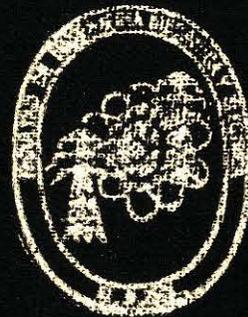
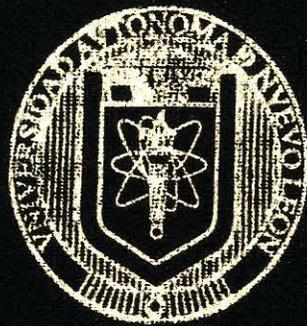


**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON**

**FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA  
Y ELECTRICA**



**MULTIPLEXAJE EN FIBRAS OPTICAS**

**T E S I N A**

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE  
INGENIERO EN ELECTRONICA Y  
COMUNICACIONES**

**PRESENTA**

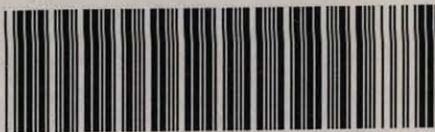
**JOSE CARLOS GARCIA BELTRAN  
ASESOR: ING. LEOPOLDO VILLARREAL**

**MONTERREY, N. L.**

**NOVIEMBRE 1995**

103

PA  
TK51  
.59  
G372  
c.1



1080086935

# UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA  
Y ELECTRICA



TESINA

MULTIPLEXAJE EN FIBRAS OPTICAS

MULTIPLEXAJE EN FIBRAS OPTICAS

QUE PRESENTA

JOSE CARLOS GARCIA BELTRAN

PARA OBTENER EL TITULO DE

INGENIERO EN ELECTRONICA Y

COMUNICACIONES

## TESINA

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE

INGENIERO EN ELECTRONICA Y

COMUNICACIONES

ASESOR: ING. LEOPOLDO VILLARREAL

PRESENTA

JOSE CARLOS GARCIA BELTRAN

ASESOR: ING. LEOPOLDO VILLARREAL

MONTERREY, N. L.

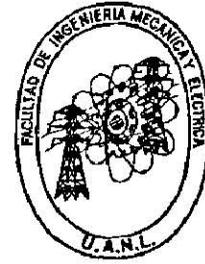
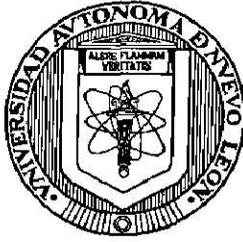
NOVIEMBRE 1995



T  
TK5103  
.59  
G372

UNIVERSITY OF  
BURUNDI  
FUND  
TESIS

UNIVERSITY OF  
BURUNDI  
FUND  
TESIS



UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA

TESINA  
MULTIPLEXAJE EN FIBRAS OPTICAS

QUE PRESENTA

JOSE CARLOS GARCIABELTRAN

PARA OBTENER EL TITULO DE

INGENIERO EN ELECTRONICA Y  
COMUNICACIONES

ASESOR: ING. LEOPOLDO VILLAREAL

SAN NICOLAS, N.L. NOVIEMBRE 1995

## **INDICE**

- 1. INTRODUCCION**
  - 1.1 ANTECEDENTES
  - 1.2 APARICION DEL CONCEPTO DE MULTIPLEXAJE EN FIBRAS OPTICAS
  
- 2. TECNICAS DE MULTIPLEXAJE POR DIVISION DE LONGITUD DE ONDA**
  - 2.1 SELECCION DE LONGITUD DE ONDA EN WDM
  - 2.2 ANCHO DE BANDA EN WDM
  
- 3. MULTIPLEXORES /DESMULTIPLEXORES**
  - 3.1 PRINCIPIO DE OPERACION
    - 3.1.1 DISPOSITIVOS DE DISPERSION ANGULAR
    - 3.1.2 DISPOSITIVOS COMO FILTROS DIELECTRICOS
    - 3.1.3 DISPOSITIVOS DE GUIAS DE ONDA PLANAR
  
- 4. TECNOLOGIA EN OPTICA INTEGRADA**
  - 4.1 ACOPLADORES MONOMODO
  - 4.2 MUL/DEX DE ELEMENTOS DISPERSIVOS EN OPTICA INTEGRADA
  
- 5. PERSPECTIVAS**
  - 5.1 EL MULTIPLEXOR
  - 5.2 EL DESMULTIPLEXOR
  - 5.3 APLICACION A UN ENLACE SUBMARINO
  - 5.4 CONCLUSION
  
- 6. BIBLIOGRAFIA**

## INTRODUCCION

### 1.1 ANTECEDENTES.

Con toda certeza, la propagación de la luz confinada a un medio transparente es conocida desde hace más de un siglo. Por ejemplo en 1870, John Tyndal demostró ante la Royal Society la propagación de la luz en un chorro de agua. Sin embargo, el trabajo formal sobre el uso práctico de ondas de luz guiadas comenzó a principios de la década de 1950. En esa época los centros de mayor actividad eran Holanda (Van Heel) e Inglaterra (Hopkins, Kapany y Hirschowitz), donde se estudiaba la propagación de la luz en fibras sin recubrir, recubiertas de plástico y recubiertas de vidrio para la transmisión de imágenes. De hecho, fueron Kapany y colaboradores quienes acuñaron el término *óptica de fibras* (o, más comúnmente, *fibras ópticas*) en 1956.

A partir de entonces, la fibra óptica se ha desarrollado como una rama independiente de las comunicaciones. El potencial de utilizar ópticas guiadas fue evidente para quienes trabajaban en telecomunicaciones. Este hecho, junto con el advenimiento de los dispositivos emisores de luz de heterounión a mediados de la década de 1960, alentó la investigación en laboratorio de las aplicaciones a la telefonía. Sin embargo, debido a la atenuación de la fibra (por lo general en el intervalo de los 1000 dB/Km), la aplicación práctica de las fibras ópticas para las comunicaciones a larga distancia era más bien dudosa. Durante el periodo de 1966 a 1969, Kao y colaboradores de los Standard Telephone Laboratories señalaron que si se utilizaban materiales más puros sería posible reducir substancialmente las pérdidas ópticas. Además se dedicaron tenazmente al desarrollo de técnicas de medición para vidrios de ultrabaja atenuación. Esto estimuló la realización de mayor trabajo en diferentes laboratorios de todo el mundo, incluyendo British Post Office, Telefunken, Siemens Haslke, Nippon Electric, Nippon Sheet Glass, Bell Telephone Laboratories y Corning Glass Works. El crédito de haber hecho posible la utilización práctica de las fibras ópticas en las comunicaciones pertenece a Kapron y colaboradores de Corning: en 1970 anunciaron haber reducido la atenuación en la fibra a menos de 20 dB/Km. Esto propició que la industria redoblara sus esfuerzos competitivos.

Recientes avances en la fabricación de vidrio con alto contenido de dióxido de silicio y bajas pérdidas por absorción han permitido que la fibra óptica sea considerada para fines de telecomunicación. Las pérdidas de cientos de decibeles por kilómetro se han reducido a 1 dB/Km y menos.

Un sistema básico de un enlace óptico consta de lo siguiente:

la salida de una fuente de luz, casi siempre un diodo emisor de luz (LED, de *light-emitting diode*) o un láser, es modulada en amplitud mediante una señal analógica o digital, lo que se logra por modulación directa de la corriente de excitación de la fuente. La luz se acopla dentro de una fibra mediante diferentes técnicas de multiplexaje y dispositivos para ello, tema de esta investigación, y a través de varios conectores dentro de un cable de fibra. Por lo general el cable es una serie de secciones empalmadas entre sí a fin de formar el enlace. Entonces, en el otro extremo la fibra se desmultiplexa y canaliza a un detector y la señal de luz modulada se convierte en una corriente modulada

del detector a fin de obtener la señal de salida. Si el enlace es largo, se emplean repetidores que constan de un receptor y un regenerador de láser para cada fibra.

## 1.2 APARICION DEL CONCEPTO DE MULTIPLEXAJE EN FIBRAS OPTICAS.

A pesar de la alta capacidad de un canal óptico, muchos sistemas en la actualidad usan solo una longitud de onda para llevar información. Nosotros sabemos que las fibras ópticas tienen amplias regiones de bajas pérdidas que podrían soportar la operación de un enlace con más de una fuente. Tecnología de Multiplexaje por División de Frecuencia (FDM, siglas en ingles) o tecnología de Multiplexaje por División de Longitud de Onda (WDM, siglas en ingles), mediante las cuales múltiples canales ópticos pueden ser transmitidos simultáneamente a diferentes longitudes de onda a través de una fibra óptica monomodo, es un medio útil de hacer uso completo de las características de bajas pérdidas de la fibra óptica sobre una amplia región de longitud de onda. Este concepto apareció por primera vez en 1970, de acuerdo a reportes publicados. Esta investigación esta enfocada a aplicaciones practicas para sistemas de comunicación.

Desde entonces, las investigaciones se han intensificado con dramáticos progresos en fuentes de luz para fibras ópticas y detectores. En años recientes, esfuerzos acelerados en investigación han explorado más componentes sofisticados para fibras ópticas, dispositivos opto-electrónicos y técnicas que permiten el procesamiento de señales en el dominio óptico u óptico-electrico (incluyendo combinación microrondas-óptica). Areas de investigación han incluido multiplexaje por división de longitud de onda (WDM), intercambio óptico, detección coherente, diodos láser sintonizables y filtros para longitudes de onda. En particular, multiplexores/desmultiplexores ópticos, que son los dispositivos clave en WDM, están actualmente entre las investigaciones y desarrollo de artículos más comunes. Muchos tipos multiplexores/desmultiplexores han sido propuestos y fabricados hasta la fecha. Tecnología óptica de WDM ha sido utilizada para combinar varios sistemas con espaciamiento de canal muy grande.

Desde que tenemos la habilidad para controlar la operación de las longitudes de onda de los emisores semiconductores como, láser DFB(Distributed-feedback láser) o láser DBR(Distributed Bragg reflector láser), es posible hipotetizar un enlace que llevaría varias longitudes de onda. **En el extremo receptor, filtros u otros elementos sensibles a la longitud de onda, tales como redes de difracción, separarían la longitud de onda y cada portadora caería en un receptor separado para su detección.** Desde que las longitudes de onda son usadas para compartir el canal, la técnica es llamada Multiplexaje por División de Longitud de Onda.

Enlaces bidireccionales son posibles también en sistemas con WDM por el intercambio de fuentes y receptores en cada extremo. El ancho de banda de las fibras ópticas se extiende abruptamente desde 800 nm hasta 1600 nm. Existen pérdidas significantes asociadas con los iones OH- a 1400 nm y 1250 nm. Estas pérdidas no son importantes para cortas distancias (arriba de 10 Km o más) pero se vuelven sumamente importantes para máximas distancias. Tres ventanas de transmisión en las fibras ópticas son identificadas cerca de 850, 1300, y 1550 nm.

## 2. TECNICAS DE MULTIPLEXAJE EN WDM

El multiplexaje por división de la longitud de onda puede ser dividido en técnicas por selección de la longitud de onda y en técnicas por banda amplia.

### 2.1 SELECCION DE LONGITUD DE ONDA EN WDM

La técnica de selección de longitud de onda es mostrada en la figura 1(a). Cada fuente opera en una longitud de onda separada. La potencia de todas las fuentes es combinada (idealmente) sin pérdidas. El desmultiplexor en el extremo receptor es sensible a la longitud de onda; separa cada longitud de onda en un diferente canal, único para esa longitud de onda. (La separación es, de nuevo, idealmente sin pérdidas). La multiplexación y desmultiplexación pueden efectuarse con bajas pérdidas de inserción, como toda la potencia es dada a una longitud de onda, esta es (en teoría) dirigida a través de un solo camino; las otras longitudes de onda van a través de caminos separados. Descuidando las pérdidas de inserción de los acopladores, entonces,

$$P_{\text{out}}(\lambda_i) = P_{\text{in}}(\lambda_i).$$

La cantidad de luz que sale de un canal hacia otro es llamado *interferencia*.

La interferencia CT para un canal  $j$  hacia otro canal  $i$  es expresada (en dB) como

$$CT_{ij} = 10 \log [ P_{ij} / P_{ii} ],$$

donde  $P_{ij}$  es la potencia medida en el canal  $i$  cuando solo el canal  $j$  esta activo y  $P_{ii}$  es la potencia en el canal  $i$  cuando es el único canal que esta activo. La interferencia puede ser expresada en cualquiera de las dos maneras, como acabamos de describir, o en total como

$$CT_{\text{total}} = 10 \log [ \sum_j P_{ij} / P_{ii} ],$$

donde el numerador es la suma de la potencia de todos los otros canales como medimos en el canal

### 2.2 TECNICA DE MULTIPLEXAJE EN BANDA AMPLIA.

La técnica de multiplexaje del ancho de banda, como vemos en la figura 1(b) combina la potencia de las fuentes en el lado transmisor y después divide la potencia de la señal total en el lado receptor. Simples ciclotrones y combinadores son usados, resultando en pérdidas de  $1/N$  para cada dispositivo. Las pérdida total, entonces, es  $1/N^2$ , como se ilustra. En consecuencia, tenemos una pérdida significante en cada canal, expresada por

$$P_{\text{out}}(\lambda_j) = P_{\text{in}}(\lambda_j) / N^2.$$

Todas las longitudes de onda son transmitidas a todos los receptores. Cada receptor requiere su propio filtro para separar los canales. La potencia dividida alcanzada por cada receptor es filtrada para la longitud de onda deseada, la cual es pasada al detector.



### 3. MULTIPLEXORES / DESMULTIPLEXORES

Los multiplexores de longitud de onda son por lo general de dos tipos: *rejillas de difracción y filtros dieléctricos*. En las publicaciones especializadas se ha informado de varios multiplexores de rejilla de difracción, en ellos suele utilizarse una combinación lente-rejilla de difracción. Los haces de luz de las fibras de entrada ( $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  y  $\lambda_3$ ) son colimados por las lentes sobre la rejilla de difracción soldada, y difractados por ésta conforme sus longitudes de onda. Se vuelven a enfocar en la fibra de salida como la salida multiplexada. En la práctica suele utilizarse una lente de varilla GRIN (de *graded refractive index*, índice de refracción graduado), debido a la ventaja de sus caras planas de entrada y salida, orientación coaxial de las fibras, fácil compensación de la abertura numérica, aberración mínima, facilidad para el montaje, etc. La atenuación por inserción típica es de 2.5 dB aproximadamente, y el aislamiento entre canales separados 20 nm entre sí es de unos 24 dB.

También se ha investigado ampliamente el empleo de filtros dieléctricos de interferencia de capas múltiples como multiplexores y desmultiplexores. Dado que los filtros dieléctricos suelen presentar una elevada sensibilidad a la polarización, por lo general se utilizan en configuraciones de incidencia casi normal junto con varillas GRIN. Aunque la opinión generalizada ha sido que los dispositivos de interferencia proporcionan baja transmisión y aislamiento deficiente, un dispositivo bien diseñado, presenta una atenuación por inserción media de alrededor de 2 dB y aislamiento entre canales (separados 20 nm entre sí) de 34 dB aproximadamente.

En virtud de que estos dispositivos son recíprocos, un multiplexor también puede utilizarse como desmultiplexor, Sin embargo, es posible obtener mayor salida óptica de un desmultiplexor si las fibras de salida tienen núcleos más grandes que el núcleo de la fibra de entrada.

#### 3.1 PRINCIPIO DE OPERACION

##### EN SISTEMAS WDM DE FIBRAS OPTICAS

Los dispositivos multiplexores/desmultiplexores son componentes realmente importantes para el desarrollo de tecnologías de WDM/FDM. Especialmente en sistemas prácticos muy adentrados de multiplexaje de longitud de onda, un dispositivo multiplexor/desmultiplexor con resolución espectral en línea, fino y estable, con sintonización de longitud de onda, con bajas pérdidas de inserción alineación sencilla y configuración más compacta es un componente extremadamente importante para comunicaciones ópticas a futuro.

#### 3.2.1 DISPOSITIVOS DE DISPERSION ANGULAR

Los dispositivos de dispersión angular podrían ser usados como multiplexores /desmultiplexores de WDM (MUX/DEMUX) con las más grandes separaciones de longitudes de onda, tales como prismas y rejillas. En la práctica, una rejilla o red fulgurada que puede difractar eficientemente la luz hacia un orden de difracción específico, es primera y ampliamente usado como el elemento de dispersión angular. Como ejemplo, el Litio ha sido más ampliamente estudiado que otro tipo de elementos de rejilla. Una estructura típica de un desmultiplexor del tipo rejilla de litio es mostrado en la figura 2(a)(tipo de lentes convencionales) y 2(b)(tipo de lentes varrilla-GRIN).

El tipo de lentes de varilla-GRIN es superior al tipo de lentes convencionales en su compactación y fácil alineamiento.

Los principios y funcionalidad de este tipo de desmultiplexor, con referencia a la estructura mostrada en la figura 2(a), son discutidos aquí como un ejemplo. Una fibra de entrada y múltiples fibras de salida son ordenadas en el plano focal de los lentes. La longitud de onda de la luz multiplexada de la fibra de entrada es colimada por los lentes y alcanzan la rejilla de difracción. La luz es dispersada angularmente, de acuerdo a diferentes longitudes de onda, y reflejada al mismo tiempo. Entonces, las diferentes longitudes de onda pasan a través de los lentes y son enfocadas a su

correspondiente fibra de salida. La red o rejilla refleja la luz según un ángulo dependiente de la longitud de onda incidente.

Cada longitud de onda es alimentada a un detector individual a través de su fibra de salida. El espaciamiento intercanal de longitud de onda es igual a 25 nm. Los 0.1 dB de ancho de banda son todos 11 nm. Tal amplitud en la banda de paso puede ser obtenido debido a las diferencias entre el

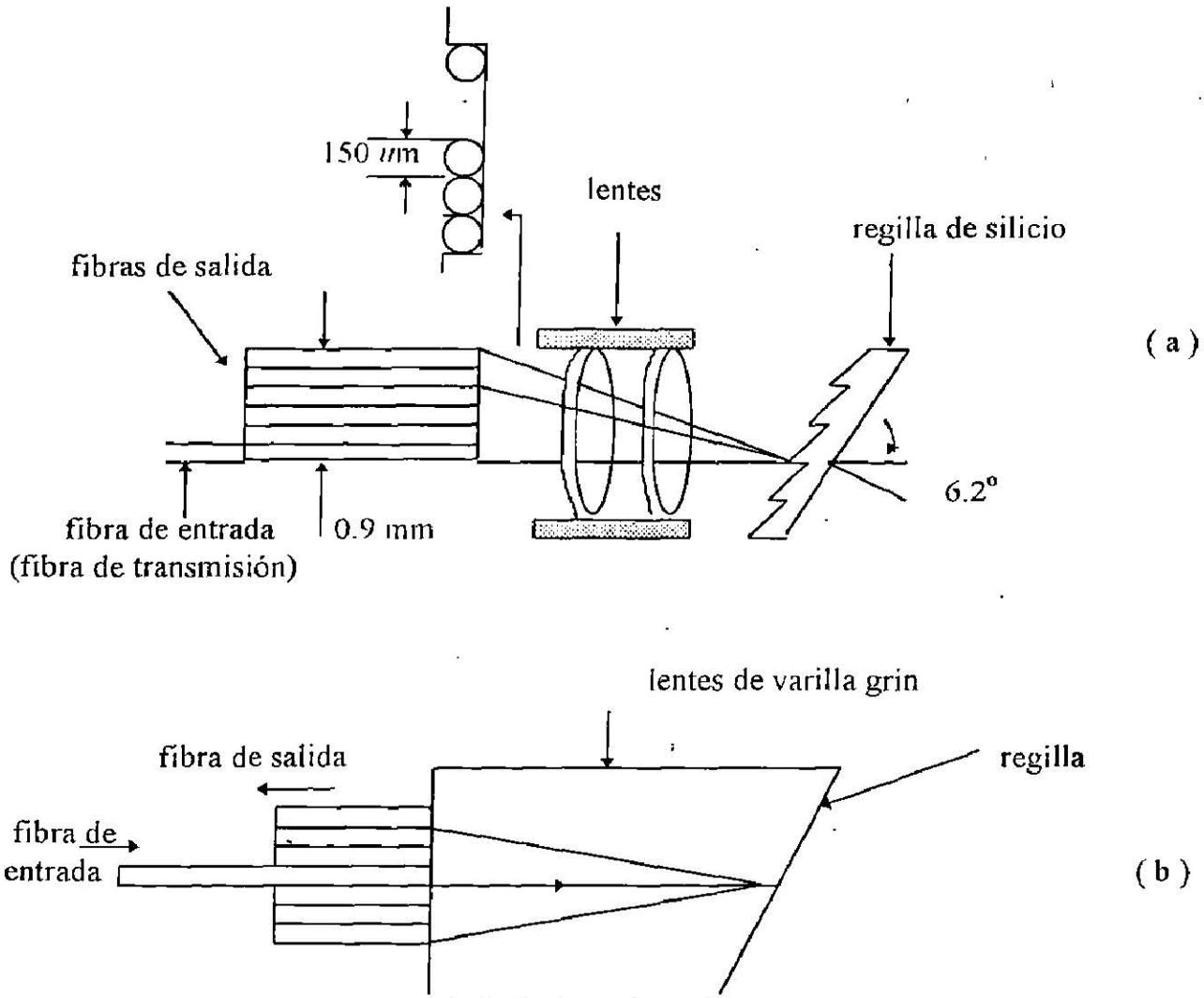


figura 2

diámetro del núcleo  $\Delta d$  de la fibra de entrada (diámetro del núcleo: 60 μm) y las fibras de salida (diámetros de núcleo: 130 μm). El ancho de banda  $Bw$  puede ser estimado de

$$Bw = (\Delta d \Delta \lambda) / \Delta Z$$

donde  $\Delta \lambda / \Delta Z$  es la dispersión lineal en el plano focal, el cual es de 25 nm/150 μm en este dispositivo. Desde que  $\Delta d$  es 70 μm,  $Bw$  es 11.7 nm de la ecuación anterior. Este valor es aproximadamente igual al valor experimental de 11 nm. Este amplio ancho de banda es necesario en un desmultiplexor para prevenir pérdidas de inserción existentes influenciadas por la variación de la longitud de onda en el LDs.

La funcionalidad de un desmultiplexor tipo Litio incluye:

|                                    |          |
|------------------------------------|----------|
| * número de canales                | 3-20     |
| * pérdidas de inserción            | 1-4 dB   |
| * espacio entre longitudes de onda | 20-40 nm |
| * atenuación por interferencia     | 20-30 dB |

### 3.2.2 FILTROS DIELECTRICOS

Los filtros dieléctricos (DTF, por sus siglas en ingles) como desmultiplexores contienen películas dieléctricas de alto y bajo índice de refracción en etapas alternadas. Cada etapa tiene un espesor óptico de aproximadamente un cuarto de la longitud de onda. Por lo tanto, un desmultiplexor DTF puede ser diseñado independientemente de los parámetros de la fibra usada y es completamente diferente de los dispositivos de dispersión angular.

Los parámetros de primordial importancia son pérdidas en la banda de transmisión, amplitud de la banda de transmisión y atenuación de rechazo en la banda. En general, pérdidas en la banda de transmisión debería de ser bajas, la anchura de la banda de transmisión deberán de ser amplia (típicamente, más amplia que la oscilación de la longitud de onda en la fuente de luz) y la atenuación de rechazo en la banda deberá de ser grande (típicamente, más de 20-30 dB).

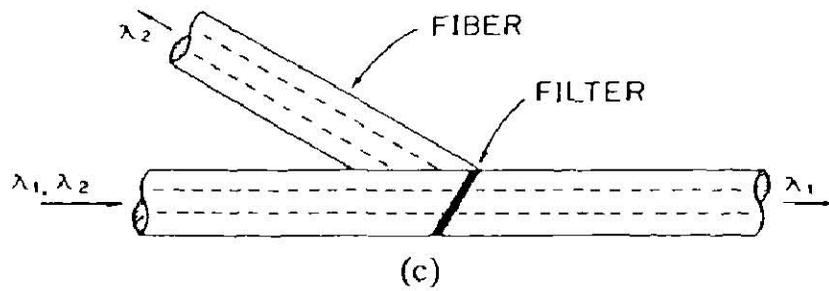
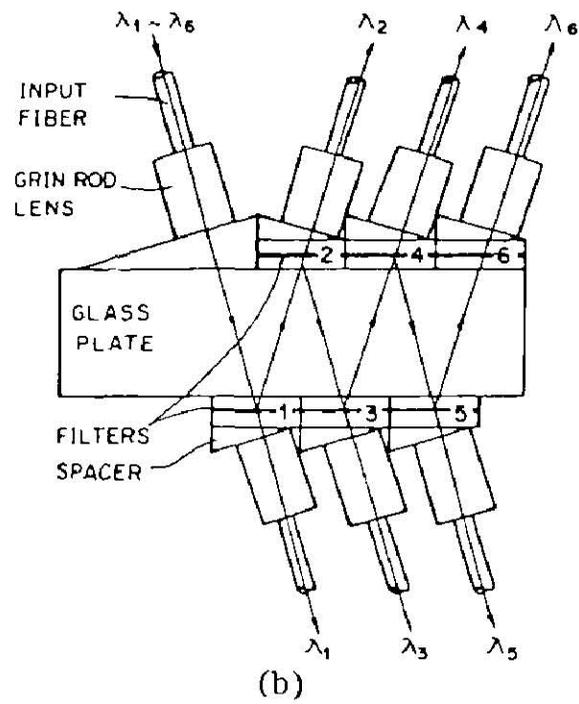
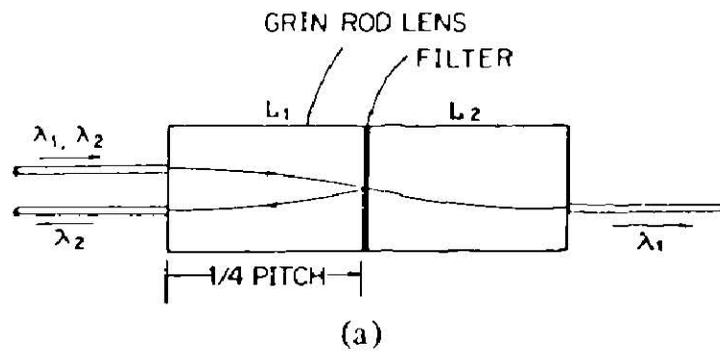
El buen funcionamiento de un multiplexor/desmultiplexor depende de las características dieléctricas de la delgada película (o capa) para una gran expansión, así el diseño de un DTF es muy importante. El método de la matriz siempre se aplica para tales diseños. En el caso de un filtro pasa-banda (BPF, en ingles) menos del 1% de desviación para un valor teórico es exigido. Por ejemplo, BPFs de 0.81, 1.2 y 1.3  $\mu\text{m}$  se han desarrollado. Estas son 23 etapas 3 cavidades para BPFs de delgadas películas compuestas de  $\text{SiO}_2$  y  $\text{TiO}_2$ . Sus características son:

|                                      |  |
|--------------------------------------|--|
| * pérdidas en la banda de paso       | menos de 0.2 dB  |
| * amplitud en la banda de paso       | 400 A (en la región 0.8 $\mu\text{m}$ )<br>600 A (en la región 1.3 $\mu\text{m}$ ) |
| * atenuación por rechazo en la banda | 25-30 dB   |

Ejemplos típicos de desmultiplexores DTF son mostrados en la figura 3. Existe el tipo de lentes de varilla-GRIN, figura 3(a), tipo multireflector, en la figura 3(b) y del tipo de final de fibra (fiber-end), en la figura 3(c). Mientras estos ejemplos son mostrados como desmultiplexores también pueden ser modificados para multiplexaje o configuraciones de multiplexaje/desmultiplexaje regresando la luz de entrada a los puertos de salida.

El tipo de lentes de varilla-GRIN tiene la ventaja de compactación, pero no es fácil de realizar con más de tres canales, porque esto requeriría de más de tres elementos de lentes de varilla-GRIN con una conexión en cascada entre-ejes (off-axis) entre elementos, y *tal conexión en cascada entre-ejes tiene una alineación muy crítica.*

El tipo multireflector tiene una estructura más complicada y *tiene una alineación todavía más complicada.* De cualquier manera, se aplica para multiplexores o desmultiplexores con más de seis canales. El tipo de terminación de fibra (fiber-end) tiene la estructura más simple, pero es difícil de fabricar para multiplexores o desmultiplexores con más de tres canales. Esto es porque *tiende a incrementar las pérdidas de inserción basadas en alineamiento,* debido a que no tienen lentes de colimación.



Dispositivos de tipo DTF estan disponibles con las siguientes características:

- \* numero de canales                      2-6 canales
- \* pérdidas de inserción                1-5 dB
- \* atenuacion por interferencia        20-70 dB
- \* espaciamiento intercanal            30-100 nm  
(o muy amplio espaciamiento, por ejemplo, 0.8 y 1.3  $\mu\text{m}$ ).

Los dispositivos de filtrado reflejan o transmiten luz dependiendo de la longitud de onda. Varios tipos de dispositivos de filtrado pueden ser usados para separar las longitudes de onda. La tabla 1.0 muestra anchos de banda representativos que pueden ser asociados con cada tipo de filtro.

| Técnica  | Ancho de Banda de Canal |
|--|-------------------------|
| Filtros de Interferencia                           | 5 nm                    |
| Filtro Fabry-Perot                                 | 0.1 - 10 nm             |
| Amplificadores Semiconductores láser sintonizables | 1.0 - 10 GHz            |
| Receptores Heterodinos                             | 1 - 10 GHz              |

Tabla 1.0

1. *Filtros de interferencia* .- Los filtros ópticos más usados en estas aplicaciones son apilaciones multi-dieléctricas (en vez de filtros de absorción usados en aplicaciones fotográficas) para proporcionar un cambio abrupto en la reflexión en la longitud de onda deseada para minimizar las pérdidas de inserción. Los filtros típicos pasan una longitud de onda (con una respuesta resonante típica) y reflejan todas las otras longitudes de onda que son más del 10 % (típicamente) lejos de la longitud de onda central del filtro. (Con diseños más complejos, el espaciamiento puede ser 1 % o hasta 0.1 % de la longitud de onda central). Para operar con más de dos canales, se vuelve necesario una serie de arreglos de varios filtros, con incrementos grandes de pérdidas de inserción por la combinación de filtros. Solamente arreglos en cascada de dos o tres filtros son usados en la práctica, debido a su altas pérdidas de inserción, limitando los sistemas de transmisión para cinco o seis longitudes de onda por canal.

2. *Filtros resonantes Fabry-Perot* .- Los resonadores Fabry-Perot son filtros ópticos pasa-banda que transmiten una banda estrecha de longitudes de onda y reflejan otras. Las frecuencias de transmisión ocurren cada  $c/2L$ , donde L es el espaciamiento entre los espejos del resonador. Este periodo es conocido como *rango de libre espectro*, FSR, o del interferometro. La amplitud de la frecuencia de 3 dB del filtro pasa-banda es  $\Delta f$  y es relacionado con el FSR por la finura F del filtro por:

$$\Delta f = FSR/F,$$

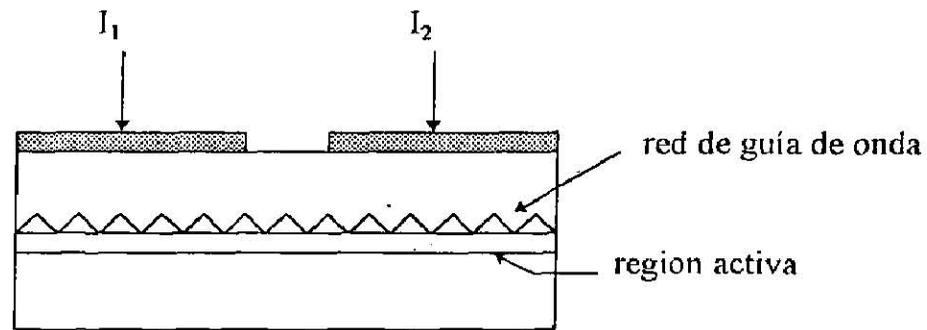
donde

$$F = \pi \sqrt{R} / (1-R)$$

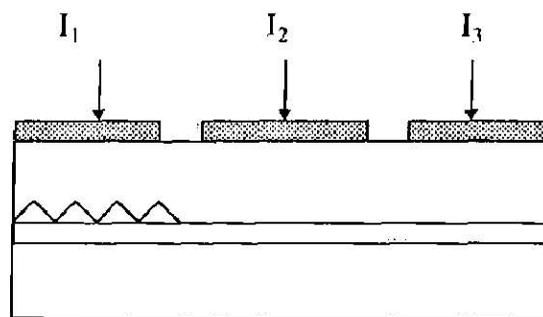
y R es la reflectividad de los espejos resonantes (asumiendo el mismo para los dos

espejos del resonador). La mínima transmisión entre los picos es  $(\pi / 2F)^2$ .

3. *Filtro Amplificador de Diodo Láser* .-Un diodo láser que se le inyecta una corriente abajo de su corriente umbral es un amplificador pasa-banda sintonizable con una estrecha banda de paso. La frecuencia central es determinada por la composición del material. Usando un láser de distribuidor retroalimentado (DFB) o un láser reflector de distribución retroalimentado (DFR) con múltiples electrodo (como se muestra en la figura 4) nos permite ajustar la longitud de onda amplificada. En el amplificador de distribución retroalimentado (figura 4-a), una corriente de entrada puede usarse para la inyección mientras la otra es usada para controlar la longitud de onda central del amplificador. En el amplificador reflector de distribución retroalimentado, la corriente  $I_1$  varia la periodicidad óptica del reflector (y por lo tanto, la longitud de onda central), la corriente  $I_2$  controla la fase del amplificador, y la corriente  $I_3$  controla la potencia inyectada o la ganancia del amplificador.



( a )



I1 — Bragg  
 I2 — Fase  
 I3 — Ganancia

( b )

figura 4

4. *Filtros Electrónicas con Detección Coherente*. -Una vez que una fuente con una amplitud lineal más pequeña que el ancho de banda de la señal sea posible, técnicas de *detección coherente* llegan a ser posibles. Estos sistemas coherentes han sido discutidos como Multiplexaje por División de Frecuencia (o FDM). El espaciamiento entre canales de este sistema es determinado por el ancho de banda de la señal modulada (dependiendo del tipo de modulación utilizada y de la razón de datos) y la estructuración del receptor utilizado. Este método de detección permite el uso de estrechos canales que son separados en el subsistema de procesamiento electrónico del receptor donde filtros electrónicos de precisión pueden ser utilizados, en vez de filtrado óptico donde la separación por filtros es todavía inadecuados y primitivos en términos de anchura mínima de canal.

### 3.2.3 DISPOSITIVOS DE GUIAS DE ONDA PLANAR

Esta clase de multiplexores/demultiplexores ópticos (MUX/DEMUX) en configuración son construidos sobre la base de la **tecnología de óptica integrada**. Esta configuración tiene las ventajas potenciales de la tecnología planar, como la reproducción, fabricación en lotes, incorporación de circuitos ópticos complejos y cómoda alineación con conexión de fibras. Se espera, que tengan muchos más avances. Pero solo se aplican a sistemas WDM de fibras monomodo, porque tiene una guía de onda planar de operación monomodo.

Los tipos de guía de onda planar incluyen el interferómetro integrado Mach-Zehnder, el reflector elíptico de Bragg, la rejilla ruidosa (chirped-grating), el acoplador contradireccional de Bragg, la rejilla de Bragg, el selector de conversión-de-modo-en cascada y otros.

Un multiplexor/desmultiplexor de cuatro canales basado en el interferómetro de Mach-Zehnder y fabricado con dopado de fósforo sobre  $\text{SiO}_2$  en guías de onda planar, tiene una muy baja pérdida en la guía de onda planar (0.05 dB/cm) para  $\lambda = 1.5 \mu\text{m}$ . Pérdidas tan bajas como 0.05 dB han sido obtenidas para canales de guías de onda monomodo. El espacio entre canales es  $77 \text{ \AA}$ . El multiplexor fue realizado con seis acopladores similares de 3 dB basados en acopladores de  $700 \text{ nm}$  de longitud. La transmisión de los cuatro puertos del multiplexor fue una función de la longitud de onda, donde la salida es normalizada con respecto a la salida total del dispositivo. Los canales de entrada son etiquetados del 1 al 4 y el canal de salida es C. Los picos de transmisión tienen una separación en longitudes de onda de  $77 \text{ \AA}$  y una eficiencia en promedio de empalmes de 90 %. La anchura de canal es de  $40 \text{ \AA}$ . El promedio de interferencia del desmultiplexor es -16 dB.

Un multiplexor de longitud de onda de cuatro canales y filtros pasabanda basados en el reflector elíptico de Bragg (EBRs) fue demostrado y presentado recientemente. El espaciamiento entre canal es de  $50 \text{ \AA}$  cerca de  $1.5 \mu\text{m}$ . El EBRs es de espejos elípticos de banda estrecha que pueden reenfocar luz de una guía de onda de entrada a cualquier número de guías de salida. Multiplexores con filtrado sencillo y doble filtrado fueron demostrados. Con filtrado sencillo, las pérdidas por inserción de fibra a fibra fueron  $3.0 \pm 0.5 \text{ dB}$ , y la interferencia fue de -20 dB. Con doble filtrado las pérdidas por inserción fueron de  $4.0 \pm 0.5 \text{ dB}$ , y la interferencia fue de -30 dB. Aproximadamente 2 dB de estas pérdidas se debieron al acoplamiento entre las fibras y las guías de onda.

## 4. TECNOLOGIA EN OPTICA INTEGRADA

El desmultiplexor a base de red antes descrito puede realizarse suprimiendo la óptica intermedia mediante la fijación de la red y las fibras a uno y otro lado de la guía integrada de dimensiones optogeométricas bien escogidas. Pero para sacar el máximo provecho de la óptica integrada será muy interesante adoptar esta tecnología en la realización de dispositivos MUL/DEX exclusivamente monomodo.

En óptica integrada se observa otra tendencia que parece poner en duda los principios mismos en que se basa la WDM que hemos definido al empezar esta investigación, dado que esta función óptica podría realizarse sin recurrir a los MUL/DEX.

En lo que respecta al multiplexor, cabe considerar en efecto, que un láser cuaternario InGaAs/InP que comprenda cintas independientes que emiten varias longitudes de ondas inyectadas en una fibra es un multiplexor sin pérdidas. El problema que hoy plantea la adopción de esta tecnología es que reduce la distancia entre cintas en la microplaqueta láser a fin de poder inyectar en una fibra con núcleo de pequeño diámetro. Habida cuenta de los resultados previsibles en este sector de la óptica integrada (reducción de la distancia entre cintas), pensamos que esta tecnología de WDM seguirá tropezando con una doble limitación: solo ofrecerá interés en el caso de la multiplexación multimodo, por razones de distancia entre cintas y no afectará a más de dos canales por el mismo motivo.

En cuanto a la desmultiplexación, se pueden separar los diferentes canales, con diafonias correctas, mediante un fotodiodo InGa-AsP de varias capas de distinta composición.

Aun cuando se conozca el modo de integrar varias cintas en una misma microplaqueta láser, sería aventurado imaginar un dispositivo WDM de varios canales, pues este necesitaría una fibra con un núcleo de diámetro demasiado grande, lo cual no permitiría una aplicación monomodo, según cabe prever actualmente.

También en este sector de la óptica integrada, los acopladores y las redes integradas podrían brindar soluciones interesantes en el futuro.

### 4.1 ACOPLADORES MONOMODO.

Se pueden clasificar como sigue:

- \* Los acopladores "Y" obtenidos por diferentes métodos de pulido de fibras monomodo o en óptica integrada. Son dispositivos pasivos o activos obtenidos mediante el acercamiento de dos fibras o dos guías que permiten efectuar el acoplamiento sobre una sola guía.
- \* Los acopladores directivos obtenidos a partir de una fibra especial que presenta dos zonas de guía, mediante pulido y acercamiento de dos fibras o en óptica integrada.

Para construir MUL/DEX a partir de acopladores habría que poner estos en tándem, con lo cual se correría el riesgo de que aumentarían las pérdidas de inserción del dispositivo, al ser de 3 dB las pérdidas teóricas de un acoplador.

Es de señalar además el riesgo de que los acopladores en óptica integrada sean sensibles a la polarización sobre todo en la tecnología del silicio, material que al dilatarse por efecto del calor puede provocar birrefringencia, con el consiguiente riesgo de dificultades en los enlaces monomodo heterodinos.

## 4.2 MUL/DEX DE ELEMENTOS DISPERSIVOS EN OPTICA INTEGRADA.

Para salvar el obstáculo del exceso de pérdidas señalado respecto a las tecnologías precedentes, pueden ser prometedor el empleo de un elemento dispersivo, en este caso la red integrada en un substrato.

*Se trata de realizar filtros selectivos sobre una guía integrada obtenida por intercambio iónico, en la que se inscribe la red holográfica lograda por interferometría o por fotolitografía.*

Actuando sobre las características optogeométricas de la red y del substrato se pueden conseguir las características de selectividad apetecidas.

La técnica de este tipo podría conducir a la realización de MUL/DEX monomodo como se indica en la figura 5.

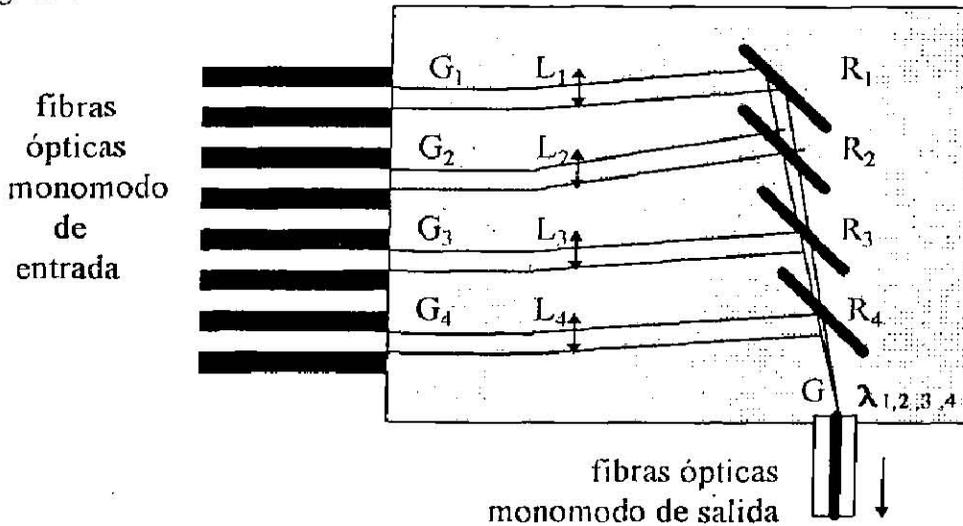


figura 5

El MUL/DEX comprende un substrato en el que van inscritos:

- 4 microguías monomodo de entrada
- 1 microguía monomodo de salida
- 4 lentes de entrada
- 1 lente de salida
- 4 redes de pasos diferentes
- 4 fibras monomodo de entrada (ACOPLAMIENTO)
- 1 fibra monomodo de salida (ACOPLAMIENTO)

Es preciso elegir el orden de difracción para evitar limitaciones muy rigurosas en la fabricación de las redes. También hay que velar por que la longitud de la onda de cada canal se mantenga alejada de la longitud de onda de corte de la guía.

## 5. PERSPECTIVAS

La segunda generación de sistemas de WDM se basará en la preparación de tecnologías que permitirán asegurar la multiplexación de "frecuencias ópticas" es decir de canales cuya separación puede disminuir hasta 1 GHz.

El interés de este tipo de multiplexación con respecto a la WDM expuesta estriba en la mejor explotación de las propiedades de las fibras monomodo: aumento de la capacidad del enlace interurbano en torno a una longitud de onda en que la dispersión del material es nula.

La WDM presentaba limitaciones a causa de la atenuación no uniforme de la fibra en la ventana de multiplexación y debido a la estrechez del rellano de la curva de eficacia de la red de difracción. Por otra parte, la dispersión no nula de fibra que puede aprovechar a un canal como máximo, de forma que los demás deberán tener velocidades unitarias más reducidas si se desea evitar interferencias entre los símbolos. Es de señalar además que algunos laboratorios hablan de fibras de dispersión nula en toda una ventana con lo cual se podría optimizar la multiplexación en frecuencias ópticas.

Por eso analizaremos, mediante las tecnologías integradas a que antes hemos aludido, los parámetros que influyen en la selectividad, elemento esencial de esta técnica de multiplexación.

### 5.1 EL MULTIPLEXOR

El diseño del multiplexor está directamente relacionado con las derivas de los diodos láser utilizados. Merced de las diversas técnicas de control automático de frecuencia (control de la temperatura o de la corriente de inyección), se puede lograr una buena estabilidad de la frecuencia de un láser semiconductor y una buena pureza espectral.

Con las tecnologías de redes integradas podrían alcanzarse el resultado apetecido eligiendo adecuadamente los parámetros optogeométricos de la guía y de las redes.

La última etapa de integración del proceso consistía en realizar los diodos láser y el multiplexor sobre una misma microplaqueta por lo que el sustrato debe ser el GaAs (material de los láser).

### 5.2 EL DESMULTIPLEXOR.

En vista de la característica de selectividad exigida para la desmultiplexación en frecuencias ópticas, estimamos que podría cumplir esta función la *técnica de Heterodinación*, la cual permite el filtrado de máxima selectividad.

En un enlace monomodo interurbano de varios canales, con detección heterodina u homodina, la desmultiplexación puede efectuarse sin recurrir a un desmultiplexor dado que la heterodinación es de por sí el filtrado más selectivo.

Con independencia de las demás limitaciones, que no analizaremos, esta solución presenta ventajas con respecto a la desmultiplexación clásica con detección directa:

\* Una ganancia de 10 a 15 dB aproximadamente en la relación señal/ruido que sólo viene limitada por el ruido cuántico:

$$S/R = n P / h\nu \Delta f$$

donde

$n$  : rendimiento cuántico del fotodiodo

$P$  : potencia del láser (oscilador local)

$h\nu$ : energía del fotón a una frecuencia  $\nu$

$\Delta f$ : banda de paso de detección

- \* Un aumento de unos 20 kilómetros en el alcance del enlace.

Mediante la combinación de una desmultiplexación heterodina con una modulación digital de la frecuencia portadora con un salto de fase (MDP), se mejoraría aun más la sensibilidad del detector en unos 3 dB, lo cual representa un aumento suplementario del alcance de unos 7 Km. Por último con esta modulación se eliminaría un efecto no lineal creado en la fibra (efecto Brillouin), nefasto para las transmisiones coherentes.

### **5.3 APLICACION A UN ENLACE SUBMARINO.**

Actualmente parece que pueden aplicarse dos ventanas del espectro de las fibras ópticas a los sistemas submarinos. Estas ventanas son las de 1.3 y 1.5  $\mu\text{m}$  que reúnen todas las ventajas en materia de atenuación y dispersión mínimas. El gran problema que plantean los enlaces submarinos es el de la fiabilidad de los repetidores. Para el aumento de la misma es preciso recurrir a técnicas que permitan ampliar el paso de regeneración. Estimamos que no conviene recurrir a la WDM para aumentar la capacidad de un enlace submarino pues, al insertar MUL/DEX en un enlace de este tipo, el alcance de este disminuye en unos 10 Km. A nuestro juicio, el único modo de aumentar la capacidad de un enlace submarino consiste en utilizar varios sistemas en un cable. Con la multiplexación en frecuencias ópticas y la desmultiplexación heterodina u homodina con MDP resulta posible aumentar a la vez la capacidad y el paso de regeneración del enlace submarino. Al propio tiempo se suprimirá el efecto de Brillouin. También se puede introducir en el enlace amplificadores ópticos que por ser del todo compatibles con la desmultiplexación en frecuencias ópticas puede sustituir a los repetidores opto-eléctricos, lo cual no es posible con la WDM por razones de anchura de banda.

## 5.4 CONCLUSION.

El presente estudio sobre la WDM permite escoger entre varias tecnologías y definir orientaciones de interés tanto en una red de video-comunicación como de telefonía por fibras ópticas. Se pueden elegir ya las tecnologías siguientes:

\* La tecnología de filtro interferente "multidieléctrico" parece ser la que mejor se adapta a la red local video-magnética interactiva, dado que esta sólo necesita un número moderado de canales y una buena diafonía. Puede elegirse esta tecnología sea cual fuere el tipo de las fuentes luminosa (diodos láser o diodos electroluminiscentes).

\* La tecnología de "red fulgurada" (blaze), es muy apropiada para los enlaces monomodo interurbanos unidireccionales, en cuyo caso sólo deben considerarse preferentemente las fuentes láser monomodo. Está última condición también permite obviar el problema de dispersión de la fibra, que puede ser nula para una longitud de onda determinada, lo cual permitiría asignar un diodo láser multimodo a este canal.

Cuando los laboratorios realicen fibras con dispersión nula a lo largo de toda una venta de transmisión se facilitara la selección de las fuentes láser para WDM. En este caso la utilización de láseres monomodo haría posible un aumento considerable de la velocidad de cada cañal. La tecnología integrada a base de elementos dispersivos o de acopladores en tandem podría aportar soluciones interesantes para la multiplexación monomodo. En cuanto a las perspectivas en materia de multiplexación en frecuencias ópticas, valdría la pena seguir una vía de investigación consistente en estudiar dispositivos en óptica integrada basados en la reducción de las pérdidas en los materiales, aun demasiado importantes, lo cual podría dar lugar a la realización del MUL/DEX. Los resultados publicados sobre la realización de fotodiodos de bandas muy anchas y las investigaciones que se están llevando a cabo en el campo de amplificación en la banda de ondas milimétricas confieren mayores intereses a la desmultiplexación heterodina.

Por último, habrá que velar especialmente por la calidad de los canales de rango elevado, para tener en cuenta la diafonía Raman (transferencia de potencia del canal de longitud de onda más baja a los canales más elevados y, por ende, a un riesgo de diafonía entre canales) creado dentro de la fibra. En el momento actual cuando el paso de regeneración de un enlace monomodo es superior a la centena de kilómetros, la detección heterodina en un enlace interurbano sólo será realmente ventajosa si se utiliza para la desmultiplexación heterodina. Con esta técnica se pueden además introducir en el enlace amplificadores ópticos que serán los futuros repetidores "totalmente ópticos". Estas condiciones de explotación se justifican de manera más ostensibles en lo que respecta a los enlaces submarinos. También estimamos que esta técnica de multiplexación heterodina podría proporcionar soluciones interesantes en la futura red local de vide-comunicaciones a base de fibras monomodo, sobre todo la posibilidad de realizar selectores de canales de televisión.

## **6. BIBLIOGRAFIA**

- FIBER OPTICS COMMUNICATIONS SYSTEMS by GOVIN P; 1990; Editorial Printec Hall
- OPTOELECTRONICS AND LIGHTWAVE TECHNOLOGY, por Peter K. Cheo; 1990; Editorial, Printec Hall.
- FIBRAS OPTICAS TECNOLOGIA, APLICACIONES Y PROYECTOS, por M. Moriny; 1987.
- MULTIPLEXACION POR DIVISION DE LONGITUD DE ONDA APLICADA A LAS REDES LOCALES E INTERURBANAS DE FIBRA OPTICA, por T. Ben Meriem; de 1985. BOLETIN DE TELECOMUNICACIONES Vol. 52 VIII/1985.
- FIBER OPTICS COMMUNICATIONS, Por Lynne Green; 1990.
- Macleod H. A.: THIN FILM OPTICAL FILTERS, Adam Hilger Ltd. (Londres 1969).

