al segundo medio. La parte que entra al segundo medio, se dobla en la frontera y se dice que se refracta. El rayo incidente, el rayo reflejado y el rayo refractado se encuentra en el mismo plano que el ángulo de refracción θ_2 , que se observa en la figura (4), depende de las propiedades de los dos medios y el ángulo de incidencia a través de la relación

Ley de Snell

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (1)$$

Donde n_1 es la rapidez de la luz en el medio 1 y n_2 es la rapidez del medio 2. La trayectoria de un rayo luminoso a través de una superficie refractante, es reversible.

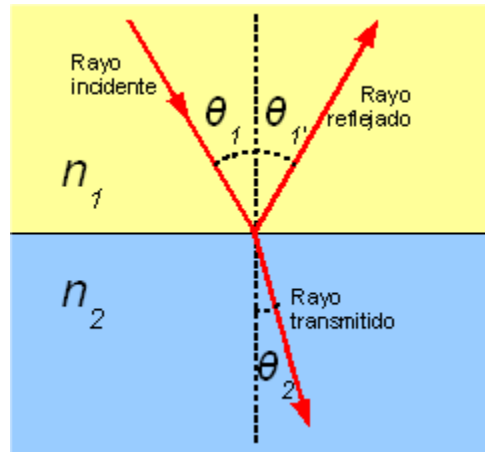


Figura 4. Rayo Reflejado y Refractado entre dos medios distintos

1.3.1 Índice de Refracción

En general, la rapidez de la luz en cualquier material es menor que su rapidez en el vacío. En efecto, *la luz viaja a su máxima rapidez en el vacío*. Es conveniente definir al índice de refracción n de un medio como la relación.

$$n = \frac{\text{Rapidez de luz en el vacío}}{\text{Rapidez de luz en el medio}} = \frac{c}{v} \quad (2) \text{ Adimensional.}$$

A partir de esta definición, vemos que el índice de refracción es un número adimensional mayor que la unidad, ya que v siempre es menor que c , además, n es igual a la unidad para el vacío.

A medida que la luz viaja de un medio a otro, su frecuencia no cambia, pero su longitud de onda sí.

La relación de $v = f \cdot \lambda$ debe ser válida en ambos medios, en virtud de que $f_2 = f_1 = f$, vemos que $v_1 = f \cdot \lambda_1$ y $v_2 = f \cdot \lambda_2$ ya que v_1 es distinto de v_2 , se concluye que λ_1 es diferente a λ_2 .

Se obtiene una relación, entre el índice de refracción y la longitud de onda al dividir

$$\frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\frac{c}{n_1}}{\frac{c}{n_2}} = \frac{n_2}{n_1} \quad (3)$$

La cual produce $n_1 \cdot \lambda_1 = n_2 \cdot \lambda_2$, si el medio 1 es el vacío o aire para todos los fines prácticos, entonces $n_1 = 1$. En consecuencia, se concluye que el índice de refracción de cualquier medio, se puede expresar como la relación.

$$n = \frac{\lambda}{\lambda_n} \quad (4)$$

Donde λ es la longitud de onda en el vacío y λ_n es la longitud de onda en el medio, cuyo índice de refracción es n . En la ecuación anterior se ve que $n > 1$, $\lambda_n < \lambda$.

De forma alternativa al remplazar al término $\frac{v_2}{v_1}$ por $\frac{n_1}{n_2}$ obtendremos que:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (5)$$

Esta fórmula nos dice que el índice de refracción del primer medio, por el seno del ángulo con el que incide la luz en el segundo medio, es igual al índice del segundo medio por el seno del ángulo, con el que sale propagada la luz en el segundo medio. Lo único que nos interesa aquí de esta ley es que dados dos medios con índices n y n' , si el haz de luz incide con un ángulo mayor que un cierto ángulo límite, (que se determina con la anterior ecuación) el haz siempre se reflejara en la superficie de separación entre ambos medios. De esta forma se puede guiar la luz de forma controlada. [3]

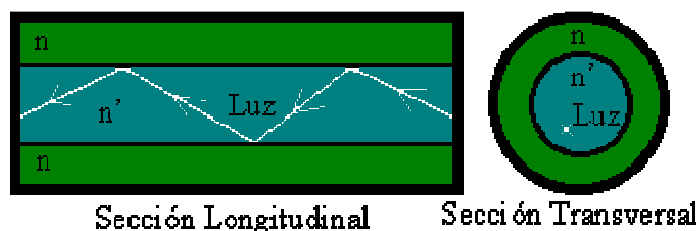


Figura 5. Conducción de la luz en un conductor de fibra óptica.

Como se ve en el figura 5, tenemos un material envolvente con índice n y un material interior con índice n' . De forma que se consigue guiar la luz por el cable. La Fibra Óptica consiste por tanto, en un cable de este tipo en el que los materiales son mucho más económicos que los convencionales de cobre en telefonía, de hecho son materiales ópticos mucho más ligeros (fibra óptica, lo dice el nombre), y además los cables son mucho más finos, de modo que pueden ir muchos más cables en el espacio donde antes solo iba un cable de cobre. [3]

1.4 PERFILES DE LA FIBRA ÓPTICA

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

$$n = n(r)$$

La propagación de los modos en el conductor de fibra óptica, depende de la forma de este perfil de índices de refracción.

En la práctica interesan los perfiles exponenciales; bajo esta denominación se entiende aquellos perfiles de índice de refracción, que representan una variación que es función exponencial del radio.

$$n^2(r) = n_1^2 \cdot \left[1 - 2 \cdot \Delta \cdot \left(\frac{r^g}{a^g} \right) \right] \quad \text{Para } r < a \text{ en el núcleo. (6)}$$

$$n^2(r) = n_2^2 = \text{cte.} \quad \text{Para } r \geq a \text{ en el recubrimiento. (7)}$$

n_1 : Índice de refracción en el conductor de fibra óptica ($r = 0$).

Δ : Diferencia normalizada de índices de refracción.

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

a : Radio del núcleo, en μm .

g : Exponente, llamado también exponente del perfil.

n_2 : Índice de refracción del recubrimiento.

La **apertura numérica (AN)** de un sistema óptico es un número a dimensional que caracteriza el rango de ángulos para los cuales el sistema acepta luz. Recíprocamente, también está relacionado con el ángulo de salida del sistema. La definición exacta del término varía según diferentes áreas de la óptica [4].

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

$$\Delta = \frac{AN^2}{2 \cdot n_1^2} = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2 \cdot n_1^2} \quad (8)$$

Merece ser relacionados los siguientes casos especiales:

- $g = 1$: Perfil Triangular.
- $g = 2$: Perfil Parabólico.
- $g \rightarrow \infty$: Perfil Escalonado.

Únicamente en el último caso el perfil escalonado, el índice de refracción es constante en el núcleo: $n(r) = n_1 = \text{cte}$. En todos los demás perfiles, el índice de refracción $n(r)$ en el núcleo se incrementa en forma gradual, desde el valor n_2 en el recubrimiento hasta n_1 en el eje del conductor de fibra óptica. En virtud de este tipo de variación, se denominan estos perfiles también *perfiles graduales*. Esta denominación se ha adoptado especialmente para el perfil parabólico (con $g = 2$) ya que los conductores de fibra óptica con esta clase de perfil, presentan muy buenas características técnicas para la conducción de luz.

La **longitud de onda** es el período espacial de dicha onda o sea la distancia o el camino de una oscilación completa.

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

$$V = 2\pi \cdot \frac{a}{\lambda} \cdot AN = k \cdot a \cdot AN \quad (9)$$

- a : Radio del núcleo.
- λ : Longitud de onda.
- AN : Apertura numérica.
- k : Índice de longitud de onda.

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

$$N \approx \frac{V^2}{2} \cdot \frac{g}{g+2} \quad (10)$$

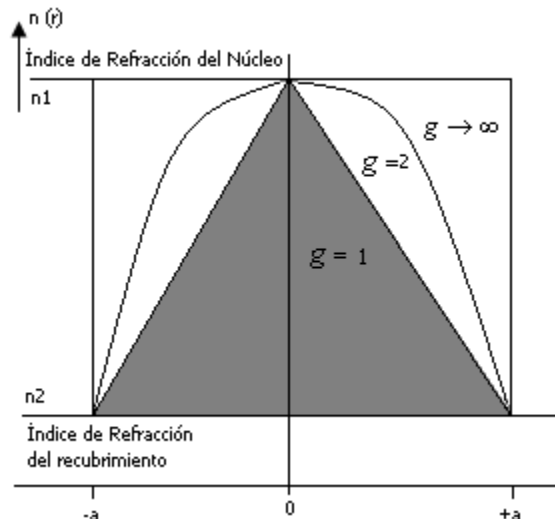


Figura 6. Perfil de índices de refracción de un conductor de fibra óptica

El número de modos del perfil escalonado ($g \rightarrow \infty$) es aproximadamente

$$N \approx \frac{V^2}{2} \quad (11)$$

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

$$N \approx \frac{V^2}{4} \quad (12)$$

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

Por otra parte, se torna más dificultosa la fabricación de emisores y receptores para frecuencias más elevadas y en consecuencia, su valor no se puede aumentar a discreción.

Si en un conductor de fibra óptica con perfil escalonado ($g \rightarrow \infty$), el parámetro V se reduce hasta un valor inferior a la constante $V_{c-\infty} = 2.405$, se podrá propagar en el núcleo sólo un único modo, el modo fundamental LP_{01} . Un conductor con estas características, se denomina conductor de fibra óptica monomodo.

La constante $V_{c-\infty}$ representa un valor límite para el conductor de fibra óptica con perfil escalonado ($g \rightarrow \infty$). El subíndice c se toma de la expresión en inglés

(cut-off value). En el caso de un perfil exponencial con un valor cualquiera del exponente g , se obtiene una aproximación del valor límite V con la expresión

$$V_c \approx V_{c.\infty} \cdot \sqrt{\frac{g+2}{g}} \quad (13)$$

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

$$V_c \approx 2.405 \cdot \sqrt{2} = 3.4$$

1.4.1 Perfil Escalonado

Para que la luz sea conducida en el núcleo de un conductor de fibra óptica con perfil escalonado, el índice de refracción n_1 debe ser algo mayor que el del recubrimiento n_2 , teniendo en cuenta, la reflexión total en la superficie de separación de ambos vidrios. Si el valor del índice de refracción n_1 se mantiene constante en toda la sección del núcleo, se habla de perfil escalonado del índice de refracción, pues el índice se incrementa en forma de escalón a partir del valor que tiene en el recubrimiento, hasta el que posee en el núcleo y que allí permanece constante.

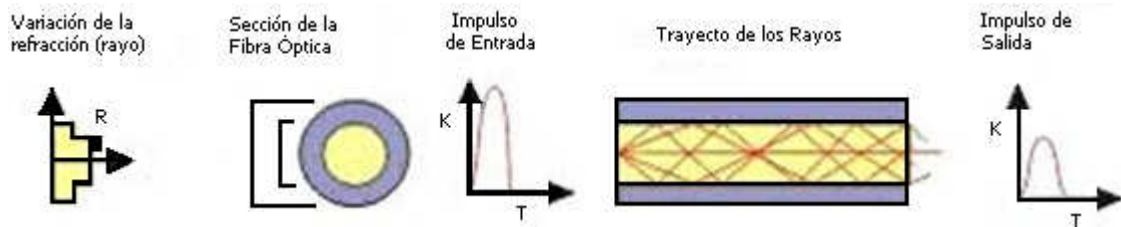


Figura 7. Conductor de fibra óptica con perfil escalonado.

Se propagaran por el núcleo, todos los rayos luminosos que forman con el eje de conductor de fibra óptica un ángulo menor o igual $(90^\circ - \alpha_0)$. Se debe tener en cuenta la ley de Refracción, cuando se acople al núcleo un rayo luminoso desde el exterior (aire con $n_0 = 1$) pues únicamente penetran a este núcleo los rayos luminosos que se hallen dentro un determinado ángulo de aceptación.

$$\text{sen } \theta = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (14)$$

Un conductor con estas características, es un conductor de fibra óptica multimodo. Un impulso luminoso que se propaga por este conductor, esta

formado por múltiples impulsos luminosos parciales, que son conducidos en cada uno de los modos del conductor.

En el extremo inicial del conductor de fibra óptica, cada uno de estos modos es excitado con un ángulo de acoplamiento diferente y conducido dentro del núcleo con otra trayectoria óptica.

En consecuencia, cada modo recorre un camino diferente y llega al otro extremo del conductor en distintos tiempos. La relación entre los tiempos de recorrido máximo y mínimo, es directamente proporcional a la relación entre los índices de refracción del recubrimiento y el núcleo, o sea que esta en el orden de magnitud de la diferencia de índices de refracción Δ . (Mayor al 1%).

La distorsión producida en los distintos modos por estas diferencias de tiempo se denomina dispersión modal y da lugar a que se ensanche el pulso luminoso de corta duración, que atraviesa el conductor de fibra óptica con perfil escalonado. Constituye una desventaja para las telecomunicaciones ópticas, pues reduce la velocidad de transmisión (cantidad de bits por unidad de tiempo), o el ancho de banda de transmisión.

Este efecto se ve atenuado por la influencia recíproca y el intercambio de energía entre los diferentes modos, a lo largo de la trayectoria en el conductor de fibra óptica. Esta mezcla o acoplamiento de modos se produce con mayor intensidad en irregularidades del núcleo, como empalmes o curvaturas de la fibra.

Observando el recorrido de los modos a lo largo del eje del conductor de fibra óptica, se comprueba que, a causa del intercambio de energía, modos de menor orden y con un pequeño ángulo respecto al eje del conductor, pasan a tener un orden con mayores ángulos y viceversa, en virtud de lo cual se produce una compensación de las velocidades entre los modos. Así, el ensanche temporal Δ_t de los pulsos luminosos acoplados; no es función lineal de la longitud L del conductor de fibra óptica (o sea $\Delta_t \sim L$), si no que en el caso ideal, solo llega a la raíz cuadrada de la longitud $\Delta_t \sim \sqrt{L}$.

La dispersión modal se puede eliminar totalmente dimensionando el conductor de fibra óptica con perfil escalonado de manera que conduzca a un único modo: el fundamental LP_{01} (donde $LP_{\nu\mu}$ de órdenes menores, cuyos índices modales son aproximadamente $\nu = 0, 1, 2$ y $\mu = 1, 2$ y se propagan casi paralelamente al eje del conductor, se encuentran en las cercanías del origen; en cambio los modos $LP_{\nu\mu}$ de orden superior con $\nu, \mu \gg 1$ se hallan más alejados del mismo).

Pero también sucede que en el modo fundamental, se ensancha en el tiempo al atravesar el conductor de estas características este efecto se denomina dispersión cromática. Por tratarse de una propiedad del material, esta dispersión en general se produce en todos los conductores de fibra óptica. Sin embargo la dispersión cromática resulta relativamente pequeña o nula, frente a la dispersión modal el longitudes de onda que van desde los 1200 a 1600 ηm .

Para describir al valor del modo fundamental (amplitud de campo radial) se ha introducido al diámetro del campo $2 \cdot w_0$.

Es necesario reducir el diámetro del campo $2 \cdot w_0$ hasta unos 10 μm , a fin de obtener un conductor de fibra óptica con perfil escalonado, baja atenuación y en el cual a longitudes de ondas mayores a 1200 ηm se propague únicamente en el modo fundamental. Un conductor con estas características se denomina conductor de fibra óptica monomodo

En la figura 8 se representa la trayectoria de un rayo luminoso y de perfil de índices de refracción de un conductor de fibra óptica monomodo.

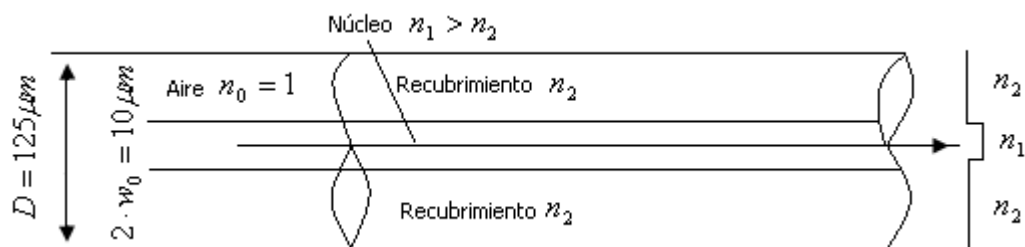


Figura 8. Conductor de fibra óptica monomodo

Se debe tener en cuenta que en el conductor de fibra óptica monomodo son comparando con el multimodo y de perfil escalonado, considerablemente menores no solo el diámetro del núcleo son también la apertura numérica y por lo tanto el ángulo de aceptación, por lo cual el acoplamiento de la luz en aquel resulta relativamente difícil.

Para un conductor de fibra óptica monomodo típico se obtiene una longitud de onda limite (por arriba de la cual solo se propaga el modo fundamental) y para la cual el parámetro V es $V_c = 2.405$.

A la longitud de onda λ_c , el siguiente modo de orden superior LP_{11} ya no es capaz de propagarse. A longitudes de onda mayores subsiste únicamente el modo fundamental LP_{01} .

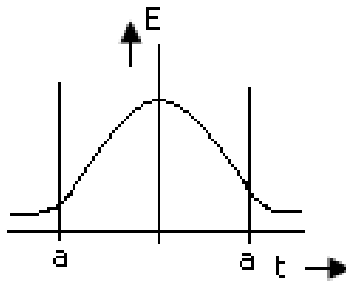


Figura 9. Distribución radial del campo del modo fundamental LP_{01}

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

1.4.2 Perfil Gradual

En un conductor de fibra óptica con perfil escalonado y múltiples modos, estos se propagan a lo largo de diferentes trayectorias, por lo cual llegan al otro extremo del conductor a diferentes momentos. Esta dispersión modal es un efecto no deseado y puede ser reducida considerablemente, si el índice de refracción en el núcleo varía en forma parabólica, desde un valor máximo n_1 en el eje del conductor y decae hasta otro valor n_2 en el límite con el recubrimiento.

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

$$n^2(r) = n_1^2 - AN^2 \cdot \left(\frac{r^2}{a^2} \right) \quad \text{Para } r < a \text{ en el núcleo. (15)}$$

$$n^2(r) = n_2^2 \quad \text{Para } r \geq a \text{ en el recubrimiento. (16)}$$

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

Como consecuencia de la variación continua del índice de refracción $n(r)$ en el núcleo, los rayos luminosos también se refractan continuamente, variando su dirección de propagación al recorrer estas trayectorias helicoidales. Si bien los rayos que oscilan en torno de el eje, deben recorrer aún un camino más largo que el que se propaga a lo largo de este eje, pueden desarrollar una mayor velocidad proporcional al menor índice de refracción, que tiene el material en los puntos mas alejados del eje y así compensa en el tiempo la mayor extensión

del recorrido. Como resultado de esta compensación, desaparece casi totalmente la diferencia de tiempos de recorrido. Cuando se conforma con exactitud el perfil parabólico de índices de refracción, se han medido en un conductor de fibra óptica con perfil gradual, con un tiempo total de recorrido de la luz de $5 \mu s$ a lo largo de un Km , dispersiones de tiempo sólo algo mayores de $0.1 ns$.

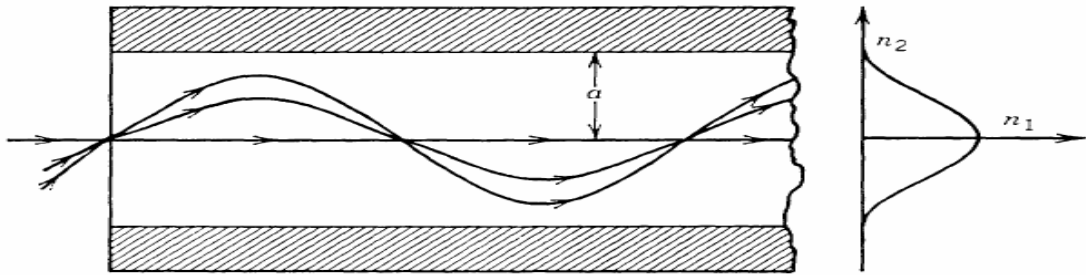


Figura 10. Conductor de fibra óptica con perfil gradual

Esta insignificante diferencia de tiempo de recorrido en el conductor de fibra óptica con perfil gradual, se produce no solo, por la dispersión en el material, sino también por la dispersión del perfil. Se origina en virtud de que los índices de refracción varían en el núcleo y en el recubrimiento de diferente manera con la longitud de onda (λ) y en consecuencia, tanto la diferencia de índices de refracción Δ , como el exponente del perfil g , son función de la longitud de onda. Para un perfil de onda gradual de forma parabólica, se obtiene teóricamente el exponente óptimo del perfil g , por la expresión:

$$g = 2 - 2p - \Delta \cdot (2 - p), \quad (17)$$

en la cual tanto el parámetro $P \ll 1$, como la diferencia de índices de refracción Δ depende de la longitud de onda λ , en consecuencia depende de ella también el exponente del perfil gradual.

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

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

$$\text{sen}\theta(r) = \sqrt{n^2(r) - n_2^2} = AN \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{r^2}{a^2}\right)} \leq AN \quad (18)$$

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

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

Y el ángulo de aceptación $\theta_{\text{máx}}$ en el eje del conductor de fibra óptica:

$$\text{sen}\theta_{\text{máx}} = AN \approx 0.206;$$

$$\theta_{\text{máx}} \approx 11.9^\circ$$

Se ha encontrado que las coordenadas $\text{sen}^2\theta$ y r^2 , son las más apropiadas para representar en un sistema de ejes coordenados al ángulo de aceptación θ en función de la distancia r al eje del conductor de fibra óptica. Un sistema con estas coordenadas, se denomina diagrama del espacio de fase.

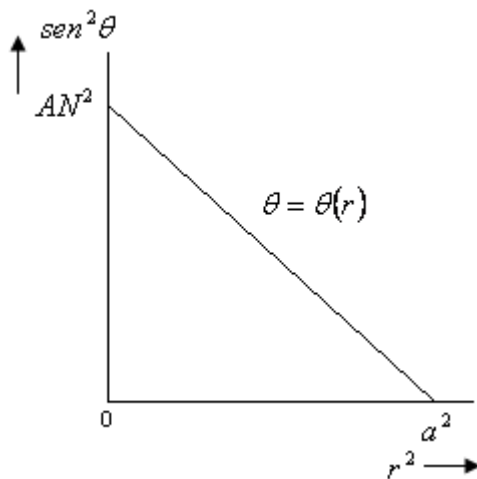


Figura 11. Diagrama del espacio de las fases de un conductor de fibra óptica con perfil gradual.

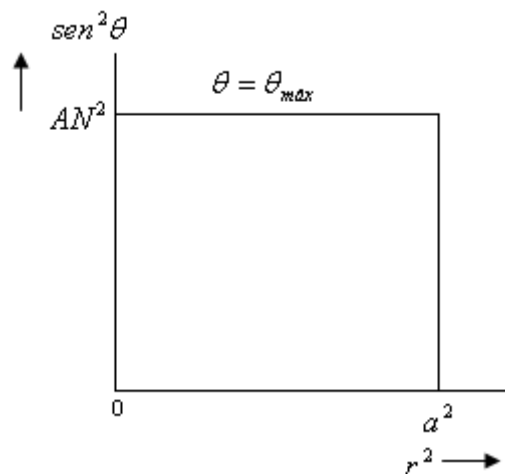


Figura 12. Diagrama en el espacio de un conductor de fibra óptica con Perfil escalonado

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

que duplica la de un conductor con perfil gradual, como se muestra la figura 11. También es proporcional a esta superficie, el número N de modos guiados en el núcleo. Cada uno de estos modos, se pueden localizar dentro de esta superficie. Así, los modos $LP_{\nu\mu}$, de ordenes menores, cuyos índices modales son aproximadamente $\nu = 0, 1, 2$ y $\mu = 1, 2$ y se propagan casi paralelamente al eje del conductor, se encuentran en las cercanías del origen; en cambio los modos $LP_{\nu\mu}$ de orden superior (con $\nu, \mu \gg 1$), se hallan más alejados del mismo. Los modos ubicados fuera de esta área no son guiados. Aquellos modos que se encuentran muy poco fuera de la curva limite, tiene limitadas posibilidades de propagación con elevada atenuación; estos modos se denominan modos fugados; en parte son guiados y en parte reflejados. Como se muestra la figura 12.

1.4.3 Perfil múltiple

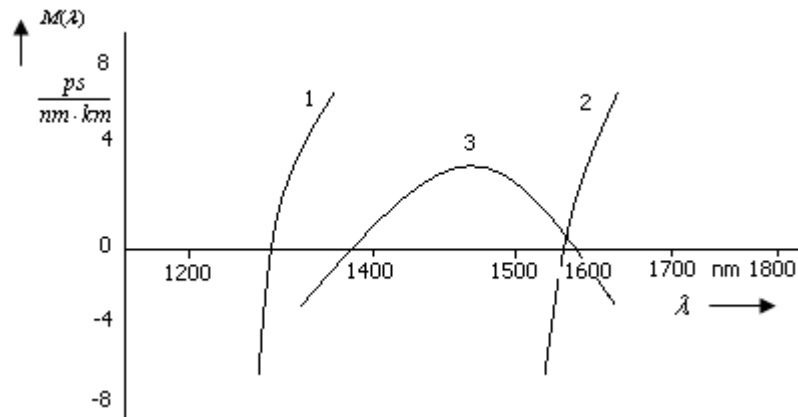
En un conductor de fibra óptica monomodo la dispersión total se compone, de dos clases de dispersión. Se trata, por un lado, de la dispersión en el material: se origina en el hecho que el índice de refracción n , por ende, la velocidad de la luz son funciones de la longitud de onda, o sea $n = n(\lambda)$ y $c = c(\lambda)$ y, por el otro lado, de la dispersión en la guía de ondas, resultante de la distribución de la luz del modo fundamental LP_{01} entre el núcleo y el recubrimiento y, por lo tanto, la diferencia de índices de refracción $\Delta = \Delta(\lambda)$ son función de la longitud de onda. Ambas clases de dispersión combinadas se denominan dispersión cromática.

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

El perfil de índices de refracción de un conductor de fibra óptica monomodo común es un perfil escalonado con una diferencia de índices de refracción Δ . Para esta estructura de perfiles simple se anula la sumatoria de ambas dispersiones en las cercanías de la longitud de onda $\lambda = 1300\text{nm}$.

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

desde los 1300 a 1550nm (los conductores de fibra óptica de dispersión plana o dispersión compensada).



1. Sin desplazamiento de la dispersión
2. Con desplazamiento de la dispersión
3. Con dispersión plana

Figura 13. Dispersión cromática en función de la longitud de onda

En la figura 13 se representa la dispersión cromática $M(\lambda)$ en función de la longitud de onda para un conductor de fibra óptica monomodo: sin desplazamiento de la dispersión, con desplazamiento de la dispersión, con dispersión plana.

Estos conductores de fibra óptica monomodo, pueden ser realizados con perfiles de diferentes estructuras.

Clase 1: Sin desplazamiento de la dispersión.

a) Perfil escalonado normal (simple step-index o matched cladding). Como se muestra en la Figura 14

b) Perfil escalonado con índice de refracción rebajado en el recubrimiento (depressed cladding). Como se muestra en la Figura 15.

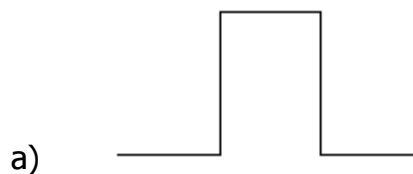


Figura 14. Perfil escalonado normal

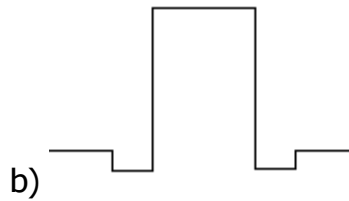


Figura 15. Perfil escalonado con índice de refracción rebajado en el recubrimiento.

Estructura de perfiles de conductores de fibras ópticas sin desplazamiento de la dispersión.

Clase 2: con desplazamiento de la dispersión.

a) Perfil segmentado con núcleo triangular (segmented core). Como se muestra en la Figura 16

b) Perfil triangular (triangular profile). Como se muestra en la Figura 17

c) perfil segmentado con doble escalón del índice de refracción en el recubrimiento (double clad). Como se muestra en la Figura 18

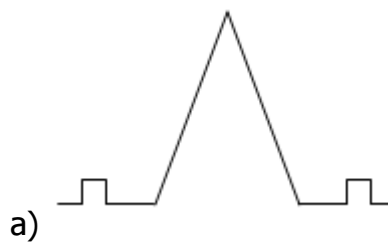


Figura 16. Perfil segmentado con núcleo triangular.

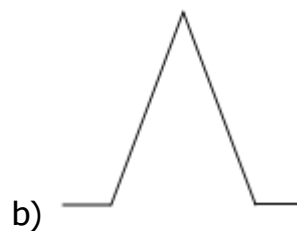


Figura 17. Perfil triangular.

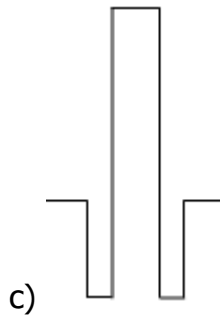


Figura 18. Perfil segmentado con doble escalón del índice de refracción en el recubrimiento.

Estructuras de perfiles de conductores de fibras ópticas con desplazamiento de la dispersión.

Clase 3: con dispersión plana

a) Perfil segmentado con cuatro escalones del índice de refracción en el recubrimiento (quadruple clad). Como se muestra en la Figura 19

b) Perfil W (double clad). Como se muestra en la Figura 20

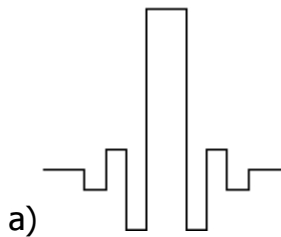


Figura 19. Perfil segmentado con cuatro escalones del índice de refracción en el recubrimiento.

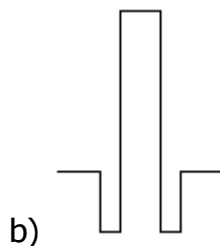


Figura 20. Perfil W.

Estructuras de perfiles de conductores con fibra óptica con dispersión

1.5 DISPERSIONES

1.5.1 Dispersión Cromática

Los pulsos luminosos se propagan por el conductor de fibra óptica con la velocidad del grupo:

$$c_g = \frac{c}{n_g} \quad (19)$$

Donde:

C_g = Velocidad de la luz de grupo.

C = Velocidad de la luz en el vacío.

n_g = Índice de refracción de grupo en el núcleo.

En la cual n_g es el índice de refracción de grupo en el núcleo que a su vez es función de la longitud de onda λ . El tiempo de recorrido de grupo que requiere un pulso luminoso para recorrer un conductor de fibra óptica de longitud L es:

$$t_g = \left(\frac{L}{c_g} \right) = \left(\frac{L}{c} \right) \cdot n_g \quad (20)$$

Donde:

t_g = Tiempo recorrido de grupo.

L = longitud de la fibra óptica.

C_g = Velocidad de la luz de grupo.

C = Velocidad de la luz en el vacío.

n_g = Índice de refracción de grupo en el núcleo.

en consecuencia, al depender del índice de refracción de grupo el tiempo de recorrido de grupo también es función de λ . Todas las fuentes luminosas emiten luz, no solo en una única longitud de onda λ sino también en un ancho espectral $\Delta\lambda$ distribuido alrededor de esa longitud de onda. En virtud de este efecto, los componentes de la luz se propagan con diferentes velocidades dentro $\Delta\lambda$ y varían los tiempos de recorrido.

La dispersión en el material M_0 da una medida de la variación del índice de refracción de grupo n_g para diferentes longitudes de onda y se la calcula derivando a dicho índice con respecto a la longitud de onda.

$$M_0(\lambda) = \frac{1}{c} \cdot \frac{dn_g(\lambda)}{d\lambda} = \frac{1}{L} \cdot \frac{dt_g(\lambda)}{d\lambda} \quad (21)$$

Para las unidades de la dispersión en el material M_0 se toma en general:

$$\frac{\text{ps}}{\text{nm} \cdot \text{km}}$$

Donde:

ps: Pascal segundo

nm: nanómetros

km: kilómetros

El índice de refracción de grupo presenta un mínimo para el vidrio de cuarzo en una longitud de onda de aproximadamente 1300 nm ; por lo tanto sus derivadas se anulan y la dispersión en el material M_0 a esta longitud de onda tomara un valor tan pequeño que se le puede despreciar.

La dispersión en el material, es una magnitud que depende de la sustancia y puede ser modificada, variando el dopado del vidrio, dentro de determinados límites, influyéndose sobre el valor mínimo citado. Esta dispersión actúa en los conductores de fibra óptica monomodo, como en los multimodo.

Es estos últimos, la dispersión modal tiene un valor muy superior que la del material en las cercanías del mínimo considerado.

Por otro lado se tiene otro efecto dispersivo: la dispersión en la guía de ondas, muy importante para los conductores de fibra óptica monomodo. Este efecto se origina en virtud de dependencia de la longitud de onda, respecto de la distribución luminosa del modo fundamental entre el núcleo y el recubrimiento y , por lo tanto, de la diferencia de índices de refracción $\Delta = \Delta(\lambda)$.

Cuanto mayor son las longitudes de onda λ , tanto más se incrementa la penetración desde el núcleo al recubrimiento del modo fundamental LP_{01} . En virtud de ello, una fracción luminosa creciente del modo fundamental, se propaga por el recubrimiento que tiene un índice de refracción menor que el del núcleo, resultando mayor la velocidad total de este modo. Dentro del ancho espectral $\Delta(\lambda)$ se tiene diferencias en los tiempos de recorrido. La velocidad de propagación de la onda luminosa es unitaria en el núcleo y en el recubrimiento: se tiene para la misma un promedio ponderado de las velocidades de propagación en ambos medios. Como se muestra en la Figura 21.

La suma de las dos dispersiones consideradas (en el material y en las guías de ondas), se denomina dispersión cromática $M(\lambda)$.

$$M(\lambda) = M_0(\lambda) + M_1(\lambda) \quad (22)$$

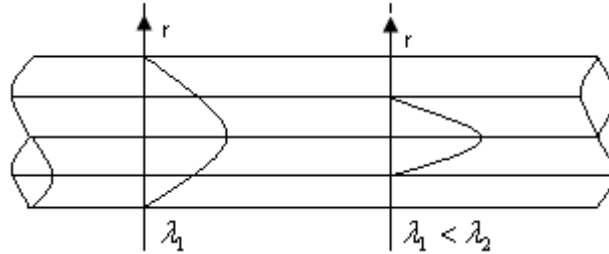


Figura 21. Distribución de la energía del modo fundamental a dos longitudes de onda diferentes

La longitud de onda λ_0 en la cual se anula la dispersión cromática se denomina cero de la dispersión cromática.

En la figura se representa las curvas de dispersión de un conductor de fibra óptica, con el cero de dispersión desplazado a los 1500 nm .

Si un emisor, acopla a un conductor de fibra óptica monomodo un pulso luminoso con un ancho espectral medio $\Delta\lambda$ o un ancho efectivo $\Delta\lambda_{ef}$

$\left(\Delta\lambda_{ef} = \frac{1}{\sqrt{\ln 4}} \cdot \Delta\lambda \approx 0.85 \cdot \Delta\lambda \right)$ para un espectro emisor gaussiano), el mismo varía en el tiempo a causa de la dispersión cromática $M(\lambda)$. Con una duración efectiva del pulso T_1 al principio del conductor y de T_2 después de una longitud L , se calcula el ensanchamiento efectivo del pulso ΔT_{ef} con la expresión:

$$\Delta T_{ef} = \sqrt{T_2^2 - T_1^2} = M(\lambda) \cdot \Delta\lambda_{ef} \cdot L \quad (23)$$

El ensanchamiento del pulso, se incrementa en forma proporcional con la longitud del conductor de fibra óptica y también, es proporcional al ancho espectral medio $\Delta\lambda$ del emisor.

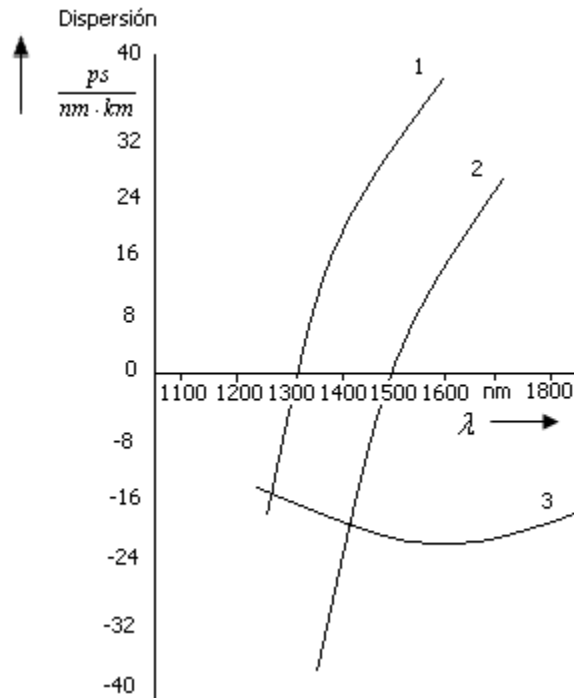


Figura 22. Curvas de dispersión de un conductor de fibra óptica monomodo

- 1 Dispersión en el material $M_0(\lambda)$.
- 2 Dispersión cromática $M(\lambda)$.
- 3 Dispersión en la guía de ondas $M_1(\lambda)$.

La formula número (24) , vale para pulsos y espectros gaussianos, siempre que la longitud de onda media λ_m del emisor no está en las cercanías de aquella en la cual se anula la dispersión cromática $M(\lambda)$. En esta zona, se debe utilizar la formula generalizada para el ensanche efectivo del pulso.

$$\Delta T_{ef} = \Delta \lambda_{ef} \cdot L \cdot \sqrt{M(\lambda_m)^2 + M'(\lambda_0)^2 \cdot \frac{\Delta \lambda_{ef}^2}{8}} \quad (24)$$

$M(\lambda_m)$ Dispersión a la longitud de onda medida λ_m del emisor, en $\frac{\rho s}{\eta m \cdot km}$.

$M'(\lambda_0)$ Incremento de la dispersión en el punto del cero λ_0 en $\frac{\rho s}{\eta m^2 \cdot km}$.

$\Delta \lambda_{ef}$ Ancho efectivo del emisor, en ηm .

El ancho de banda B de un conductor de fibra óptica monomodo se puede calcular para un espectro de emisión gaussiano y un ensanchamiento efectivo del pulso ΔT_{ef} como función de la longitud de onda λ . [5]

$$B = \frac{\sqrt{\ln 4}}{\pi} \cdot \frac{1}{\Delta T_{ef}} = \frac{\ln 4}{\pi} \cdot \frac{1}{\Delta T} \approx \frac{0.375}{\Delta T_{ef}} \approx \frac{0.441}{\Delta T} \quad (25)$$

1.5.2 Dispersión Rayleigh

Durante el proceso de fabricación, el vidrio es producido en fibras largas, de un diámetro muy pequeño. Durante este proceso, el vidrio está en un estado plástico (no líquido y no sólido). La tensión aplicada al vidrio durante este proceso, causa que el vidrio se enfríe y desarrolle irregularidades submicroscópicas, que se forman de manera permanente en la fibra. Cuando los rayos de luz que se están propagando por una fibra, chocan contra una de estas impurezas, se difractan. La difracción causa que la luz se disperse, o se reparta en muchas direcciones. Una parte de la luz difractada continúa por la fibra y parte de esta se escapa por la cubierta. Los rayos de luz que se escapan, representan una pérdida en la potencia de la luz. Como se muestra en la figura 23. [6]

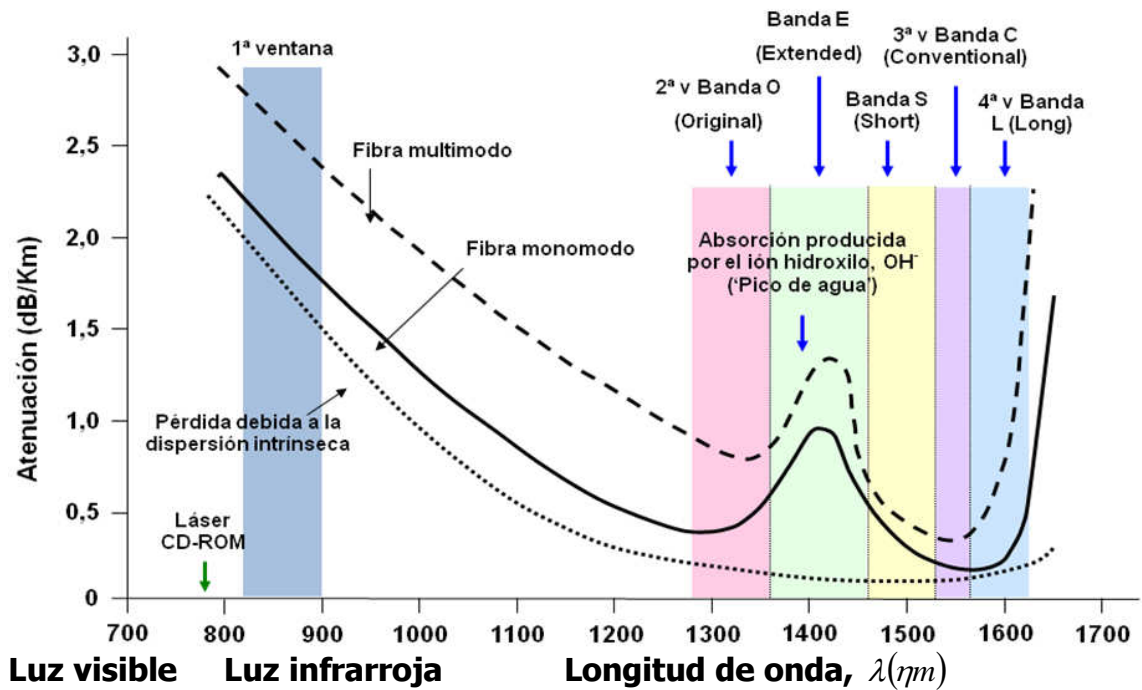


Figura 23. Atenuación de la fibra óptica

1.5.3 Dispersión Modal

La dispersión modal o esparcimiento del pulso, es causado por la diferencia en los tiempos de propagación de los rayos de luz que toman diferentes trayectorias por una fibra. Obviamente, la dispersión modal puede ocurrir solo en las fibras multimodo. Se puede reducir considerablemente usando fibras de

índice graduado y casi se elimina totalmente usando fibras de índice de escalón de modo sencillo. [6]

La dispersión modal puede causar que un pulso de energía de luz se disperse conforme se propaga por una fibra. Si el pulso que esta esparciéndose es lo suficientemente severo, un pulso puede caer arriba del próximo pulso. En una fibra de índice escalón multimodo, un rayo de luz que se propaga por el eje de la fibra requiere de la menor cantidad de tiempo para viajar a lo largo de la fibra. Un rayo de luz que choca a la interface de núcleo/cubierta en el ángulo crítico sufrirá el número más alto de reflexiones internas y, en consecuencia, tomar la mayor cantidad de tiempo para viajar a lo largo de la fibra. [5]

1.5.4 Dispersión Intramodal De La Guía De Onda

Es función del ancho de banda de la señal de información y la configuración de la guía generalmente es más pequeña que la anterior y se la puede despreciar. [7]

1.6 MATERIALES

Para la transmisión de señales lumínicas a través de un conductor de fibras ópticas, se requieren en su comienzo y su final elementos de emisión y recepción adecuados, para convertir las señales eléctricas en ópticas y viceversa.

En el extremo emisor, una señal eléctrica modula la intensidad de una fuente luminosa. La señal óptica se acopla al conductor de fibra óptica y llega al extremo receptor, donde un receptor de luz la convierte en una señal eléctrica.

En la técnica de los semiconductores, los conversores electro-ópticos con base a elementos químicos del tercer, cuarto y quinto grupo de la tabla periódica y sus combinaciones, por ejemplo InGaAsP/InP han demostrado ser particularmente aptos.

Los semiconductores poseen dos bandas de energía para los electrones: la banda de valencia y la banda de conducción, separadas por una distancia E_g (energy gap).

Un fotón que incide sobre el semiconductor cede su energía $h \cdot \nu$ a un electrón en la banda de valencia: este incrementa su energía y pasa a la banda de conducción, de mayor energía, dejando en la banda de valencia un espacio vacío denominado laguna; el fotón desaparece. Se trata de una absorción, una de las interacciones electro-ópticas.

Los electrones pueden volver espontáneamente a lagunas de la banda de valencia, si la banda de conducción esta ocupada en exceso de su equilibrio, en cuyo caso el semiconductor puede emitir un fotón por cada electrón. Este proceso se denomina recombinación irradiante de portadores de carga en exceso, pues en él se unen electrones y lagunas en exceso. Se dice que tiene emisión espontánea o luminiscencia.

En cambio, se trata de emisión estimulada, cuando fotones existentes en el semiconductor, excitan a los portadores de carga para tener una recombinación irradiante, es decir para emitir fotones. En este caso, es importante destacar que la radiación emitida tiene idéntica longitud de onda y fase que la radiación excitadora.

Estos tres procesos se desarrollan simultáneamente, predominando uno de ellos el cual puede ser aprovechado técnicamente. Así, en el fotodiodo se utiliza la torsión, en el diodo emisor de luz (o luminiscente), la emisión espontánea y el diodo laser la emisión estimulada.

Cabe mencionar, a demás, que en un semiconductor en el cual la conducción esta en su mayor parte a cargo de electrones, se denomina semiconductor n.

En cambio, se denomina semiconductor con déficit de electrones, en el cual las lagunas (portadores de cargas positivas) realizan principalmente la conducción. La unión de una capa semiconductor p y otra n, o sea una juntura pn (pn-junction) conforma un diodo.

1.6.1 Elementos Activos

1.6.1.2 Elementos emisores.

Para irradiar fotones por medio de la emisión espontánea o estimulada es necesario llevar portadores de carga en exceso al semiconductor, lo cual se logra inyectando portadores a través de una juntura pn.

Si se opera una juntura pn en la dirección de conducción, se inyectan electrones adicionales a la capa p y algunas adicionales en la n, que se pueden "utilizar" para emitir fotones.

El proceso de inyección de portadores a la posterior emisión, se denomina luminiscencia por inyección; en la práctica se la emplea en elementos emisores, como por ejemplo diodos emisores de luz (LED) y diodos laser.

1.6.1.3 Diodo emisor de luz (LED)

El diodo semiconductor que emite luz por emisión espontánea, se denomina diodo emisor de luz.

El rendimiento de la conversión de corriente eléctrica en luz, se describe por medio del rendimiento cuántico exterior, denominación dada a la relación entre los fotones emitidos por unidad de tiempo y el número de portadores que atraviesa la juntura pn del diodo semiconductor (para el GaAs, típicamente de 0.5 a 1%).

Dado que a medida que aumenta la temperatura, decrece el rendimiento cuántico, se debe evitar el calentamiento de la zona de recombinación, asegurando la evacuación de calor por medio de una conformación adecuada del diodo.

Para el funcionamiento del diodo emisor de luz es, además, muy importante la longitud de onda emitida, determinada principalmente por la separación entre banda de energía E_g valiéndose la siguiente relación:

$$\lambda = 1.24 / E_g \quad (26)$$

λ : Longitud de onda.

E_g : Separación de energía, en eV.

$h \cdot \nu$: 1.24.

Para diodos del arseniuro de galio (GaAs), E_g vale 1.43 eV: entonces λ vale $0.89 \mu m$ a temperatura ambiente.

Para fosfuro de indio (InP) con $E_g = 1.35$ eV de manera análoga $\lambda = 1.92 \mu m$.

El ancho espectral medio $\Delta\lambda$ de un diodo emisor de luz es aproximadamente proporcional al de la longitud de onda, o sea, es fuertemente a elevadas longitudes de onda.

Otro importante valor característico es el tiempo de conmutación del diodo emisor de luz. Su valor determina el tiempo de reacción del diodo. Sucede que el tiempo medio de vida de los portadores de carga en exceso, determina la emisión de luz después de interrumpirse la corriente. Por debajo de este límite el diodo ya no puede reaccionar ante las variaciones de la corriente inyectada. Tiempos mínimos típicos están en el orden de algunos nanosegundos, que corresponde a un ancho de banda de modulación en la gamma de 100MHz.

Dado que tiempo de reacción y tiempo cuántico son función de concentración de lagunas, no es posible utilizarlos simultáneamente. Diodos emisores de luz muy "rápidos" irradian, con referencia a la corriente de inyección, menos fotones

1.6.2 Conformación y Valores Característicos

A continuación se detallan 3 ejemplos de diodos emisores entre las múltiples posibilidades de su aplicación. Se trata de:

Diodo difundido de GaAs para $\lambda \approx 900nm$

Diodo de alta potencia de AlGaAs/GaAs para $\lambda \approx 830nm$ y

Diodo de alta potencia de InGAsP/InP para $\lambda \approx 1300nm$.

En la tabla 1. Se resumen los valores característicos típicos

	Tipo		
	IRED	IRED de alta potencia	
Longitud de onda (ηm)	880 a 950	800 a 885	1300/1550 ³
Ancho espectral (ηm)	50	45	100 ²
Material semiconductor	GaAs	AlGaAs/GaAs	InGaAsP/InP
Estructura	Difusión simple	Doble heteroestructura	
Emisión	espontánea		
Tiempo de conmutación (ηs)	20 a 100	5 a 20	5 a 20
Potencia luminosa acoplable a un conductor de fibra óptica con diámetro del núcleo 50 μm (μW)	2	30 a 100	50 a 100
Longitud de transmisión en km a una velocidad Mbits/s	0,01 a 0,1 a 5 a 10	1 a 5 30 a 100	1 a 5 50 a 200

1.6.2.1 Diodo de GaAs para longitudes de onda de 880 a 950 ηm .

El diodo de GaAs es, considerando su configuración, el emisor más simple. Consiste de un sustrato de GaAs-n, con una zona p de 200 μm de diámetro en su cara superior. De la luz infrarroja generada principalmente en la zona p, se utiliza la fracción emitida por la superficie p para acoplarla al conductor de fibra óptica.

1.6.2.2 Diodo de potencia AlGaAs/GaAs (Burrus) para longitudes de onda de 800 a 885 ηm .

El diodo esta formado por un cristal semiconductor de estructura cúbica. Sobre un sustrato de GaAs con dopado n, se hace crecer de forma epitaxial una doble heteroestructura de tres capas de AlGaAs de diferentes espesores y dopados. Con estas capas epitaxiales orientadas hacia abajo, el diodo se suelda, con disipador de calor de oro, sobre una plaquita de silicio con pista conductora y aislación de SiO_2 . En la base del cristal de diodo, una capa aislante de Al_2O_3 limita el flujo de corriente a un contacto p de reducida superficie.

El espesor y sobre todo el dopado de la capa superior de AlGaAs, se ajustan de tal forma, que en ella no se produzca un apreciable ensanche de la corriente. De esta forma se logra que una superficie de la capa activa de AlGaAs, de diámetro solo ligeramente superior que el del contacto p, sea excitada para emitir, con lo cual se garantiza, que la superficie de emisión tenga el reducido tamaño requerido.

La luz infrarroja emitida hacia arriba en dirección al sustrato de GaAs, se acopla a la fibra óptica. Al atravesar la capa activa, esta radiación experimenta una auto absorción insignificante, debido a su reducido espesor y atraviesa sin absorción la capa de GaAs que se halla encima de la anterior; sin embargo, dado que la luz se vería totalmente absorbida en el sustrato dentro de unos pocos micrómetros en la zona de emisión, éste se reduce mediante ataque con ácido en forma concéntrica hacia el contacto p. Luego se fija el contacto al material remanente del sustrato. Esta configuración brinda la ventaja de obtener, gracias a la reducida superficie del contacto p, un área de emisión proporcionalmente pequeña.

1.6.2.3 Diodo de potencia InGaAsP/InP para longitudes de onda 1300 a 1550 μ m .

Respecto a los diodos emisores para la "segunda ventana" (1300 μ m), es necesario en lo concerniente al material pasar del semiconductor terciario AlGaAs al cuaternario InGaAsP y a cristales de InP para el sustrato. La configuración de los diodos de potencia cuaternarios es, en principio, similar a la de los diodos AlGaAs/GaAs.

Un semiconductor de InGaAsP emite a una longitud de onda de 1300 μ m y su constante estructural se ajusta al InP, lo cual permite realizar también, la doble heteroestructura, tan eficaz para diodos emisores.

La diferencia entre la radiación de un diodo emisor de luz y un diodo laser consiste en que este último, por la emisión estimulada, emite luz coherente. El diagrama polar de irradiación del diodo laser es mucho más que angosto que el diodo LED, lo cual, facilita un acoplamiento particularmente efectivo con el conductor de fibra óptica.

1.6.3 Conformación y valores característicos.

Los diodos laser se pueden clasificar, según su estructura, en dos familias que se caracterizan por la clase de limitación lateral de la conducción de ondas.

Tabla 2. Valores Característicos de diodos láser.

	Tipo	
	DL	DL-MCRW
Longitud de onda ηm	800 a 885	1300/1550 ¹⁾
Ancho Espectral ηm	3 a 5	3 a 5
Material Semiconductor	GaAlAs/GaAs	GaInAsP/InP
Estructura	Doble heteroestructura	
Emisión	Coherente	Coherente
Tipo de Conmutación ηs	< 1	< 1
Potencia lumínica acoplable a un conductor de fibra óptica. Núcleo \emptyset $50 \mu m$ (mW). Campo $\emptyset 10 \mu m$ (mW)	1 a 5	1 a 3 0,5 a 1,5
Longitud del tramo de transmisión en km para velocidades de transmisión en ($Mbit/s^2$)	5 a 20 565	hasta 35 1200

¹⁾ En desarrollo

²⁾ El producto velocidad de transmisión/longitud es constante.

1.6.3.1 Módulo láser

El uso de los diodos láser requiere en la práctica la combinación de varios grupos funcionales. Están alojados dentro de una caja hermética; al conjunto se le denomina modulo láser.

En la figura (24) se ilustra el diagrama en bloques de un módulo láser. La conformación modular asegura la adaptación sencilla de este módulo al tramo de la línea de transmisión. La adaptación óptica se efectúa en el módulo: se acopla de modo óptimo un tramo corto de conexión del conductor de fibra óptica (pigtail) con la superficie de emisión del diodo (se requiere un ajuste de la fase). Este tramo se hace salir en forma hermética de la caja del modulo láser.

Gran importancia tiene el grupo funcional correspondiente a la regulación de la temperatura. Para esta función se utilizan, entre otros elementos, placas de enfriamiento por efecto Peltier.

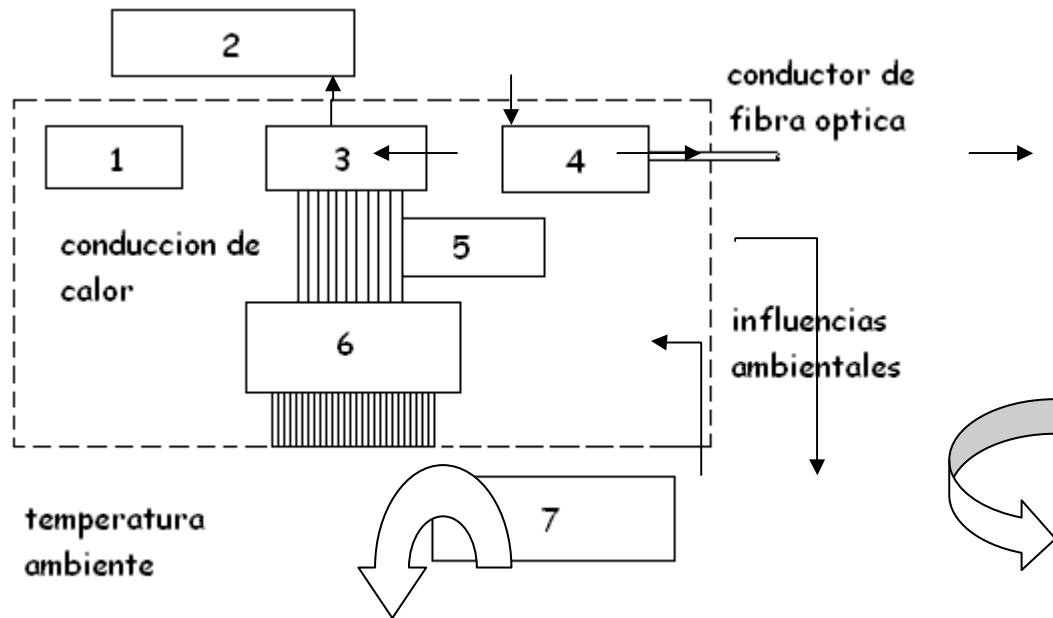


Figura 24. Diagrama en bloques de un módulo láser.

- 1 Diodo monitor
- 2 Regulación y control eléctricos.
- 3 Diodo láser.
- 4 Adaptación óptica.
- 5 Termistor.
- 6 Placas de enfriamiento por efecto Peltier.
- 7 Regulación de la temperatura.

1.6.3.2 Elementos Receptores

En el fotodiodo se aprovecha el efecto de la absorción de radiación luminosa por un semiconductor. En este proceso, para transportar corriente se libera un par electrón-laguna, por la incidencia de un fotón con mayor energía que la separación E_g de las bandas de energía (proceso inverso a la de emisión luminosa).

En principio, las junturas de pn de semiconductores se pueden utilizar, no sólo para la excitación de portadores por inyección lumínica, sino también para la concentración de portadores de carga excitados ópticamente por medio de la separación, en el campo eléctrico, de la zona espacial de cargas, o sea, para la

recepción de la luz. En la concentración de los portadores de cargas de la juntura pn, como los que se encuentran en la <zona de difusión>.

Mientras que el primer caso, los dos portadores de carga generados son separados inmediatamente por el campo eléctrico en la zona de carga espacial, en el segundo, los portadores minoritarios generados se deben difundir hasta la juntura pn, antes que sean absorbidos por el campo de la zona de carga espacial y transportados a la zona semiconductor neutra, ubicada enfrente. A causa de ambos procesos circula una corriente eléctrica en el circuito exterior.

Para la fabricación de estos receptores, se utilizan principalmente silicio y germanio o compuestos de los grupos III, IV y V. En la figura (25) se dan los coeficientes de absorción α , de materiales semiconductores usuales en función de la onda λ .

Como se observa, en la figura número (25) el Si es especialmente apto para su uso por debajo de $1000\eta m$. Para longitudes de onda mayores, conviene más el Ge. En el rango de los 1300 a $1600\eta m$, el InGaAs o InGaAsP es apto como material para fotodiodos.

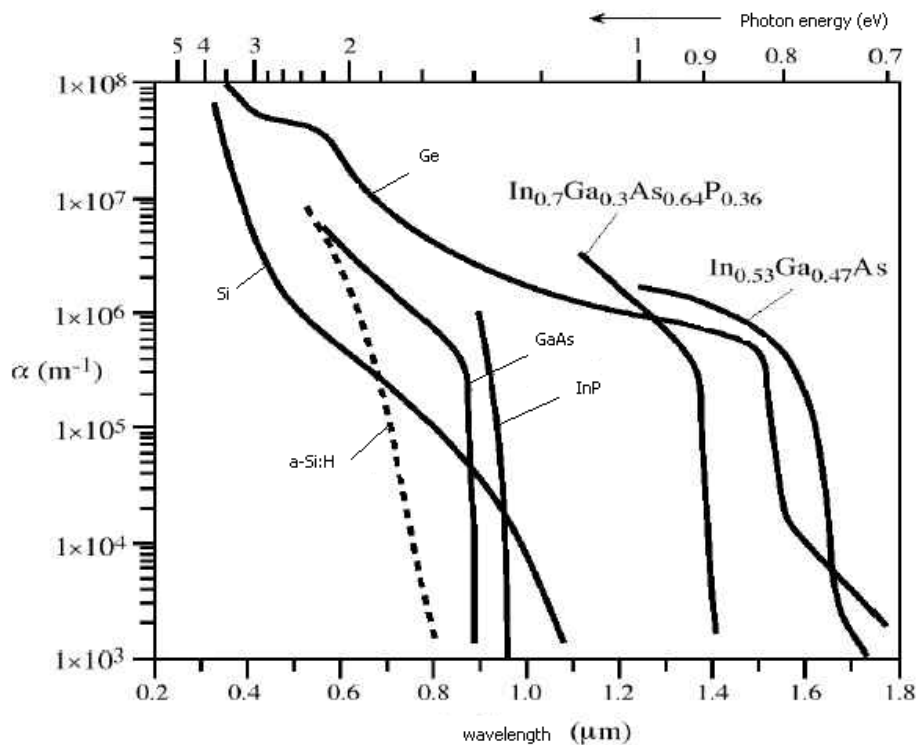


Figura 25. Coeficientes de absorción para varios materiales semiconductores

1.6.3.3 Fotodiodo PIN

En semiconductores con bajo coeficiente de absorción, se incrementa la zona de absorción, para la radiación intercalando entre el semiconductor n y el p una capa de semiconductor no dopado (zona i, intrínseca). A este diodo se lo denomina fotodiodo PIN.

1.6.3.4 Fotodiodos de silicio para longitudes de onda de hasta 1100 nm.

La figura número 26 ilustra un corte esquemático de un diodo con una estructura pvn^+ , donde v significa, que la zona i es conductora n. La luz infrarroja incide sobre el diodo a través de la zona p; la superficie se recubre con una capa de Si_3N_4 para evitar pérdidas por reflexión.

Para aumentar la sensibilidad, se puede agregar a los fotodiodos PIN un FET (transistor de efecto de campo). Con estos módulos híbridos PIN-FET se obtienen sensibilidades muy elevadas.

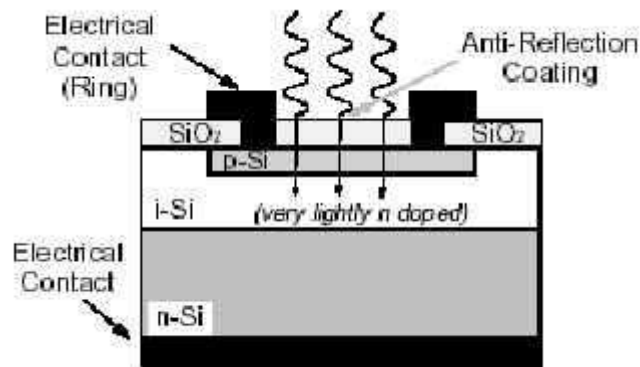


Figura 26. Esquema de un fotodiodo pin

1.6.3.5 Fotodiodo de avalancha

Si los portadores de carga acelerados en el campo eléctrico, adquieren velocidades tan altas, que por el efecto de choques se ionizan a otros portadores de cargas, se obtiene una corriente fotoeléctrica particularmente elevada.

Este proceso, se denomina ruptura por avalancha y, en consecuencia, se dice del fotodiodo que es de avalancha (APD o FDA).

1.6.3.6 Fotodiodo de avalancha (APD o FDA) de silicio para longitudes de onda de hasta 1100 ηm .

En principio, se puede utilizar al fotodiodo PIN descrito precedentemente como uno de avalancha. Son muy altos los requerimientos de tensión, para lograr los elevados campos necesarios para la ruptura por avalancha.

Por razones técnicas, en la actualidad casi todos estos diodos se realizan con una estructura p^+np .

1.6.3.7 Fotodiodo de avalancha de InGaAs/InP para 1300 ηm .

En forma similar al del fotodiodo PIN, la iluminación se realiza a través del sustrato, pero la juntura pn no está en la capa absorbente de InGaAs sino en el In.

Por ello se forma una zona con un campo eléctrico de elevada intensidad en la capa InP n^- , donde se puede producir la ruptura por avalancha con mayor facilidad. Para concentrar las lagunas producidas por los fotones, hace falta ajustar solamente un campo eléctrico de baja intensidad.

Otros diodos para la gama de las longitudes de onda de los 1300 ηm son:

-Fotodiodo de avalancha de germanio, que se puede fabricar con una tecnología relativamente simple; se usa cada vez menos.

-Combinación de un fotodiodo de InGaAs/InP con un FET-GaAs. [5]

Tabla3. Valores característicos de elementos receptores.

Tipo	Longitud de onda ηm	Material Semiconductor	Estructura	Amplificación (veces)	Sensibilidad espectral A/W
PIN-FD	400 a 1000	Si	PIN/planar	No hay	0,7 a 0,9')
AFD	400 a 1000	Si	planar	10 a 100	
PIN-FD	1300	Ge	Mesa/planar	No hay	
AFD	1300	Ge	Mesa/planar	10	
PIN-FD	900 a 1600	InGaAs/InP	Mesa/planar	No hay	
AFD	900 a 1600	InGaAs/InP	Mesa/planar	10 a 50	

Capítulo 2

2. COMPONENTES DE LOS MEDIOS ÓPTICOS

2.1 MATERIALES

2.1.2 Vidrio de Cuarzo

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

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

En su forma más pura el cuarzo cristalino aparece como cristal de roca claro como el agua. Sus propiedades ópticas y mecánicas son anisotrópicas (*La **anisotropía** es la propiedad general de la materia según la cual determinadas propiedades físicas, tales como: elasticidad, temperatura, conductividad, velocidad de propagación de la luz, etc. varían según la dirección en que son examinadas*[7]): varían en las diversas direcciones de sus cristales.

En la actualidad y debido a las múltiples aplicaciones técnicas del cuarzo, por ejemplo: como cuarzo oscilante, como elemento óptico activo, o como elemento piezoeléctrico, se lo elabora en forma sintética provocando su crecimiento a partir de un núcleo cristalino.

En contraposición con el cuarzo, el vidrio de cuarzo resulta de una masa fundida a partir de SiO_2 solidificado, de carácter amorfo, es decir no cristalino, con apariencia sólida debido a su alta viscosidad (tenacidad). No posee punto de fusión, pero a temperaturas elevadas se ablanda progresivamente, se vuelve pastoso y luego se evapora sin pasar previamente por el estado líquido.

La viscosidad es un valor muy importante para la elaboración y el conformado del vidrio. Con la misma se describe el rozamiento interno en el vidrio de cuarzo; su símbolo es η y su unidad puede ser indicada con 1 decipascalsegundo

$\left(dPa \cdot s = \frac{1g}{cm \cdot s} \right)$. A medida que aumenta la temperatura, la viscosidad del vidrio de cuarzo disminuye en forma progresiva.

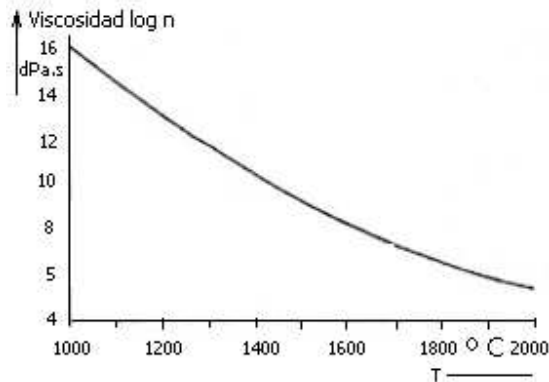


Figura 27. Variación de la viscosidad del vidrio de cuarzo en función de la temperatura

Por consideraciones prácticas y con el auxilio del logaritmo de la viscosidad en la tabla 4, se han definido algunas temperaturas características, ya que la curva que relaciona su variación no presenta puntos destacados.

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

2.2 Fabricación

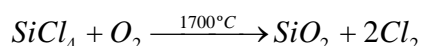
En general, la elaboración de vidrio de cuarzo de alta pureza, tiene lugar mediante separación de SiO_2 de la fase gaseosa, produciéndose con el agregado de oxígeno y en virtud del desprendimiento gaseoso, la transformación del compuesto muy volátil tetracloruro de silicio. $SiCl_4$.

Se elige el proceso indirecto por medio de $SiCl_4$, pues en contra posición del SiO_2 natural, mediante destilación es posible obtener este compuesto con alto grado de pureza.

Tabla 4. Temperaturas características del vidrio interpretadas con ayuda del $\log \eta$

Viscosidad $\log \eta$	Denominación	Temperatura del vidrio de cuarzo en °C.
7.6	Temperatura de ablandamiento (softening point).	1730
1.3	Límite superior de relajación (annealing point).	1180
14.5	Límite inferior de relajación (strain point).	1075

Ecuación de reacción.



Actualmente se fabrican los conductores de fibra óptica, para telecomunicaciones ópticas utilizando este proceso. Un factor muy importante para la propagación de la luz, en un conductor de fibra óptica es, el índice de refracción n (capítulo 1) del vidrio. Este se puede "ajustar" por medio de un adecuado "dopado" o sea agregando determinados óxidos durante la separación de fase gaseosa. Por ejemplo: agregando flúor (F) o trióxido de boro B_2O_3 , se obtiene un índice de refracción bajo y al agregar dióxido de germanio GeO_2 , o pentóxido de fósforo P_2O_5 , un índice más alto, como el requerido para el núcleo del conductor de fibra óptica. Se debe tener en cuenta, sin embargo, que son relativamente limitadas las variaciones de los índices de refracción del vidrio de cuarzo, que se pueden obtener al variar el dopado.

En la figura número 27 se ha representado la variación del índice de refracción n , del vidrio de cuarzo dopado en función de la concentración de diferentes elementos dopantes.

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

Otro motivo por el cual se atenúa la luz que recorre el vidrio de cuarzo, resulta de la absorción por los metales de transición Fe, Cu, Co, Cr, Ni, Mn y por el agua en forma de iones de OH. Sólo muy pequeñas contaminaciones del vidrio de cuarzo con estas impurezas metálicas, o con iones de OH alcanzan para producir elevadas pérdidas de luz. La concentración de estas impurezas, se indica en partes por millón, o en partes por billón (ppb= 10^{-9}); significa que tiene una parte de impureza por cada 10^6 o 10^9 partes de la sustancia básica. La absorción de estas impurezas es muy marcada; por ejemplo:

Material	Impureza	Atenuación (dB/km)	λ (nm)
Cu	1 ppm	varios	880
OH	1 ppm	0,1	800
		1	950
		1,7	1240
		35	1390

De lo anterior se desprende además que, según la impureza, la atenuación puede ser importante a determinada longitud de onda en razón, de lo cual se habla de bandas de absorción en la correspondiente gama de longitudes de onda.

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

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

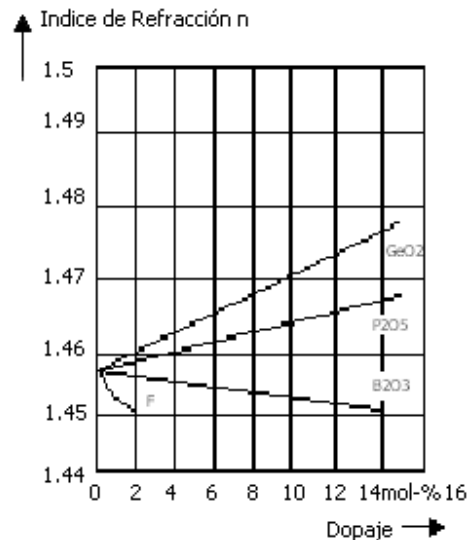


Figura 28. Índice de refracción de SiO₂ en función de los diferentes elementos dopantes

2.3 Propiedades del Material

El vidrio de cuarzo es una sustancia isotrópica (*se refiere al hecho de que ciertas magnitudes vectoriales medibles dan resultados idénticos con independencia de la dirección escogida para la medida* [8].); quiere decir que sus propiedades físicas son las mismas independientemente de la dirección. Muy conocido es su comportamiento frente a variaciones rápidas de temperatura.

Teniendo en cuenta su coeficiente de dilatación lineal extremadamente pequeño, presenta una extraordinaria estabilidad frente a los cambios de temperatura. [5]
Características típicas del vidrio de cuarzo:

Tabla 5. Características del vidrio de cuarzo.

Denominación	Unidad	Valor
Densidad γ	g/cm^3	2.20
Modulo de elasticidad E	N/mm^2	72500
Modulo de torsión G	N/mm^2	30000
Coefficiente de dilatación lineal (por variaciones de temperatura) α	K^{-1}	$5.5 \cdot 10^{-7}$

2.4 Procesos de Fabricación

A continuación se describen las técnicas más empleadas en la fabricación de la preforma de fibra óptica. La preforma es el cilindro macizo de dióxido de silicio dopado, que sirve como materia prima para la elaboración de la fibra. El paso siguiente para dicha elaboración, tal como las conocemos una vez fabricadas, es la extrusión de la preforma.

2.5 Fabricación de la Preforma

Los cuatro procesos utilizados para fabricar la preforma son los siguientes:

2.5.1 Método M.V.C.D (Modified Chemical Vapor Deposition)

Para la fabricación de la preforma se parte de un tubo de cuarzo puro en cuyo interior se deposita una serie de capas concéntricas, constituidas por la mezcla ya descrita anteriormente de dióxido de silicio y aditivos de dopado, estas capas concéntricas, depositadas interiormente, constituirán el núcleo de la fibra óptica.

El procedimiento industrial, consiste en instalar el tubo de cuarzo, sobre un torno, luego se calienta el tubo de cuarzo, mediante un quemador de oxígeno e hidrógeno, hasta que se alcanza una temperatura de 1500° Celsius, aproximadamente, seguidamente, el torno comienza a girar y el quemador se desplaza longitudinalmente a lo largo del eje del tubo, por un extremo del mismo, se introducen los aditivos de dopado que se van a necesitar, mezclados con la cantidad exacta de oxígeno, este es el paso fundamental del proceso, pues de la proporción de los aditivos de dopado introducidos, dependerá el perfil final del índice de refracción del núcleo de la fibra óptica, durante la oxidación se produce la mezcla homogénea del dióxido de silicio, con los aditivos de dopado depositándose en la cara anterior del tubo de cuarzo, en forma de capas concéntricas. Sucesivas, pasadas en ambos sentidos del quemador, a la vez que el torno continúa girando, garantizan la deposición de las sucesivas capas concéntricas, de esta forma se logra el perfil deseado, con los valores de índice de refracción prefijados para el núcleo de la fibra óptica. Este paso del proceso recibe el nombre de sintetización del núcleo de la fibra óptica. Todo el proceso se realiza en fábrica, en forma totalmente automática y bajo la supervisión de computadores. El último paso del proceso consiste, una vez realizada la operación de deposición, en la maniobra de colapso, en esta última, el tubo de cuarzo con el dióxido de silicio en su interior, convenientemente dopado, se convierte en un cilindro macizo que constituye la preforma, esto se realiza, mediante varias pasadas consecutivas del quemador a una temperatura de alrededor de 1750° Celsius, esta temperatura garantiza el reblandecimiento del Cuarzo, con lo que el tubo se colapsa y se

convierte en el cilindro macizo que constituye la preforma, las dimensiones geométricas de la preforma, son una longitud útil de aproximadamente un metro, con un diámetro exterior de un centímetro.

2.5.2 Método V.A.D (Vapor Axial Deposition)

En este método las materias primas empleadas, son las mismas que en la técnica M.C.D.V y la diferencia entre ambas radica en que, mientras en el procedimiento M.C.D.V. tan sólo se deposita el núcleo de la fibra óptica, en la técnica V.A.D. se deposita tanto núcleo de la fibra, como el recubrimiento.

Para la fabricación de la preforma se parte de un cilindro de vidrio auxiliar que servirá de soporte para iniciar la operación, los materiales se van depositando ordenadamente a partir del extremo del cilindro auxiliar, con lo que la "preforma porosa" va creciendo axialmente sobre dicho cilindro, dado que en esta técnica, se deposita tanto el núcleo como el recubrimiento de la fibra óptica u operación de síntesis del núcleo y del recubrimiento, debe cuidarse que en la zona de deposición axial o núcleo se deposite comparativamente, más dióxido de germanio que en la periferia, lo que se realiza como en los otros métodos mediante el control por medio de computadores, la preforma porosa, conforme su tasa de crecimiento, va siendo desprendida del cilindro auxiliar de vidrio; con este método se pueden obtener preformas en formas de varillas, comparativamente más largas que con el proceso descrito anteriormente, el último paso consiste, en la operación de colapsado, en el cual la preforma porosa es sometida a una temperatura de alrededor de 1600° Celsius, que garantiza el reblandecimiento del cuarzo, la preforma porosa, hueca en su interior, se colapsa convirtiéndose en el cilindro macizo y transparente que constituye la preforma.

Este proceso, presenta las ventajas frente al M.C.V.D., de que permite obtener preformas con mayor diámetro y mayor longitud, a la vez, que requiere un menor aporte energético.

2.5.3 Método O.V.D. (Outside Vapor Deposition)

Para la fabricación de la preforma se parte de una varilla de substrato cerámica, los cloruros vaporosos se introducen en la llama del quemador y la llama caldea radialmente la varilla de substrato cerámica, a la vez, que se desplaza longitudinalmente en su misma dirección, de esta forma se aplican centenares de capas, comenzando inicialmente por el núcleo, para finalizar con el revestimiento de la fibra óptica, la preforma porosa, conforme la tasa de crecimiento de la misma va siendo desprendida de la varilla de substrato cerámica que servía de soporte, a continuación se realiza el proceso de síntesis de la preforma, desglosable en los

procesos de secado de la misma, con cloro gaseoso y posterior colapsado de la preforma de manera totalmente análoga a los realizados con la técnica V.A.D. se logra, de esta forma, sintetizar el núcleo y el recubrimiento de la fibra óptica.

La tasa de deposición en ambas técnicas, resulta muy ventajosa, pues aumenta con el crecimiento progresivo debido al incremento de la superficie del sustrato, las tasas de deposición que se alcanzan son del orden de $4.3 \frac{g}{min}$, lo que representa a una tasa de fabricación de fibra óptica de $5 \frac{km}{hora}$, una vez eliminadas las pérdidas iniciales en el estirado de la preforma.

Otra ventaja de ambas técnicas, consiste en que optimizándose el proceso de secado, es posible fabricar fibras de una muy baja atenuación y de una gran calidad, porque los perfiles así obtenidos son lisos y sin estructura anular reconocible, motivada por la alta tasa de deposición.

2.5.4 Método P.C.V.D. (Plasma Chemical Vapor Deposition)

Este método inicia la oxidación de los cloruros de silicio y germanio, obligándoles a pasar por un estado de plasma, seguido de un proceso de deposición interior, el proceso se caracteriza por la obtención de perfiles especialmente lisos, sin estructuras anular reconocible. [11]

Capítulo 3

3. EVOLUCIÓN DE LA FIBRA ÓPTICA

Desde la llegada de la fibra monomodo, el espectro básico de atenuación de la fibra óptica siempre ha ofrecido una región de alta atenuación en la longitud de onda de 1383 μm , conocido como el pico de agua. Hasta hace poco, los diseñadores han evitado el sistema de transmisión en la región del pico de agua debido a las excesivas penalizaciones en la atenuación. En los últimos años, los productores de fibra óptica han introducido un nuevo estándar de la ITU-TG.652 de fibra mono modo, G.652.C y G.652.D, que básicamente elimina el pico de agua. Además de la reducción de las pérdidas en 1383 μm , un proceso "anti-envejecimiento" (o proceso "envejecimiento del hidrógeno") también fue desarrollado para garantizar que la atenuación en 1383 μm no aumentara con el tiempo (es decir, posterior instalación).

3.1 La importancia del "pico de agua" en fibras G.655

En 1383 μm existe un pico anómalo en la atenuación de fibra óptica que es causado por la absorción de agua (en forma de hidroxilo o iones de OH^-) que se disuelve en el vidrio.

Obviamente, las longitudes de onda en el modelo de bandas de longitud de onda centrada entre 1310 μm y 1550 μm no se ven afectadas por el pico de agua por lo que la importancia de la reducción del volumen máximo de agua de fibra G.655 no es evidente.

Sin embargo el pico de atenuación en 1383 μm y en las longitudes de onda en la cercanía de 1383 μm también tiene atenuación elevada. La gama de longitudes de onda afectados y la magnitud de su aumento de la atenuación depende de la magnitud del pico de agua. Cerca de la ventana de 1400 μm es, sin duda afectada por la escala del pico de agua y la longitud de onda de esta región es donde opera la bomba láser de amplificación Raman. Por lo tanto una mayor atenuación en la región afectará negativamente a la eficiencia de la bomba.

Otro beneficio que ofrece eliminar un pico de agua es una distribución más limitada de fabricación para la atenuación en 1383 μm y en consecuencia, también en la ventana de 1400 μm .

3.1.2 Importancia del envejecimiento del hidrogeno

La conversión completa de productos para reprimir un pico de agua es un importante avance tecnológico y de fabricación. Sin embargo, si una vez instalado, la atenuación en 1383 ηm aumenta debido a la exposición de hidrógeno, el desempeño del sistema puede ser afectado negativamente, que puede conducir potencialmente el corte de luz a la red.

3.1.3 Impacto de la supresión del pico de agua.

La atenuación de la distribución en la fabricación de 1383 ηm para fibras de pico de agua no reprimido es amplia. Por la variabilidad de la atenuación, distribución y la inestabilidad del pico de agua debido al envejecimiento de hidrógeno, los diseñadores de sistemas necesitan ser conservadores en sus diseños.

Altos márgenes del sistema han tenido que ser construidos, junto con la variable de atenuadores de la señal, para compensar la elevada pérdida (de la atenuación básica de la fibra y un potencial aumento de atenuación en la fibra con el tiempo). Por lo tanto, la nueva generación de fibras con permanentemente bajos picos de agua y una reducida atenuación de distribución, ofrece significantes ventajas sobre la anterior generación de fibras con altos picos de agua. Esta nueva generación de fibra G.655 permite a los diseñadores del sistema, mejorar drásticamente el rendimiento de su sistema y/o ahorrar un significativo costo en un rendimiento equivalente del sistema.

En un sistema de amplificación de Raman, por lo general, varias bombas Raman adyacentes a las longitudes de onda que están desplegadas con el fin de obtener una amplia amplificación de la ventana. La óptima ubicación de la bomba Raman de longitudes de onda para la eficacia de la amplificación de la banda-C va de 1410 a 1470 ηm . Hacer más bajo el pico de agua, más reducido, y estabilizar la distribución de atenuación en 1383 ηm , por lo tanto, tienen el mismo efecto en la ventana de 1400 ηm , donde las bombas Raman se encuentran. Estas características facilitan el diseño del sistema, da flexibilidad y reducción de los gastos de la siguiente manera:

La baja atenuación provee más margen del sistema el cual, para dar un alcance al sistema, puede ser usado para bajar los costos, bajar la potencia en las bombas Raman o garantizar una alta calidad del servicio.

Una baja atenuación aumenta el alcance final del sistema y puede utilizarse para el amplio rango de trabajo de una red antes que los equipos terminales sean necesarios.

La baja atenuación podrá reducir el consumo de los amplificadores de potencia.

La distribución más estricta en la atenuación facilita la optimización del margen del sistema y asocia la eficiencia de costos

A través de la estabilidad del pico de agua " envejecimiento del hidrogeno" maximiza la flexibilidad en el diseño del sistema, eliminando la necesidad del diseño del sistema conservador, el rendimiento y el ahorro en costos más bajos de energía y bombas de rayos láser.

Sistemas de alto rendimiento (40Gb / s), y sistemas que se extienden con extra largos alcances o longitudes, a menudo necesita amplificación Raman. Como resultado de sus ventajas con amplificación Raman, una fibra con un pico de agua reprimido permitirá mejorar la transmisión de resultados 40Gb / s y facilitará así mismo un sistema más flexible en términos de diseño, en última instancia, el alcance y la capacidad de configurar concatenados más largo que se extiende de la duración normal.

Impulso de la adopción del mercado de 40Gb/s es cada vez mayor

Es ampliamente reconocido que la transmisión de 40Gb / s es la siguiente después de los 10Gb / s en redes de larga distancia. La amplificación Raman suele considerarse como una de las técnicas para proporcionar mayor OSNR necesarios para sistemas de 40Gb / s. Muchos sistemas establecidos y nacientes en casas han demostrado la capacidad que tienen los 40Gb / s y el equipo disponible en la actualidad y los distribuidores han comenzado a investigar vías de actualización 40Gb/s.

La fibra G.655 de pico de agua reprimido más el soporte en la adopción en los sistemas de 40Gb/s proporcionando una margen adicional y flexibilidad en los sistemas. [11]

3.2 Nuevas Tecnologías de Fibras Ópticas

La fibra monomodo definida en la Recomendación G.652 de la ITU-T, es la más común en las instalaciones realizadas desde que se explota la tecnología monomodo.

La atenuación mínima se obtiene en la ventana de 1550 ηm , y la dispersión cromática mínima en la ventana de 1310 ηm , por lo tanto, no pueden garantizarse las mejores condiciones de pérdida y dispersión, simultáneamente.

Lo anterior impulsó a la industria a crear fibras con mejores prestaciones en cuanto a dispersión y ancho de banda efectivo. A partir del año 2004, la ITU-T y la CEI han iniciado el proceso de normalización de este nuevo tipo de fibras, que algunos países ya han decidido instalar.

La fibra óptica tiene la posibilidad de operar en un amplio rango espectral, que va mas allá de las tres "ventanas" de operación tradicionales que entregan las fibras comunes, y debido a esto, es muy importante la definición de las bandas de operación que comprende el espectro óptico extendido.

La ITU-T a través del suplemento 39 de la serie de recomendaciones "G" (*Diseño de Sistemas Ópticos y Consideraciones de Ingeniería*) de Octubre de 2003, ha establecido una nueva definición de bandas de operación para los sistemas ópticos, como banda "O", banda "E", banda "C", banda "S", banda "L", banda "U".

Banda "O" (Original, Original): definida a partir de 1260 nm por encontrarse en este punto la longitud de onda de corte para las fibras G.652. Para este punto la dispersión cromática en el peor caso es de -6.42 ps/km·nm, su equivalente positivo debido a la pendiente de dispersión ocurre en 1375 nm, pero este punto cae sobre la ascendente del pico de absorción de agua cuyo máximo esta en 1383. Por esto se define el límite superior de esta banda en 1360 nm.

Banda "C" (Conventional, Convencional): En la recomendación G.957 (*Interfaces ópticas para equipos y sistemas relacionados con la jerarquía digital síncrona*) se designó la zona desde 1430 nm a 1580 nm para aplicaciones de corta distancia con fibra G.652, y la zona entre 1480 nm y 1580 nm para aplicaciones de larga distancia con fibra G.652, G.653, y G.654. Estos límites fueron impuestos debido a consideraciones de atenuación, y en algunos casos por limitaciones debido a la dispersión cromática. Para aplicaciones con amplificadores ópticos tanto monocanal como multicanal, estos rangos fueron más tarde subdivididos. En

esta subdivisión, la zona que utilizan los amplificadores EDFA, de uso mayoritario en la actualidad, va desde 1530 a 1565 ηm , valores con los cuales se define esta banda. Sin embargo esto es solo una definición y no limita la zona de operación de los EDFA, ya que existen algunos diseños de estos que exceden los límites de esta banda.

Banda "L" (Long, Larga): Para longitudes de onda superiores a la banda C, el rendimiento del cable de fibra óptica dentro de un rango de temperaturas específico es adecuado para 1625 ηm , para los tipos de fibras actuales. Más aún, es recomendable el uso de rangos lo más ancho posibles para la transmisión de señal. Esto define la banda L que va desde 1565 a 1625 ηm .

Banda "U" (Ultralong, Ultralarga): Para casos de mantenimiento y pruebas en las redes de fibra óptica en operación (generalmente con OTDR's), estos procesos deben llevarse a cabo ya sea introduciendo el láser del instrumento a la fibra fuera de tráfico, o estando esta en tráfico y ubicar la longitud de onda de prueba por medio de Multiplexión óptica dentro de la banda de transmisión. La intención de definir la banda U se basa en que, en sistemas futuros, sea posible realizar un monitoreo de la fibra en tráfico por medio de la ubicación de la longitud de onda de prueba en regiones que no son utilizadas por las longitudes de onda de transmisión. Esta banda se define desde 1625 a 1675 ηm , ya que esta zona es una región atractiva para futuras longitudes de onda de mantención, pese a su elevada atenuación, pues se pretende que nunca sea ocupada por canales de transmisión.

3.2.1 Amplificación óptica

Actualmente las redes que utilizan amplificaciones ópticas, en su gran mayoría emplean amplificadores de fibra dopada con erbio (EDFA). Sin embargo este tipo de amplificadores tiene un ancho de banda de operación limitado (aproximadamente 35 THz) que se ubica en la banda "C" comprendida entre 1530 y 1565 ηm , lo cual no permite un completo aprovechamiento del espectro óptico disponible. Para solucionar este problema, han seguido técnicas de amplificación variadas tales como amplificadores (EDFA) de banda dual (que operan en las bandas C y L), amplificadores dopados con tierras raras distintas al erbio y amplificadores basados en el Esparcimiento Estimulado de Raman (SRS). Es por esto que la nueva generación de fibras ópticas para redes de transmisión de larga distancia que requieran de amplificación, deben considerar la operación con estas nuevas tecnologías de amplificación y muy especialmente deben tener en cuenta la amplificación de Raman, ya que ella ha tenido un fuerte desarrollo y se espera que sea la tecnología de amplificación óptica predominante en el futuro.

3.2.2 Banda "E" (Extended, Extendida)

La última actualización de la recomendación G.652 de Marzo de 2003, incluye como sub-categorías G.652.C y G.652.D, la estandarización de fibras que disminuyen la atenuación producida por el pico de absorción de agua, y que permiten la transmisión en las longitudes de onda que este comprende. El efecto de absorción debido a los iones OH⁻ es imperceptible mas allá de los 1460 ηm , razón por la cual esta banda está definida entre 1360 y 1460 ηm . [12]

Tabla 6. Nueva definición de bandas de operación para los sistemas ópticos

BANDA	DESCRIPCIÓN	RANGO (nm)
Banda-O	Original (Original)	1260 a 1360
Banda-E	Extended (Extendida)	1360 a 1460
Banda-S	Short (Corta)	1460 a 1530
Banda-C	Conventional (Convencional)	1530 a 1565
Banda-L	Long (Larga)	1565 a 1625
Banda-U	Ultralong (Ultralarga)	1625 a 1675

En la banda-E el amplificador de fibra Raman que no posea dispersión cero en la fibra, se muestra con un volumen máximo de 39dB de ganancia. La ganancia de la absorción de agua de la fibra no se observa al obstaculizar significativamente la amplificación. Este dispositivo podría ampliar el ancho de banda de las telecomunicaciones.

La reciente demanda de las telecomunicaciones de banda ancha ha llevado a investigar la amplificación fuera de las regiones convencionales de longitud de onda de la banda C (1530-1565 ηm). La amplificación Raman es una opción atractiva como ganancia ya que puede ser obtenido a lo largo de toda la región espectral.

Una banda espectral que los investigadores han evitado hasta la fecha es la banda-E (1360-1460 ηm), debido a la fuerte absorción de agua en los picos presentes.

Aquí en la banda-E, el amplificador de fibra Raman (FRA) demuestra que a partir de 1360 a 1440 ηm tiene máximo de ganancia de 39dB.

Las especificaciones de medidas y de fabricación indican que la absorción de agua de la (FRA) en sí no constituyen un fuente importante de la pérdida, pero que el vapor de agua en el analizador de espectro óptico (OSA) y la sonda láser presenta más de un problema específicamente para la caracterización del amplificador.

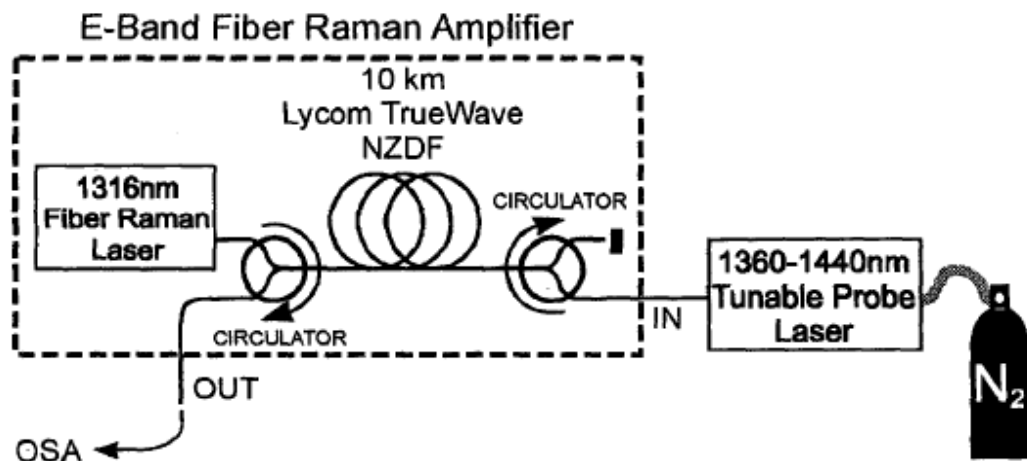


Figura 29. Configuración experimental

La Figura 29 muestra la puesta en marcha. La ganancia consiste en una fibra de 10 km TrueWave con dispersión no cero de fibra (NZDF) con una longitud de onda de 1447nm de dispersión no cero. NZDFs están diseñados con banda ancha de baja dispersión para posibilitar el aumento del ancho de banda en las telecomunicaciones; $1,3 \mu\text{m}$ optimizado circulan contra la bomba de propagación y la señal en la NZDF.

La bomba de potencia de salida se limitó a 2.5W para evitar daños en la circulación. En la NZDF la potencia de la bomba fue hasta 1.9W y en la NZDF la señal de potencia fue de 21dBm para obtener pequeñas señales en las mediciones de OSA. Ganancias netas y las cifras de ruido (NFS) se mide mediante la comparación de la FRA de entrada y salida de señales.

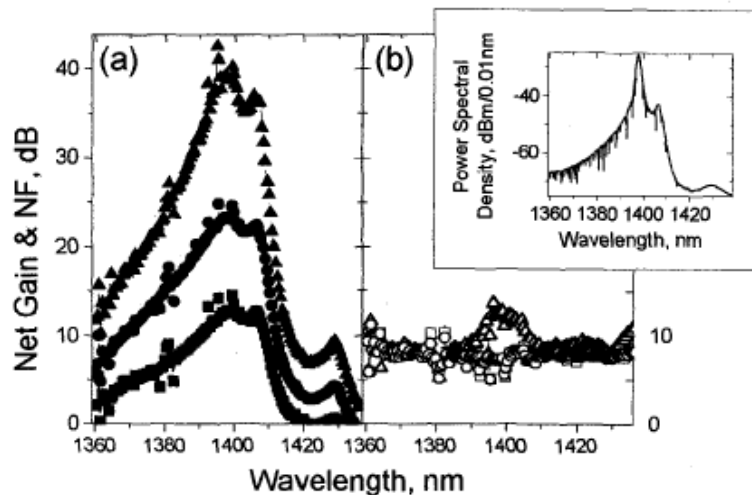


Figura 30. Ganancias (a) y NFS (b) para la bomba NZDF con potencias de 1,9 (triángulos), 1,2 (círculos) y 0.7W (cuadrados). Insertar: Raman ASE emitida para la bomba de 1.9W de potencia.

La Figura 30 muestra las ganancias en NFS, y en la NZDF la potencia de la bomba es de 1.9, 1.2 y 0.7W, en pasos de 0.5nm. Ganancias tan altas como 39dB se obtuvieron cerca de la ventana 1398 ηm Raman con pico >10dB, y ganancias sobre más de 56 nm de ancho de banda para la bomba en la NZDF con potencia de 1.9W. En las NFS se obtuvieron 8dB de ancho de banda durante la mayor parte de la FRA. Para NZDF en la bomba la potencia fue > 1.5W; en las NFS se observaron hasta 12.5dB alrededor de 1398 ηm y esto aparecen debido a la emisión espontánea amplificada (ASE) en la bomba de alta potencia (Fig. 2 (b) recuadro).

En la ganancia se observaron picos en 1380 y 1395 ηm y espectros en NF. Estos picos se deben a las fuertes líneas de absorción de agua en la banda-E. Simultáneamente las mediciones en OSA y en el medidor de potencia (PM), indican que la principal fuente de la pérdida de agua en este sistema, es la OSA y no NZDF. Las especificaciones de los fabricantes de NZDF muestran un aumento de pérdida de 0.1dB/km ó 1dB sobre la longitud de la FRA en torno a la región espectral. Sin embargo, la base de medidas en OSA muestra el aumento de pérdidas hasta 10dB y en los picos de agua. Las varias depuraciones a lo largo del N_2 y los resultados de PM sugieren que la TL provee una constante energía a través de su gama de sintonización. Sin embargo, la falta de precisión de TL, la

repetitividad espectral en toda anchura de línea de 0.1 nm y podrían contribuir a la ganancia los picos de absorción de agua y a los picos en NF.

Gran ganancia de las mediciones en la señal se han realizado para investigar la ganancia de saturación. Bastantes constantes de ganancias se observaron con el aumento de la señal de potencia hasta que la FRA fuera de 10-20mW la salida de la señal, después de esto se observó que la señal espectral presenta distorsiones. La dispersión estimulada Brillouin parece contribuir a estas distorsiones.

Resumiendo, se demostró la banda-E en la FRA y en la NZDF. La absorción de agua no parece obstaculizar significativamente en la amplificación de las NZDFs, pero podría ser un elemento que complica la caracterización de técnicas de TLs y OSAs. El uso de fibra Allwave con la eliminación de pérdida de agua permitirá más eficiencia en la banda-E para la amplificación Raman.[13]

3.2.3 Banda "S" (Short, Corta): La zona comprendida entre los límites de las bandas E y C se denomina la banda S. No obstante, en aplicaciones particulares, no se dispone de la banda completa para canales de información propiamente. Algunas longitudes de onda pueden ser utilizadas por los láseres de bombeo que necesitan los amplificadores ópticos, ya sean los del tipo ion-activo como los de Raman. También algunos canales pueden ser asignados para el canal de supervisión óptica de los sistemas WDM (OSC, Optical Supervisory Channel). [12]

Multiplexar las bandas C y L ya se han convertido en una manera convencional de aumentar el número de canales ó la capacidad de transmisión en los sistemas de transmisión WDM. Una manera prometedora de aumentar la región del ancho de banda portadora más lejos es usando la banda-S (1450-1520 nm), porque la pérdida en la fibra está por debajo de los 0.25 dB, y la región es menos vulnerable a la pérdida de flexión en las bandas C y L. varios tipos de amplificadores de fibra óptica han sido nombrados, llamados amplificadores de fibra thulium dopados (TDFA) para la banda de 1450-1480 nm , cambio de ganancia de los amplificadores de fibra thulium dopados (GS-TDFA) para la banda 1480-1510 nm , y los amplificadores Raman para la banda 1450-1520 nm . A continuación se muestra una revisión de estos 3 amplificadores:

3.2.3.1 TDFA

Las TDFA están compuestas por cuatro niveles de transición $^3\text{H}_4 - ^3\text{F}_4$ de tierras raras de iones de thulium (Tm^{3+}), como muestra la figura 30. Esta transición es un problema en la vida de los niveles superiores (1.7 ms) y es mucho más pequeña

en los niveles inferiores (11ms), haciéndolo más dificultoso en el estado de inversión de la población para la formación. El sistema de bombeo es emitido con un fotón más alto, como se muestra en la figura 31, es muy usado para solucionar este problema. El bombeo con la emisión de un fotón más alto donde Tm^{3+} son los iones excitados en 3F_4 son llevados a un nivel en un estado de absorción (primer estado de bombeo) y son bombeados de nuevo para aparecer al nivel superior 3H_4 a través de un estado excitado de absorción (segundo estado de bombeo). El segundo estado de bombeo reduce la larga vida de la población de iones Tm^{3+} en el nivel más bajo 3F_4 , y al mismo tiempo, se les excita de manera eficiente para aparecer en el nivel superior 3H_4 , como se muestra en la figura 31, lo que permite que la inversión en la población tome lugar. El bombeo con la emisión de un fotón más alto mediante el uso de la bomba, ya sea una sola fuente de emisión cerca de 1050 nm (bombeo de la única longitud de onda), ó dos clases de fuentes de emisión bombeo a diferentes longitudes de onda, como corresponde al primer y segundo estado de bombeo (doble bombeo de longitud de onda). Las fuentes de bombas en 1200 ηm ó 1550-1650 ηm son usadas para el primer estado de bombeo y 1050 nm ó en 1380-1400 ηm es usada el segundo estado de bombeo. Normalmente, el bombeo de la doble longitud de onda es más eficiente que el bombeo único de longitud de onda, sin embargo la configuración de este amplificador es bastante complejo. Además, cabe señalar que la doble longitud de onda de bombeo utilizando 1400 y 1550 ηm permite a todos los de bombeo de LD.

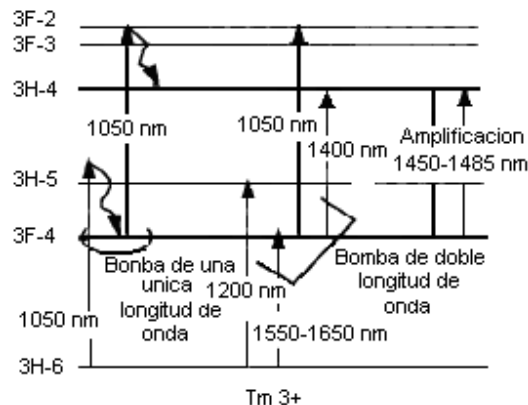


Figura 31. Diagrama de energía de Tm^{3+} y un sistema de bombeo con emisión de fotones más altos.

La figura 32 muestra el espectro de ganancia de los TDFA como función de las longitudes TDF. Los TDFA es bombeado bidireccionalmente con láseres Nd: YLF. La potencia de la bomba varía hacia adelante y hacia atrás entre 75 y 225 mW,

respectivamente. El espectro de ganancia fue medido con una señal de prueba de 30 dBm mientras que dos señales de saturación (1460 y 1472 nm) tuvieron una entrada de potencia de -10dBm/ch (-7 dBm en total). La ganancia fue más de 20 dB, y la cifra de ruido fue menos de 6 dB en la región 1450-1485 nm de longitud de onda para una óptima longitud en TDF. La eficiencia en la ganancia aumento 20m y luego disminuyo, por lo que es importante para optimizar la duración de TDF con una eficiente de amplificación. La eficiencia de conversión en la potencia (PCE) fue alrededor de 10-12%. Este valor de PCE puede ser mejorado hasta un 15% empleando una doble longitud de onda de bombeo (1047+1200 nm).

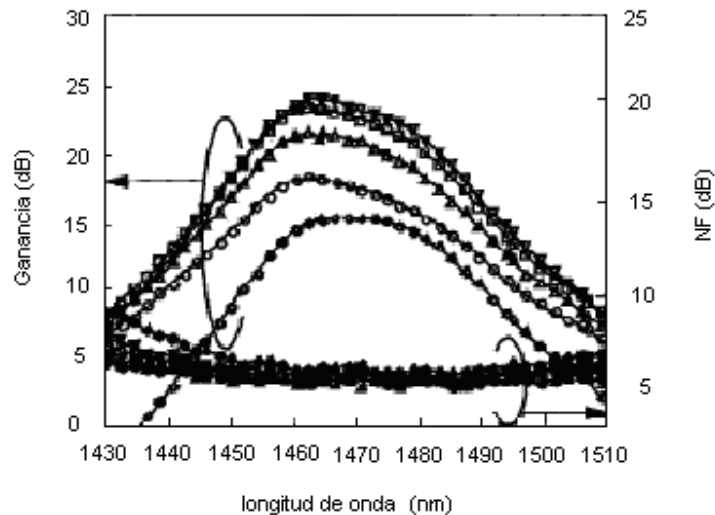


Figura 32. Características de las ganancias de TDF

3.2.3.2 Cambio de ganancia de los TDF

La ganancia de banda de los TDF puede ser cambiada por una región más larga de 1480-1510 nm de longitud de onda para formar un bajo estado en la inversión de la población entre los niveles 3H_4 y 3F_4 . Esto es similar en la banda de ganancia de los EDFA ya que es cambiada a la banda 1580 nm de longitud de onda.

El bombeo con la emisión de un fotón más alto usando TDF a 1050 nm un único bombeo de longitud de onda no puede ser lograda con un bajo estado de inversión en la población. Los iones excitados Tm en el nivel 3F_4 son instantáneamente

excitados otra vez en el nivel superior ${}^3\text{H}_4$, haciendo que se imposible realizar la baja inversión en estado en la población. El primer rango del estado de bombeo debe ser aumentado para lograr una baja inversión en la población y por tanto una ganancia en la banda de turno.

Dos técnicas han sido ya propuestas para lograr un estado bajo en la inversión de la población; doble bombeo de la longitud de onda y alta concentración en el dopaje. El doble bombeo de longitud de onda emplea el mismo esquema que la figura 31. Adicionalmente la bomba fuente en 1550 ηm ó 1200 ηm es usada en conjunción con una bomba fuente en 1050 ó 1400 ηm . La primera fase del rango de bombeo es aumentada por una fuente adicional de la bomba, y en última instancia un bajo estado en la inversión en la población es formado.

La diferencia entre los dos esquemas es la condición de potencia, es decir, la ganancia de banda requiere un cambio en la primera fase en la fuente de la bomba con una potencia mucho mayor. La eficacia en la conversión de la potencia alrededor del 10% se ha logrado con las fuentes de la bomba de 1550 y 1400 ηm . La otra manera de cambiar la ganancia en la banda es usar una mayor concentración en el dopaje.

En este caso, el núcleo TDF es dopado con iones Tm^{3+} a una concentración de más de 4.000 ppm. Cuando los iones Tm^{3+} están más juntos, da como resultado alta concentración en el dopaje, se produce una transferencia no radiactiva de energía llamada "la relajación cruzadas". La relajación cruzada es un fenómeno donde los iones de Tm^{3+} en el nivel ${}^3\text{H}_4$ transfieren su energía a los iones vecinos en el terreno, como se muestra en la figura 33, y ambos iones están en el nivel ${}^3\text{F}_4$. Esto es equivalente en la primer estado del rango de bombeo, y causa los cambios de ganancia en la banda. La ventaja del sistema es que el amplificador de configuración es tan simple como la de la EDFA.

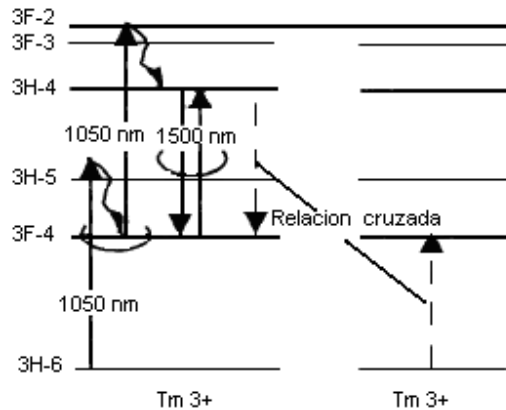


Figura 33. Alta concentración en el dopaje.

La figura 34 muestra las características de ganancia en los cambios de ganancia en los T DFA cuando es usada una alta concentración en el dopaje. Los amplificadores son utilizados en dos estados de configuración (la antigua etapa es el bombeo hacia adelante a 300 mW, y la segunda etapa es bidireccional, el bombeo es a 425 y 275 mW con 1.047 fuentes de la bomba). Una ganancia de más de 30 dB y una cifra de ruido inferior a 5 dB se lograron en la región 1480-1510 nm de longitud de onda. La eficiencia de conversión de potencia de este amplificador se puede aumentar a más del 10% en virtud de optimizar las condiciones.

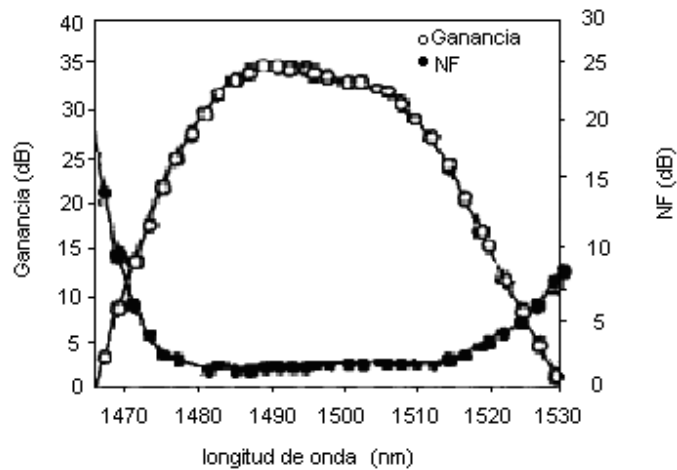


Figura 34. Características en la ganancia de GS-TD usando alta concentración en el dopaje.

3.2.3.3 Amplificadores Raman

Se pueden construir amplificadores Raman en la banda-S (ambos distribuidos y discretos) mediante el establecimiento de la bomba de longitud de onda en torno a 1400 nm . Los amplificadores Raman pueden utilizarse en conjunción con TDFAs o GS-TDFAs. Sin embargo la transmisión WDM multiplexada en las bandas S, C y L basada en la distribución del amplificador Raman no puede ser lograda porque la bomba en la longitud para las bandas C y L son distribuidas por amplificadores Raman, $1450\text{-}1510 \text{ nm}$, coinciden con la banda-S, y la reflexión posterior de la luz de la bomba causa graves interferencias con las señales de banda S.

Ya se ha informado que discretos amplificadores Raman en la banda-S pueden ser construidos utilizando una bomba de 1420 nm de luz. Una ganancia de más de 20 dB se logró para una señal total de entrada con potencia de -7 dBm en la región de $1500\text{-}1530 \text{ nm}$ de longitud de onda, con una bomba de potencia de 800 mW. La eficiencia de conversión de potencia fue inferior al 8%.

La bomba de longitud de onda de los amplificadores de banda S coincide con el pico de la pérdida causada por la absorción OH que deja en torno a 1380 nm , debemos utilizar baja absorción OH en la fibra para aumentar la eficiencia. Los Discretos amplificadores Raman requieren más atención en lo que respecta al exceso de ruido causado por la doble dispersión Rayleigh, y efectos no lineales, como la modulación de cruz de la fase ó mezcla de cuatro de ondas que se producen en el interior de la ganancia de los medios de comunicación de las fibras de silicio a pocos kilómetros de longitud.

El TDFAs o GS-TDFA parecen tener una ligera ventaja sobre los amplificadores Raman en términos de eficiencia de conversión de potencia, pero se tienen que hacer nuevas mejoras en el PCE, si se quiere emplear a todos estos amplificadores de bajo condiciones practicas. [14]

3.3 Principales Características Optoelectrónicas a Considerar en Nuevos Desarrollos de Fibras Ópticas

3.3.1 Diámetro del Campo Modal y Área Efectiva

Si bien estos términos parecen similares, no lo son. La diferencia se basa en que el diámetro del campo modal de una fibra óptica se refiere a la zona en la cual está distribuido el campo modal, pero de una forma no necesariamente uniforme, ni cubriéndola por completo; el área efectiva en tanto define la superficie real que el campo ilumina dentro de la zona definida por el diámetro del campo modal.

Los fenómenos no lineales se manifiestan cuando la fibra se ve sometida a altos niveles de potencia los cuales se producen debido a que el campo óptico, generalmente de alta potencia, es confinado dentro del diámetro del campo modal, en la pequeña área efectiva del núcleo de la fibra por distancias muy largas. El confinamiento del campo óptico dentro del núcleo se logra por medio del perfil del índice de refracción, el que determina la distribución del campo del modo fundamental. Esto hace que mientras menor sea este parámetro, mayor será la concentración de potencia óptica en la fibra, obteniendo como consecuencia la manifestación de efectos no lineales que degradaran la señal transmitida.

3.3.2 Dispersión por Modo de Polarización (PMD)

Este tipo de dispersión es causado por el fenómeno de birrefringencia, definido como la diferencia entre los índices de refracción efectivos que ven los dos modos fundamentales polarizados ortogonalmente, lo cual causa que cada polarización tenga diferentes constantes de propagación, y que finalmente resulta en un tiempo de retardo neto en las componentes del pulso.

Este fenómeno se produce debido a la asimetría del medio de propagación, y normalmente ocurre en los cristales debido a la falta de homogeneidad de los componentes químicos constituyentes.

Dado que este tipo de dispersión es importante a partir de una velocidad de 2,5 Gbps, es un parámetro que se vuelve de gran importancia en el diseño de las fibras ópticas de nueva generación. Por esto los fabricantes dentro de sus nuevos diseños buscan obtener los menores valores de PMD a velocidades muy altas de transmisión. [12]

Este tipo de dispersión debe medirse durante el proceso de fabricación, durante el proceso de cableado y después de la instalación ya que las curvaturas y los puntos de tensión son las causantes principales de este tipo de dispersión.

La PMD puede aumentar si el cable sufrió durante la instalación, esfuerzos no recomendados, lo que significa que no se podrá incrementar en forma simple la velocidad de los enlaces si no se ha calculado o medido este nuevo parámetro, con los consiguientes efectos de disponer de redes de cables de fibra óptica que no se podrán utilizar más allá de un 30% o 40% de la vida útil del cable por no poder aumentar la velocidad de modulación.

Se han realizado mediciones de este fenómeno en Suiza y algunos países europeos, y se ha demostrado que valores menores o iguales a 0,3 (ps/ $\sqrt{\text{Kms.}}$) se pueden considerar normales, y valores mayores o iguales a 1 (ps/ $\sqrt{\text{Kms.}}$) deben considerarse no aceptables.

La atenuación que sufre la señal óptica es afectada por los esfuerzos mecánicos, excesivos radios de curvatura, o algún esfuerzo mecánico mayor que el recomendado. Estos esfuerzos también pueden afectar el valor de la dispersión de polarización en más de un orden de magnitud, por lo cual la PMD no debe ser considerada solo como un retardo de la señal, sino más bien como una distribución estadística de retardos.

En la actualidad existen instrumentos para medir la PMD, con lo cual es posible iniciar el estudio de las redes ya instaladas e investigar la factibilidad de aumentar en el corto plazo las velocidades de modulación, además de intentar proponer algunas soluciones para casos en que la PMD supere los valores recomendados indicados anteriormente.

Se recomienda realizar mediciones de este parámetro a las redes ya instaladas para definir si a futuro podrán transmitir velocidades de STM 16 o STM 64 correspondiente a 2.5 o 10 Gbps. respectivamente.

Las mediciones se deben además realizar en forma periódica ya que el fenómeno de la PMD es cambiante en el tiempo, luego se recomienda establecer métodos periódicos de evaluación.

El efecto de la polarización de la luz tiene gran importancia en las fibras ópticas en cuyo caso el índice de refracción y la geometría del núcleo afectan de alguna

manera la polarización de la luz que se propaga por este medio físico de transmisión.

3.4 Fibras de nueva generación y Aspectos normativos

3.4.1 Fibras ZWPF (Zero Water Peak Fibers) con atenuación plana en el pico de agua

Esta clase de fibra es fabricada con nuevos procesos de manufactura que son capaces de remover los iones OH presentes en la fibra y por lo tanto virtualmente logran eliminar el pico de agua centrado en 1383 ηm , y que causa una elevada tasa de error en la recepción de los canales ubicados entre 1370 y 1430 ηm , haciéndoles inutilizables, esto permite la apertura de una banda de operación continua que va desde 1260 a 1625 ηm . Sin embargo la fibra ZWPF se ubica dentro de la categoría de fibras ópticas monomodo estándar G.652, pero bajo las sub-categorías "C" y "D" de espectro de atenuación aplanado (G.652.C; G.652.D).

Tabla 7. Características más importantes de las fibras ZWPF según la norma G.652 de la ITU-T

	G.652A	G.652.B	G.652.C	G.652.D
Atenuación (dB/km)	≤ 0.5 a 1310 nm ≤ 0.4 a 1560 nm	≤ 0.4 a 1310 nm ≤ 0.35 a 1550 nm ≤ 0.4 a 1625 nm	≤ 0.4 de 1310 a 1525 ≤ 0.47 de 1250 a 1625	≤ 0.4 de 1310 a 1625 ≤ 0.47 de 1250 a 1625
PMD del enlace (ps/km)	≤ 0.5	≤ 0.2	≤ 0.5	≤ 0.2

Estas nuevas fibras son particularmente para la tecnología de Multiplexión por división de longitud de onda aproximada (Coarse Wavelength Division Multiplexing, CDWM), principalmente en sistemas metropolitanos sin repetición.

Hoy en día los sistemas comerciales CWDM que soportan entre dos y ocho longitudes de onda, son ampliamente disponibles. Su uso se limita a la zona 1470 y 1610 ηm . Con velocidades actuales de transmisión de 2.5 Gbps por cada canal (STM-16, y que en el futuro puede ser de 10 y hasta 40 Gbps por luz), estos ocho canales alcanzan una capacidad de transmisión máxima de 20 Gbps. [12]

3.4.2 Multiplexión por división de longitud de onda aproximada (CDWM)

Esta tecnología fue utilizada comercialmente por primera vez a comienzos de 1980 para el transportar señales de video digital sobre la fibra multimodo. La Corporación Quante comercializo un sistema en la ventana de 800 ηm con cuatro

canales de funcionamiento cada uno de 140 Mbps. Estos sistemas se utilizaron principalmente en enlaces de televisión por cable. Sin embargo, los sistemas CWDM no generaron gran interés entre los proveedores de servicios hasta ahora.

Como líneas por metro buscan soluciones rentables a sus necesidades de transporte, la CWDM es cada vez más aceptada ampliamente como una importante arquitectura de transporte. A diferencia de las DWDM, que son sistemas basados en tecnología CWDM que despliegan láseres con un enfriamiento distribuido en la retroalimentación (DFB) de banda ancha y filtros ópticos. Estas tecnologías deben proporcionar varias ventajas a los sistemas CWDM, como la reducción de la disipación de energía, menor tamaño, y menor costo. La disponibilidad comercial de los sistemas CWDM ofrece estos beneficios de la tecnología hace una alternativa viable a los sistemas DWDM por muchos metros y aplicaciones de acceso.

El ancho de banda de una fibra óptica de enlace se puede aumentar mediante la transmisión de datos más rápida ó la transmisión de múltiples longitudes de onda en una sola fibra, con un método conocido como WDM (multiplexación por división de longitud de onda). La tecnología de multiplexación por división de longitud de onda implica la utilización de un multiplexor para combinar longitudes de onda que viajan en diferentes fibras en una sola fibra. En el receptor final del enlace, un desmultiplexor separa las longitudes de onda y rutas en diferentes fibras, y todos los terminales en diferentes receptores como se muestra en la figura 35.

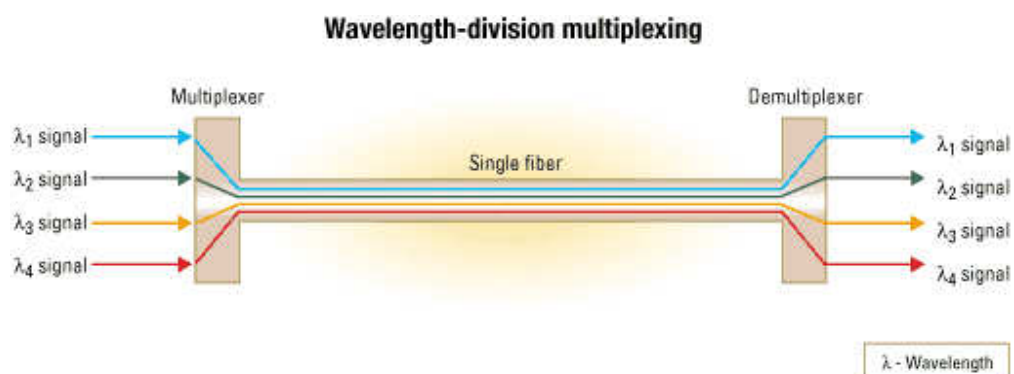


Figura 35. WDM se consigue usando un multiplexor para combinar longitudes de onda que viajan en diferentes fibras en una sola fibra. En el receptor final de la relación, un desmultiplexor separa las longitudes de onda y rutas en diferentes fibras.

Los espacios entre las longitudes de onda individuales transmitidas a través de la misma fibra sirven como base para la definición de DWDM y CWDM.

Sistemas DWDM suelen utilizar uno de las tres posibles separaciones de longitudes de onda:

200 GHz (1.6 ηm)

100 GHz (0.8 ηm)

50 GHz (0.4 ηm)

Los futuros sistemas se prevé que incluso han espaciado más estrecho. Las longitudes de onda de funcionamiento de los sistemas DWDM están definidas de acuerdo a una normalización de la frecuencia / longitud de onda de la red elaborado por la Unión Internacional de Telecomunicaciones.

Ambas arquitecturas la Gruesa y la Densa utilizan láseres distribuidos en la retroalimentación (DFB). Sin embargo, los sistemas DWDM requieren mayor enfriado en los láseres DFB. Esto es debido a un láser semiconductor de longitud de onda que deriva aproximadamente con temperatura $0,08 \eta m / ^\circ C$. Los láseres DFB se enfrían para estabilizar la longitud de onda que derivan fuera de los filtros pasa banda del multiplexor y des multiplexor como la temperatura fluctúa en los sistemas DWDM.

Por otro lado, en los sistemas CWDM, el uso láseres DFB no se enfrían. Estos sistemas suelen funcionar de 0 a $70^\circ C$ con el láser de longitud de onda derivan aproximadamente $6 \eta m$ sobre este rango. Esta longitud de onda deriva, junto con la variación de la longitud de onda de láser de hasta $\pm 3 \eta m$ (láser debido a los procesos de fabricación de troqueles), se obtiene un total de variación de longitud de onda de alrededor de $\pm 12 \eta m$. El filtro óptico pasa banda y el espaciamiento de canal de láser debe ser lo suficientemente amplia como para dar cabida a la longitud de onda de la variación sin enfriamiento en los láseres en los sistemas. En estos sistemas CWDM la separación entre canales es típicamente de $20 \eta m$ con ancho de banda de canal de $13 \eta m$.

3.4.2.1 Hardware menos costoso.

La diferencia de costos entre CWDM y DWDM pueden ser atribuidos al hardware y los costos de explotación. Si bien los láseres DWDM son más caros que los láseres CWDM, el láser enfriado DFB proporciona soluciones rentables para vuelos de larga distancia de transporte de metro y grandes anillos que requieren alta

capacidad. En ambas aplicaciones, el costo de los sistemas DWDM se amortizan a lo largo de la gran cantidad de clientes atendidos por estos sistemas. El acceso a las Metro-redes, requieren menor costo y menor capacidad de los sistemas a las exigencias del mercado, que se basan en gran medida de lo que el cliente está dispuesto a pagar por los servicios de banda ancha. El precio de transceptores DWDM es típicamente cuatro o cinco veces más caro que el de sus homólogos CWDM. El alto costo del transceptor DWDM se atribuyen a una serie de factores relacionados con el láser.

El filtro CWDM cuesta alrededor de un 50% menos que el filtro DWDM, y se prevé que reducirá en un factor de tres en los próximos dos a tres años, la fabricación automatizada como se espera. La adopción de nuevos filtros y de tecnologías de multiplexación / des multiplexación se espera que disminuya aún más los costos.

3.4.2.2 Fibras de nueva generación hasta 16 longitudes de onda.

Los sistemas de apoyo CWDM están comercialmente disponibles en la actualidad y van desde dos hasta ocho longitudes de onda. Estos sistemas prevén una escala de 16 longitudes de onda en la región 1290 a 1610 ηm de longitud de onda en el futuro. Hoy en día, la mayoría de los sistemas CWDM están basados en 20 ηm con un de canal de espaciamiento de 1470 a 1610 ηm , con el desarrollo que ocurren en la ventana de 1300 ηm . Las longitudes de onda en la región de 1400 ηm sufren mayor pérdida de señal óptica debido al pico atenuación causada por el agua residual en la mayoría de fibras instaladas. Mientras que está perdida adicional puede limitar el desempeño del sistema en enlaces más largos, esto no es un obstáculo mayor en el despliegue CWDM en más de un acceso extendido por metro.

3.4.2.3 Normas de marcha

Una organización de trabajo para definir normas para los sistemas CWDM es el Grupo de Interés Comercial 1400 ηm (1400 CIG), cuyos participantes incluyen proveedores de componentes, vendedores de sistemas y proveedores de servicios. El grupo hasta la fecha centra su atención principalmente en la definición de la longitud de onda de la red CWDM y la investigación de la relación con comparaciones costo/rendimiento de las arquitecturas DWDM vs CWDM.

Estas longitudes de onda aprovechan el espectro completo de fibra óptica, incluyendo el legado de fuentes ópticas en 1310,1510 y 1550 ηm , mientras que maximizar el número de canales. [16]

3.5 Algunos Fabricantes

3.5.1 AllWave

La fibra óptica monomodo AllWave de pico de agua cero de OFS es la primera fibra de espectro completo de la industria, diseñada para sistemas ópticos de transmisión que operan en el espectro completo de longitud de onda desde 1260 ηm hasta 1625 ηm .

Esta fibra óptica establece las pautas de la industria, y mantiene su liderazgo con especificaciones que no sólo son totalmente compatibles con los estándares ITU-T G.652 para fibras ópticas monomodo, sino que además exceden los requerimientos del estándar ITU-T G.652.D para fibras monomodo de bajo pico de agua.

La fibra óptica AllWave ofrece la pérdida más baja de todas las fibras ópticas de bajo pico de agua que están disponibles comercialmente en todo el mundo. La fibra óptica AllWave de espectro completo ADVANTAGE™ es la fibra recomendada para redes metropolitanas, locales, y de acceso, debido a sus especificaciones superiores – baja pérdida óptica a través de toda la longitud de banda desde 1260 ηm hasta 1625 ηm , disponibilidad de geometría más firme, baja pérdida en el empalme, y baja dispersión del modo de polarización (PMD por sus iniciales en inglés). Estas características, sumadas a la absoluta compatibilidad con base de fibra embebida, flexibilizan el diseño de redes y permiten obtener soluciones de bajo costo que ayudan a maximizar la tasa de retorno de las inversiones.

La fibra AllWave está protegida por la patente No. 6.205.268 en los EE.UU. y patentes equivalentes en el resto del mundo, para uso en la operación de sistemas por multiplexación por división de longitud de ondas en el área de pico de agua.

La ausencia de defectos de envejecimiento por hidrógeno asegura confiabilidad de atenuación a largo plazo a través de toda la banda de longitud de onda (1260 – 1625 ηm).

OFS establece la máxima pérdida a través de la banda de 1400 ηm (1360 a 1480 ηm) con respecto de la pérdida de 0,31 Db/km a 1383 ηm de la fibra AllWave, que se toma como punto de referencia. La atenuación en la región de 1460 a 1625 ηm se compara con la pérdida a 1550 ηm . [17]

3.5.2 Comm Scope

Estos iones se eliminan durante la fabricación de LightScope ZWP, reduciendo así la atenuación de los picos en el E-banda y hacer esta parte de la transmisión del espectro utilizable. El E-banda representa el 30% de la transmisión del espectro disponible en fibras de vidrio de sílice.

LightScope ZWP proporciona bajo el agua superior máximo rendimiento en la banda E-durante la vida útil del producto. Este rendimiento está garantizado por un único ultra-purificador proceso de fabricación que prácticamente elimina los iones hidroxilo en la fibra de vidrio. La consiguiente disminución de la atenuación sobre el agua pico región, relativamente más baja y 1400 μ banda de dispersión (en comparación con los convencionales de fibra en la banda de 1550), da como resultado un producto que ofrece una mayor transmisión del espectro y los beneficios económicos de la menos costosa de transmisión de opciones. [18]

3.6 Nuevas Técnicas.

3.6.1 Fibra Óptica acompañados con filtros y películas de metal.

Se está fabricando fibra óptica compacta combinada directamente por filtros depositando películas delgadas de metal en el retraso de línea terminal de la fibra. El promedio de reflexión de la película de metal se midió para tener un 88% en la región de longitud de onda de 1400-1600 ηm .

En el paquete (o célula) basada en redes de conmutación óptica apoya diferentes servicios potenciales con una amplia gama de atributos, una adjunta a la cabecera de cada paquete de carga útil que contiene una dirección de destino con el fin de que la ruta de la carga sea útil para el destino dicho. Dado que la velocidad de la dirección en el proceso de detección en cada nodo de conmutación de la red afecta significativamente el rendimiento, la dirección de detección óptica de los medios ha tratado de mejorar el rendimiento de la red.

Entre la óptica de paquetes de sistemas de procesamiento de dirección propuesto hasta el momento, la fibra óptica en sus configuraciones refleja una curvatura con los amplificadores semiconductores ópticos tomando ventaja en los efectos de ganancia de saturación en los materiales amplificadores semiconductores para decodificar el intervalo de tiempo codificado en las cabeceras. [19]

3.6.2 Sintonizable longitud de onda generada por un pulso en la región de 1400-1600 nm utilizando un láser de fibra Yb.

La explotación de cada vez más sectores de transmisión de la fibra para los avances en los llamados sistemas de comunicaciones ópticos para las fuentes de pulsos simples sintonizables de la longitud de onda, pueden cubrir toda una región de longitud de onda en la que se está interesado. Tales fuentes pueden ser utilizadas en los dispositivos de instrumentación y pueden también encontrarse aplicaciones en los dispositivos WDM y TDM. Para que estas fuentes sean prácticas son requeridas sistemas de fibra simple compatible, un requisito crítico que ha impedido el uso de tales fuentes en los sistemas de comunicaciones reales a la fecha.

Anteriormente, la generación de parámetros ópticos en la polarización periódica de LiNbO_3 , generación anti-carbono en las fibras con dispersión cero en 1560 ηm , la generación súper continua en la micro estructura de la fibra ó la estrecha fibra utilizando un Ti: láser de zafiro en el extremo delantero donde es implementado

para producir la emisión espectral en la ventana de transmisión de las fibras ópticas. Estas fuentes o bien sufren de densidad espectral limitada, limitada coherencia, inestabilidad espectral ó requieren complejos sistemas de láser para su funcionamiento.

Se demuestra una súper continua generación en la región de 500-1600 nm de longitud de onda utilizando un láser Yb de fibra compacto ultrarrápido como la utilización por primera vez de una fuente de bomba en un sistema compatible. Por otra parte, debido a la inyección súper continua en la longitud de de la fibra en los estándares de las comunicaciones, se puede inducir la generación de pulsos Raman para producir cerca de ancho de banda limitado pulsos sintonizables en la región 1400 - 1600 ηm de longitud de onda. El pulso requerido de energía para la generación súper continúa de pulsos Raman es solo del orden de 1 nJ, lo que demuestra que esta técnica es compatible con las fuentes de operación de fibra en los rangos de repetición de GHz.

3.6.2.1 Montaje del experimento

El montaje del experimento se muestra en la figura 36. Un completo paquete de la bomba en el revestimiento con láser Yb de fibra, genera una alta calidad cerca de los límites de la banda ancha de 100 fs pulsos con una potencia promedio de 250mW a una longitud de onda de 1.05 μm y rango de repeticiones de 50 MHz. Los pulsos son generados al hacer explotar fenómenos de propagación auto similar a los amplificadores Yb, permitiendo a la fibra la entrega de pulsos a través de fibras monomodo empleando fibras compactas para la entrega de los elementos (15*10*5 cm) como se muestra en la Figura 37.

Los pulsos de la entrega del elemento son de libre espacio junto a la reducción de la dosis de fibra como se muestra en la figura 37. La reducción está hecha de la norma SMF-28 de fibra y compone +3 cm de longitud de fibra sin reducir a la entrada del final, una actual sección de fibra sin recudir de 15 cm de longitud en total, y una larga de 15 m de longitud sin reducir SMF-28 de coleta de fibra al final de la salida. La reducción es quitada para tener un diámetro constante de solo 3 μm a lo largo de 90 nm de cintura con una pequeño transformación de modo adiabático en ambos extremos teniendo en cuenta el resto de los 15 cm de la sección reducida. La dispersión de la reducción puede ser calculada fácilmente asumiendo un dieléctrico cilíndrico en el aire. La dispersión cero de la cintura estrecha reducida es cerca de 850 ηm , mientras que la señal de longitud de onda de 1050 ηm la dispersión es anómala con un valor de -50 ps²/km. La dispersión mantiene anómala en toda la región de longitud de onda desde 850 nm para

$1.8 \mu m$, sin embargo la magnitud absoluta de la dispersión aumenta rápidamente con el aumento de la longitud de onda.

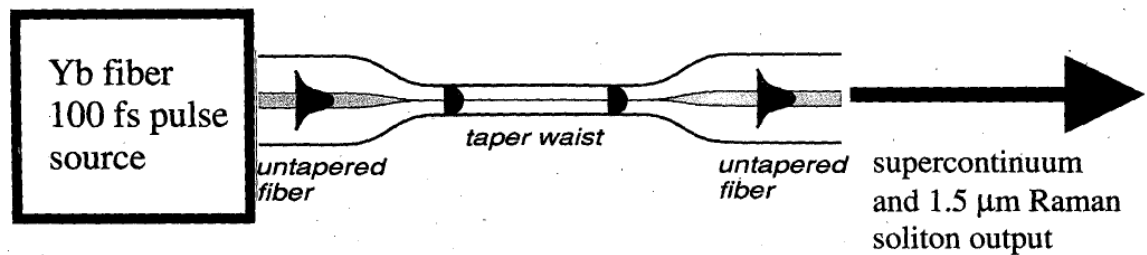


Figura 36. Esquema experimental de la puesta en marcha por la generación súper continua y de pulsos Raman.



Figura 37. Fotografía de la puesta en marcha experimental para la generación súper continua usando un láser de fibra Yb como fuente.

3.6.2.2 Resultado

Se generó súper continuo que se extiende desde $900 \text{ nm} - 1300 \text{ nm}$ con acoplamiento acerca de 1 nJ de pulsos en la reducción de la fibra. El espectro de la generación súper continua al inyectar pulsos de energía de 2.5 nJ se muestra en la figura 37. La correspondiente luminosidad visible monomodo se muestra a la salida en la coleta de fibra también se muestra en la figura 37.

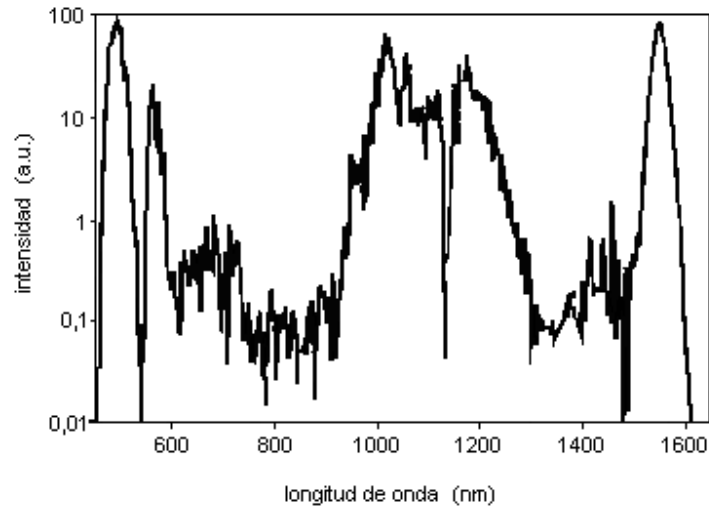


Figura 38. Espectro de la generación súper continua con laser de fibra Yb.

La generación súper continua va a lo largo con pulsos de orden más alto y generación múltiple de pulsos Raman. El contenido espectral en la región de longitud de onda $> 1.3 \mu m$ eventualmente se divide y produce pulsos Raman a lo largo de la longitud de la coleta de fibra empalmada a la salida final de la reducción. Al cambiar la potencia inyectada al extremo delantero de la reducción de la fibra, la longitud de onda con los pulsos Raman puede cambiar el resultado ampliamente en la fuente de sintonización de la longitud de onda. En el presente ejemplo el rango de sintonización fue entre $1400-1550 nm$, aunque muchos más amplios rangos sintonizables pueden ser esperados por una pequeña modificación en la dispersión y en diámetro del núcleo en la coleta de la fibra. El espectro de pulsos Raman se obtienen a diferentes pulsos de inyección como se muestra en la figura 39. El espectro de pulsos de Raman tiene una banda ancha alrededor de $20 nm$, la cual corresponde a los pulsos con un ancho de banda limitado con un ancho de $130 fs$. Un beneficio de los pulsos de Raman es que la generación en las cercanías de los límites de ancho de banda y los pulsos de bajo ruido son automáticamente asegurados. [20]

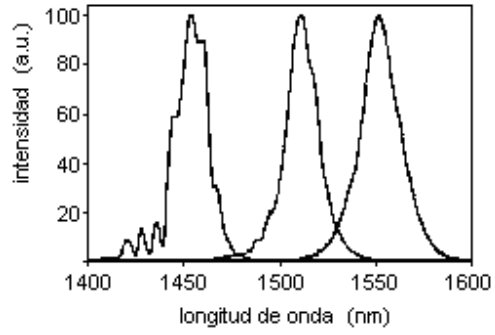


Figura 39. Espectro de generación de los pulsos Raman con láseres de fibra Yb para diferentes entradas de potencias.

3.7 Aplicaciones de la fibra Óptica

3.7.1 Internet

El servicio de conexión a Internet por fibra óptica, derriba la mayor limitación del ciberespacio: su exasperante lentitud.

Para navegar por la red mundial de redes, Internet, no sólo se necesitan un computador, un módem y algunos programas, sino también una gran dosis de paciencia. Un usuario puede pasar varios minutos esperando a que se cargue una página o varias horas tratando de bajar un programa de la Red a su PC.

Esto se debe a que las líneas telefónicas, el medio que utiliza la mayoría de los 50 millones de usuarios para conectarse a Internet, no fueron creadas para transportar videos, gráficas, textos y todos los demás elementos que viajan de un lado a otro en la Red.

Pero las líneas telefónicas no son la única vía hacia el ciberespacio. Recientemente un servicio permite conectarse a Internet a través de la fibra óptica.

La fibra óptica hace posible navegar por Internet a una velocidad de dos millones de bps, impensable en el sistema convencional, en el que la mayoría de usuarios se conecta a 28.000 o 33.600 bps.

3.7.2 Redes

La fibra óptica se emplea cada vez más en la comunicación, debido a que las ondas de luz tienen una frecuencia alta y la capacidad de una señal para transportar información aumenta con la frecuencia. En las redes de comunicaciones se emplean sistemas de láser con fibra óptica. Hoy funcionan muchas redes de fibra para comunicación a larga distancia, que proporcionan conexiones transcontinentales y transoceánicas. Una ventaja de los sistemas de fibra óptica es la gran distancia que puede recorrer una señal antes de necesitar un repetidor para recuperar su intensidad. En la actualidad, los repetidores de fibra óptica están separados entre sí unos 100 km, frente a aproximadamente 1,5 km en los sistemas eléctricos. Los amplificadores de fibra óptica recientemente desarrollados pueden aumentar todavía más esta distancia.

Otra aplicación cada vez más extendida de la fibra óptica son las redes de área local. Al contrario que las comunicaciones de larga distancia, estos sistemas

conectan a una serie de abonados locales con equipos centralizados como ordenadores (computadoras) o impresoras. Este sistema aumenta el rendimiento de los equipos y permite fácilmente la incorporación a la red de nuevos usuarios. El desarrollo de nuevos componentes electroópticos y de óptica integrada aumentará aún más la capacidad de los sistemas de fibra.

Red de área local o LAN, conjunto de ordenadores que pueden compartir datos, aplicaciones y recursos (por ejemplo impresoras). Las computadoras de una red de área local (LAN, *Local Area Network*) están separadas por distancias de hasta unos pocos kilómetros, y suelen usarse en oficinas o campus universitarios. Una LAN permite la transferencia rápida y eficaz de información en el seno de un grupo de usuarios y reduce los costes de explotación.

Otros recursos informáticos conectados son las redes de área amplia (WAN, *Wide Area Network*) o las centralitas particulares (PBX). Las WAN son similares a las LAN, pero conectan entre sí ordenadores separados por distancias mayores, situados en distintos lugares de un país o en diferentes países; emplean equipo físico especializado y costoso y arriendan los servicios de comunicaciones. Las PBX proporcionan conexiones informáticas continuas para la transferencia de datos especializados como transmisiones telefónicas, pero no resultan adecuadas para emitir y recibir los picos de datos de corta duración empleados por la mayoría de las aplicaciones informáticas.

Las redes de comunicación públicas están divididas en diferentes niveles; conforme al funcionamiento, a la capacidad de transmisión, así como al alcance que definen. Por ejemplo, si está aproximándose desde el exterior hacia el interior de una gran ciudad, se tiene primeramente la red interurbana y red provisional, a continuación las líneas prolongadas aportadoras de tráfico de más baja capacidad procedente de áreas alejadas (red rural), hacia el centro la red urbana y finalmente las líneas de abonado. Los parámetros dictados por la práctica son el tramo de transmisión que es posible cubrir y la velocidad binaria específica así como el tipo de fibra óptica apropiado, es decir, cables con fibras monomodo ó multimodo.

3.7.3 Telefonía

Con motivo de la normalización de interfaces existentes, se dispone de los sistemas de transmisión por fibra óptica para los niveles de la red de telecomunicaciones públicas en una amplia aplicación, contrariamente para sistemas de la red de abonado (línea de abonado), hay ante todo una serie de consideraciones.

Para la conexión de un teléfono es completamente suficiente con los conductores de cobre existentes. Precisamente con la implantación de los servicios en banda ancha como la videoconferencia, la videotelefonía, etc, la fibra óptica se hará imprescindible para el abonado. Con el BIGFON (red urbana integrada de telecomunicaciones en banda ancha por fibra óptica) se han recopilado amplias experiencias en este aspecto. Según la estrategia elaborada, los servicios de banda ancha posteriormente se ampliarán con los servicios de distribución de radio y de televisión en una red de telecomunicaciones integrada en banda ancha (IBFN).

3.7.4 Otras aplicaciones

Las fibras ópticas también se emplean en una amplia variedad de sensores, que van desde termómetros hasta giroscopios. Su potencial de aplicación en este campo casi no tiene límites, porque la luz transmitida a través de las fibras es sensible a numerosos cambios ambientales, entre ellos la presión, las ondas de sonido y la deformación, además del calor y el movimiento. Las fibras pueden resultar especialmente útiles cuando los efectos eléctricos podrían hacer que un cable convencional resultara inútil, impreciso o incluso peligroso. También se han desarrollado fibras que transmiten rayos láser de alta potencia para cortar y taladrar materiales.

La aplicación más sencilla de las fibras ópticas es la transmisión de luz a lugares que serían difíciles de iluminar de otro modo, como la cavidad perforada por la turbina de un dentista. También pueden emplearse para transmitir imágenes; en este caso se utilizan haces de varios miles de fibras muy finas, situadas exactamente una al lado de la otra y ópticamente pulidas en sus extremos. Cada punto de la imagen proyectada sobre un extremo del haz se reproduce en el otro extremo, con lo que se reconstruye la imagen, que puede ser observada a través de una lupa. La transmisión de imágenes se utiliza mucho en instrumentos médicos para examinar el interior del cuerpo humano y para efectuar cirugía con láser, en sistemas de reproducción mediante facsímil y fotocomposición, en gráficos de ordenador o computadora y en muchas otras aplicaciones. [21]

3.7.5 Áreas de aplicación

A nivel mundial, el reciente desarrollo y crecimiento de la óptica ha tenido como consecuencia novedosas aplicaciones en las actividades cotidianas del ser humano. Desde el punto de vista de las aplicaciones en la óptica, se pueden separar en cuatro grandes áreas en las cuales inciden las investigaciones que actualmente se

realizan: Instrumentación óptica, comunicaciones ópticas, metrología óptica. Sin embargo, y como soporte de estos tres, debe de mencionarse un área más de investigación, la óptica de frontera (y que está estrechamente relacionada con la fotónica). Estos cuatro grupos de aplicaciones no están aisladas entre si, al contrario, hay una estrecha relación entre ellos. Por ejemplo, las aplicaciones en instrumentación óptica están relacionadas con aplicaciones en comunicaciones ópticas y metrología, así mismo, la óptica de frontera está relacionada con la instrumentación óptica a través de las nuevos conceptos o descubrimientos que se van generando.

3.7.5.1 Instrumentación Óptica

Se incluye el estudio y diseño de elementos, y sistemas ópticos que se utilizan principalmente para coleccionar imágenes. Como ejemplo de ello podemos citar: lentes, prismas, espejos, microscopios, telescopios, etc. Los temas relacionados con la instrumentación óptica son: trazo de rayos, aberraciones, análisis de Fourier, difracción etc. Los sistemas ópticos se utilizan en muchos ámbitos de la vida cotidiana así como en investigaciones científicas, aplicaciones tecnológicas y militares.

3.7.5.2 Comunicaciones Ópticas

En este grupo de aplicaciones se utiliza a la luz como portadora de información y se usan sistemas ópticos para la transmisión y recepción de señales. Los temas relacionados con esta área de aplicaciones son: cristales especiales, fibras ópticas, detectores, fuentes de luz (láseres), procesamiento de señales, holografía, óptica no lineal, entre otros.

3.7.5.3 Metrología Óptica

Tienen que ver con el monitoreo de parámetros físicos, usando sistemas y métodos de no contacto, utilizando luz, lo cual lleva a realizar pruebas no destructivas. Los temas relacionados con este polo de aplicaciones son: sistemas ópticos, polarización, interferencia, emisión de la luz, detectores de luz, procesamiento de imágenes, etc. La metrología óptica ha tenido un gran impacto en la solución de problemas industriales y de ingeniería, igualmente se han implementado técnicas de monitoreo en el área médica.

3.7.5.4 Óptica de Frontera

Investiga fenómenos relacionados con radiación luminosa de alta potencia, la rápida detección y transmisión de información generada con luz, nuevos materiales ópticos, fuentes de radiación y detección luminosa. Temas relacionados: coherencia, óptica cuántica, fibras fotónicas, óptica no lineal, etc. Las aplicaciones derivadas de estos estudios se reflejan en la aparición de nuevos tipos de láseres o bien en el perfeccionamiento de los ya existentes. Estas investigaciones también permiten el empleo de nuevos materiales para aplicaciones diversas como en las comunicaciones y sensores ópticos. La comprensión de nuevos fenómenos en este campo son empleados para mejorar la solución de algunos problemas ya existentes y para solucionar algunos otros que habían sido considerados con anterioridad.

3.8 Aplicaciones de la fotónica

Los cristales fotónicos son nuevos materiales nanoestructurados que presentan propiedades exclusivas, ya aplicadas para fibras ópticas. Se trata de estructuras constituidas por variaciones periódicas en el índice de refracción del material que las constituye y con banda prohibida para fotones (*o photonic bandgap, PBG*). En analogía con las bandas electrónicas de sólidos ordenados (como los materiales semiconductores) donde la periodicidad atómica origina bandas o niveles de energía para los electrones, la distribución espacial de la constante dieléctrica en el caso de los cristales fotónicos origina una estructura de bandas para fotones. Estas bandas pueden diseñarse a voluntad (de forma análoga a la ingeniería de bandas en los materiales semiconductores), por lo que estas estructuras pueden impedir o favorecer la propagación de fotones con determinadas energías, produciendo efectos no observados en la óptica convencional. Tanto la periodicidad como las dimensiones físicas de las zonas de variación de la constante dieléctrica están relacionadas con la longitud de onda de los fotones que se propagan, exigiendo para estas zonas dimensiones en la escala de nanómetros para fotones con energías dentro del espectro visible e infrarrojo cercano. [23]

La electrónica funciona con corrientes de electrones. Con electricidad, para entendernos. Pero la fotónica, funciona con corrientes de fotones, con luz, en otras palabras. Aquella, forma parte de nuestra civilización de una manera tan profunda que solo cuando hace falta percibimos su valor. Las corrientes de partículas luminosas, los fotones, empiezan a hacerse hueco entre nosotros y algunas de sus aplicaciones ya son imprescindibles: los lectores de código de barras, las aplicaciones del láser en la medicina, la televisión digital, las cámaras fotográficas, telescopios y microscopios, los punteros láser, etc. [24]

La fotónica (generación y transmisión de la luz) tiene aplicaciones en casi todos los sectores industriales: tecnologías de la imagen y de la información, así como en la salud.

La óptica y el fotón, después de haber conquistado las telecomunicaciones, van a invadir progresivamente las computadoras y a duplicar sus posibilidades. La sustitución del electrón por el fotón en las PC representa todavía un gigantesco desafío tecnológico, ya que hay que concebir y realizar nuevos tipos de transistores, componentes de memoria y circuitos capaces de utilizar en toda su potencia esta fascinante partícula elemental, constituyente básico de la luz, que se comporta como una partícula "puntual" y también como una onda difusa.

Entre las propiedades sorprendentes del fotón, algunas podrían resultar muy útiles en informática, como por ejemplo que muchos haces de fotones pueden cruzarse sin interferir entre sí.

Así, junto con la espintrónica, la fotónica constituye uno de los próximos saltos tecnológicos que aportarán cambios drásticos tanto al sector de las telecomunicaciones como al de la informática.

Recientemente, una nueva etapa importante en el dominio de la fotónica ha sido franqueada por investigadores franceses. Bombardeando proteínas de pollo con un rayo láser, científicos de Estrasburgo pueden haber puesto a punto el disco duro del futuro: la *memoria holográfica*, que podrá almacenar el equivalente a 27 DVD en un fino soporte del tamaño de un CD.

Bautizada como hipermemoria difractiva, esta técnica recurre a las proteínas animales que almacenan datos y que se deforman bajo el efecto de un rayo láser, modulado a su vez en función de los datos a registrar, explica Patrick Meyrueis, director del laboratorio de fotónica de la Universidad Louis Pasteur de Estrasburgo. Deformadas de esta manera, las moléculas de las aves, una vez depositadas sobre un soporte de vidrio o de plástico, forman una imagen holográfica que puede ser leída con ayuda de un láser. Estos datos son inscritos gracias a la luz y almacenados en una imagen holográfica que contiene 128 gigas.

Por el momento esta *memoria holográfica* no es regrabable, pero los investigadores estudian los efectos de la luz sobre otras proteínas, particularmente las contenidas en las algas, para disponer de una memoria holográfica regrabable a voluntad. Así conseguirían discos duros de gran capacidad, accesibles a enorme velocidad.

En los laboratorios de Estrasburgo los investigadores trabajan también con un micrófono óptico ultrasensible, que funciona gracias a las interferencias provocadas por el sonido sobre la propagación de la luz en las fibras ópticas.

Usando el mismo principio, estos investigadores han puesto a punto un sismógrafo fotónico capaz de detectar ínfimos movimientos telúricos estudiando su impacto sobre la propagación de un rayo de luz.

Otros investigadores en fotónica, particularmente en París, han puesto a punto lentes extraplanas "líquidas", constituidas por una gota de agua depositada en aceite entre dos láminas de cristal.

Sometida a un impulso eléctrico, la gota de agua es capaz de identificar un objeto colocado delante de ella, abriendo así el camino a la incorporación de lentes autos focales extraplanos en las cámaras fotográficas digitalizadas y miniaturizadas de los teléfonos móviles.

En medicina, astronáutica, informática o las tecnologías del sonido y la imagen, la fotónica y sus aplicaciones son inmensas.

Pero, como con la espintrónica, la fotónica en nuestra vida cotidiana estará estrechamente vinculada a los esfuerzos financieros que se destinen en materia de investigación teórica y fundamental.

De permanecer esta carrera tecnológica, se hará del fotón el gran vector unificador de las telecomunicaciones, la informática y la multimedia en 2030.

La fibra óptica y las comunicaciones ópticas a la velocidad de la luz son imprescindibles, pues cada día se requiere mayor movimiento de información por Internet y la televisión digital por cable, lo que hace necesario un sistema de alta capacidad de transmisión donde los conductores eléctricos quedan saturados. Por las fibras ópticas podemos enviar la información en forma de haz láser a la velocidad de la luz. Además, la más moderna tecnología permite enviar muchas comunicaciones a la vez por la misma fibra, enorme ventaja respecto de los cables eléctricos, simplemente usando luces de varios colores distintos.

Otro ejemplo son los hologramas. En una fotografía normal la imagen está impresa en el papel. Es la imagen de intensidad de luz que tomó la cámara con su objetivo. Por el contrario, con el holograma conseguimos fabricar una copia de las ondas luminosas que venían desde el objeto. Es como si se tuviera delante el mismo objeto (sólo ópticamente, pues éste ya no está). En su lugar está el holograma, que nos envía información de la intensidad de luz y del relieve del objeto, así que lo veremos en 3D.

Así, en un futuro cercano se podrá pensar en una televisión 3D. Aquí hay que considerar dos aspectos: la cantidad de información que hay que transmitir para producir un holograma, y la resolución del elemento que forma la imagen.

Uno de los retos importantes de la fotónica es la computación óptica. Los procesadores actuales no pasan mucho más allá de 3 mil millones de sencillas operaciones por segundo, y aun así a veces nos parecen lentos, pero se está cerca del límite de velocidad con corrientes de electrones. Usando la luz se podría

aumentar aún mucho más la velocidad de cálculo, tal vez hacerlos un millón de veces más rápidos.

Lo más significativo de la nueva computación óptica es sin duda la posibilidad de aumentar la potencia de los moduladores ópticos, miniaturizar su tamaño y el consumo eléctrico, reducir su costo y de esta forma integrar a la fibra óptica todos los niveles de la cadena digital, desde el núcleo de un procesador hasta las comunicaciones a larga distancia.

Durante los años recientes, los investigadores de Intel han estado explorando de manera activa el uso del silicio como base principal de los componentes fotónicos.

Esta investigación ha cimentado la fama de esa firma en un campo especializado conocido como fotónica de silicio, el cual parece asegurar que dará soluciones que romperán las antiguas limitaciones del silicio como material para fibras ópticas.

En un gran avance, los investigadores de Intel han desarrollado un modulador óptico basado en silicio que funciona a un gigahertzio, que representa un aumento de más de 50 veces el récord de la investigación anterior: aproximadamente 20 megahertzios. El importante descubrimiento tecnológico fue dado a conocer en la publicación científica *Nature*.

Cada día que pasa aparecen nuevas aplicaciones de la fotónica. La luz láser está cada vez más presente en las casas. En el campo de la salud también avanzan rápidamente las aplicaciones fotónicas. Por ejemplo, dentro de muy poco las radiografías se harán con luz láser visible, que es mucho menos peligrosa que los rayos X.

En México, en el departamento de fotónica de la UAM, se realizan estudios sobre la investigación y desarrollo de nuevas tecnologías para generar y manejar luz y otras formas de energía radiante, de las cuales su unidad cuántica es un fotón.

Este departamento enfoca y aplica su investigación fundamental a cuatro temas principales: ingeniería láser, espectroscopía óptica, materiales ópticos avanzados y superficies ópticas. Su misión es incrementar el conocimiento alrededor de la interacción de la materia con los fotones. Esto permitirá oportunidades para nuevas y avanzadas tecnologías que en un futuro cercano puedan mejorar el confort humano. [25]

3.9 Niobato de Litio

El Niobato de Litio es un material cristalino anisotrópico. Los índices de refracción del LiNbO_3 se encuentran asociados según los ejes de la siguiente manera, "x" corresponde a $n_x=n_0$, "y" corresponde a $n_y=n_0$, "z" corresponde a $n_z=n_e$. n_0 y n_e son el índice ordinario y extraordinario respectivamente como se muestra en la figura 40.

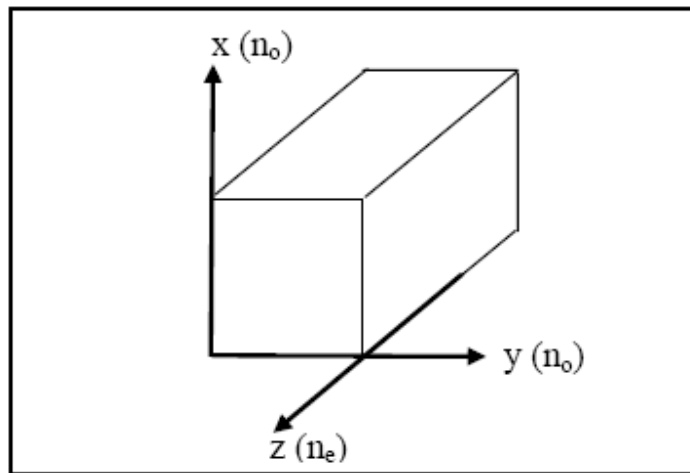


Figura 40. Orientación de los ejes y sus índices de refracción.

El Niobato de Litio se clasifica por sus características de corte y propagación, las cuales pueden ser corte "Z" y propagación "Y", corte "Z" y propagación "X", corte "X" y propagación "Y" y corte "Y" y propagación "X".

El Niobato de Litio es un cristal fuertemente asimétrico, el cual puede variar el estado de polarización de la luz que lo atraviesa, con la variación de un campo eléctrico E aplicado externamente. Esta variación se sujeta a un efecto electro-óptico, que se puede explicar de la manera siguiente: un campo eléctrico externo aplicado al cristal cambia el índice de refracción n_e y n_0 según la orientación del cristal y del campo aplicado. La figura 41 representa la composición del cristal, así como la variación de la constante de propagación $\beta(L)$ (tiempo de traslado de la onda) al incidir sobre el cristal un campo eléctrico E .

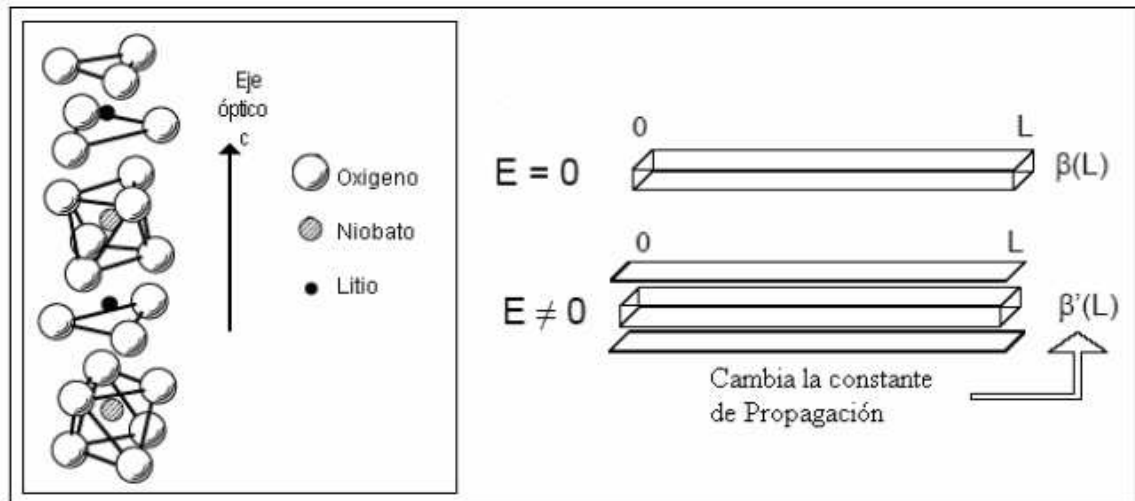


Figura 41. Cristal de Niobato de Litio LiNbO_3 y Cambio de la constante de propagación.

El material más utilizado para la formación de componentes moduladores de intensidad, en tecnología de óptica integrada es el LiNbO_3 por su característica electro-óptica. [26]

3.9.1 Componentes Ópticos Pasivos

Optoelectrónica: Con el nombre de óptica integrada se designa al proceso de integración de componentes pasivos y activos en un mismo conjunto (*chip*) con tecnología planar. Esta técnica es viable sólo en componentes monomodo y con polarización simple. La gran mayoría de los componentes se basan en el efecto *Pockles lineal*. El mismo consiste en un cambio del índice de refracción del material proporcionalmente a la amplitud del campo eléctrico asociado. El material típicamente usado en optoelectrónica es el cristal de LiNbO_3 (Niobato de litio) conocido originalmente como Perovskita. Sobre el cual se difunde Ti con el propósito de obtener una guía de onda monomodo.

Algunos componentes realizables en optoelectrónica son:

3.9.1.2 Modulador Óptico: El material sustrato (LiNbO_3 o AsGa) tiene dibujado mediante Ti una guía de onda monomodo. El voltaje aplicado modifica el tensor de permeabilidad óptica del material produciendo un cambio de fase o un efecto de acoplamiento modal en el desplazamiento de la onda dentro de la guía. Dando lugar a una modulación (AM, PM), giro de polarización o conversión de frecuencia.

El modulador Mach-Zender actúa como modulador AM ya que cada rama introduce una modulación de fase de igual magnitud pero de sentido opuesto con lo cual se obtiene una suma (interferómetro) diferencial. Por esto se llama *modulador interferométrico*. [27]

El uso de LiNbO₃ como sustrato produce una atenuación de 0,5 dB por cada interfaz de unión con la fibra óptica y una pérdida de propagación de 0,5 dB/cm. Esto implica que cada componente modulador puede introducir una atenuación total de 2 dB. La tecnología de AsGa está aún a muchos años de laboratorio respecto del LiNbO₃ pero tiene la ventaja de poder integrar circuitos electrónicos en el mismo sustrato. El LiNbO₃ requiere altos voltajes y por ello pone un límite a la miniaturización de componentes. [28]

3.9.1.3 Acoplador Direccional: En ausencia de tensión aplicada la luz cambia de fibra óptica periódicamente. Con voltaje aplicado el índice de refracción varía y se modifica la velocidad de propagación y la periodicidad del acoplamiento entre guías. De esta forma la luz que ingresa por una guía puede pasar a la otra o salir por la misma al final del componente que trabaja como un *switch* óptico. Esta misma estructura se puede usar como modulador digital a la salida de un Láser; como aislador; como generador de pulsos de luz a partir de un emisor que trabaja en onda continua; etc.

3.9.1.4 Switch: Permite la permutación entre FO en forma opto-mecánica, termo-óptica (los polímeros cambian el índice de refracción en función de la temperatura) o mediante un circuito electro-óptico de NiLiO₃ donde el índice de refracción se modifica en función de voltaje eléctrico. Se han observado aplicaciones en conmutación de circuitos y en moduladores para alta velocidad. [27]

Capítulo 4

4. ESTADO DE LAS REDES ÓPTICAS

Los rápidos avances producidos en DWDM, junto con la creciente demanda de servicios de alta velocidad y gran ancho de banda, están provocando cambios sustanciales en las arquitecturas de las redes ópticas. Así, la tecnología DWDM se está expandiendo progresivamente desde el núcleo de las redes ópticas de alta velocidad hacia las redes metropolitanas y de acceso. Y todo ello provocado por el éxito alcanzado por las soluciones DWDM de largo alcance que han permitido un aumento espectacular en la capacidad de las redes ópticas de transporte.

De hecho, se ha observado que la introducción de tecnología DWDM en las redes ópticas metropolitanas produce grandes beneficios en cuanto a coste, flexibilidad y eficiencia. Las primeras generaciones de sistemas DWDM dependían de subsistemas eléctricos que se encargaban de realizar funciones de conmutación, gestión de conexiones, protección y gestión de prestaciones. Sin embargo, se debe destacar las ventajas adicionales que conlleva la introducción de redes ópticas transparentes en el ámbito de las redes regionales y metropolitanas. Una red óptica transparente hace referencia a una red que mantiene el tráfico en el dominio óptico, es decir, sin ningún tipo de conversión OEO (óptica-eléctrica-óptica) en ninguno de sus nodos. Estas redes también se conocen habitualmente por el nombre de redes todo ópticas (all-optical networks), y sus elementos básicos son OADMs (optical add-drop multiplexers) y OXCs (optical cross-connects) que trabajan directamente sobre los canales ópticos sin realizar ningún tipo de conversión al dominio eléctrico.

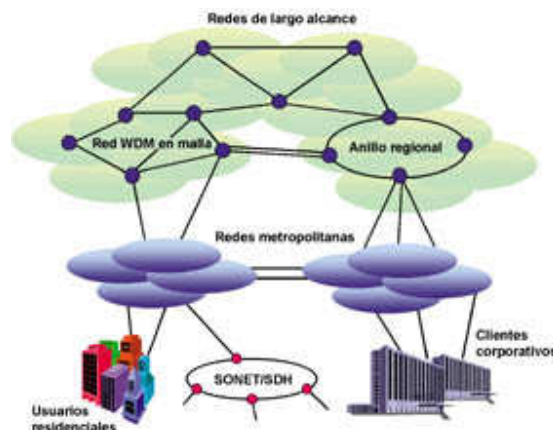


Figura 42. Jerarquía de la red óptica

La reducción en la cantidad de conversión OEO en una red óptica representa importantes ahorros de coste y de consumo de potencia, a la vez que se facilita una evolución más rápida hacia mayores velocidades. Así pues, el impulso por la migración hacia redes ópticas transparentes se basa fundamentalmente en consideraciones económicas, viéndose favorecido por la aparición de toda una serie de nuevas tecnologías de conmutación óptica. En este artículo se analizará en primer lugar la arquitectura jerárquica de las redes ópticas, para analizar posteriormente la implicación que tiene la introducción de la tecnología DWDM en el entorno de las redes metropolitanas. En un siguiente artículo se estudiarán las distintas tecnologías de conmutación óptica existentes que permiten la realidad de estas redes ópticas transparentes.

4.1 Jerarquía de Red óptica

La jerarquía de red óptica se ilustra en la figura 42, donde se pueden observar los distintos segmentos o dominios de red que la conforman: redes de largo alcance, redes metropolitanas y redes de acceso.

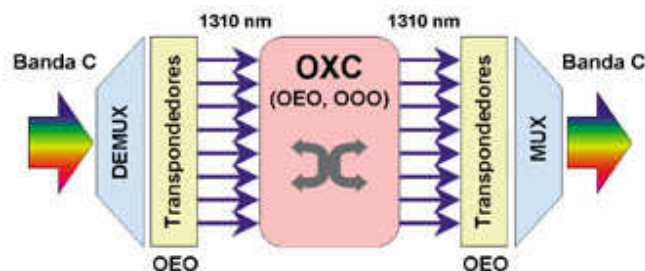


Figura 43. Segmentos de red

4.2 Redes de largo alcance

Las redes de largo alcance pueden cubrir distancias geográficas de miles de kilómetros, enlazando entre sí las distintas redes metropolitanas y extendiendo a su vez la conectividad entre dominios regionales. Dada la gran capacidad de transporte que requieren este tipo de redes, el esquema tradicional basado en SONET/SDH tuvo que sustituirse por un despliegue de tecnología DWDM a gran escala. Al mismo tiempo, las distancias de transmisión tan elevadas y el gran número de canales ópticos provoca la aparición de múltiples efectos no lineales y degradaciones de las señales. En muchos casos se requiere conversión optoelectrónica (OE) y regeneración electrónica 3R para mantener una calidad de

señal y una tasa de errores aceptable, lo cual se encuentra enfrentado con los planteamientos de las redes ópticas transparentes. Como resultado de todo esto, las soluciones de largo alcance son muy costosas y representan inversiones estratégicas de larga duración.

Sin embargo, la mejora de las diferentes tecnologías empleadas (fibras, amplificadores ópticos, filtros y elementos compensadores de dispersión) está permitiendo incrementos notables de la capacidad de transmisión y la migración hacia arquitecturas de red multilongitud de onda con velocidades del orden de Tbit/s. Las redes de largo alcance continúan evolucionando con cada nueva generación de mejoras DWDM, convirtiéndolas en más robustas, eficientes y económicas. Así, las redes de nueva generación serán capaces de desarrollar mecanismos flexibles de protección, conmutación y enrutamiento. Y para ello es necesario también que el escalón inferior (redes metropolitanas) sea eficiente y robusto.

4.3 Redes metropolitanas

Las redes ópticas metropolitanas cubren distancias de cientos de kilómetros, proporcionando servicio a grandes áreas metropolitanas. Constituyen el segmento de enlace entre las redes de acceso y de largo alcance, interconectando todo un abanico de protocolos de cliente y de velocidades de canal. Las redes metropolitanas se guían por dos factores clave: los requisitos de cliente y la tecnología para satisfacer estos requisitos. Para ello, los proveedores de servicio desplegaron en su día tecnología SONET/SDH empleando topologías punto a punto y anillos de ADMs. Sin embargo, en la actualidad las redes metropolitanas están experimentando una rápida metamorfosis como consecuencia de los correspondientes cambios en los dominios de acceso y de largo alcance.

La explosión de capacidad producida en los enlaces de largo alcance DWDM, unido a la creciente demanda de ancho de banda IP coloca a las redes metropolitanas en una encrucijada. La infraestructura actual basada en TDM presenta problemas para conseguir la eficiencia y flexibilidad que necesitan los clientes, en concreto limitaciones para escalar la capacidad e ineficiencia frente al tráfico de ráfagas o impredecible. Teniendo en cuenta estas cuestiones, se requiere una migración hacia una arquitectura ultra escalable y de mayor capacidad. Los proveedores de servicio necesitarán este tipo de soluciones en un mercado competitivo donde el coste, la diferenciación de servicios (QoS, quality of service, y SLA, service level agreement) y la capacidad bajo demanda se convertirán en claras ventajas competitivas. En este sentido, la arquitectura basada en DWDM es la solución más

económica para crear redes ópticas metropolitanas con escalabilidad de ancho de banda, flexibilidad, multitud de servicios y capacidad de gestión. En definitiva, el mercado de las redes ópticas metropolitanas plantea interesantes retos y oportunidades tanto para los vendedores de equipamiento como para los proveedores de servicio.

4.4 Redes de acceso

Las redes de acceso se caracterizan por una gran variedad de protocolos e infraestructuras, y por lo tanto también de velocidades: DS1, DS3, OC-3, OC-12, Ethernet a 10 Mbit/s, ESCON a 200 Mbit/s, OC-48 y OC-192. Se encargan de concentrar el tráfico de un gran número de usuarios de Internet residenciales y de grandes corporaciones: empresas privadas, organismos gubernamentales, instituciones educativas, etc. Para soportar esta diversidad de clientes, las redes de acceso deben manejar un conjunto de aplicaciones basadas en multitud de protocolos. Entre los diferentes protocolos se encuentran: IP, ATM, SONET/SDH, Ethernet/Fast Ethernet/Gigabit Ethernet, voz multiplexada en TDM, vídeo digital, FDDI (Fiber Distributed Data Interface), ESCON (Enterprise System Connectivity) y Fibre Channel.

Este segmento de mercado ofrece oportunidades muy dinámicas e impredecibles. Estas oportunidades provienen de aplicaciones finales de usuario y tecnologías de acceso mejoradas de alta velocidad, tales como DSL (Digital Subscriber Line), módems de cable o servicios inalámbricos emergentes como LMDS. No obstante, está claro que el tráfico IP continuará en aumento, y este hecho representa muchos factores a tener en cuenta debido a la naturaleza asimétrica e impredecible de los perfiles de tráfico basados en Internet. En general, las redes de acceso se guían por dos cuestiones clave: diversidad de aplicaciones y flexibilidad de arquitecturas. Además, un factor clave que requieren los proveedores de servicio para el desarrollo de redes de acceso eficientes es la "transparencia". De este modo, los vendedores que proporcionen plataformas transparentes frente a múltiples servicios y que simplifiquen las redes, ganarán el mercado.

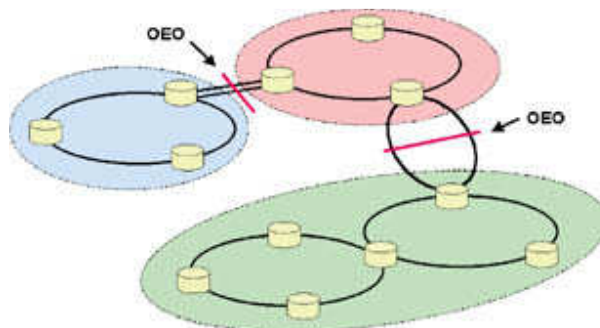


Figura 44. Funcionalidad del WXC

4.5 Diferentes generaciones de redes DWDM

La primera generación de redes WDM surgió para aliviar el problema del agotamiento de capacidad de las redes SONET/SDH, y tal y consistía simplemente en combinar múltiples longitudes de onda en una misma fibra. El número de canales era pequeño (del orden de 16) y la protección se realizaba en las capas 2 ó 3.

La segunda generación de redes metropolitanas DWDM dobla el número de canales e introduce protección de anillo y OADMs estáticos, permitiendo que los proveedores de servicio proporcionen servicios basados en longitud de onda. Adicionalmente, las arquitecturas de red que emplean DWDM de segunda generación soportan interfaces multiservicio protegidos, tales como Gigabit Ethernet, ESCON y SONET/SDH. Si bien estas mejoras son enormes en comparación con las redes SONET/SDH convencionales, la segunda generación de redes posee limitaciones en cuanto a capacidad, coste, escalabilidad y gestión de red. La conmutación entre múltiples anillos metropolitanos se realiza de forma centralizada y las longitudes de onda se demultiplexan antes de ser conmutadas/enrutadas de forma individual. Esto da lugar a conmutadores con un gran número de puertos (por ejemplo, 1024 x 1024) para poder gestionar el tráfico entre anillos, resultando en costes elevados.

La mayoría de OXCs existentes en la actualidad realizan conversiones optoelectrónicas a la entrada y a la salida del conmutador debido a la falta de estándares de interconexión de longitudes de onda en entornos donde existen equipos de múltiples fabricantes. Estos conmutadores ofrecen una escalabilidad muy limitada y se convierten en una solución costosa debido a las funciones de demultiplexado, conmutación y remultiplexado que es necesario realizar (figura 43). Cada conversión requiere transmisores, receptores, fibras y conectores,

aumentando el tamaño del conmutador y disminuyendo su fiabilidad. Luego conforme aumentan las capacidades de las redes, sólo los conmutadores todos ópticos proporcionan una correcta protección de las inversiones.

Finalmente, las redes ópticas de tercera generación se caracterizan por ofrecer gestión dinámica de las longitudes de onda directamente en el dominio óptico, proporcionando ventajas significativas con respecto a la segunda generación de redes. Asimismo, el número de canales es mayor y existe una monitorización de prestaciones más sofisticada que se realiza sobre cada canal óptico. Por medio de láseres sintonizables y filtros, junto con tarjetas de interfaz de múltiples velocidades, se puede realizar la gestión dinámica de longitudes de onda en el dominio óptico de una forma rápida y eficiente. Sin embargo, la clave para ganar clientes consiste en su habilidad para proporcionar nuevos servicios o cambiar la capacidad de los existentes de forma rápida.

En resumen, la tercera generación de redes DWDM proporciona conmutación de longitudes de onda directamente en el dominio óptico, teniendo en cuenta además todos los aspectos relativos a coste, escalabilidad y gestión. De este modo, en las áreas regionales y metropolitanas se proponen una serie de elementos que optimizan el funcionamiento de los anillos interconectados y de las redes en malla. Estos elementos consisten en conmutadores WXC (wavelength cross-connects), OADMs configurables dinámicamente, transpondedores sintonizables y software de gestión avanzado para controlar la capa óptica. A diferencia de la figura 43, el WXC conmuta longitudes de onda individuales sin necesidad de demultiplexar el flujo DWDM, ahorrando gran número de costes y disminuyendo sustancialmente los requisitos de tamaño y consumo de potencia del conmutador. En la figura 44 se muestra esquemáticamente la funcionalidad del WXC, donde se observa que en relación con la figura 43 han desaparecido los de/multiplexores, los costosos transpondedores utilizados para las conversiones OEO y las fibras.

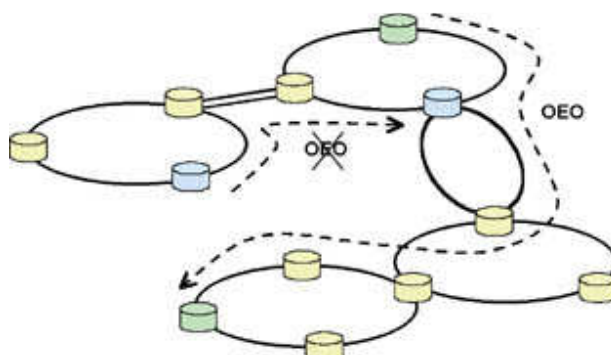


Figura 45. Redes con diferentes rutas entre anillos interconectados o arquitecturas en malla.

Ahora cada longitud de onda puede enrutarse dinámicamente hacia cualquier nodo de cualquier enlace. De este modo, las redes pueden gestionar las diferentes rutas entre anillos interconectados o arquitecturas en malla. Adicionalmente, los mecanismos de protección de red pueden aprovecharse de estas funcionalidades para redirigir las diferentes longitudes de onda en caso de fallo de algún nodo o enlace.

4.6 Implantación de DWDM en las redes metropolitanas

Anteriormente se ha comentado las ventajas que conllevan las redes ópticas transparentes basadas en tecnología DWDM. A continuación se analizará las implicaciones que tiene su implantación en el entorno de las redes metropolitanas, relegando las funcionalidades eléctricas a los extremos de la red. No obstante, se debe matizar antes que las conversiones OEO siguen siendo necesarias para realizar ciertas funcionalidades de red que de otro modo resultarían complejas, como por ejemplo la regeneración 3R (reamplification + reshaping + retiming) de las señales ópticas o la conversión de longitud de onda.

Precisamente para desplazar la funcionalidad eléctrica a los extremos de la red y al mismo tiempo minimizar la cantidad de conversiones OEO requeridas en el núcleo, los proveedores de servicio suelen emplear dos posibles esquemas: (a) arquitectura basada en "islas" geográficas de transparencia o (b) gestión inteligente del canal óptico extremo a extremo. La primera de las posibilidades consiste en crear islas o dominios de transparencia en el interior de la red donde no se requiere regeneración 3R debido a las cortas distancias que recorren las señales ópticas. De este modo, los nodos situados en el interior de una de estas islas no será necesario que implementen conversión OEO. En cambio, las

longitudes de onda transportadas entre dos de estas islas requerirán regeneración 3R y posiblemente conmutadores eléctricos o láseres sintonizables en el caso de realizar conversión de longitud de onda. El esquema de esta arquitectura se muestra en la figura 44.

La otra posibilidad es la conversión OEO, se realiza basándose en el trayecto que sigue cada uno de los canales ópticos, los cuales se gestionan individualmente. La conversión OEO puede añadirse a los nodos según las necesidades, y las longitudes de onda pueden enrutarse por enlaces diferentes en función de sus limitaciones de transmisión. Las ventajas que proporciona este esquema a los proveedores de servicio son: minimización del número de transceptores desplegados, reducción del tamaño de los conmutadores eléctricos, en caso de ser necesarios, y gestión más flexible del crecimiento de la red. [29]

CONCLUSIONES

- Las diferencias principales que las fibras de nueva generación presentan con respecto a las fibras monomodo convencionales tienen como resultado general lo siguiente:
 - Un aumento en el ancho de banda máximo que puede alcanzar la red.
 - Un aumento en la distancia de tramos sin regeneración.
 - Un aumento en el costo total de la red a causa del aumento en el valor por kilómetro de las fibras.
- Para ello será necesario comparar las características técnicas de cada una de las fibras, y hacer un balance entre los beneficios técnicos que ellas entregan y el costo de cada alternativa.
- La supresión del pico de agua en la fibra y con sus avanzadas especificaciones de atenuación apoyará la evolución transmisión de larga distancia mediante el suministro del sistema, de la flexibilidad y de los niveles superiores del sistema. Componentes necesarios para la alta tasa de datos y del costo efectivo del sistema de diseño.
- La continuidad y estabilidad del espectro nos facilita la multiplexión en todo el recorrido en las gamas de longitud de onda.
- Se ha demostrado que en sistemas CWDM es necesario realizar un estudio previo del número de canales y de la potencia óptica por canal.
- La construcción de la fibra óptica es un factor muy importante ya que en el momento de utilizarla esta se encuentra expuesta a muchos agentes externos e internos.
- Al disminuir la atenuación bajan los costos, baja la potencia en las bombas Raman y garantiza una alta calidad del servicio.
- Hay muchos parámetros físicos, químicos y biológicos que se pueden detectar con fibras ópticas.
- La tecnología DWDM se está expandiendo progresivamente desde el núcleo de las redes ópticas de alta velocidad hacia las redes metropolitanas y de acceso.

BIBLIOGRAFÍA

- [1]. http://es.wikipedia.org/wiki/fibra_optica
- [2]. Raymond A. Serway and Robert J. Beichner, Physics for Scientist and Engineers, 2000, 1996,1990,1986,1982, by Saunders College Publishing.
- [3]. <http://www.monografias.com/trabajos13/fibropt/fibropt.shtml>
- [4]. http://es.wikipedia.org/wiki/Apertura_num%C3%A9rica
- [5] Lichtwellenleiterkabel. Siemens Aktiengesellschaft, Berlín y Munich y Marcombo s.a. Barcelona: Gran vía de les Corts catalanes, 594
- [6]. http://www.dei.uc.edu.py/tai98/Fibras_Opticas/perdidas9.htm
- [7]. <http://www.textoscientificos.com/redes/fibraoptica/propiedades-tranmision>
- [8]. <http://es.wikipedia.org/wiki/Anisotrop%C3%ADa>
- [9]. <http://es.wikipedia.org/wiki/Isotrop%C3%ADa>
- [10]. <http://www.doschivos.com/trabajos/tecnologia/758.htm>
- [11]. <http://www.corning.com/WorkArea/showcontent.aspx?id=7843>
- [12]. <http://www.senacitel.cl/downloads/senacitel/2004/tt29>
- [13].<http://ieeexplore.ieee.org/Xplore/login.jsp?url=/iel5/9092/28851/01297718.pdf?temp=x>
- [14].<http://ieeexplore.ieee.org/Xplore/login.jsp?url=/iel5/7379/20048/00927373.pdf?arnumber=927373>
- [15] <http://www.senacitel.cl/downloads/senacitel2002/ID019.pdf>
- [16]. http://www.cubeoptics.com/img/FCKeditor/File/cwdm_white_paper.pdf

- [17]. <http://www.ofsoptics.com/spanish/pdf/AllWaveEsp117web.pdf>
- [18]. http://bb.commscope.com/eng/support_document/construction_guides/_icsFiles/afieldfile/2006/12/27/fiber_manual_1003.pdf
- [19]. <http://ieeexplore.ieee.org/Xplore/login.jsp?url=/iel3/68/10974/00502278.pdf?temp=x>
- [20]. <http://ieeexplore.ieee.org/Xplore/login.jsp?url=/iel4/68/15740/00730510.pdf?temp=x#>
- [21]. <http://www.monografias.com/trabajos13/fibropt/fibropt.shtml#APLICAC>
- [22]. <http://www.smf.mx/boletin/2005/Abr-05/Articulos-HHC.html>
- [23]. http://www.idepa.es/sites/export/sites/default/EuropaI_D_i/Repositorios/galeria_descargas_EuropaI_D_i/Aplicaciones_industriales_01.pdf
- [24]. <http://www.fisicahoy.com/fisicaHoy/fotonica/fotonica.html>
- [25]. <http://www.jornada.unam.mx/2006/05/04/038n1tec.php>
- [26]. http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/meie/jimenez_p_jl/capitulo_3.pdf
- [27]. http://www.rares.com.ar/albums/1_Manual_de_Telecomunicaciones_2000/505%20Componentes%20opticos%20pasivos.pdf
- [28]. http://www.rares.com.ar/albums/1_Manual_de_Telecomunicaciones_2000/508%20Componentes%20electroopticos.pdf
- [29]. <http://www.aciem.org/bancoconocimiento/R/Redesopticastransparentesbasadasentecnologia/Redesopticastransparentesbasadasentecnologia.asp>