
6. Diseño de dispositivos WDM MMI

*An expert is one who knows more and more about less
and less.*

Nicholas Murray Butler.

En este capítulo se diseñarán un multiplexor por división en longitud de onda y un conmutador de longitudes de onda MMI-MZI, con sus módulos de desplazamiento de fase basados en el efecto termoóptico.

6.1 Dispositivos WDM MMI

Un novedoso tipo de multiplexores por división en longitud de onda son los denominados multiplexores¹ MMI-MZI. Consisten en un acoplador MMI² actuando como divisor, un interferómetro de múltiples ramas MZI³, y otro acoplador MMI actuando como combinador.

La teoría de interferencia multimodal o de autoimágenes se basa en la propiedad de las guías de onda multimodo por la cual un perfil de campo inicial de entrada, se reproduce

¹ Se habla indistintamente de multiplexores o demultiplexores, por el carácter bidireccional de los dispositivos MMI.

² Acrónimo de la expresión inglesa *Multi-Modal Interference*, que puede traducirse por interferencia multimodal.

³ Acrónimo de la expresión inglesa *Mach-Zehnder Interferometer*, que puede traducirse como interferómetro Mach Zehnder.

en una única o múltiples imágenes, en intervalos periódicos a lo largo de la dirección de propagación de la guía [1].

Los dispositivos ópticos basados en los efectos de interferencia multimodal, se caracterizan por [2]:

- Gran ancho de banda óptico.
- Insensibilidad a la polarización.
- Dimensiones aceptables.
- Buenas tolerancias de fabricación.
- Fáciles de fabricar, es decir, bajo coste en su fabricación a gran escala.

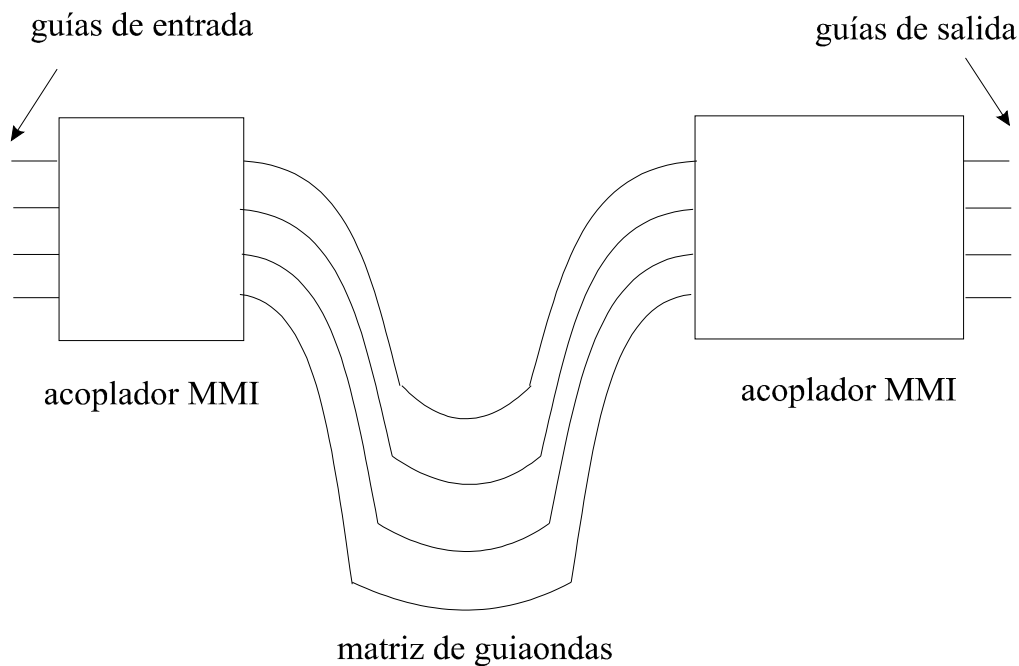


Figura 6.1: Representación esquemática de un multiplexor MMI-MZI.

A continuación se explica el principio general de funcionamiento de un dispositivo MMI $N \times N$, consistente en dos acopladores MMI $N \times N$ a su entrada y salida, conectados por una rejilla de guiaondas en forma de matriz con N guías monomodo. El esquema del dispositivo se representa en la Figura 6.1. Los acopladores MMI son insensibles a la

longitud de onda sobre el rango de longitudes de onda deseado. Un campo óptico en cualquiera de las entradas del acoplador MMI $N \times N$, es reproducido a las salidas del acoplador en forma de N autoimágenes con igual intensidad y fases diferentes. La luz que entra al dispositivo es por lo tanto distribuida por el primer acoplador MMI entre todas las guías de la matriz de guías. Los diversos caminos a través de la matriz, dan lugar a retardos de fase proporcionales a las diferencias de longitud entre sus distintas ramas. El segundo acoplador MMI distribuye la potencia incidente en cada una de sus entradas a todas sus salidas, donde tiene lugar la interferencia entre los diversos campos ópticos retardados entre sí. Las longitudes de las guías son elegidas de forma que haya interferencia constructiva para diferentes longitudes de onda en ciertas salidas del combinador. Para prevenir acoplamientos cruzados, las guías de la matriz de guías no deben cruzarse entre sí.

La distinción fundamental entre la rejilla de guías en forma de matriz de los multiplexores MMI y la de los multiplexores presentados en el capítulo 3, radica en que la diferencia de longitud entre las guías adyacentes en la matriz de un multiplexor MMI no es necesariamente un valor constante. En efecto, siguiendo el análisis dado en [3], la longitud L_j de la rama j de la matriz de un multiplexor MMI puede escribirse como

$$L_j - L_m \cong d_j \Delta L, \quad \text{para } j = 1, 2, \dots, N \quad (6.1)$$

donde L_m es la longitud del camino más corto, d_j es un entero determinado por las relaciones de fase del combinador $N \times N$ MMI, y ΔL es la longitud que origina un desplazamiento de fase de $2\pi/N$ entre dos canales de longitudes de onda adyacentes. Hay diversas combinaciones posibles de las longitudes de las distintas ramas de la matriz que satisfacen las condiciones de adaptación de fase del multiplexor, debiendo seleccionar aquellos d_j que den como resultado un dispositivo pequeño con la mejor respuesta espectral.

Cuando la potencia óptica se distribuye de forma equitativa entre las diferentes ramas de la matriz de guías, los lóbulos laterales en la transmisión espectral de un multiplexor MMI son relativamente altos. Utilizando dichos divisores, la porción relativa de potencia en una guía de la matriz se incrementa gradualmente al aumentar d_j hasta llegar a $d_j^{max}/2$, y después decrece gradualmente. Se ha demostrado que esta distribución de potencia no uniforme produce una supresión de los lóbulos laterales [4].

Centrándonos en el funcionamiento del multiplexor 1×2 , para que dos señales se combinen de la forma y manera adecuadas en el combinador MMI 1×2 , se han de verificar ciertas condiciones de desfase relativas a su entrada. Debido a que para el caso concreto de un divisor MMI 1×2 , las señales a su salida tienen la misma fase, el desfase necesario deberá producirse en la etapa formada por la matriz de guías. Para conseguir dicho desfase se utilizan guías curvas y tramos rectos, con distinta longitud de éstos últimos.

Todas estas ideas constituyen la base de los multiplexores diseñados en [1]. En la Figura 6.1 se tiene un esquema del multiplexor 1×2 . El divisor MMI tiene una anchura de $30 \mu\text{m}$, una longitud de $472 \mu\text{m}$, y las salidas están separadas $\pm 7,8 \mu\text{m}$ de su centro. Las guías monomodo que conforman el *phasar* tienen una anchura de $3 \mu\text{m}$. El combinador MMI tiene una anchura de $30 \mu\text{m}$, una longitud de $1.886 \mu\text{m}$, y sus entradas y salidas están separadas $\pm 7,8 \mu\text{m}$ de su centro. Tanto las guías monomodo como las multimodo son de salto de índice con $n_1 = 1,52$ para el núcleo y $n_2 = 1,46$ para el revestimiento; índices que se pueden obtener a partir de SiO_2 . Las guías curvas utilizadas, son las de la familia llamada *bend*, en concreto un *SB-bend* para el camino superior de mayor longitud y un *S-bend* para el camino inferior. El resultado es un dispositivo demasiado grande, de $11.645,8 \times 707,5 \mu\text{m}^2$, siendo la causa la necesidad grandes radios de curvatura, de $6.000 \mu\text{m}$, en los tramos curvos. Además, estas dimensiones aumentan considerablemente al considerar multiplexores de mayor número de salidas.

El multiplexor descrito en [5], es uno de los multiplexores MMI-MZI que mejores prestaciones ofrecen hasta la fecha. Se trata de un multiplexor 1×12 , con un divisor de potencia no uniforme, que trabaja con un espaciado entre canales de 1 nm en torno a los $1,55 \mu\text{m}$. Está diseñado en un sistema de guías de ondas InP-InGaAsP, con guiado fuerte, teniendo unas pérdidas de inserción de 1,7 dB, debidas principalmente a los acopladores MMI. Gracias a esta estructura de guías de ondas, se pueden utilizar radios de curvatura de tan solo $200 \mu\text{m}$ en las guías curvas de la matriz, dando lugar a unas dimensiones del dispositivo de $2 \times 3,2 \text{ mm}^2$.

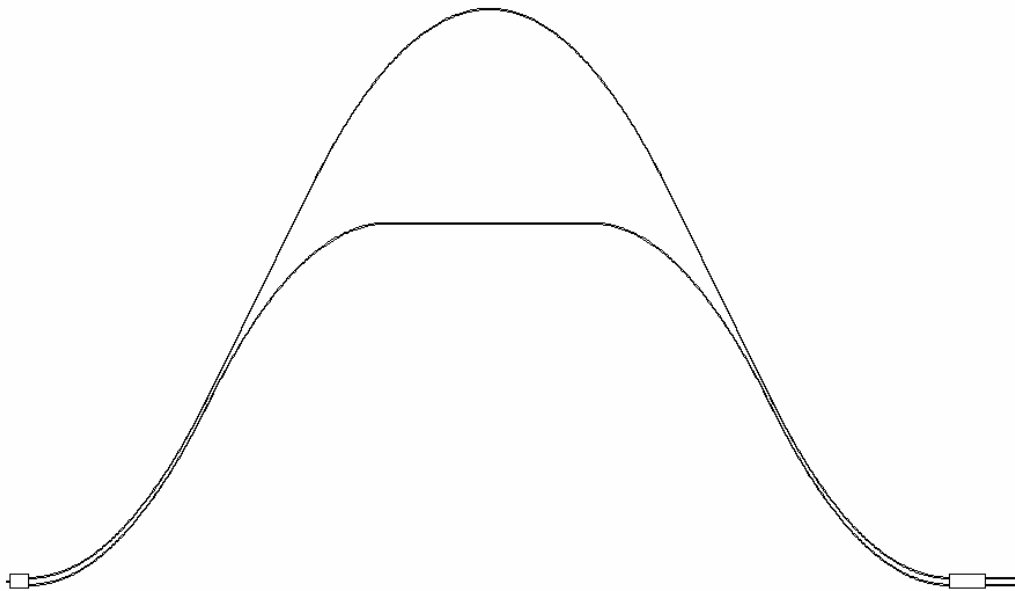


Figura 6.1: Representación del multiplexor por división en longitud de onda 1×2 diseñado en [1], donde quedan reflejadas las verdaderas dimensiones del dispositivo.

Añadiendo un desplazador de fase controlado electrónicamente a cada rama de la matriz, se consigue un dispositivo sintonizable, es decir, capaz de llevar a cabo, además de funciones de multiplexación y demultiplexación; funciones de conmutación, interconexión, e inserción/extracción de longitudes de onda.

De este modo, a una longitud de onda fija, el demultiplexor activo actúa de la misma forma que el conmutador electroóptico MMI descrito en [6], o el conmutador termoóptico MMI descrito en [7].

Un elemento de creciente importancia en las redes de transmisión óptica con señales WDM, es el OADM⁴. Este dispositivo permite la extracción selectiva de uno o varios canales correspondientes a diferentes longitudes de onda (de forma fija o seleccionable), y la incorporación de nuevas señales a las mismas longitudes de onda. Son, por lo tanto, muy atractivos en los equipos de encaminamiento de longitudes de onda y permiten que la red sea transparente a los formatos de las señales y a sus tasas binarias. Para llevar a cabo esta extracción e incorporación selectiva de señales se necesitan demultiplexores y multiplexores activos.

Uno de los OADM más interesantes de los fabricados hasta la fecha, es el presentado en [8]. Se trata de un OADM totalmente integrado, formado por cuatro AGWs (basados en multiplexores con placas de enfoque), y una matriz de conmutadores termoópticos. El dispositivo trabaja con 16 longitudes de onda espaciadas 26,4 nm en torno a 1,55 μm . Su tamaño total es de 87×74 mm², su diafonía de estado activo/pasivo es menor a -28,4 dB, y sus pérdidas de inserción son de 7,8-10,3 dB [9].

Un esquema de esta familia de OADMs, basados en multiplexores con placas de enfoque y matriz de guíasondas, se muestra en la Figura 6.2. En este caso, el dispositivo trabaja con 8 canales de entrada y 16 de salida.

También la fibra de rejilla de Bragg es un componente atractivo para la fabricación de OADMs, ya que proporciona una alta reflectividad a una cierta longitud de onda con pérdidas de transmisión insignificantes, posibilitando la selección de una determinada longitud de onda con baja diafonía entre canales adyacentes. Se han conseguido varios OADMs empleando fibras de rejilla, pero presentaban ciertas desventajas, como la

⁴ Acrónimo de la expresión inglesa *Optical Add-Drop Multiplexer*, de difícil traducción.

necesidad de una sintonía muy fina, alto coste y dificultades en la fabricación. No obstante, recientemente ha aparecido un nuevo tipo de OADM que utiliza fibras de rejilla de Bragg y divisores con control de la polarización, que puede fabricado fácilmente y con bajo coste, y muestra una alta estabilidad frente a perturbaciones [10].

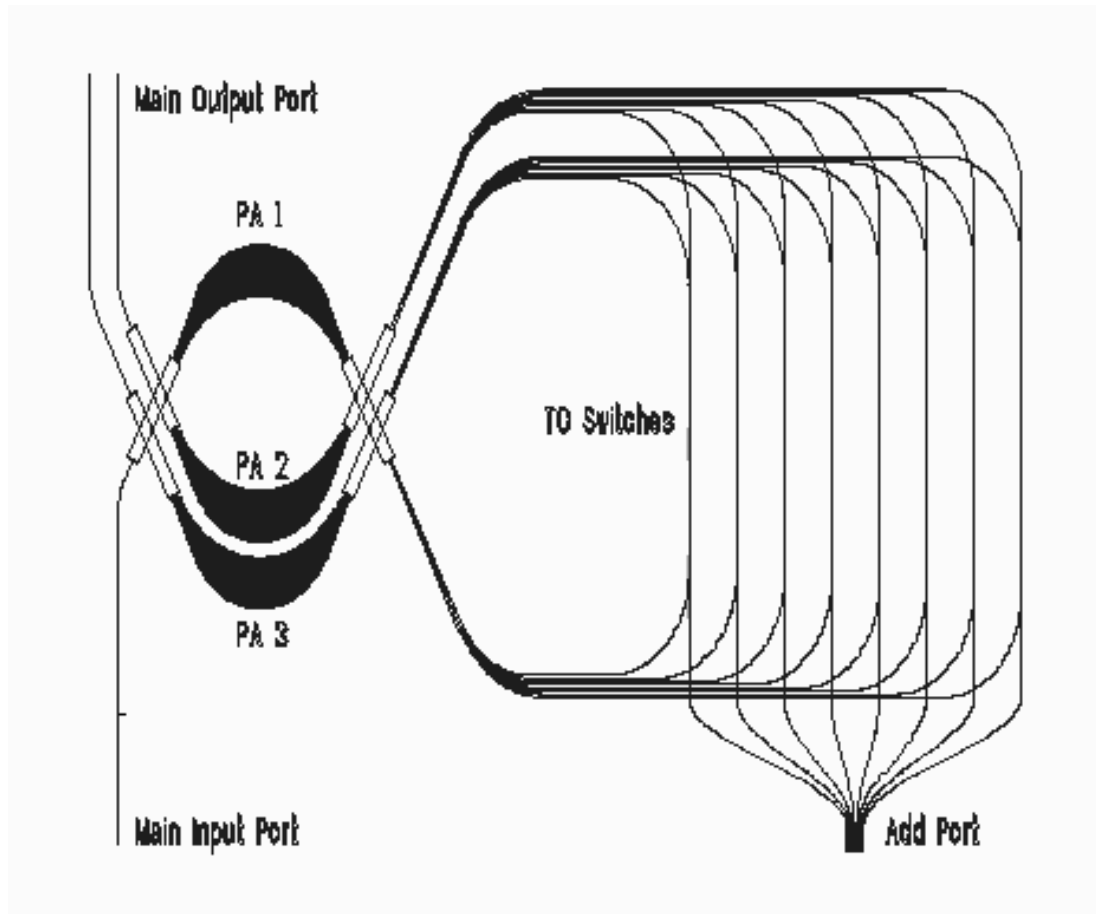


Figura 6.2: OADM 8x16 realizado mediante tres multiplexores AWG.

Nodos de adición y extracción de longitudes de onda semejantes a [8], se pueden fabricar mediante multiplexores y demultiplexores MMI activos, siguiendo el esquema de la Figura 6.3, pero con una complejidad mucho menor, resultando en un menor tamaño y un menor coste [11].

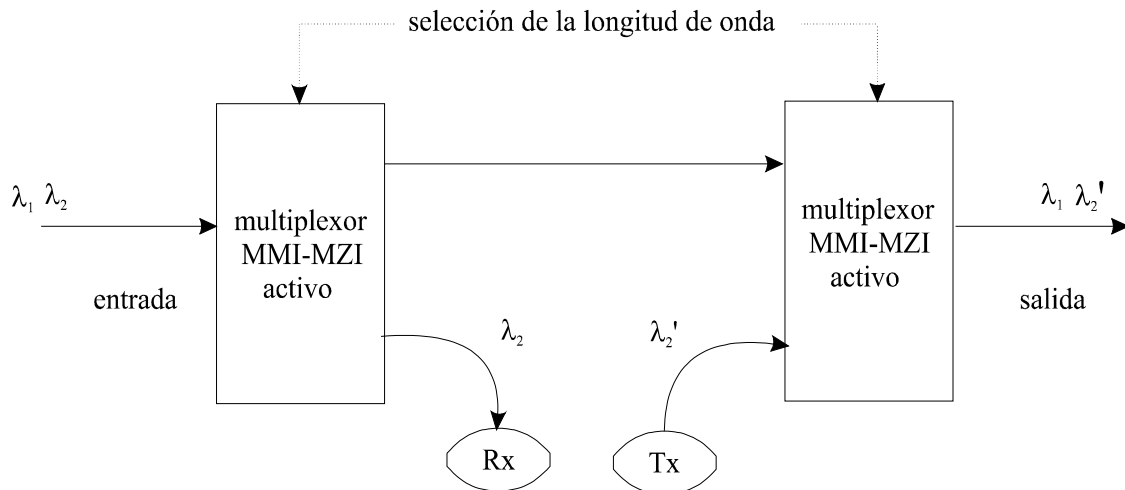


Figura 6.3: ADM 2x2 realizado mediante dos multiplexores 1x2 MMI-MZI.

6.2 Objetivos

Estudiadas las posibilidades de los dispositivos MMI, se han visto las limitaciones que presentan los multiplexores MMI pasivos. En efecto, estos dispositivos, compuestos por un divisor, un *phasar* y un combinador, presentan ciertas desventajas frente a otros en estudio y comercialización, estando todas ellas derivadas principalmente del diseño del *phasar*, a saber:

- Conseguir los desfases a partir de guías curvas, da lugar a dimensiones del dispositivo muy grandes y difícilmente integrables.
- Se trata de un dispositivo pasivo, lo cual supone menores tolerancias en el paso de la simulación a la fabricación y la imposibilidad de reconfigurar dinámicamente las señales a extraer de cada una de las salidas.

Teniendo presentes estos inconvenientes, sería interesante conseguir un multiplexor con las características reflejadas en la Figura 6.4 para el caso de un WDM 1x2, y cuyo funcionamiento es descrito a continuación. La luz de entrada al multiplexor se distribuye entre las dos guías que conforman la matriz de guías a través de un acoplador MMI 1x2 y después, cuando la luz se propaga a través de la matriz, se

recombina en un acoplador 2×2 para dar lugar a 2 salidas, cada una correspondiente a una longitud de onda. En cada rama hay un desplazador de fase controlado electrónicamente capaz de producir un cambio en ésta de 0 a π . Dicho desplazador puede estar basado en el efecto termoóptico [11] o electroóptico [12]; siendo en principio más interesante este primer efecto como se concluyó en el capítulo 5.

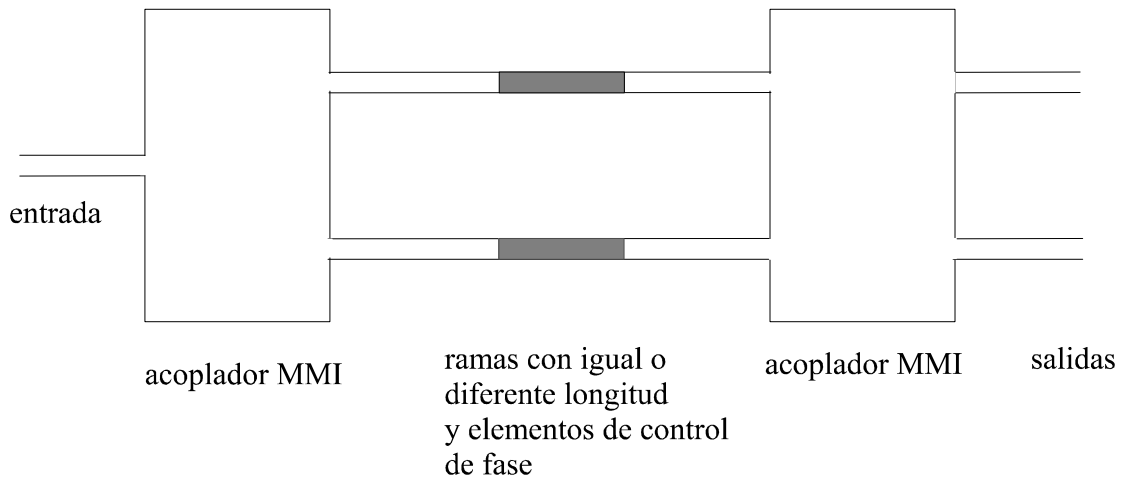


Figura 6.4: Principio del nuevo demultiplexor MMI-MZI sintonizable.

6.3 Diseño de un multiplexor MMI

En este apartado se procederá a derivar expresiones analíticas que nos ayuden a comprobar la viabilidad de los WDM 1×2 basados en el efecto termoóptico. El esquema del dispositivo a diseñar se muestra esquemáticamente en la Figura 6.5.

Suponemos para ello, que a la entrada del demultiplexor, tenemos una señal óptica multiplexada en longitud de onda, siendo dichas longitudes de onda λ_1 y λ_2 . La fase de una señal óptica tras recorrer una longitud de la guíaondas monomodo L , viene dada por $\phi = \beta L$, siendo β la constante de propagación de la onda guiada correspondiente al modo fundamental. Podemos expresar β como $\beta = (2\pi/\lambda)n_{eff}$, siendo λ la longitud de onda de la

luz en el vacío y n_{eff} el índice efectivo del modo guiado que se propaga, el cual depende de la longitud de onda y de las dimensiones de la guíaondas.

Si denotamos por ϕ_i^j la fase a la entrada i del combinador MMI 2×2 , para la longitud de onda λ_j y siendo L_H la longitud del calentador, tenemos que

$$\begin{cases} \phi_1^1 = \phi_2^1 + \Delta\beta_1^1 L_H \\ \phi_1^2 = \phi_2^2 + \Delta\beta_1^2 L_H \end{cases} \quad (6.1)$$

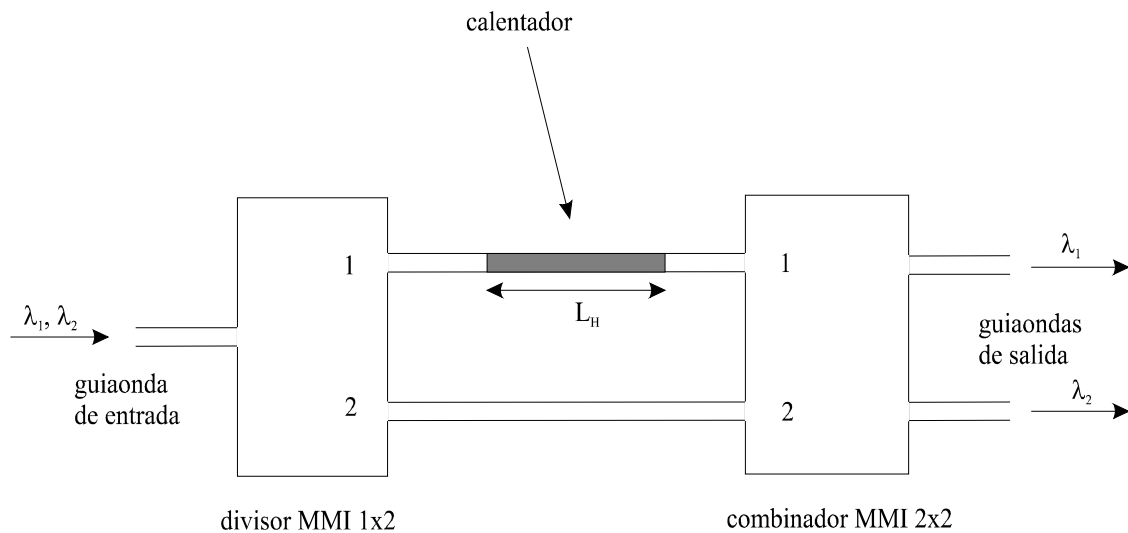


Figura 6.5: Esquema de un demultiplexor WDM MMI-MZI 1x2.

Considerando la nomenclatura reflejada en la Figura 6.5, la combinación de fases para obtener la deseada interferencia constructiva, en el caso del combinador 2×2 , es la siguiente [1]: si la señal presente en la entrada 1 está retrasada 90° respecto de la que está en la entrada 2, su suma aparecerá en la salida número 1; y cuando la retrasada 90° sea la señal de entrada 2, la señal aparecerá exclusivamente en la salida número 2. Estas condiciones aplicadas en las ecuaciones (6.1) pueden resumirse

$$\begin{cases} \Delta\beta_1^1 L_H = \frac{2\pi}{\lambda_1} \Delta n_{eff} L_H = (4m_1 + 1) \frac{\pi}{2} & m_1 = 0, 1, 2, \dots \\ \Delta\beta_1^2 L_H = \frac{2\pi}{\lambda_2} \Delta n_{eff} L_H = (4m_2 + 3) \frac{\pi}{2} & m_2 = 0, 1, 2, \dots \end{cases} \quad (6.2)$$

de modo que la ecuación de diseño del WDM 1×2 es

$$\Delta\beta_1^1 L_H - \Delta\beta_1^2 L_H = (\pi + 4m) = 2\pi \Delta n_{eff} L_H \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right) \quad (6.3)$$

donde $m = m_2 - m_1$. Evidentemente, el caso práctico que reviste mayor interés, por dar lugar a un dispositivo más reducido o a cambios menores del índice de refracción es el de menor m . Así tomando $m = 0$, haciendo $\Delta\lambda = \lambda_1 - \lambda_2$ (donde se supone que $\lambda_1 > \lambda_2$), y puesto que $\lambda_1 \approx \lambda_2$, llegamos a que

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{2\Delta n_{eff} L_H} \quad (6.4)$$

Los WDM diseñados en [1], tienen su etapa desfasadora basada en guías de diferente longitud. Es fácil demostrar que si ΔL es la diferencia entre la guía superior y la inferior, la ecuación de diseño queda

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{2n_{eff} \Delta L} = \frac{\lambda\pi}{\beta\Delta L} \quad (6.5)$$

En el diseño efectuado en [1] se tomaron como parámetros teóricos $\Delta\lambda = 10$ nm, $\lambda_1 = 1,55$ μm , $\lambda_2 = 1,54$ μm ; y calculando β a partir del simulador, se obtuvo $\Delta L = 78,33$ μm . Tras simular el dispositivo se realizaron las pequeñas correcciones pertinentes en estos valores: $\lambda_1 = 1,55104$ μm , $\lambda_2 = 1,54107$ μm ($\Delta\lambda = 9,97$ nm). Según la ecuación (6.5), tomando $\lambda = 1,545$, $\Delta\lambda = 10$ nm, y calculando $n_{eff} = 1,50885$ a partir del simulador,

tenemos que $\Delta L = 79,1 \mu\text{m}$; lo cual nos informa de la validez de la expresión de diseño que se ha deducido.

De la ecuación (6.5) se concluye también, que es preferible utilizar materiales con alto índice de refracción, ya que, como $n_2 < n_{eff} < n_1$, se conseguirá una rejilla de matriz de guiaondas más compacta.

Otra forma de conseguir un multiplexor más reducido, corroborada por los dispositivos descritos en la literatura, es utilizar *bends* de radios menores. Para ello es necesario un sistema de guiaondas con guiado fuerte, es decir, conseguir una alta diferencia relativa entre los índices de refracción del núcleo y revestimiento Δ [13], siendo en nuestro caso $\Delta = 3,98 \%$. No obstante, el BPM disponible hace uso de la aproximación de guiado débil, con lo cual no es posible simular estas estructuras.

A partir de la ecuación (6.4) comprobaremos si es posible construir un multiplexor como el mostrado en la Figura 6.5. Para ello, tomamos de la Tabla 5.1 el valor de $\partial n/\partial T$ para el SiO_2 , es decir, $10^{-5} / ^\circ\text{C}$, y consideramos una temperatura máxima de $25 ^\circ\text{C}$ en el núcleo de la guiaonda. Ateniéndonos a los resultados del capítulo 5, sabemos que la variación total del índice del núcleo de la guiaondas toma un perfil *gaussiano* de media $2,5 \cdot 10^{-4}$.

Un claro problema en el diseño es, que en el capítulo 5 se ha deducido un método aproximado para simular el efecto termoóptico en un simulador BMP 2D, considerando el perfil del índice de refracción del núcleo. Pero la ecuación (6.4) depende del valor promedio del índice de refracción efectivo. Por falta de información suponemos $\Delta n_{eff} = 2,5 \cdot 10^{-4}$.

Tomando como parámetros teóricos $\lambda = 1,545 \mu\text{m}$, $\Delta\lambda = 10 \text{ nm}$, y $L_H = 10.000 \mu\text{m}$, la variación del índice de refracción necesaria para poder implementar el multiplexor es $\Delta n_{eff} = 1,1935 \cdot 10^{-2}$. Evidentemente, aun con una longitud del electrodo tan grande, el

multiplexor que se pretendía realizar resulta ser inviable.

La solución podría estar en combinar el desfasaje originado por la aplicación del efecto termoóptico a través de un calentador de película delgada y el originado por la distinta distancia recorrida en las guías de la matriz. Las guías curvas se seguirían basando en *bends*, por sus características de pérdidas y de insensibilidad a la polarización de la luz. Es fácil demostrar que la consideración conjunta de estos dos mecanismos lleva a la ecuación de diseño

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{2(\Delta n_{eff} L_H + n_{eff} \Delta L)} \quad (6.6)$$

Tomando de nuevo $\lambda = 1,545 \text{ } \mu\text{m}$, $\Delta\lambda = 10 \text{ nm}$, $L_H = 1.000 \text{ } \mu\text{m}$, y $\Delta n_{eff} = 2,5 \cdot 10^{-4}$, se llega a que $\Delta L = 78,935 \text{ } \mu\text{m}$. Como vemos la diferencia en longitud necesaria entre los guías de la matriz es prácticamente igual a la del diseño de [1], y en cualquier caso, las dimensiones del multiplexor se verán incrementadas, pues el radio de los *bends* no es posible reducirlo y ahora es necesario introducir un tramo recto donde ubicar el calentador.

Las ventajas de utilizar un *phasar* activo, al menos para el caso de un multiplexor 1×2, se reducen por lo tanto a la posibilidad de tener un margen entre los valores simulados y los reales más alto⁵, aumentando las tolerancias de fabricación, y a su aplicación a la conmutación, interconexión, e inserción y extracción de longitudes de onda.

Por ello, en cuestión de diseño sólo interesa un valor de L_H suficiente una como para producir un desfase de 2π , suponiendo que se utiliza un único calentador. La longitud del calentador teóricamente y con las suposiciones realizadas, resulta ser $L_H = 1.550 \text{ } \mu\text{m}$.

⁵ En el caso real, el ajuste de los desplazadores de fase, se haría monitorizando la potencia del canal de longitud de onda deseada en una de las salidas y maximizando ésta sintonizando la potencia suministrada a cada calentador. Este proceso converge siempre en 3 o 4 iteraciones [11].

El esquema del dispositivo diseñado se ilustra en la Figura 6.6. Ambas guías de la matriz de guiaondas han de tener el mismo radio de curvatura, ya que no es posible determinar el desfase de una señal óptica en una guía curva.

En [11] se describe un multiplexor MMI 1×2 termoóptico, con un principio de diseño semejante al aquí derivado, salvo que se opta por utilizar una guía recta en la rama inferior de la matriz de guiaondas y un *S-bend* en la rama superior, con un radio de 3.000 μm , consiguiendo un dispositivo de menores dimensiones frente a aquel que utiliza dos *S-bends*. Los tiempos de subida y bajada son de 150 y 220 μs , respectivamente.

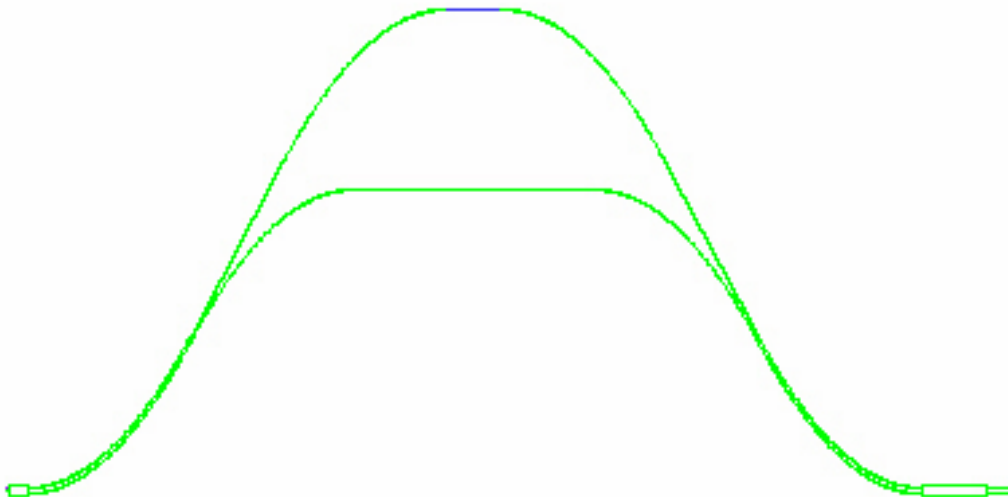


Figura 6.6: Esquema del diseño teórico del WDM 1×2, donde quedan reflejadas las dimensiones teóricas del dispositivo. En azul oscuro se representa el calentador.

Para multiplexores de más entradas o salidas, una idea interesante para lograr diferentes desfases en las señales ópticas que van por cada una de las guías de la rejilla, utilizando las mismas temperaturas, es utilizar calentadores de diferente longitud [12].

6.4 Diseño de un conmutador MMI

Como hemos visto, los resultados teóricos del diseño de un multiplexor activo MMI 1×2 no han sido demasiado satisfactorios, pues sigue siendo un dispositivo difícilmente integrable. Además, aun pudiendo simular el dispositivo, no hay forma alguna de controlar el desfase introducido por los calentadores, puesto que desconocemos qué variación en promedio inducen sobre el índice de refracción efectivo.

Otra posible aplicación de la teoría de interferencia multimodal, es el diseño de conmutadores. Seguidamente se demostrará la posibilidad de realizar un conmutador MMI 1×2 con el esquema mostrado en la Figura 6.7.

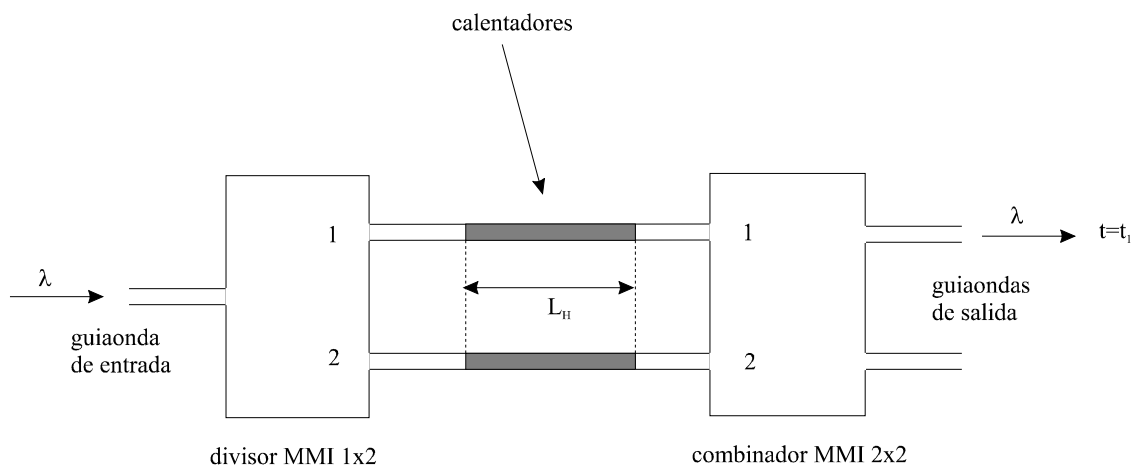


Figura 6.7: Esquema de un conmutador WDM MMI-MZI 1×2 .

Para que la señal de longitud de onda λ que entra al conmutador, salga en un determinado instante de tiempo t_1 por la salida 2 del conmutador, el cambio inducido por el calentador en el índice de refracción del núcleo de la guía superior de la matriz de guías y la longitud de dicho calentador, han de cumplir

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n_{eff} L_H = \frac{\pi}{2} \quad (6.7)$$

Considerando $\Delta n_{eff} = 2,5 \cdot 10^{-4}$, $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$, y con las mismas suposiciones que se hicieron al diseñar el multiplexor, se llega a que la longitud del calentador necesaria es de $1.550 \mu\text{m}$.

Evidentemente, puesto que las señales a la entrada de las dos guías de la matriz de guías tienen la misma fase y el dispositivo es simétrico respecto al centro de los dos acopladores MMI, la longitud del calentador sobre la rama inferior de la matriz para que la señal de entrada al conmutador se dirija en un instante t_2 por la salida 1, será también de $1.550 \mu\text{m}$. El esquema del diseño teórico del dispositivo se ilustra en la Figura 6.8.

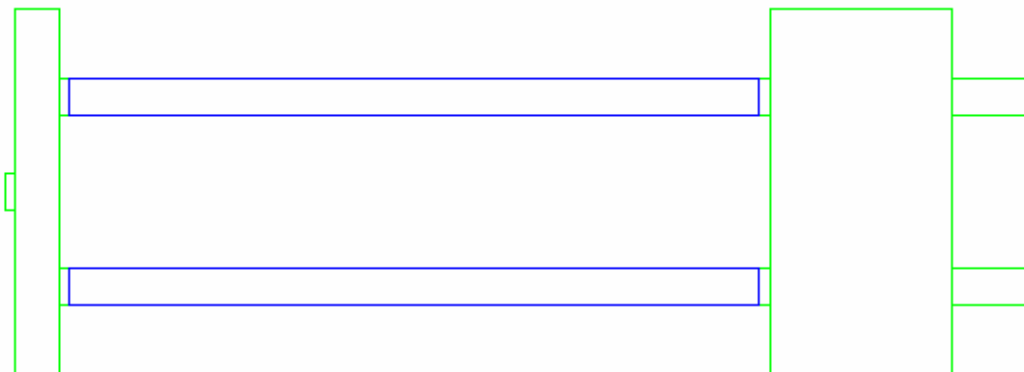


Figura 6.8: Esquema del diseño teórico del conmutador 1x2, donde quedan reflejadas las dimensiones teóricas del dispositivo. En azul oscuro se representan los calentadores.

Estos conmutadores, además de tener todas las ventajas de los dispositivos basados en la interferencia multimodal, se pueden conectar en cascada, y son, por lo tanto, muy interesantes para fabricar matrices $N \times N$.

Otra posible solución es la propuesta en [7], donde sólo se dispone el calentador en una de las ramas de la rejilla de matriz de guías. Se trata de un conmutador termoóptico MMI 2x2 sobre SiO_2 que trabaja a una $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$, y requiere bajas

potencias, del orden de 110 mW. La longitud del calentador es de 2 mm, consiguiendo una diferencia de fase de π para $\Delta T = 39$ °C. La distancia entre las guías de la matriz es tan sólo 4 μm , teniendo unas pérdidas de inserción de fibra a fibra de 1 dB. Los tiempos de respuesta del conmutador son de 150 μs el de subida, y de 180 μs el de bajada.

6.5 Referencias

- [1] Carlos Llorente. “*Estudio y diseño de multiplexores por división en longitud de onda (WDM)*”. Tesis Doctoral, Dpto. de Teoría de la Señal y Comunicaciones e Ingeniería Telemática, Universidad de Valladolid, 1997.
- [2] L. B. Soldano and E. C. M. Pennings. “*Optical multi-mode interference devices based on self-imaging: principles and Applications*”. Journal of Lightwave Technology, vol. 13, no. 4, pp. 615-627, 1995.
- [3] M. R. Paiam and R. I. MacDonald. “*Design of phased-array wavelength division multiplexers using multimode interference couplers*”. Applied Optics, vol. 36, no. 21, pp. 5.097-5.108, 1997.
- [4] M. Bachmann, P. A. Besse and H. Melchior. “*Overlapping-image multimode interference couplers with a reduced number of self-images for uniform and nonuniform power splitting*”. Applied Optics, vol. 34, no. 30, pp. 6.898-6.910, 1995.
- [5] M. R. Paiam and R. I. MacDonald. “*A 12-channel phased-array wavelength multiplexer with multimode interference couplers*”. Photonics Technology letters, vol. 10, no. 2, pp. 241-243, 1998.
- [6] R. M. Jenkins, J. M. Heaton, D. R. Wight, J. T. Parker, J. C. H. Birbeck, G. W. Smith and K. P. Hilton. “*Novel $1 \times N$ and $N \times N$ integrated optical switches using self-imaging multimode GaAs/AlGaAs waveguides*”. Applied Physics Letters, vol. 64, no. 6, pp. 684-686, 1994.
- [7] Q. Lai, W. Hunziker and H. Melchior. “*Low-power compact 2×2 thermo-optic silica-on-silicon waveguide switch with fast response*”. Photonics Technology Letters, vol. 10, no. 5, pp. 681-683, 1998.
- [8] Katsunari Okamoto. “*Integrated optical WDM devices*”. (ECIO'97) 8th European

Conference on Integrated Optics, Stockholm, Sweden, pp. 62-67, 2-4 April 1997.

[9] K. Okamoto, M. Okuno, A. Himeno and Y. Ohmori. “*16-channel optical add/drop multiplexer consisting of arrayed-waveguide gratings and double-gate switches*”. Electronics Letters, vol. 32, no. 16, 1996.

[10] S. Y. Kim, S. B. Lee, J. Chung, S. Y. Kim, Il J. Park, J. Jeong and S. S. Choi. “*Highly stable optical add/drop multiplexer using polarization beam splitters and fiber Bragg gratings*”. Photonics Technology Letters, vol. 9, no. 8, pp. 1.119-1.121, 1997.

[11] J. P. Weber, B. Stoltz and O. Öberg. “*A new tunable demultiplexer using a multi-leg Mach-Zehnder interferometer*”. (ECIO'97) 8th European Conference on Integrated Optics, Stockholm, Sweden, pp. 272-275, 2-4 April 1997.

[12] H. Bissessur, F. Gaborit, B. Martin, G. Ripoché and P. Pagnod-Rossiaux. “*Tunable phased-array wavelength demultiplexer on InP*”. Electronics Letters, vol. 31, no. 1, pp. 32-33, 1995.

[13] H. Takahashi, S. Suzuki, and I. Nishi. “*Wavelength multiplexer based on SiO₂-Ta₂O₃ arrayed-waveguide grating*”. Journal of Lightwave Technology, vol. 12, no. 6, pp. 989-995, 1994.