

---

---

## ***3. Dispositivos WDM no MMI***

---

---

*My peace of mind is often troubled by the depressing sense that I have too heavily borrowed from the work of other men.*

*Albert Einstein*

**E**n este tercer capítulo se hace un somero repaso a los multiplexores por división en longitud de onda más relevantes. En este capítulo sólo nos ocuparemos de los dispositivos que no se basan en la teoría de interferencia multimodal, pues éstos serán tratados con más detalle en el capítulo 6.

### **3.1 Guiaondas en forma de matriz**

#### **3.1.1 Interconector de N guías**

Los interconectores de N guías son multiplexores por división en longitud de onda formados por una rejilla en forma de matriz de guiaondas, guiaondas de entrada y salida y placas de guiaondas para enfocar [1].

La rejilla en forma de matriz está formada por guiaondas regularmente distribuidas que unen las dos placas y en las que la longitud entre las guías vecinas difieren en un valor constante  $\Delta L$ . La luz de entrada es radiada desde la primera placa y luego excita la matriz de guiaondas. Después de viajar a través de estas guías, la luz interfiere constructivamente en un punto focal de la segunda placa. La ubicación de este punto focal depende de la

longitud de onda pues el retardo de fase relativo en cada guíaonda viene dado por  $\Delta L/\lambda$ . La dispersión de la posición focal  $x$  con respecto a la longitud de onda  $\lambda$  viene dada por

$$\frac{dx}{d\lambda} = \frac{fm}{n_s d} \quad (3.1)$$

donde  $f$  es la distancia focal de la placa convergente,  $n_s$  es el índice de refracción de la región de la placa y  $d$  es la distancia entre las guíaondas de la matriz a su salida. El orden de difracción  $m$  viene dado por

$$m = \frac{n_c \Delta L}{\lambda} \quad (3.2)$$

donde  $n_c$  es el índice de refracción de la guíaonda de la matriz. Las múltiples señales WDM son de esta forma dispersadas y focalizadas simultáneamente a cada posición de la guíaonda de salida prescrita. De este modo las guíaondas en forma de matriz funcionan como una rejilla cóncava de difracción.

Estos dispositivos, con un tamaño total de algunos centímetros, son especialmente atractivos por su resolución en longitudes de onda, mejores que 1 nm y por su versatilidad, pudiendo funcionar selectivamente como se refleja en la Figura 3.1 y se indica a continuación:

- a) Multiplexor de varias longitudes de onda, combinándose todas las señales en una única guía de salida.
- b) Demultiplexor de varias longitudes de onda, de modo que cada señal de diferente longitud de onda presentada en la misma guía de entrada, avanzará por una salida diferente al resto.

- c) Multiplexor *add-drop*, función en la que simultáneamente tiene lugar la multiplexación y demultiplexación, pudiendo así extraer una o varias longitudes de onda del sistema, a la vez que incorporar otras nuevas.
- d) Interconector completo, es decir, las diferentes longitudes de onda de la luz presentada por cualquiera de las guías de entrada, es separada de acuerdo con su longitud de onda y conectadas a diferentes guías a la salida del dispositivo.

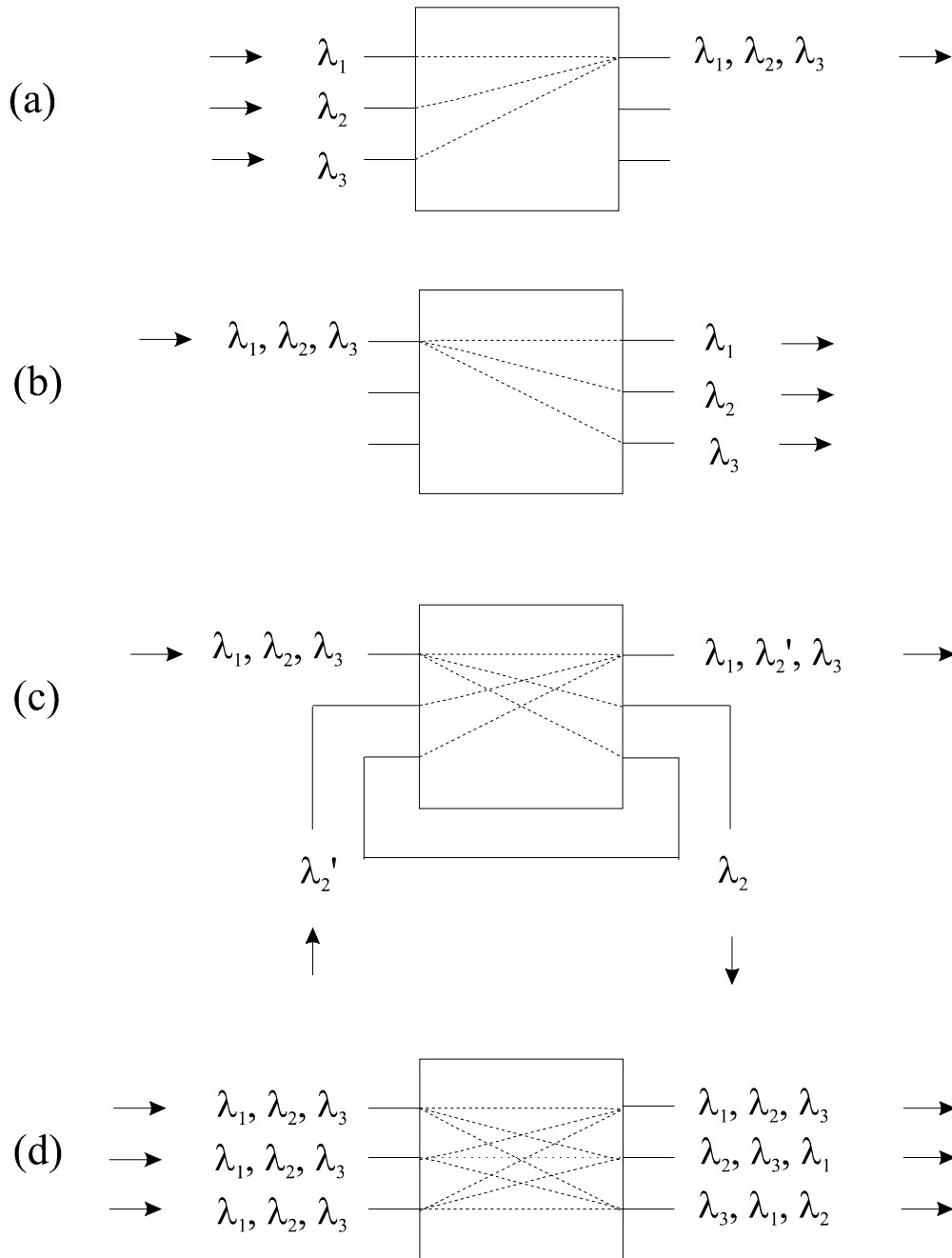
Puesto que la dispersión de la posición focal  $x$  con respecto a la longitud de onda  $\lambda$  es casi constante, las pérdidas de transmisión de estos multiplexores se incrementa monótonamente alrededor del centro de la longitud de onda en cada canal. Esto supone serias restricciones en la tolerancia a la longitud de onda de los diodos láser y requiere un control adecuado de la temperatura tanto para el multiplexor como para los láseres.

Estos dispositivos requieren de anchas respuestas espectrales, pues serán insertados en redes en donde las señales atraviesan varios filtros. Una de las formas más novedosas para aplanar esta respuesta es utilizar bocinas de guíaondas parabólicas en las guíaondas de entrada, pero hay otras propuestas [2].

El problema de la dependencia de la polarización, puede ser resuelto completamente con el método de la placa de onda, que mediante un buen diseño y una correcta fabricación, cancela completamente la variación entre los modos TE y TM, independientemente del nivel de birrefringencia de la guíaonda, introduciendo unas pérdidas despreciables.

Otro problema es, como se ha dicho, la dependencia con la temperatura. La longitud de onda emitida por los láseres semiconductores y la longitud de onda central en los filtros ópticos semiconductores tiene típicamente una dependencia con la temperatura de  $10^{-10}/^{\circ}\text{C}$  o mayor. Este valor es demasiado alto para los dispositivos ópticos ha ser utilizados sin control de la temperatura en sistemas WDM, en los cuales el espacio entre longitudes de

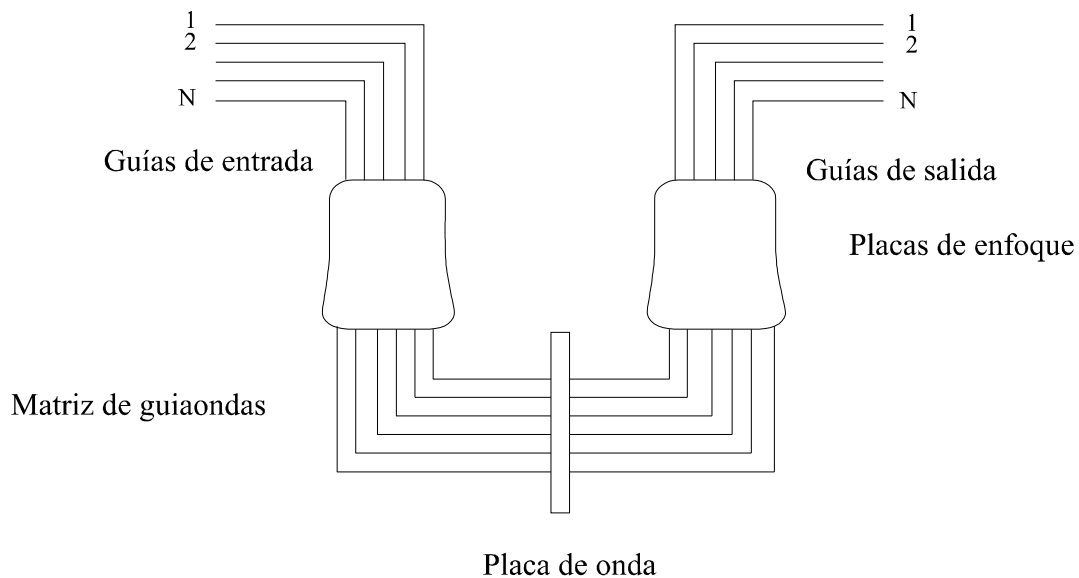
onda es típicamente de unos pocos cientos de gigahercios. Se ha propuesto recientemente una matriz de guíaondas con una dependencia inferior a  $0,1 \cdot 10^{-10} / ^\circ\text{C}$  para ocho canales en un sistema material de InGaAsP-InP [3].



**Figura 3.1: Funciones de la matriz de guíaondas.**

Estos multiplexores son los que han derivado en más dispositivos comerciales y los

que mejores resultados han presentado hasta la fecha. En [4] se presenta uno de los más avanzados teniendo en cuenta que a menor diferencia entre las longitudes de onda de los canales se tienen peores diafonías, debido a los errores de fase en la matriz de guías y a la necesidad de disminuir la distancia entre las diferentes guías. Se trata de un multiplexor  $128 \times 128$  con  $0,2 \text{ nm}$  de separación entre canales, utilizando guías basadas en silicio con condiciones de deposición mejoradas. El tamaño total del dispositivo es de  $58 \times 94 \text{ mm}^2$ , y el *phasar*<sup>1</sup> supone  $23 \times 17 \text{ mm}^2$  (el doble que para un multiplexor  $64 \times 64$  [5]), estando las guías separadas  $30 \text{ }\mu\text{m}$ , obteniendo una diafonía de unos  $-30 \text{ dB}$ .



**Figura 3.1:** Representación esquemática del dispositivo, donde se aprecia las diferentes partes que lo componen.

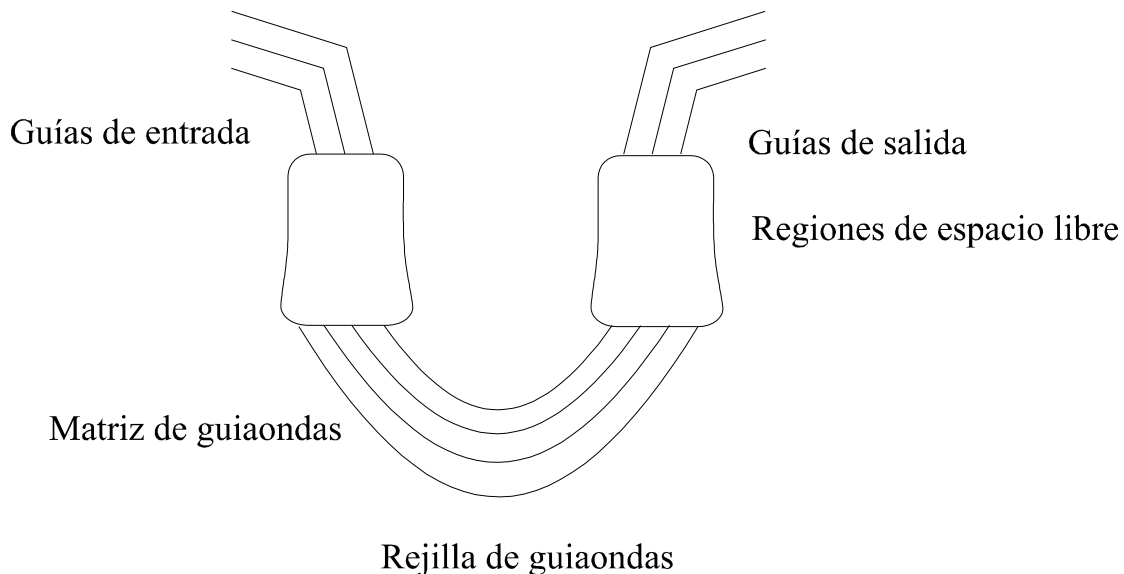
En la Figura 3.1 se representa esquemáticamente este multiplexor, donde se ven las  $N$  guías de entrada, las  $N$  de salida, las dos placas de guías de onda de enfoque y la rejilla en forma de matriz de guías de onda. La colocación exacta de las guías de entrada y de salida, así como de las que forman la matriz, se basa en la construcción del círculo de Rowland [6].

<sup>1</sup> Expresión inglesa de difícil traducción. Es el nombre que recibe el bloque del multiplexor necesario para desfasar las diferentes señales ópticas.

### 3.1.2 Multiplexor con regiones de espacio libre

Los multiplexores con regiones de espacio libre consisten en dos divisores ópticos de espacio libre interconectados por una rejilla de guiaondas, y son capaces de transmitir simultáneamente  $N^2$  canales ópticos con  $N$  longitudes de onda diferentes [7].

En estos multiplexores, cuando el haz que se propaga a través de las guiaondas de entrada, entra en la FPR<sup>2</sup>, deja de estar confinado lateralmente y se expande. A la salida de dicha región se tiene una rejilla de guiaondas, por las cuales el haz expandido se acopla, viajando a través de cada una de las guías hasta la región de espacio libre ubicada en la salida.



**Figura 3.2: Esquema de un multiplexor con regiones de espacio libre.**

La longitud de la matriz de guiaondas es elegida de modo que la diferencia de

---

<sup>2</sup> Acrónimo de la expresión inglesa *Free Propagation Region*, que se podría traducir como región de espacio libre.

caminos ópticos entre las guías adyacentes sea igual a un múltiplo entero de la longitud de onda central del multiplexor. Para esta longitud de onda los campos en las guías llegarán a la región de espacio libre de salida con la misma fase (sin considerar un múltiplo entero de  $2\pi$ ), y la distribución de campo es la misma que en la región de espacio libre de entrada. El haz divergente que entra en la región de espacio libre de salida, es así transformado en uno convergente, con igual amplitud y distribución de fase. La progresión lineal de fase afecta a la dirección de propagación de la onda convergente en la región de espacio libre de salida.

La Figura 3.2 representa la arquitectura esquemática de este dispositivo, con las zonas diferenciadas de entrada y salida, las dos regiones de espacio libre, y la matriz de guías. Las entradas y salidas, y la matriz, están formadas por 16 y 48 guías, respectivamente [7].

La resolución espectral de estos multiplexores  $N \times N$  es muy buena, y las pérdidas de inserción son bastante bajas.

### 3.1.3 Multiplexor con placas de difracción

Estos dispositivos forman las rejillas de difracción en una guía en forma de placa [8], y su sistema óptico es semejante al de un espectrómetro convencional, estando el espaciado mínimo entre longitudes de onda limitado a magnitudes del orden de bastantes nanómetros.

Este problema de la separación mínima entre longitudes de onda se puede solventar por medio de interferómetros Mach-Zehnder como un elemento óptico, consiguiendo separaciones del orden de milésimas de nanómetros. Pero en este caso el número de canales está limitado a 2, necesitando conectar en cascada varios interferómetros para conseguir un número de canales de 4, 8, 16, ...

La mejor solución propuesta para conseguir un número de canales elevado, son las rejillas de guiaondas en forma de matriz. Esta rejilla, como ya se ha dicho, consiste en una matriz de guiaondas, cuyas longitudes difieren en una constante  $\Delta L$ , que ha sido integrada en el mismo substrato que las guiaondas de entrada y salida y guías de enfoque.

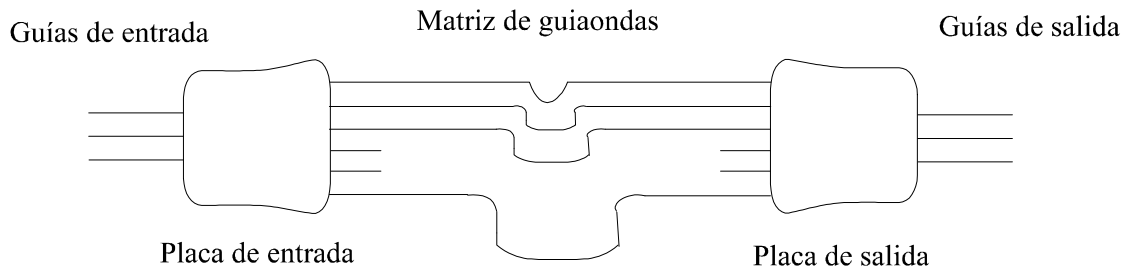
En la operación de demultiplexación, la luz es difractada en la placa y acoplada en la guiaonda que forma parte de la matriz. Cada una de estas guías se localiza en un círculo cuyo centro está al final de la guía de entrada central, y cuyo radio es la longitud focal de la placa.

La luz difractada entra con la misma fase en cada una de las guías de la matriz de guiaondas. Puesto que las guías en la matriz están suficientemente separadas para que no se acoplen entre sí y sus longitudes difieren en  $\Delta L$ , cada luz que se propaga de forma individual en la guiaonda llega a la salida con diferente fase.

El resultado de esa diferencia de fase de la luz es que el frente de onda sufre una inclinación dependiente de la longitud de onda. La luz procedente de la matriz de guiaondas se enfoca en las guías de salida mediante la placa de salida, y las posiciones de las guías de salida y de las de la matriz se basan en la construcción del círculo de Rowland [6]. Finalmente, la luz se demultiplexa en sus respectivas guías de salida.

En la Figura 3.3 se aprecia un esquema de la arquitectura descrita en [8], que opera con 28 canales separados 1 nm. La rejilla de guiaondas en forma de matriz se basa en  $\text{SiO}_2\text{-Ta}_2\text{O}_5$ , proporcionando una alta diferencia relativa de los índices de refracción  $\Delta$ , de 5 %. Gracias a este alto valor de  $\Delta$ , las guiaondas pueden curvarse con radios de 1 mm, y por lo tanto el multiplexor es susceptible de ser fabricado en un substrato muy pequeño de 1×2 cm. La dispersión angular que se consigue con las guiaondas utilizadas, es mayor que la obtenida mediante las guiaondas de cristal convencional, con valores de  $\Delta$  de un 1% o menores.





**Figura 3.3: Esquema de un multiplexor con placas de difracción.**

### 3.2 Multiplexor de tipo meandro

Los primeros multiplexores por división en longitud de onda apropiados para su integración monolítica, fueron las rejillas de Bragg y los interferómetros.

Las rejillas de Bragg tienen una única banda de paso con típicas anchuras a mitad de la banda de 1 nm o menor. Los interferómetros pueden ser diseñados para separaciones de longitud de onda de 1,3 a 1,55  $\mu\text{m}$ , pero con unas separaciones entre canales que pueden llegar a ser tan bajas como 10 o 20 nm.

El acoplador de meandro [9] está especialmente indicado para comunicaciones bidireccionales. Dicho dispositivo es un acoplador codireccional fuertemente asimétrico con variaciones periódicas de la separación entre las dos guías con las que trata. Exhibe una única banda de transmisión con características tipo  $\text{sinc}^2$ , y su principio de operación puede ser entendido mejor de una forma cualitativa con las bases de las ampliamente conocidas propiedades de los acopladores asimétricos rectos.

Si la luz se propaga a lo largo de un acoplador asimétrico, experimenta una transferencia de potencia con una longitud de batida de período  $\Lambda$  [10], dada por

$$\Lambda(\lambda) = \frac{\pi}{\sqrt{k^2(\lambda) + \delta^2(\lambda)}} \quad (3.3)$$

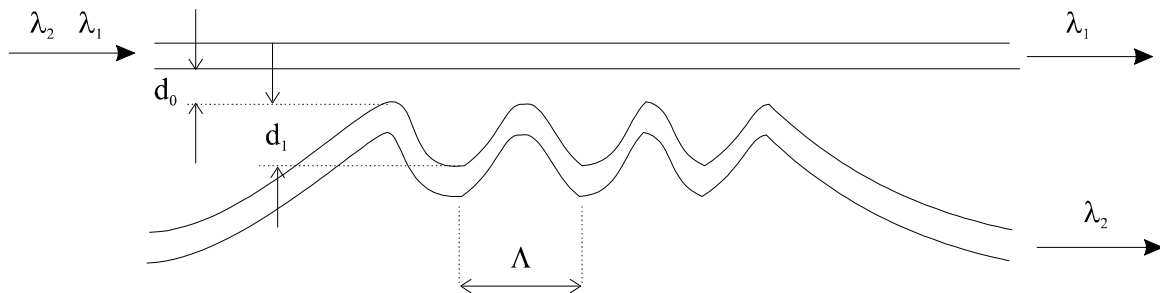
donde  $k$  es la constante de acoplo,  $\lambda$  es la longitud de onda en el vacío de la onda, y

$$2\delta(\lambda) = \beta_1(\lambda) - \beta_2(\lambda) \quad (3.4)$$

con

$$\beta_i = \frac{2\pi}{\lambda} n_{eff,i} \quad i = 1, 2 \quad (3.5)$$

$\beta_i$  son las constantes de propagación de los dos automodos, respectivamente, y  $n_{eff,i}$  es el índice de refracción efectivo del modo correspondiente. Para guías de onda fuertemente asimétricas, las  $\beta_i$  se aproximan a las constantes de propagación asociadas con las guías aisladas.



**Figura 3.4: Esquema de un acoplador de meandro. La representación no está a escala.**

El máximo porcentaje de potencia óptica que puede ser intercambiado entre las dos guías de onda asimétricas, alcanza el mínimo cuando es máxima la diferencia  $\delta$  entre las constantes de propagación  $\beta_i$ . De cualquier forma, se puede conseguir la completa transferencia de potencia entre dos guías asimétricas para una longitud de onda seleccionada,  $\lambda_c$ , si la constante de acoplo  $k(z, \lambda)$  varía periódicamente con una longitud de período  $\Lambda(\lambda_c)$  dada por (3.3), donde  $z$  es la dirección de propagación.

La variación periódica de  $k$  puede conseguirse de múltiples formas. La propuesta original es hacer un cambio escalonado, mientras que en [9] se ha adoptado el diseño

ilustrado esquemáticamente en la Figura 3.4, donde la distancia  $d$  entre dos guías varía de acuerdo con

$$d(z) = d_0 + d_1 \cos^2\left(\frac{\pi z}{\Lambda(\lambda_c)}\right) \quad (3.6)$$

Puesto que  $k$  exhibe una dependencia exponencial con  $d$ , incluso para variaciones moderadas de  $d$  (es decir,  $d_1 \approx d_2$ ) se asegura el correcto funcionamiento del dispositivo.

Las características esenciales del acoplador de meandro son su longitud de onda central  $\lambda_c$  y la anchura mitad de la banda de transmisión. Estos parámetros dependen de la composición de la capa de la guíaonda y de parámetros de diseño relacionados con las guíaondas.

### 3.3 Filtros con interferómetros Fabry-Perot

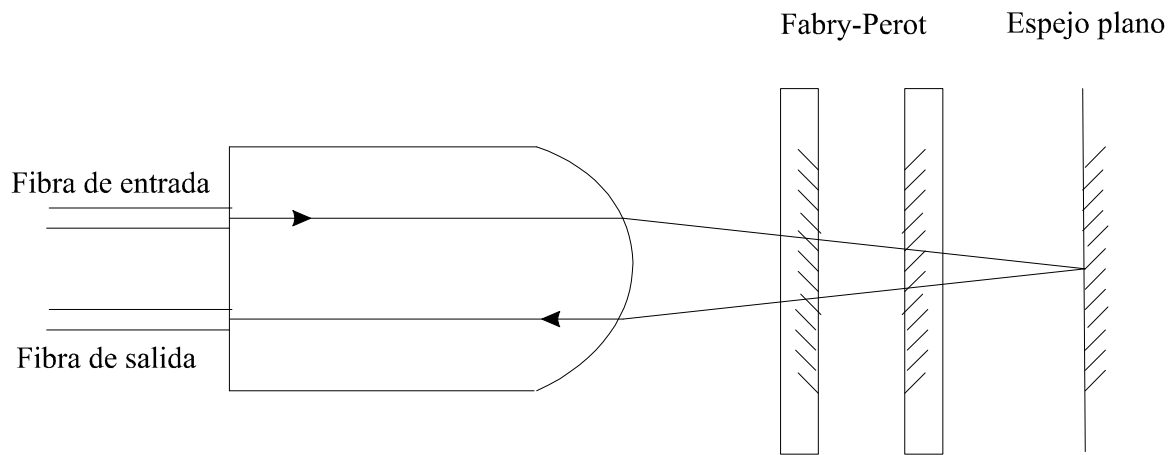
Los filtros ópticos sintonizables son componentes básicos para la demultiplexación de canales WDM en sistemas con esquema de detección directa. De entre todos los filtros ópticos sintonizables, los que mejor funcionalidad ofrecen son los Fabry-Perot (FP) [11], representado de forma muy esquemática en la Figura 3.5.

Un dispositivo Fabry-Perot elemental consta de dos espejos planos y paralelos, separados  $d$  y con índice de refracción  $n$  entre éstos. Se trata por lo tanto de una estructura muy sencilla, y en principio sin pérdidas cuando está en resonancia.

Cuando sobre el interferómetro FP incide un haz paralelo formando un ángulo externo  $\theta$  con la perpendicular a los espejos, la intensidad transmitida en la dirección  $\theta$  es

$$I = \left( \frac{T}{1-R} \right)^2 \frac{1}{1 + \frac{4R}{(1-R)^2} \sin^2(kd \cos \theta)} \quad (3.7)$$

siendo  $R$  y  $T$  los coeficientes de reflexión y de transmisión del espejo respectivamente.



**Figura 3.5: Representación esquemática de un interferómetro Fabry-Perot.**

De esta forma se consiguen un conjunto de picos de transmisión, de valor máximo  $(T/(1-R))^2$ , considerando que las pérdidas y dispersión debidas a los materiales son insignificantes. La separación entre picos sucesivos o FSR, que determina el rango de sintonía máximo, viene dada aproximadamente por

$$\Delta\lambda_{FSR} = \frac{\lambda_0^2}{2n_e L} \quad (3.8)$$

donde  $\lambda_0$  es la longitud de onda de transmisión (modo resonante),  $n_e$  es el índice de refracción de la cavidad y  $L$  su longitud.

La sintonización de uno de los picos de transmisión a la longitud de onda del canal a demultiplexar, se consigue cambiando la longitud del camino óptico en la cavidad, y se puede conseguir mecánica, térmica y electroópticamente. Puesto que los sistemas WDM

tienen una separación entre canales del orden de nanómetros, los interferómetros usados en este tipo de aplicaciones para seleccionar de forma no ambigua un canal, presentan una separación entre sus espejos del orden de decenas de micras.

La selectividad de un interferómetro FP se determina mediante la capacidad de discriminación del filtro o *finesse*, que es un parámetro nominalmente caracterizado por reflectancia de los espejos, y que se degrada por pérdidas de la cavidad ocasionadas, por ejemplo, por desalineamientos entre los espejos. La *finesse* viene dada por

$$\frac{1}{F^2} = \frac{1}{F_R^2} + \frac{1}{F_D^2} \quad (3.9)$$

donde  $F_D$  es la *finesse* de defectos que caracteriza las deficiencias en el *offset* angular del espejo y en las asperezas superficiales del mismo, y  $F_R$  es la *finesse* de reflexión, dada por

$$F_R = \frac{\pi\sqrt{R}}{(1-R)} \quad (3.10)$$

La gran ventaja de los filtros FP frente a los DFB, es, que el rango de selección de longitudes de onda y el ancho de banda de transmisión pueden ser diseñados independientemente. El rango de sintonía es linealmente dependiente del recíproco de la longitud del filtro e independiente de la reflectividad del espejo, mientras que el ancho de banda de transmisión sí que depende de ambos parámetros.

Estas características conducirán a un diseño flexible del dispositivo, ya que, por ejemplo, una gran anchura de banda con un gran rango de sintonías de longitudes de onda permite obtener un gran número de canales sin un control preciso de la longitud de onda. Además, mediante un filtro FP de dos secciones, se puede controlar también la transmitividad (ganancia) y la longitud de onda de transmisión independientemente.

Si el coeficiente de absorción de los espejos es muy pequeño (con recubrimientos

de dieléctrico), las pérdidas de inserción son prácticamente insignificantes para estos demultiplexores. En cuanto al coeficiente de potencia de diafonía, depende de  $(N/F)^2$ , siendo  $N$  el número de canales a demultiplexar, de modo que para mantenerla en niveles bajos es necesaria una alta *finesse*.

### 3.4 Referencias

- [1] H. Takahashi, K. Oda, H. Toba, and Yasuyuki Inoue. “*Transmission Characteristic of Arrayed Waveguide  $N \times N$  Wavelength Multiplexer*”. *Journal of Lightwave Technology*, vol. 13, no. 3, pp. 447-455, 1995.
- [2] Katnusari Okamoto. “*Integrated optical WDM devices*”. (ECIO'97) 8<sup>th</sup> European Conference on Integrated Optics, Stockholm, Sweden, pp. 62-67, 2-4 April 1997.
- [3] H. Tanobe, Y. Kondo, Y. Kadota, K. Okamoto and Y. Yoshikuni. “*Temperature insensitive arrayed waveguide gratings on InP substrates*”. *Photonics Technology Letters*, vol. 10, no. 2, pp.235-237, 1998.
- [4] K. Okamoto, K. Syuto, H. Takahashi, and Y. Ohmori. “*Fabrication of 128-channel arrayed-waveguide grating multiplexer with 25 GHz channel spacing*”. *Electronic Letters*, vol. 32, no.16, pp. 1.474-1.475, 1996.
- [5] K. Okamoto, K. Moriwaki, and S. Suzuki. “*Fabrication of  $64 \times 64$  arrayed-waveguide grating multiplexer on Si*”. *Electronic Letters*, vol. 31, no. 3, pp. 184-186, 1995.
- [6] M. Wu, and Y. J. Chen. “*Design considerations for Rowland circle gratings used in photonic integrated devices for WDM applications*”. *Journal of Lightwave Technology*, vol. 12, no. 11, pp. 1.939-1.942, 1994.
- [7] M. Smit, and Y. S. Oei. “*Photonic integrated circuits for multiwavelength applications*”. (WOCSDICE 97) 21<sup>st</sup> Workshop on Compound Semiconductor Devices and Integrated Circuits, La Haya (Países Bajos), invited paper, pp. 29-36, 25-28 May 1997.
- [8] H. Takahashi, S. Suzuki, and I. Nishi. “*Wavelength multiplexer based on  $\text{SiO}_2\text{-Ta}_2\text{O}_3$  arrayed-waveguide grating*”. *Journal of Lightwave Technology*, vol. 12, no. 6, pp. 989-995, 1994.
- [9] C. Bornholdt, F. Kappe, R. Müller, H.-P. Nolting, F. Reier, R. Stenzel, H. Venghaus,

and C. M. Weinert. “*Meander coupler, a novel wavelength division multiplexer/demultiplexer*”. Applied Physics Letters, vol 57, no. 24, pp. 2.517-2.519, 1990.

[10] H. Venghaus, C. Bornholdt, F. Kappe, H.-P. Nolting, and C. M. Weinert. “*Meander-type wavelength demultiplexer with weighted coupling*”. Applied Physics Letters, vol 61, no. 17, pp. 2.018-2.020, 1992.

[11] Takahiro Numani. “*1.5- $\mu$ m two-section Fabry-Perot wavelength tunable optical filter*”. Journal of Lightwave Technology, vol. 10, no. 11, pp. 1.590-1.596, 1992.