



UNIVERSIDAD
POLITECNICA
DE VALENCIA



Máster Universitario
en Tecnologías, Sistemas y
Redes de Comunicaciones

Desarrollo de una estructura interferométrica multimodo sintonizable mediante efecto termo-óptico en tecnología de fotónica de silicio

Autor: Álvaro Rosa Escutia

Director: Pablo Sanchis Kilders

Fecha de comienzo: 1/11/2010

Lugar de trabajo: Centro de Tecnología Nanofotónica

Objetivos —

Desarrollar un dispositivo basado en un interferómetro multimodo (MMI) compacto y sintonizable utilizando el efecto termo-óptico, a partir del cual se provocará un cambio en el índice de refracción en una zona concreta del MMI, cambiando la distribución de campo que hay en su interior y por lo tanto pudiendo sintonizar la potencia óptica de salida del dispositivo.

Metodología —

Estudio del MMI para comprender su funcionamiento, estudio del fenómeno de autoimágenes, estudio de la distribución de la fase del campo en el interior del MMI y aplicación del efecto termo-óptico para provocar un cambio de fase y provocar la sintonización. Diseño de MMIs con salida cruzada (para mantener el menor tamaño posible) y simulación de estos, aplicando más tarde el efecto termo-óptico para ver como evoluciona la sintonización.

Desarrollos teóricos —

Desarrollo para encontrar la fase en puntos clave del MMI y así poder comprender y aplicar la sintonización, así como encontrar el cambio de fase necesario y diseñar los electrodos óptimos.

Desarrollo de prototipos y trabajo de laboratorio —

Se han fabricado varias muestras de MMIs sintonizables, en *modo pasivo* su comportamiento era el que se esperaba. Por otra parte en modo activo se han tenido algún problemas ya que no solo influye el MMI, si no que también hay que adecuar el calentador para que proporcione el aumento de temperatura necesario y consuma la menor potencia posible, y en algunas muestras hubo algunos calentadores que se quemaron antes de llegar al punto en el que se podría considerar que se han intercambiado las salidas del MMI.

Resultados —

Pese a los contratiempos sufridos por algún electrodo quemado, los resultados sobre el MMI sintonizable han sido positivos. Se ha demostrado en laboratorio que es posible conmutar la salida y los resultados en cuanto a pérdidas de inserción y transmisión han sido los que se esperaba.

Líneas futuras —

Investigar sobre nuevos materiales que puedan permitir un mayor cambio de índice en un menor espacio de tiempo y de longitud, ya sea por soportar mayores temperaturas o por poseer un coeficiente termal mayor que el del silicio. Así como investigar directamente sobre el electrodo, para poder optimizarlo (su forma, principalmente) y que disipe la mayor cantidad de calor posible consumiendo una potencia (eléctrica) mínima.

Publicaciones —

A.Rosa, A.M.Gutiérrez, A.Brimont, A.Aamer and P.Sanchis, “A silicon-based tunable multimode interferometer using the thermo-optic effect”, European Conference on Integrated Optics(ECIO), 2012, Sitges, Spain

Abstract —

A lo largo de este trabajo se demostrará la posibilidad de poder realizar un interferómetro multimodo (MMI) sintonizable mediante el efecto termo-óptico en tecnología fotónica de silicio. Se trata de un MMI 2x2, en el cual se introduce potencia óptica en una de las dos entradas saliendo también dicha potencia por uno sólo de los dos puertos de salida. Utilizando el efecto termo-óptico, se cambiara la fase de una de las autoimágenes que se forman en el interior del MMI, modificando el patrón de interferencia y cambiando de este modo la potencia en los puertos de salida. Se han realizado varias simulaciones para comprobar el resultado teórico y para optimizar el diseño del MMI y así minimizar las perdidas. Después de las simulaciones se ha pasado a fabricar y medir varios MMIs, y se ha demostrado que es posible conseguir sintonización en el MMI usando el efecto termo-óptico.

ÍNDICE

I. Introducción	4
I.1. Motivación.....	4
I.2. Objetivos	5
II. Guías ópticas	7
II.1. Tipos de guías	7
II.2. Propagación y efecto TIR	8
II.3. Guías monomodo y multimodo (distribución de fase).....	9
III. El interferómetro multimodo (MMI)	10
III.1. Autoimágenes del MMI	10
III.2. El MMI como divisor/acoplador de potencia	11
III.3. El MMI sintonizable	12
III.3.1. Distribución de las autoimágenes y sintonizabilidad	12
III.3.2. Efecto termo-óptico	13
IV. Simulaciones del MMI sintonizable	16
IV.1. Introducción al programa Rsoft.....	16
IV.2. Simulaciones y resultados	19
V. Fabricación y medidas del MMI sintonizable	23
V.1. Fabricación.....	23
V.2. Resultado de medidas en pasivo	25
V.3. Resultado de medidas en activo	29
VI. Conclusiones y líneas futuras	32
Agradecimientos	32
Referencias	32
Anexos (se debe incluir las publicaciones que el autor tenga relacionada con la tesina y los justificantes de aceptación en el caso que no hayan sido publicadas todavía los artículos/congresos)	33

I. Introducción.

I.1. Motivación

En los últimos años, el mundo de las telecomunicaciones ha crecido exponencialmente tanto en número de usuarios como en la demanda de ancho de banda para aplicaciones que requieren una mayor tasa de transmisión, para una mayor calidad de servicio ofrecido. En cierta medida, ha sido posible satisfacer este aumento de capacidad gracias a la introducción de la fibra óptica en las redes de comunicaciones cableadas. Su explotación ha permitido el aumento del número de usuarios de las redes y el aumento de las prestaciones de las aplicaciones que cada vez requerían de un mayor ancho de banda para poder realizar la tarea para la que habían sido creadas.

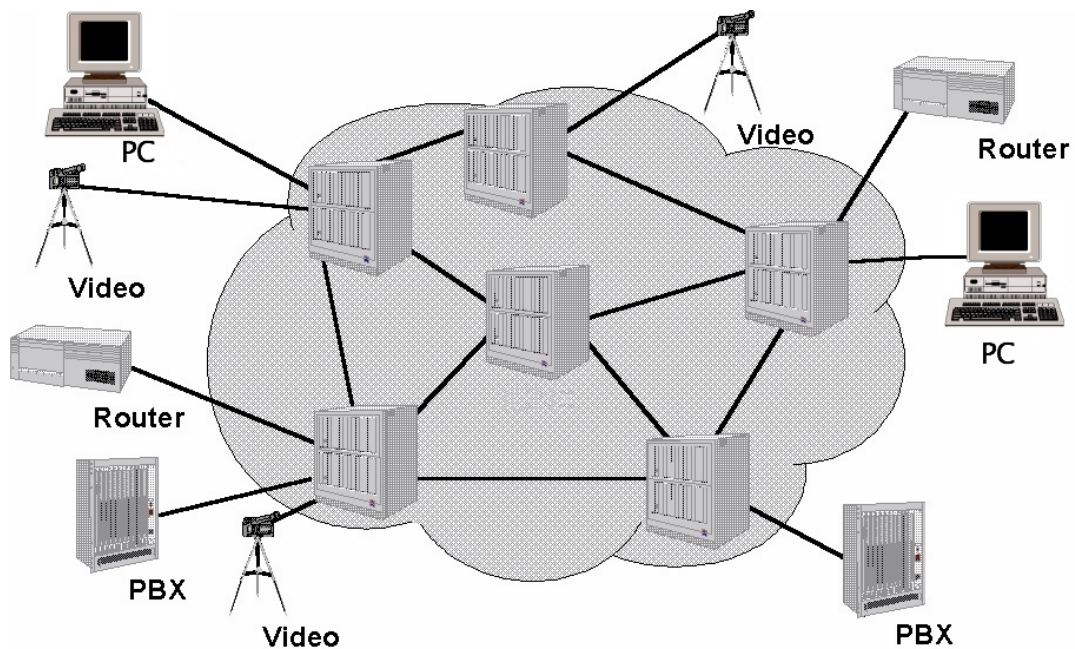


Fig.1: Red de comunicaciones que ofrece distintos servicios

Pero el crecimiento es continuo y las redes existentes están llegando al límite de su capacidad, en parte debido a que estas redes están controladas por equipos electrónicos (routers, módems, ordenadores y demás dispositivos). Estos equipos transforman la señal óptica en eléctrica, bajándola a frecuencia de trabajo electrónicas con mucho menos ancho de banda que en las frecuencias ópticas, perdiendo prestaciones y haciendo de cuello de botella en las redes donde el medio de transmisión es la fibra óptica.

Internet no va a parar de crecer y con la llegada de nuevas tecnologías como el video en 3D o la alta definición, servicios de almacenamiento o sistemas operativos donde todo funciona remotamente desde internet, hacen una necesidad eliminar el cuello de botella para aumentar la capacidad de la red.

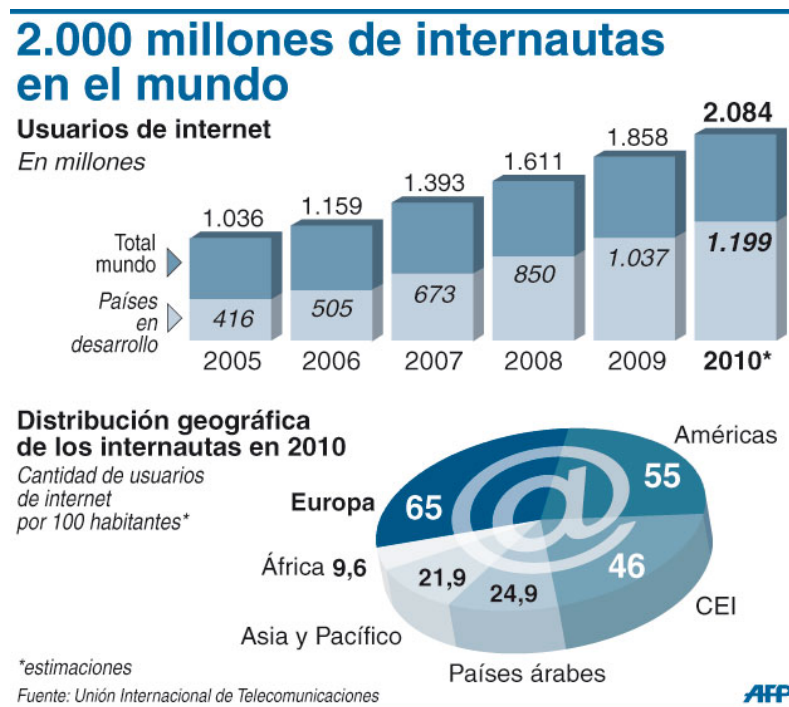


Fig. 2: Crecimiento de internet en los últimos años

De este continuo aumento de usuarios unido a la mayor demanda de ancho de banda de cada usuario para tener servicios de última tecnología, surge la necesidad/motivación de crear una nueva tecnología que pueda permitir el avance de las redes para poder dar acceso a los nuevos usuarios y a los nuevos servicios que se van a ofrecer.

I.2. Objetivos

A largo plazo lo que se pretende es que los dispositivos electrónicos pasen a ser dispositivos ópticos y esto pasa actualmente por el desarrollo y la investigación sobre tecnología de circuitos fotónicos integrados, con el fin de crear chips todo-ópticos que puedan servir para sustituir a los actuales circuitos micro-electrónicos.

Existen distintas tecnologías para fabricar dispositivos nanofotónicos, pero entre ellas la que más destaca es la basada en el silicio, gracias a su compatibilidad en los procesos de fabricación de la tecnología CMOS, empleada para fabricar los microchips de los dispositivos electrónicos actuales. Esta compatibilidad facilitaría la fabricación de dispositivos nanofotónicos a gran escala, abaratando su coste y además permite la integración de dispositivos electrónicos y fotónicos dentro de un mismo chip.

Para el desarrollo de estos dispositivos fotónicos, existen 2 métodos de fabricación: el guiado por contraste de índices y el guiado por cristales fotónicos. Un cristal fotónico es una estructura periódica a través de la cual se puede evitar la propagación de un cierto margen de longitudes de onda. Por ejemplo, una capa de silicio agujereada periódicamente, donde el tamaño de los agujeros y su disposición pueden marcar la posición del *bandgap* (banda de frecuencias donde no hay propagación). Aunque realmente el guiado por cristal fotónico practicamente no se usa. El guiado más utilizado es por contraste de índices.

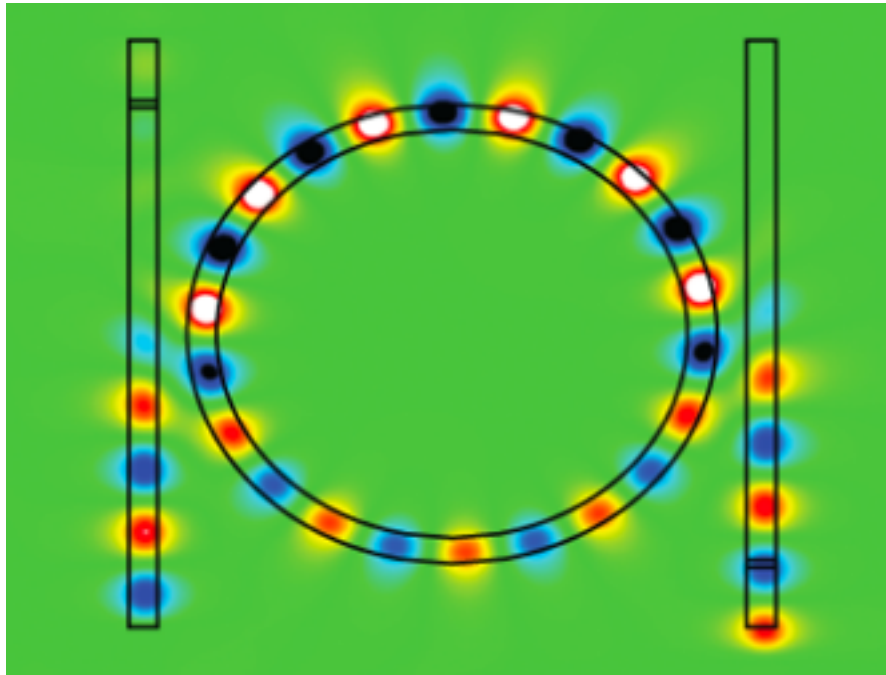


Fig. 3: Anillo resonante guiado por contraste de índices.

En caso de guiado por contraste de índices, en este caso el guiado se basa en la propagación por el efecto TIR (reflexión interna total) debido a la diferencia de índices entre el núcleo y la cubierta. La tecnología empleada se denomina SOI (*silicon on insulator*) y se basa en utilizar silicio para el núcleo de la guía y el sílice (Óxido de silicio) para la cubierta, permitiendo de esta manera dotar a la guía de un alto contraste de índices puesto que el índice del silicio es aproximadamente 3.45 y el del sílice de 1.45. Cuanto mayor sea el contraste de índices mayor será el confinamiento del campo en el núcleo, obteniendo así unas menores pérdidas en propagación.

A lo largo de este proyecto vamos a ver como se ha diseñado el MMI (el cual está basado en una guía multimodo) sintonizable con guiado por contraste de índices, con tecnología SOI y aprovechando las características térmicas del silicio, para provocar el efecto termo-óptico que dotará al MMI de sintonizabilidad.

II. Guías ópticas.

Una guía óptica es una estructura física que permite el guiado de ondas electromagnéticas en el espectro óptico, ya sea por contraste de índices o como cristal fotónico.

II.1. Tipos de guías

Las guías ópticas se pueden clasificar de diferentes formas. En este caso las vamos a clasificar según su geometría y transmisión modal.

Según su geometría podemos diferenciar entre guía planar y guía rectangular:

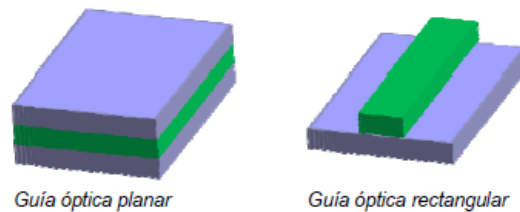


Fig. 4: Guía óptica planar y guía óptica rectangular.

En la guía óptica planar solo existe confinamiento en una dirección del espacio y en la guía rectangular, en 2 y por lo tanto sirve mejor como guía óptica la guía rectangular, la cual también podemos diferenciar entre varias clases según su geometría: channel o strip (a), rib (b), cristal fotónico (c) o guía slot(d):

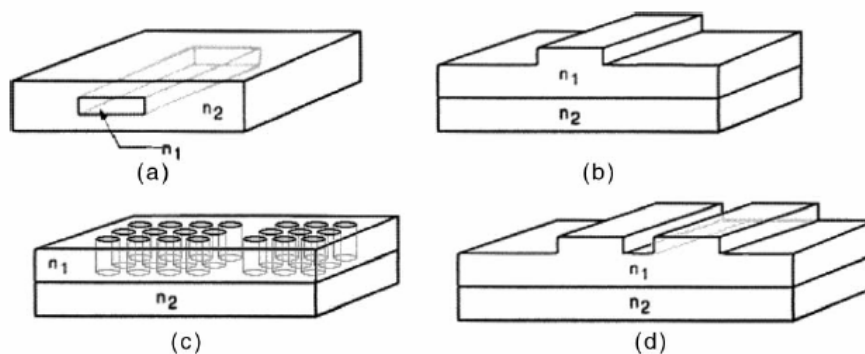


Fig.5: Tipos de guías ópticas rectangulares.

La guía strip sería la del caso (a) pero la cubierta superior a la guía sería de aire en lugar de otro material (como la del ejemplo de guía óptica rectangular), mientras que las guías de tipo channel son concretamente la del caso (a), que serán con el tipo de guías con el que se trabaja en este proyecto, donde el núcleo es de silicio y va cubierto completamente por sílice (óxido de silicio). Se trabaja con este tipo de guías puesto que permiten bajos radios de curvatura, un alto confinamiento

del campo y es posible una alta integración de este tipo de guías gracias a las tecnologías de fabricación empleadas. Las guías de tipo slot presentan un confinamiento mayor, pero por el contrario presentan unas mayores pérdidas a causa de la rugosidad.

II.2. Propagación y efecto TIR (Reflexión interna total)

El guiado por contraste de índices se produce gracias al efecto de la reflexión total interna, que se tiene lugar cuando los rayos que viajan por el núcleo de la guía, son reflejados totalmente por las paredes de esta quedando “atrapados” en su interior y propagándose sobre el eje longitudinal de la guía.

Este efecto se puede entender mediante el estudio de la *ley de Snell* sobre un corte perpendicular de una guía óptica planar, que simplifica el caso gracias a su geometría.

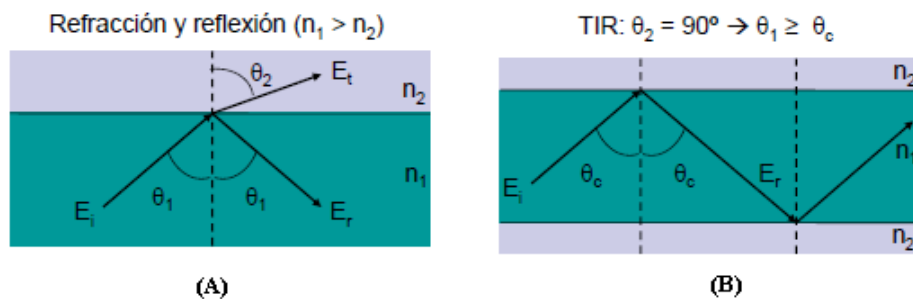


Fig.6: Ley de Snell sobre una guía óptica

En el caso (A) vemos gráficamente la ley de Snell, con los rayos reflejados y refractados, que responden a su ecuación:

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

Para que el campo refractado sea cero, el ángulo θ_2 debe de ser de 90° , en este caso suponiendo que los índices de refracción son constantes, hallaremos el ángulo crítico a partir del cual se da el fenómeno de reflexión interna total, ya que en este caso no existe rayo refractado. De este modo, el rayo viaja rebotando por las paredes del núcleo.

El valor de la constante de propagación, en este caso, del rayo propagado por la guía óptica se puede definir de la siguiente manera:

$$k_0 = \frac{2\pi}{\lambda}$$

Del mismo modo podemos definir las constante de propagación para cada dirección del espacio, teniendo en cuenta que en este caso disponemos de 2 ejes, llamaremos z al eje horizontal e y al transversal y se podrán definir las constante de propagación para cada eje del siguiente modo:

$$k_z = n_1 k_0 \sin(\theta_1)$$

$$k_y = n_1 k_0 \cos(\theta_1)$$

Obteniendo para $\theta_1=0$ la constante de propagación del modo fundamental, ya que este se propagaría por la guía sin reflexiones en las paredes, directamente en la dirección de propagación (en este caso, sobre el eje z). Así pues, queda demostrado que se puede relacionar el ángulo de incidencia del rayo con los distintos modos de propagación en una guía óptica.

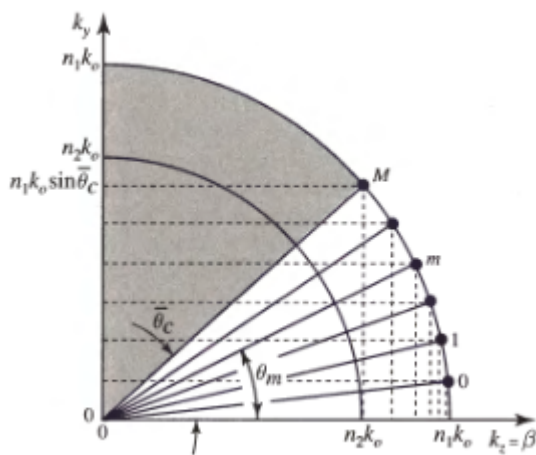


Fig.7: Vemos la relación que hay entre el ángulo del rayo que se transmite a través de la guía y el modo de propagación concreto para cada rayo, hasta llegar al ángulo crítico.

II.3. Guías monomodo y multimodo

La característica principal de una guía monomodo es que, debido a sus dimensiones (y según el material en que se haya fabricado), solo se propaga a través de ella el modo fundamental. Esto significa que el rayo viaja a través de la guía en línea recta, sin reflexiones o con reflexiones de ángulos tan pequeños que su efecto resulta despreciable.

Las guías multimodo tienen una anchura mayor que permite mayores ángulos de reflexión y por lo tanto la excitación de un mayor número de modos además del fundamental.

Para determinar el número de modos TE soportados por una guía dieléctrica vamos a observar la siguiente figura:

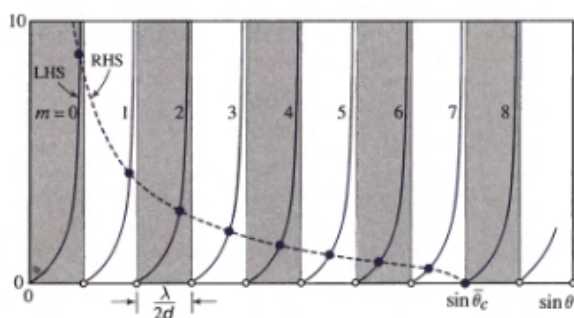


Fig.8: El eje de abscisas está dividido en intervalos de $\lambda/2d$ y dentro hay un punto que indica que

a partir de ahí se propaga el siguiente modo. Esto se cumple mientras $\sin\theta \leq \sin\bar{\theta}_c$.

De este modo, el número de modos máximos propagados en una guía será el menor entero superior al resultado $\sin\bar{\theta}_c/(\lambda/2d)$, y esto podemos escribirlo como la siguiente ecuación:

$$M = \frac{2d}{\lambda} \cos(\theta_c)$$

Aplicando en la ecuación anterior la igualdad: $\sin(\theta_c) = n_2/n_1$, y teniendo en cuenta la relación entre longitud de onda en el vacío (λ_0) y la longitud de onda en el medio material de índice $n_1(\lambda)$: $\lambda_0 = n_1\lambda$, obtenemos:

$$M = \frac{2d}{\lambda_0} NA$$

Donde NA, que es la apertura numérica:

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

Llegados a este punto, se puede observar que cuando $(2d/\lambda_0)NA < 1$, solo se puede propagar un modo por la guía (el modo fundamental) por lo tanto, se tratará de una guía monomodo. Por otra parte, en una guía dieléctrica, cada modo tiene su frecuencia (o longitud de onda) de corte, excepto el fundamental que siempre va a estar permitido.

III. El interferómetro multimodo (MMI)

El MMI es básicamente una guía multimodo en la cual, alimentado por una guía monomodo (en este caso), se consigue que se exciten la mayoría de los modos al mismo tiempo, interfiriéndose entre sí con lo cual, cuando hay interferencia constructiva, provoca la aparición de autoimágenes.

III.1. Autoimágenes en el MMI

¿Qué son las autoimágenes? Son réplicas de la señal de entrada que se forman en el interior del MMI gracias a la interferencia que producen entre ellos mismos los distintos modos que se excitan al mismo tiempo. En este caso se propone el uso de las autoimágenes como puertos de salida del MMI, permitiendo dispositivos que dividen la señal de entrada o como veremos más adelante, influyendo sobre las autoimágenes para conseguir un conmutador.

Uno de los parámetros de diseño es la longitud del MMI, la cual depende del número de autoimágenes que se quieran obtener como salidas. Para hallar dicha distancia hay que fijarse en la fase de los n modos soportados por la guía, en la dirección de propagación, que viene dada por la siguiente ecuación de campo [1]:

$$\Psi(y, z) = \sum_{m=0}^{n-1} c_m \psi_m(y) \exp\left(\frac{m(m+2)\pi}{3L_\pi} z\right) \quad (1)$$

Donde m es el orden de cada modo, z es la dirección de propagación, L_π es la longitud de batido entre los 2 modos de orden inferior (en modo 0 y el modo 1), c_m representa la potencia acoplada a cada modo y puede ser calculada mediante la integral de solape entre el modo m y el campo a la entrada.

A partir de la ecuación (1), podemos ver que encontraremos una autoimagen del campo de entrada cuando [1]:

$$\exp\left(\frac{m(m+2)\pi}{3L_\pi} z\right) = 1 \text{ o } (-1)^m$$

Por lo tanto se puede deducir se puede encontrar la autoimagen de la entrada en $z=3L_\pi$ y sus múltiplos enteros ($2*3L_\pi, 3*3L_\pi, 4*3L_\pi\dots$). En el caso de los múltiplos pares se va a encontrar una autoimagen exactamente igual a la señal de entrada. Por otra parte, en el caso de los múltiplos impares vamos a encontrar la autoimagen espejo, volteada y en el punto opuesto respecto al eje y (esto se puede observar en la Figura 10).

III.2. El MMI como divisor/acoplador de potencia

Para conseguir un MMI como divisor es necesario hallar varias autoimágenes en un mismo punto del eje z . En el caso descrito anteriormente, encontramos una autoimagen en $z=3L_\pi$ y sus múltiplos enteros, pero en este caso se necesita tantas autoimágenes como salidas se quieran conseguir.

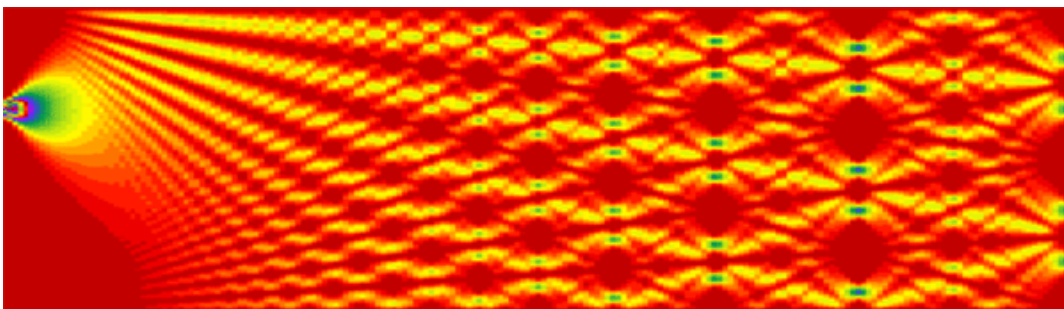


Fig.9: Ejemplo de diversas autoimágenes para distintos puntos de la dirección de propagación.

Así pues, según [1], se pueden hallar múltiples autoimágenes (N autoimágenes) en distancias $z=3L_\pi/N$, donde N representa el número de autoimágenes que se quieren encontrar (que es igual al número de salidas que se querrá para el divisor/acoplador de potencia). De este modo, con un MMI podemos conseguir N salidas con una potencia máxima en cada salida teórica de P_{in}/N .

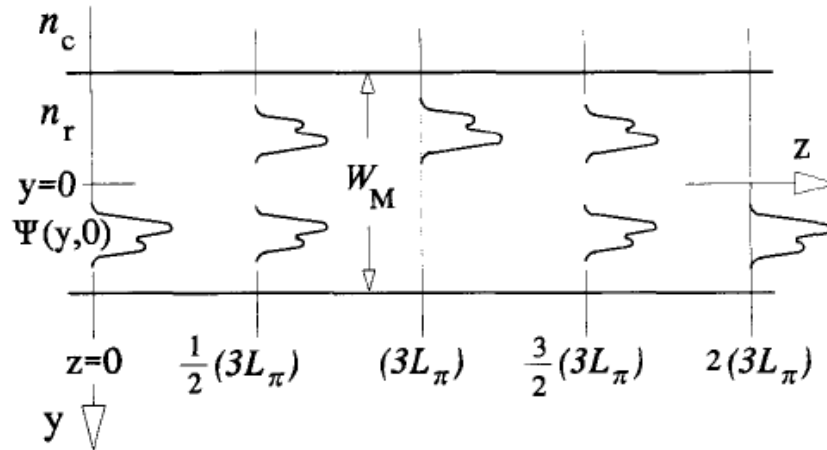


Fig.10: Distancias a las que podemos encontrar algunas autoimágenes [1].

III.3. El MMI sintonizable

El MMI sintonizable es básicamente un MMI el cual tiene una única salida (con una longitud de, por ejemplo, $3L_\pi$) y en un momento determinado es posible cambiar la “ubicación” (respecto al eje y) de dicha salida, imitando el comportamiento de un conmutador de 2 salidas. En este caso, para provocar dicho cambio se va a hacer uso del efecto termo-óptico (del cual se hablara más adelante), aplicado sobre una zona concreta del MMI.

III.3.1. Distribución de las autoimágenes y sintonizabilidad

Para este caso se ha escogido una longitud del MMI correspondiente a $3L_\pi$, dado que esta sería la longitud más corta con la que utilizar una única autoimagen como salida.

Así pues, se ha decidido que la forma más sencilla de conseguir la sintonización será influir directamente sobre una de las 2 autoimágenes situadas en el punto $\frac{1}{2}(3L_\pi)$, y se ha comprobado que la diferencia de fase entre dichas autoimágenes es de aproximadamente $\pi/2$ radianes, de modo que la autoimagen espejo y la autoimagen tiene una fase de 0.241π y 0.779π radianes, respectivamente. Por otra parte, para las autoimágenes situadas en el punto $\frac{3}{2}(3L_\pi)$, tienen justo la fase contraria, 0.779π y 0.241π radianes para la autoimagen espejo y la autoimagen respectivamente, obteniendo una diferencia de fase de $-\pi/2$ radianes. Dado que lo que se quiere conseguir es cambiar, mediante el efecto termo-óptico, el campo en el punto $3L_\pi$ por el que hay en el punto $2(3L_\pi)$.

Para conseguir dicho cambio, se pretende cambiar (aumentar) la fase de la autoimagen del punto $\frac{1}{2}(3L_\pi)$ en π radianes para conseguir una diferencia de fase de equivalente a $3/2\pi$ radianes (equivalente a $-\pi/2$ radianes) y por lo tanto consiguiendo en $3L_\pi$ el campo de salida que hay en $2(3L_\pi)$, obteniendo de este modo como salida en lugar de la autoimagen espejo, la autoimagen de la entrada.

Los datos de las fases de las autoimágenes se han obtenido mediante una sencilla aplicación programada en matlab que simula la propagación de todos los modos en una guía, obteniendo la interferencia entre ellos y pudiendo obtener datos (amplitud i fase) del campo resultante en cualquier punto.

III.3.2. El efecto termo-óptico

El cambio de fase comentado en el punto anterior, se ha de llevar a cabo utilizando el efecto termo-óptico, que se basa en calentar una superficie de la guía (en este caso del MMI) provocando un cambio en el índice de refracción del material (Silicio). El cambio de fase mediante el cambio de índice viene dado por la siguiente ecuación [2]:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \Delta n_{eff} \cdot L_h \quad (2)$$

Dado que en este caso con los calentadores (resistencias) de titanio es posible conseguir un cambio de índice del orden de 10^{-2} , mediante la ecuación (2) podemos deducir que la longitud mínima para poder conseguir un cambio de fase de π radianes es $L_h=77.5 \mu m$, teóricamente.

La variación del índice de refracción con la temperatura se puede obtener de la siguiente ecuación [3]:

$$\Delta n_{eff} = \frac{\delta n}{\delta T} \Delta T \quad (3)$$

Donde $\delta n/\delta T$ es el coeficiente termo-óptico y es un valor constante (para una cierta longitud de onda) que depende del material sobre el cual se aplique la variación de temperatura, en este caso, para el silicio a 1550 nm, $\delta n/\delta T=(1.86\pm 0.08)\cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ [4]. Con estos datos y la L_h teórica obtenida, el aumento de temperatura necesario para provocar el cambio de índice de 10^{-2} sería de 53.7° K . Si se decidiera aumentar la longitud del calentador, el cambio de índice necesario para sintonizar la respuesta del MMI sería menor y por lo tanto la variación de temperatura también sería menor, reduciendo los requerimientos de potencia eléctrica consumida.

El calentador es, básicamente, una pequeña resistencia eléctrica (ver figura 11) colocada sobre el MMI, que genera una cierta cantidad de calor en función de su resistencia y su corriente (efecto Joule) y este pasa al MMI.

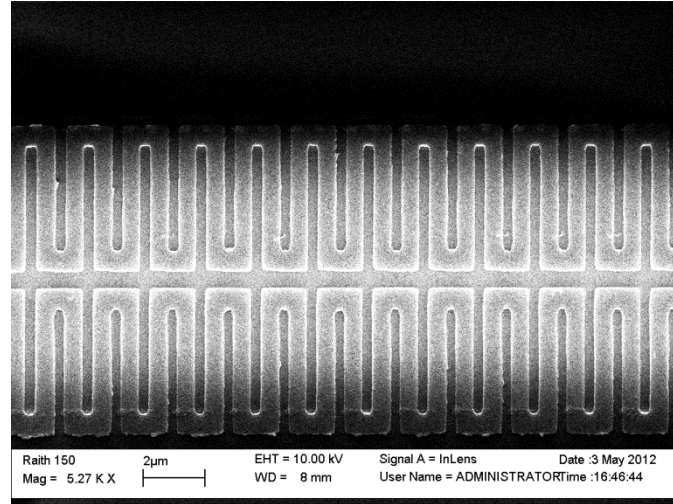


Fig.11: Imagen SEM de 2 calentadores colocados sobre el MMI

Como puede verse en la figura 11, el calentador tiene forma de gusanillo y podría intuirse un cierto problema de espacio debido a la expansión del titanio al calentarse, pero este ha sido un factor despreciable ya que el valor del coeficiente térmico de expansión es de $8.6 \mu\text{m} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ [5].

La temperatura a la cual puede llegar el calentador, se puede calcular a través los valores de su resistencia que se pueden medir y utilizar en la siguiente ecuación [5]:

$$R(T) = R(T_0)(1 + \alpha (T - T_0)) \quad (4)$$

Donde T_0 es la temperatura inicial (temperatura ambiente, entre 22 y 25°C) y T es la temperatura que alcanza el calentador. $R(T)$ es el valor de la resistencia a la temperatura T , $R(T_0)$ es el valor de la resistencia a temperatura ambiente y α es el coeficiente de temperatura de la resistencia y en [5] lo han estimado en $4.2 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$, aunque en nuestro caso puede ser un poco diferente debido a las diferencias geométricas de los calentadores, puede servir de punto de referencia para comparar distintos valores de temperatura de distintos calentadores que podamos medir.

IV. Simulaciones del MMI sintonizable

Una vez realizado el desarrollo teórico, el siguiente paso ha sido la realización de simulaciones para comprobar que las estructuras se comportan como se espera y ajustar los parámetros necesarios para obtener los mejores resultados posibles en cuanto a pérdidas en el MMI.

IV.1. Introducción al programa RSoft

El RSoft es un simulador electromagnético que nos va a permitir observar como se comportan diferentes estructuras las cuales se pueden definir en el propio programa.

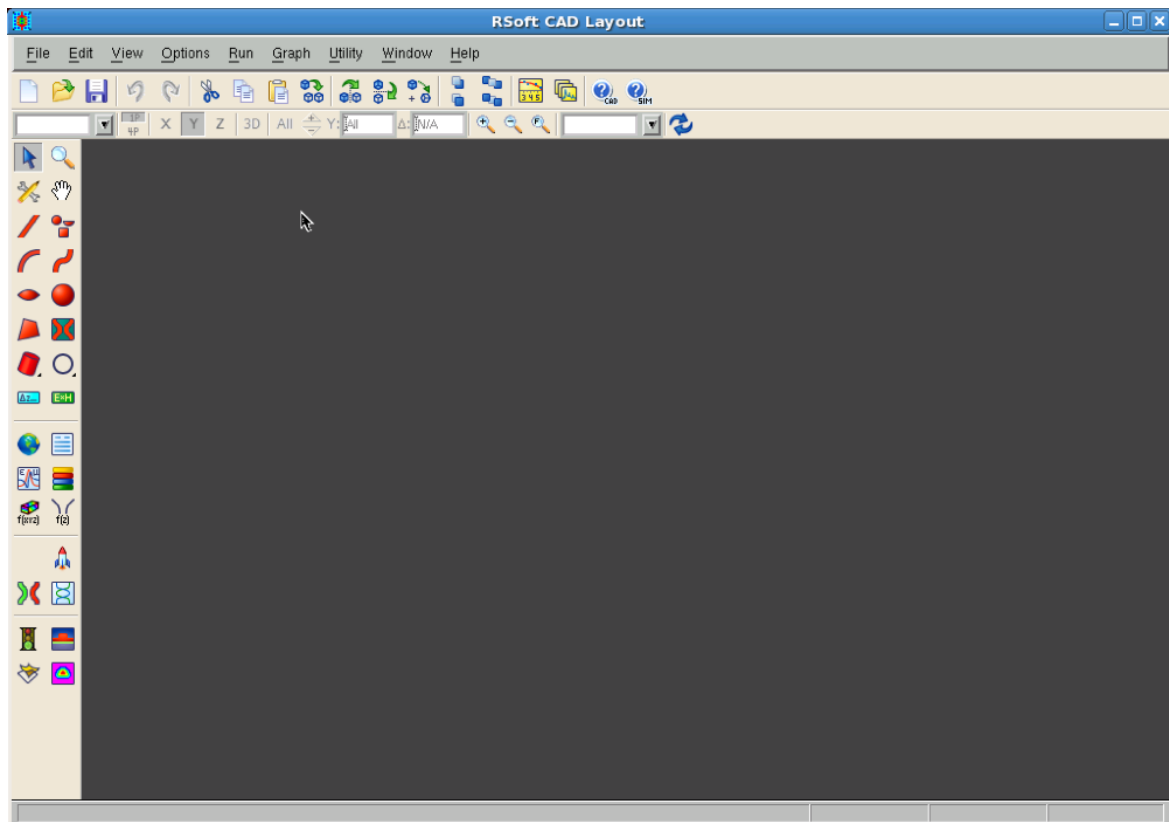


Fig.12: Imagen de la pantalla principal del RSoft

En la pantalla principal podemos encontrar en la parte superior una barra de menús típica de cualquier aplicación de Windows (aunque la versión utilizada sea para Linux) y a la izquierda encontramos una barra de herramientas que sirven para dibujar estructuras, cambiar sus parámetros o incluso parámetros de la simulación, y además también permite lanzar distintos tipos de simulaciones (únicas o con algún tipo de barrido).

Las principales herramientas de simulación son el FullWAVE y el BeamPROP.

FullWAVE está basado en el método fdtd (diferencias finitas en el dominio del tiempo), en el cual se realiza un mallado del espacio-tiempo y se va calculando el campo eléctrico en cada nodo

de la malla a través del campo calculado en los nodos adyacentes y el instante de tiempo anterior. De este modo podemos calcular en campo eléctrico y magnético en una región del espacio durante un cierto periodo de tiempo. Hay que ser cuidadosos con el mallado elegido ya que si elegimos un mallado demasiado grande el resultado de la simulación será distinto al resultado real de la estructura que se esté simulando, pero si se elige demasiado pequeño el coste computacional puede aumentar significativamente. Es por esto (el coste computacional) que el FullWAVE es un método muy bueno para estructuras relativamente pequeñas tanto en 2D como en 3D, sin embargo para un MMI sintonizable que tiene unos $600\mu\text{m}$ de largo el coste computacional es muy grande, por ello para simular el MMI sintonizable se ha usado el BeamPROP.

El BeamPROP está basado en la técnica BPM (método de propagación de pulso) que es la que más se ha usado para simular estructuras como por ejemplo MMIs. En este caso se obtiene el campo transversal resultante en puntos discretos en el plano xy y luego se va calculando dichos planos para la dirección de propagación mostrando así el patrón de campo de una estructura dada (podría darse como ejemplo el MMI mostrado en la figura 9).

Una vez claros los conceptos que usa el simulador, se pasará a configurar los parámetros básicos de la simulación en la figura 13.

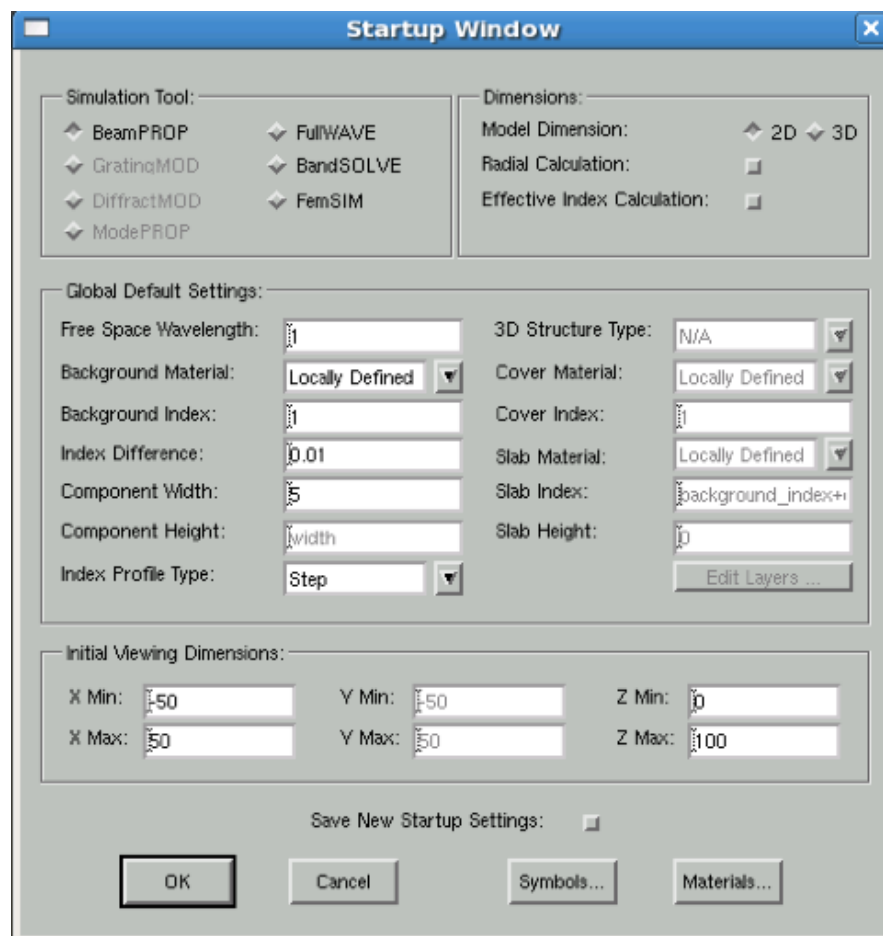


Fig.13: Imagen de la ventana de configuración del RSoft

En la ventana de la figura 13 se pueden configurar distintos parámetros necesarios para la simulación como *Simulation Tool* donde se marcará la opción BeamPROP, el modelado 2D o 3D donde se elegirá 2D y se usará el método del índice efectivo, también definiremos el índice del sílice en *Background Index* y el del silicio con *Index Difference*, en *Component Width* se pondrá el ancho por defecto de la estructura y *Component Heigh* indicará la altura en caso de tratarse de una estructura 3D.

Estas son las principales opciones que hay que rellenar para iniciar un proyecto en el RSoft, luego se pasara a formar la estructura a simular, en este caso un MMI de 2 entradas y 2 salidas. Para ello hemos de definir todas las características físicas del MMI y sus entradas y salidas, como por ejemplo longitudes y anchuras tanto del MMI como de sus entradas y salidas y también de la zona central donde se simulara el cambio de índice para tratar de provocar el intercambio entre los puertos de salida.

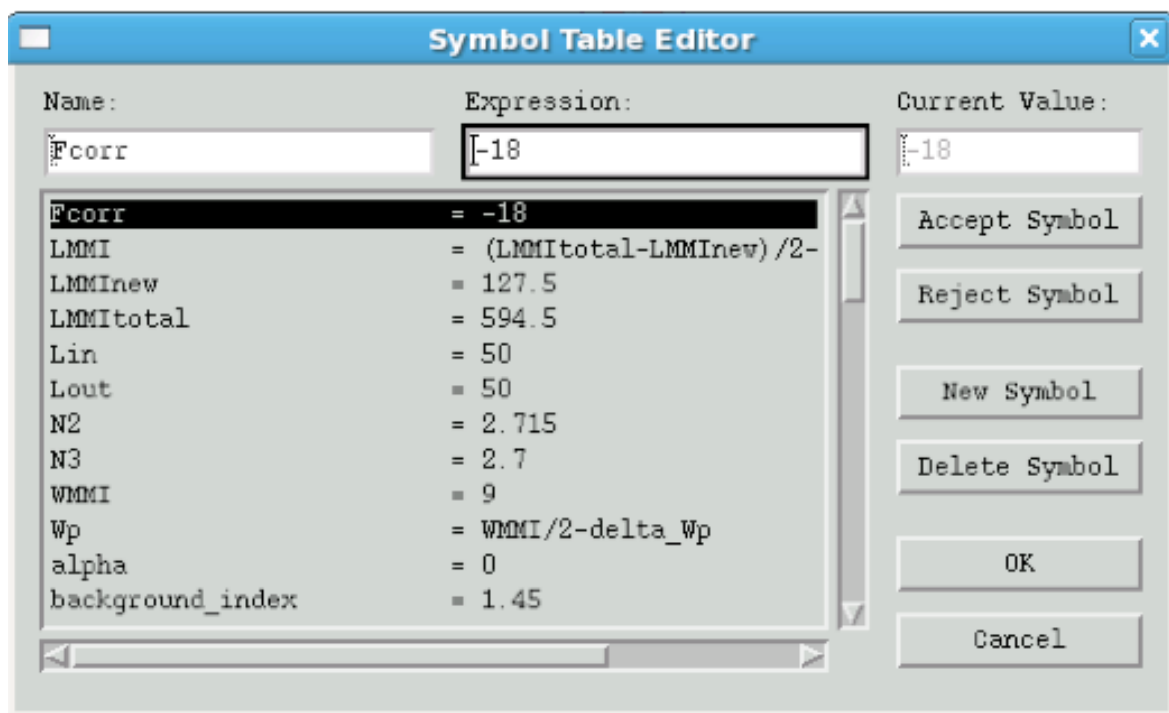


Fig.14: Imagen de la tabla donde se definen los parámetros físicos del MMI.

Una vez introducidos todos los parámetros que definen al MMI podemos ir introduciéndolos en la siguiente ventana, en la cual se accede a las características de cada estructura del diseño final por separado (por ejemplo, las características de un puerto de entrada). En la parte *Starting Vertex* se definen los parámetros del inicio de la estructura y en *Ending Vertex* los parámetros que definen el final de dicha estructura. Hay que tener en cuenta que el inicio de la estructura se considera al punto mas cercano a $z=0$, tomando $z=0$ el plano de referencia en la dirección de propagación.

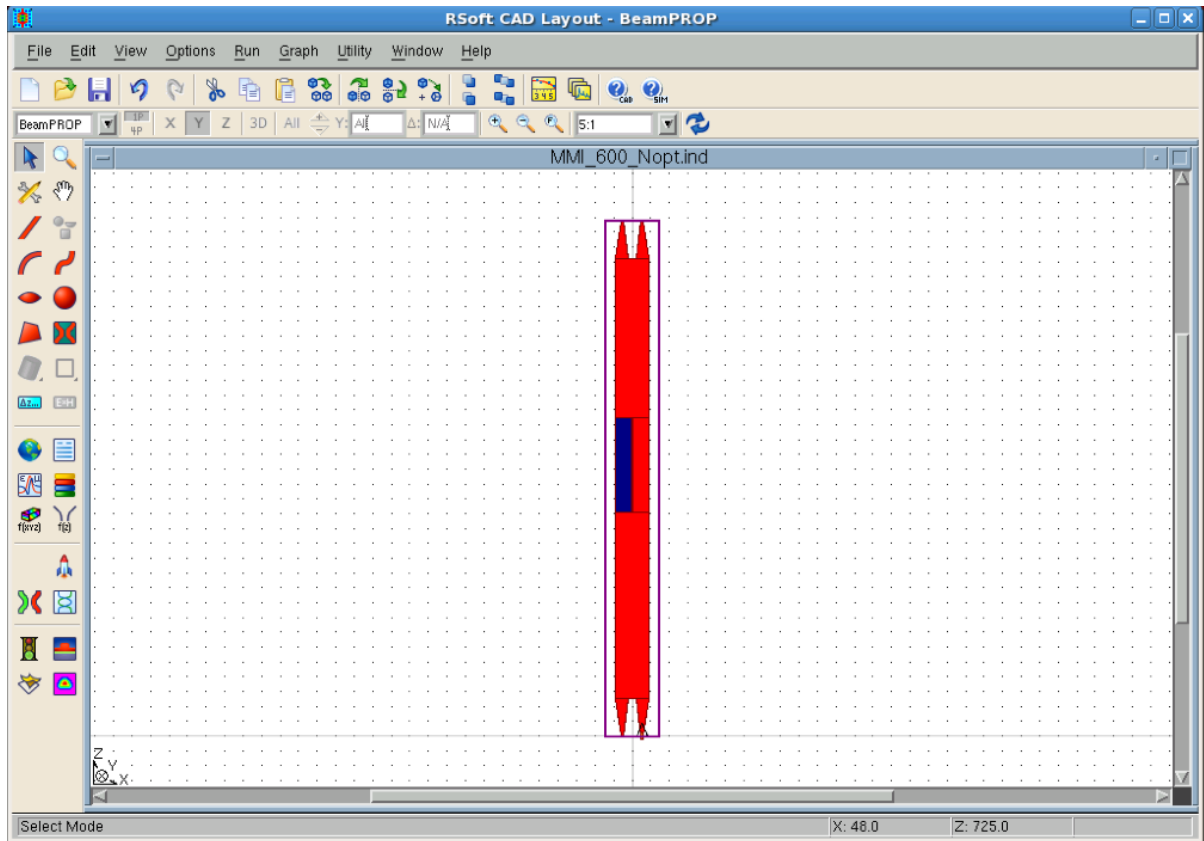


Fig.15: Imagen del MMI listo para simulación.

IV.2. Simulaciones y resultados

En primer lugar hay que simular el MMI de forma pasiva y realizar distintos barridos en anchura y longitud para buscar las dimensiones en las cuales se tengan las menores pérdidas posibles, de este modo se optimizará la estructura que ya se tenía definida. Para obtener los resultados de entradas y salidas es necesario configurar los *monitores*, los cuales dan una medida del campo a la salida y de ese modo podemos interpretar los resultados de las simulaciones.

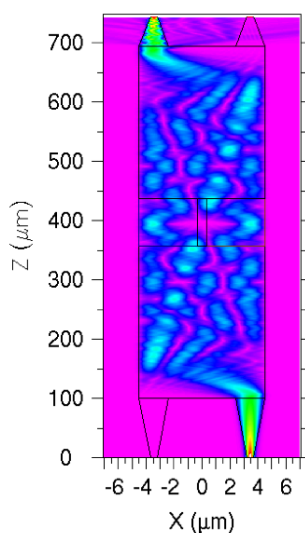


Fig.16: Simulación sencilla del MMI sin sintonizar, usando el simulador BeamPROP. En ella se puede apreciar que, efectivamente, la potencia de entrada sale por el puerto cruzado y también se pueden ver las 2 autoimágenes centrales (a la altura de $400\mu\text{m}$). Además, como curiosidad se puede ver cierta simetría en el patrón de interferencia y si se prolongara la longitud del MMI se podría conseguir la salida por el puerto directo, pero interesa hacer el MMI tan pequeño como sea posible.

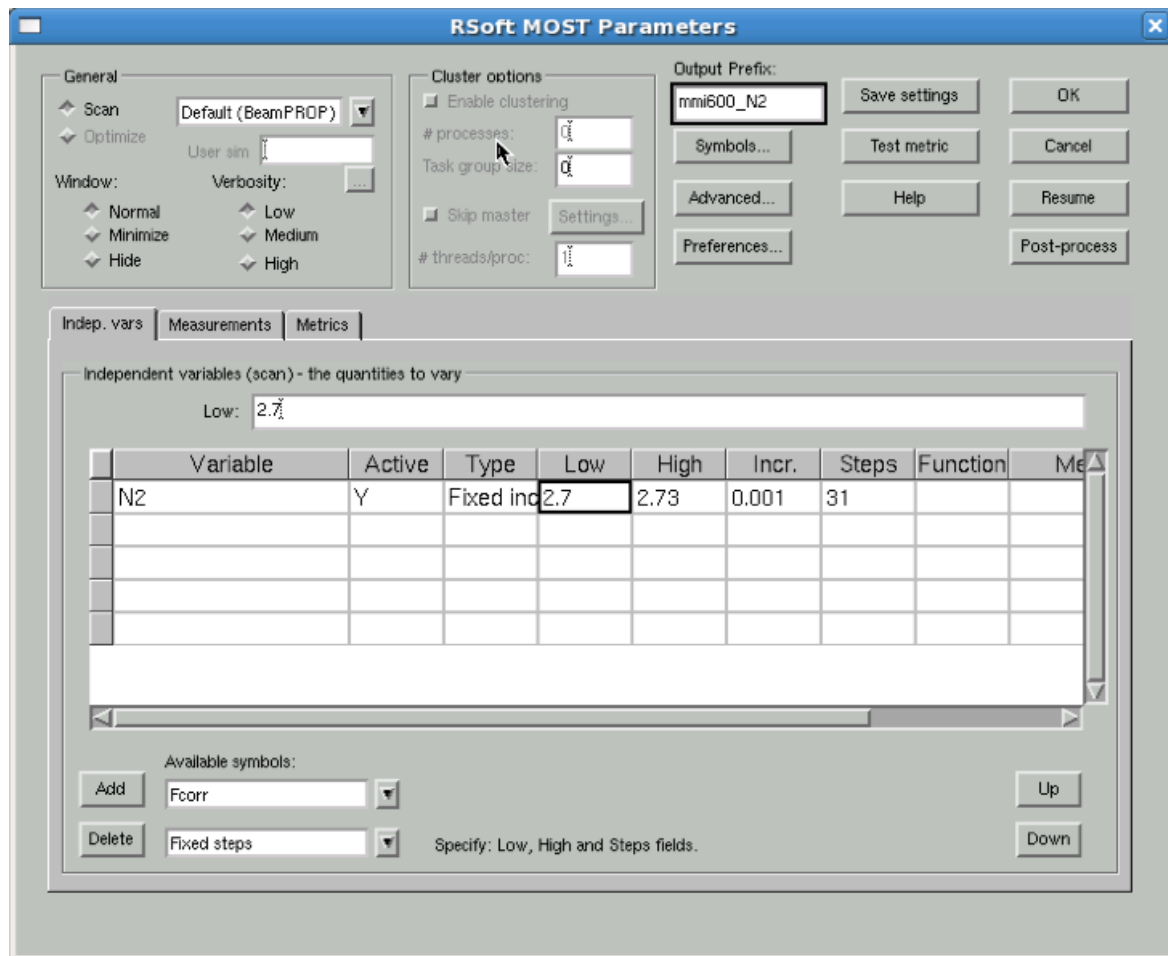


Fig.17: Ventana donde se configuran los barridos. Se puede ver que hay sitio para poder configurar distintas variables.

Una vez obtenido el MMI más eficiente posible en términos de pérdidas de inserción y cross-talk, el siguiente paso es hacer un barrido, pero esta vez el parámetro que irá cambiando en cada simulación será el índice de refracción (efectivo) de la zona que has sido marcada (con otro color) en el centro de la estructura del MMI (ver figura 15).

Esta simulación, confirma lo visto en la parte teórica puesto que con un cambio de índice localizado es posible (según las simulaciones) realizar un cambio en la salida del MMI. En la siguiente figura (figura 18) se pueden ver los resultados de las simulaciones, una sin cambio de índice y otra con el cambio necesario para provocar la sintonización del puerto de salida, obtenido del barrido.

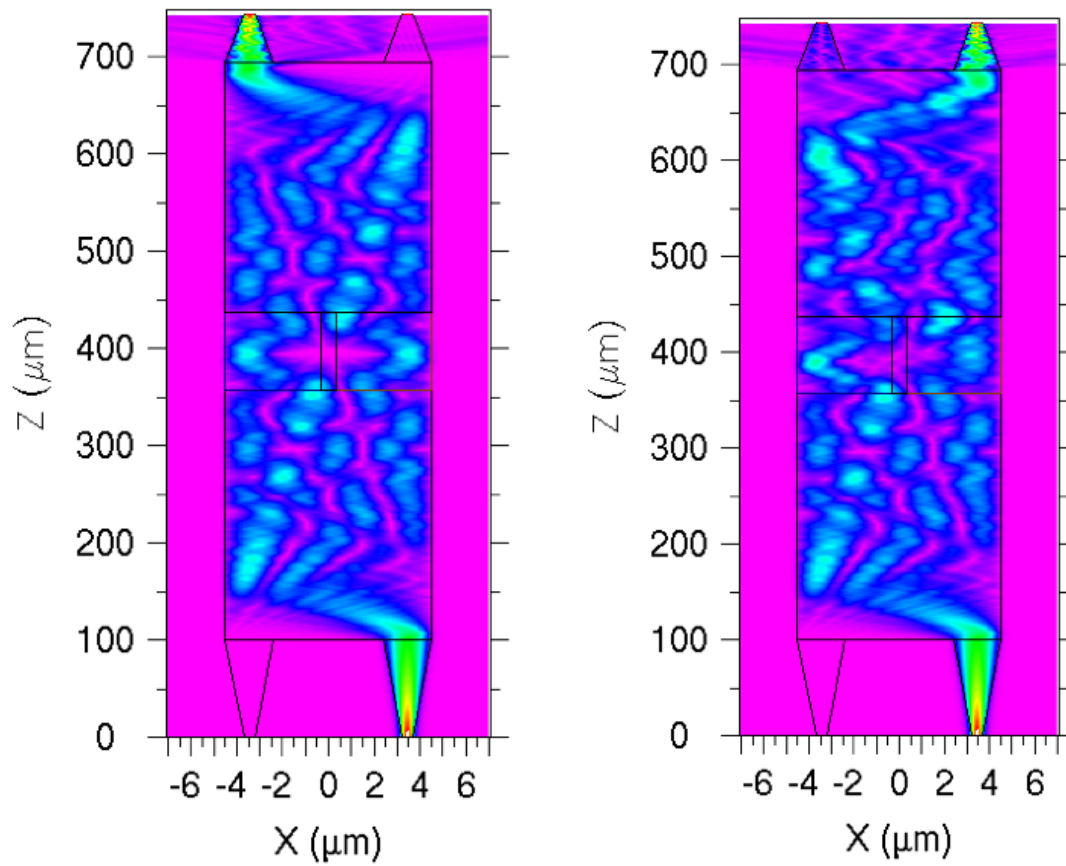


Fig.18: Comparación de los resultados, sin cambio de índice y con cambio de índice. Simplemente con estas imágenes ya se puede apreciar el significativo aumento de cross-talk al sintonizar el MMI.

A continuación se van a observar los resultados del barrido tanto a escala lineal como en escala logarítmica. En estos resultados se puede observar que el intercambio de potencia entre los puertos de salida es gradual de modo que si se quisiera se podría “configurar” como divisor de potencia, con distintos niveles de potencia en cada puerto o incluso los mismos, funcionando como un divisor de 3dB.

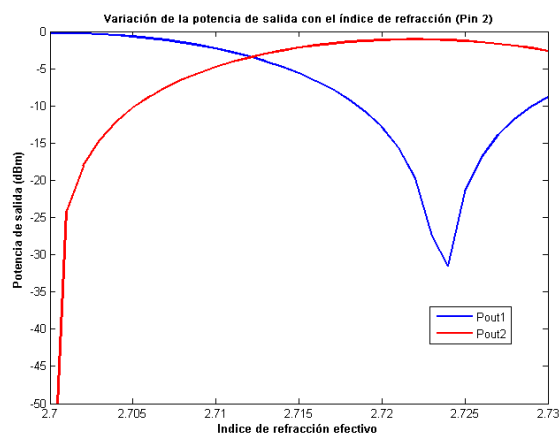


Fig.19: Resultados del barrido en el índice de refracción (efectivo). En esta imagen podemos comprobar cómo aumenta el cross-talk al sintonizar, así como el aumento de pérdidas en el puerto de salida activo.

Como se podrá observar en la parte de medidas, con este tipo de MMI se encontró un problema en el calentador, que consumía demasiada potencia debido al nivel de temperatura que debía alcanzar. Para solventar este problema se necesita hacer que el calentador sea más grande, para que de este modo se necesite un menor cambio de índice. Así pues, ahora lo que se necesita es conseguir que la autoimágenes tenga una mayor longitud, para lo cual hay que aumentar su tamaño y esto se consiguió aumentando el tamaño del taper de la guía de entrada que va unido al MMI. Al tener una fuente de mayor anchura se consiguió aumentar el tamaño de las autoimágenes, como se puede ver en la figura 20.

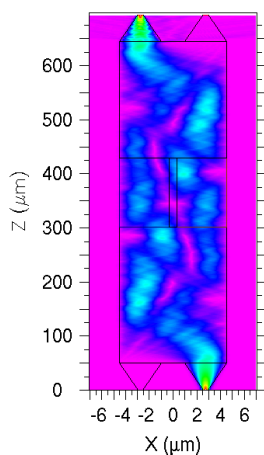


Fig.20: Puede verse como se ha aumentado el tamaño de las autoimágenes aumentando el tamaño de la fuente.

Como se ha explicado en el párrafo anterior, el objetivo que se persigue es reducir el índice necesario para provocar la sintonización del puerto de salida. Para ello se ha realizado un barrido y se ha comparado este nuevo resultado optimizado, con el cambio de índice necesario en el anterior MMI simulado y el resultado puede verse en la siguiente figura:

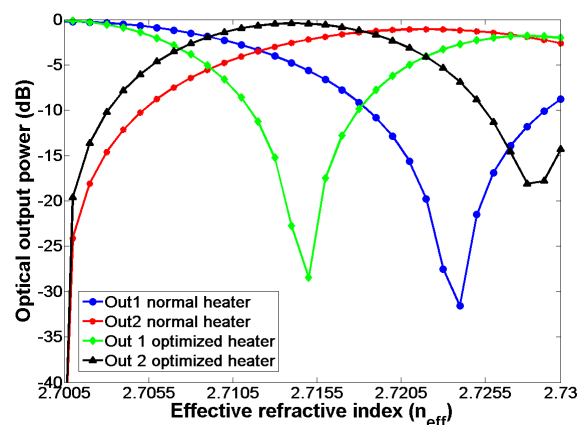


Fig.21: Comparación de los resultados de sintonización del MMI optimizado con el anterior.

Como se puede ver en la figura 21, se ha conseguido reducir el cambio de índice necesario para conseguir sintonizar el puerto de salida y con esto se debería mejorar el consumo de potencia.

V. Fabricación y medidas del MMI sintonizable

En este punto realizaremos dos tipos de medidas y las llamaremos medidas en pasivo y medidas en activo. Las medidas en pasivo se realizarán sobre el MMI sin aplicar tensión, es decir sin sintonizar, y en este tipo de medida comprobaremos que dada una entrada de potencia al MMI su salida se corresponde con el puerto cruzado y que las pérdidas deberían ser bastante pequeñas, así como también mediremos su ancho de banda. En las medidas activo se medirán las salidas del MMI para distintos puntos de tensión, también se medirá la corriente que pasa por el circuito con el fin de poder obtener los distintos valores de la resistencia para cada punto, y encontrar el punto concreto en el cual se consigue conmutar el puerto de salida del MMI utilizando el efecto termo-óptico.

IV.1. Fabricación

Se entiende por proceso de fabricación al proceso mediante el cual la oblea SOI es tratada para llevar a cabo el grabado de nuestro diseño para obtener posteriormente nuestro circuito integrado. Los prototipos que diseñemos se fabricaran sobre una oblea SOI de 150 mm. Este tipo de obleas se caracteriza por tener una capa de 250 nm de silicio en la que se grabaran las estructuras, una capa de óxido de 3 μm y un substrato de silicio de 750 μm . El proceso tecnológico de nanofabricación es, a grandes rasgos, el siguiente:

Depositar una capa de resina sobre la oblea. El elemento encargado de distribuir la resina sobre la oblea es el *Coater*. La funcionalidad del *Coater* es buscar una relación entre el espesor de la resina con la que cubrir la oblea y la velocidad para cubrir toda la oblea de la manera más uniforme.

Las estructuras que se desean fabricar se exponen sobre dicha capa de resina mediante litografía de haz de electrones (EBL, *E-Beam Lithography*). Este tipo de litografía permite obtener resoluciones de hasta 2nm. El elemento que se encarga de dicha exposición es el cañón de electrones. El cañón de electrones permite grabar motivos sobre resinas especiales que cambian sus propiedades al recibir electrones.

La técnica de barrido electrónico (SEM, del inglés *Scanning Electron Microscope*) permite inspeccionar las muestras expuestas. Esta técnica está basada en el bombardeo de las muestras con electrones y tiene detectores que recogen los electrones rebotados para formar la imagen de la muestra aumentada.

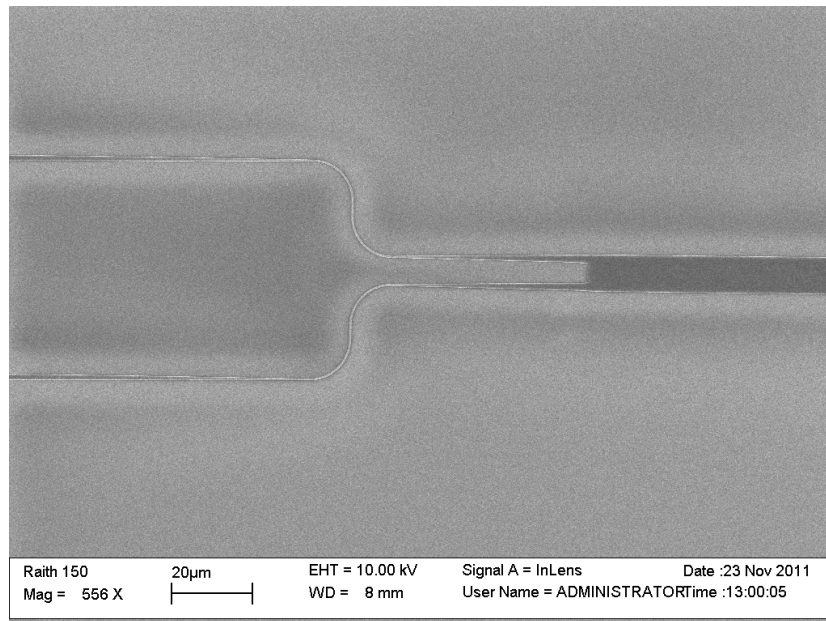


Fig.22: Imagen SEM de una parte de un MMI.

A continuación se revela la capa de resina, normalmente mediante ataques químicos, obteniéndose la máscara que permite transferir los diseños a la capa de silicio de la oblea mediante ataque inductivo de plasma (ICP, *Inductive Coupled Plasma*). El ICP permite pasar el motivo en la resina al substrato. Para ello, crea un plasma de gases fluorados que atacan el silicio o el óxido de silicio, mediante procesos tanto físicos (sputtering) como químicos (recombinación).

El último paso será la limpieza de los restos de resina que quedan sobre la oblea.

Para la creación de la máscara se pueden utilizar dos tipos de resina:

- **Resina positiva:** En este tipo de resinas se debe exponer, mediante el proceso de litografía, las zonas de la oblea en las que se quiere atacar el silicio. Es lo que se denomina diseño inverso ya que, por ejemplo, para fabricar una guía hay que exponer no la guía en sí, sino dos franjas a ambos lados de la misma denominadas trincheras, para así formar la guía original. El proceso de fabricación mediante resina positiva se muestra a continuación, siendo una de las más comúnmente usadas la PMMA.

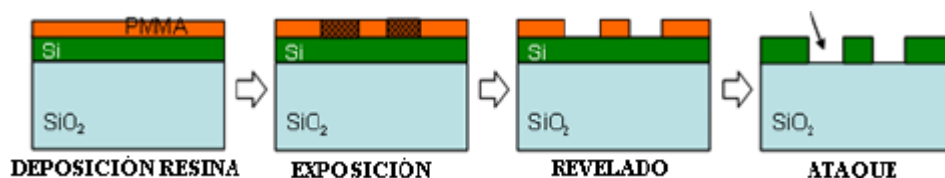


Fig.23: Proceso de fabricación con resina positiva.

- **Resina negativa:** En este tipo de resinas será la parte no expuesta la que será eliminada cuando se realice el revelado, por lo que únicamente habrá que exponer las regiones de la oblea en

las que no se atacará el silicio. Es lo que se denomina proceso directo ya que en este caso, siguiendo el ejemplo anterior, únicamente hay que exponer la guía. El tipo de resina negativa más común es la FOX-12.

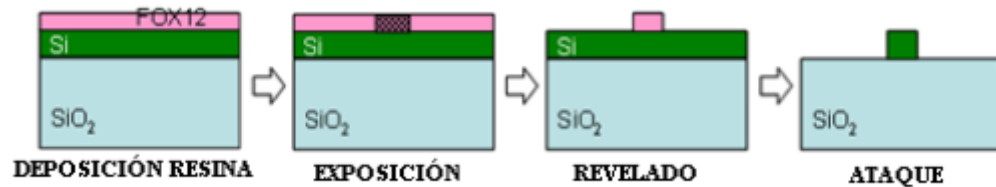


Fig.24: Proceso de fabricación con resina negativa.

Inicialmente los procesos que se seguían para la fabricación de las muestras se basaban en la obtención de la máscara con resina positiva como la PMMA. Actualmente se están realizando grandes esfuerzos en orientar la fabricación hacia el proceso *lift-off*. Con esta técnica es posible la obtención de una mayor verticalidad en las paredes de las guías. También se está estudiando el uso de resinas negativas como es el caso de la FOX-12.

IV.2. Resultados de medidas en pasivo

En este apartado vamos a realizar las medidas explicadas en el párrafo anterior, para lo cual disponemos de un laser de longitud de onda sintonizable que nos permitirá medir el ancho de banda y un controlador de polarización que nos permitirá ajustar la polarización del campo de entrada, en cuanto a la parte previa al MMI:

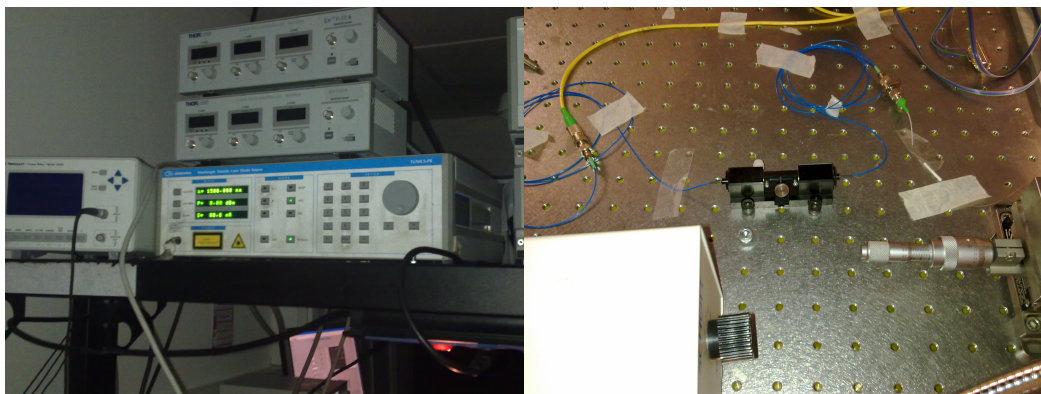


Fig. 25 y 26: A la izquierda el laser y en la imagen de la derecha el controlador de polarización

Después del MMI se tiene un medidor de potencia óptica que nos permitirá medir la potencia de salida de cada puerto y para poder apuntar las fibras de entrada y salida un microscopio, conectado al ordenador, y en el ordenador un programa realizado en LabView que nos permite controlar el laser y el medidor.

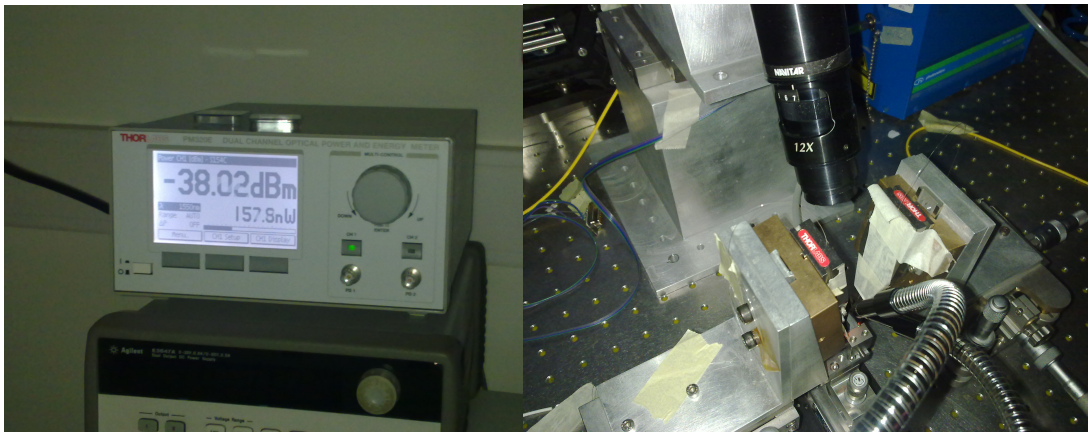


Fig. 27 y 28: A la izquierda el medidor de potencia y en la imagen de la derecha se pueden ver los soportes para las fibras de entrada y salida y el microscopio.

Al medir se van a encontrar varios MMIs en una misma muestra (o chip), para poder realizar varias medidas y así comprobar algunas tolerancias de fabricación así como (en un caso concreto) hacer comparaciones/comprobaciones entre distintos métodos de simulación. En la imagen 16 podemos ver la muestra (o chip) listo para empezar las medidas y en la 30 una imagen del microscopio de un MMI de la muestra.

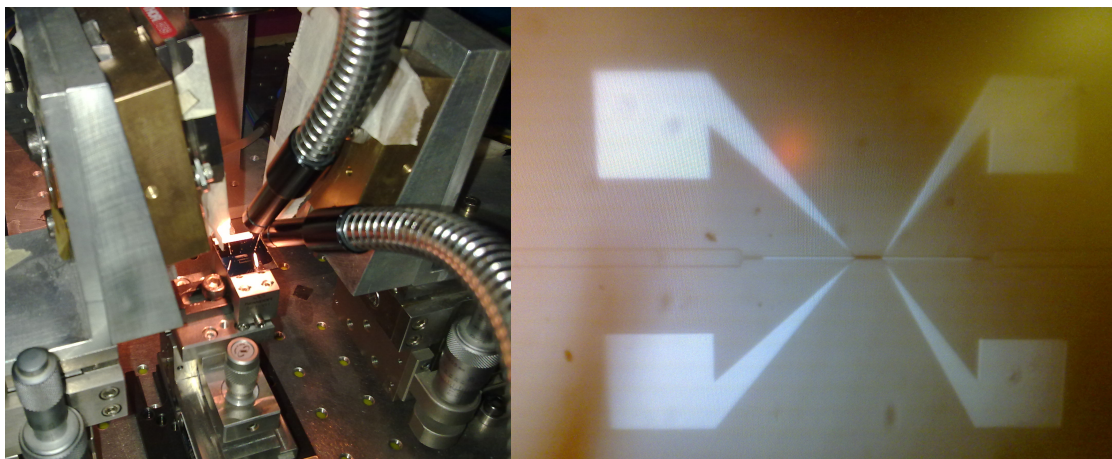


Fig. 29 y 30: A la izquierda la muestra fabricada con varios MMIs listos para medir y en la imagen de la derecha se pueden a través del microscopio, un MMI con los pad's para "inyectar" corriente en el calentador.

En la muestra también hay distintas guías, que servirán para medir pérdidas y ver la respuesta en frecuencia real de los gratings, la cual hay que tener en cuenta ya que se solapará sobre la respuesta en frecuencia del MMI. En la siguiente figura podemos ver el espectro, resultado de una simulación en [6], que presentan los gratings:

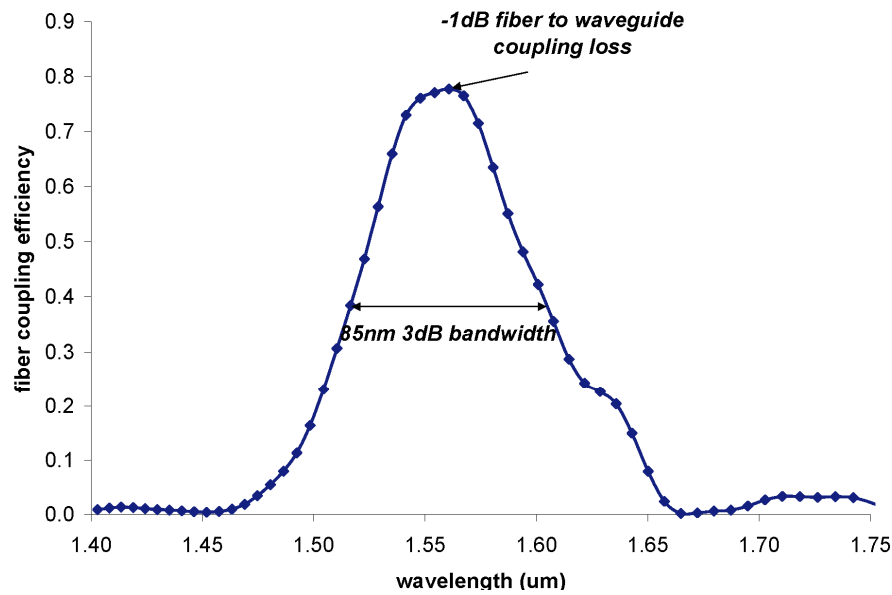


Fig.31: Espectro simulado en longitud de onda de un grating centrado en 1550 nm.

Una vez listo en set-up, lo primero es tomar medidas de la guía de alineamiento, para tener una referencia sobre como funcionan los gratings de dicha muestra y tratar de minimizar las pérdidas en el set-up (alineamiento de las fibras y polarización sobre todo). Luego, con el programa de LabView se realiza un barrido en frecuencia y se obtiene la siguiente respuesta espectral del grating y la guía (figura 31).

Luego hay que realizar distintas medidas del MMI como ver la potencia que sale por cada puerto y comprobar que se los resultados se corresponden con los deseados, y así poder comprobar las distintas características del MMI como su reciprocidad o su ancho de banda. Para comprobar la reciprocidad, simplemente se va cambiado de puerto de entrada y se observan todas las salidas. Respecto al ancho de banda el proceso es exactamente el mismo que se ha descrito para comprobar el ancho de banda en la guía de alineamiento junto con los gratings. Al observar la respuesta en frecuencia del MMI se ha de tener en cuenta que esta, está solapada a la del grating, ya que como se verá a continuación es mayor el ancho de banda del MMI y por lo tanto el elemento que restringe el ancho será el grating.

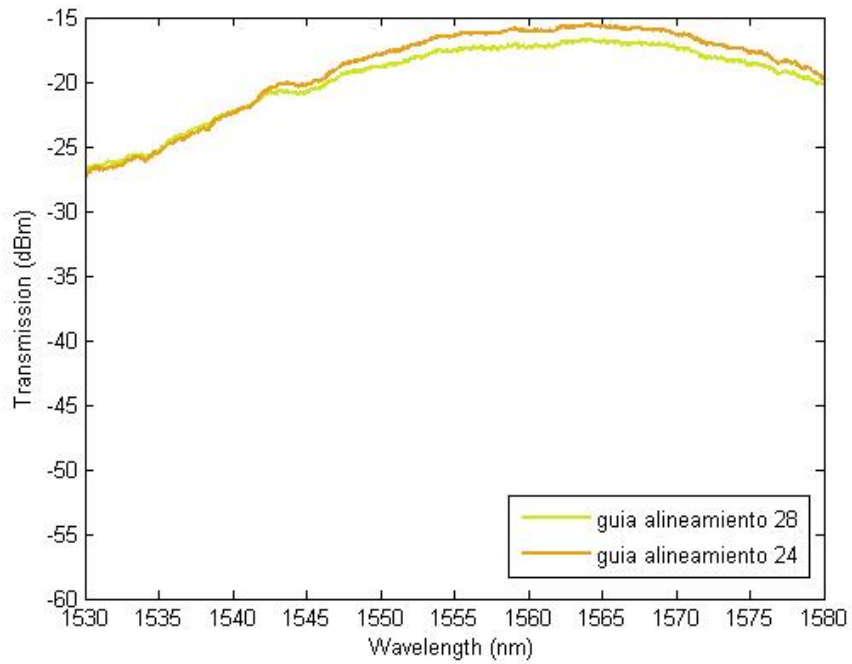


Fig.32: Respuesta espectral medida de la guía de alineamiento más el grating.

Para realizar la descripción de las medidas del MMI, se ha llamado a los distintos puertos como *in1* y *in2* para los puertos de entrada y *out1* y *out2* para los puertos de salida, y se tomará como referencia su disposición en la siguiente imagen.

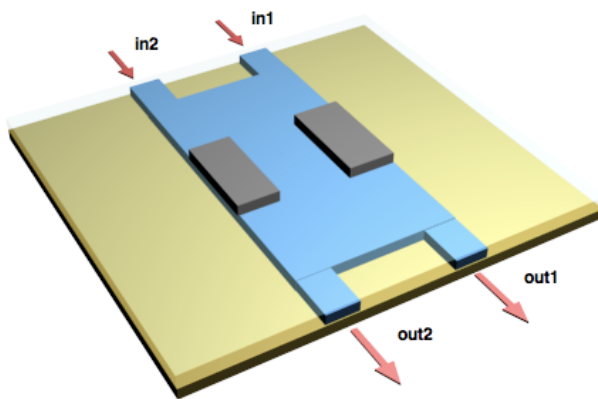


Fig.33: Representación gráfica de la disposición de los puertos de entrada y salida, así como la nomenclatura utilizada.

Se van a mostrar varias gráficas, con un puerto de entrada como referencia, en las que se comparará la diferencia entre los distintos puertos de salida (directividad, acoplamiento).

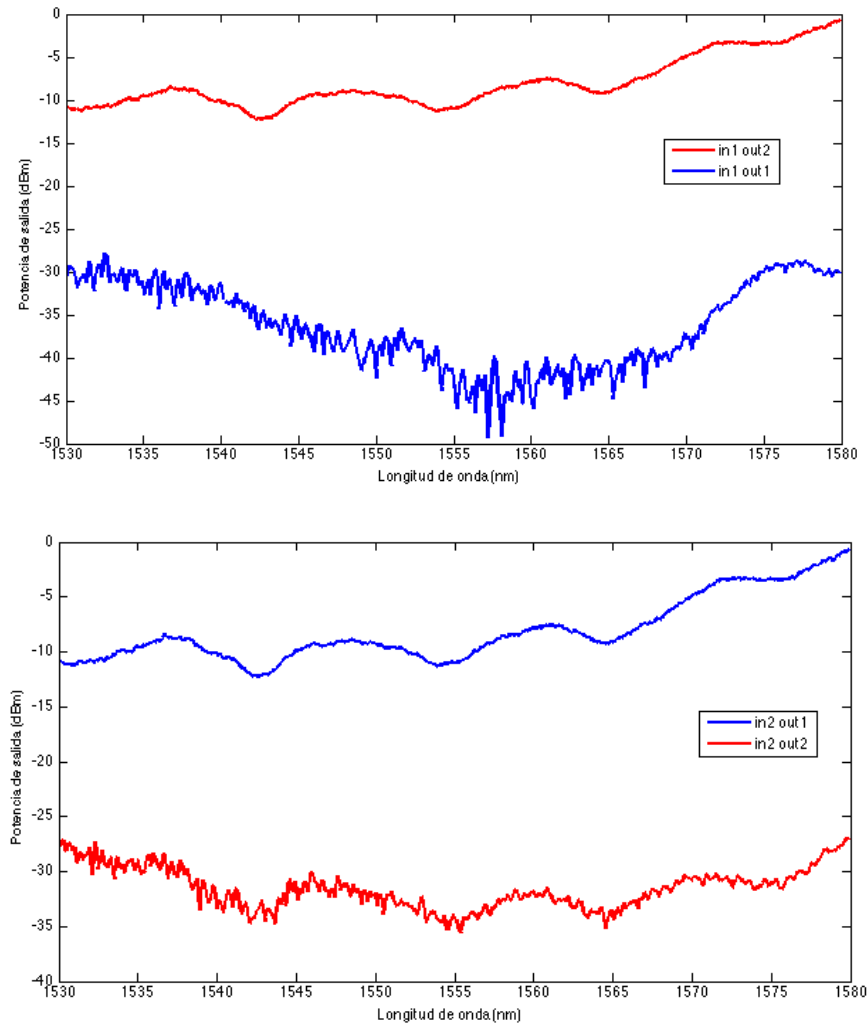


Fig.34 y 35: Respuesta espectral normalizada cuando la entrada es el puerto 1 (superior) y cuando la entradas es el puerto 2 (inferior).

En la figura 34 se puede observar y comprobar con el resultado experimental, que la entrada del MMI sale por su puerto cruzado, en este caso, la señal entra por el puerto *in1* y sale por el puerto *out2*, tal y como se había desarrollado en la parte teórica y luego también se pudo observar en las simulaciones con el RSoft. Este hecho también se puede comprobar en la figura 35, donde el puerto de entrada es *in2* y vemos como la señal sale por el puerto *out1*.

También se puede apreciar una característica fundamental, el gran ancho de banda que presenta el MMI. Aunque esta medida este influenciada por el efecto de los gratings, del cual se ha observado en un primer momento que su respuesta en frecuencia esta ligeramente desplazada hacia la derecha, se puede concretar que posee una respuesta bastante plana. Además, observando el punto donde está el máximo del grating, se puede ver que el MMI presenta una perdidas de inserción de 1 dB aproximadamente.

Otra característica importante que se puede observar en ambos resultados es el aislamiento que presenta el puerto de salida (cruzado) respecto al puerto directo con una diferencia de entre 18 y 25 dB según el punto del espectro donde se mire. En 1550nm hay un aislamiento de 21 dB aproximadamente.

IV.2. Resultados de medidas en activo

Una vez tomadas las medidas pasivas, hay que pasar a las medidas en activo en las cuales se proporcionará una cierta corriente al calentador y este irá subiendo de temperatura y, como se ha visto en la teoría, deberá cambiar el índice de refracción de la zona situada justo debajo del calentador provocando un intercambio de potencia entre los dos puertos de salida. Este cambio debería poder ser apreciado observando el medidor de potencia, viendo como cambia el nivel de potencia óptica a la salida a medida que aumentamos el nivel de tensión en el calentador.

En este caso, el set-up para tomar las medidas será básicamente el mismo que el anterior con la excepción de que serán añadidas 2 puntas que harán contacto con los electrodos, además se deberá contar con una fuente de alimentación y un multímetro digital para medir la corriente del circuito eléctrico.

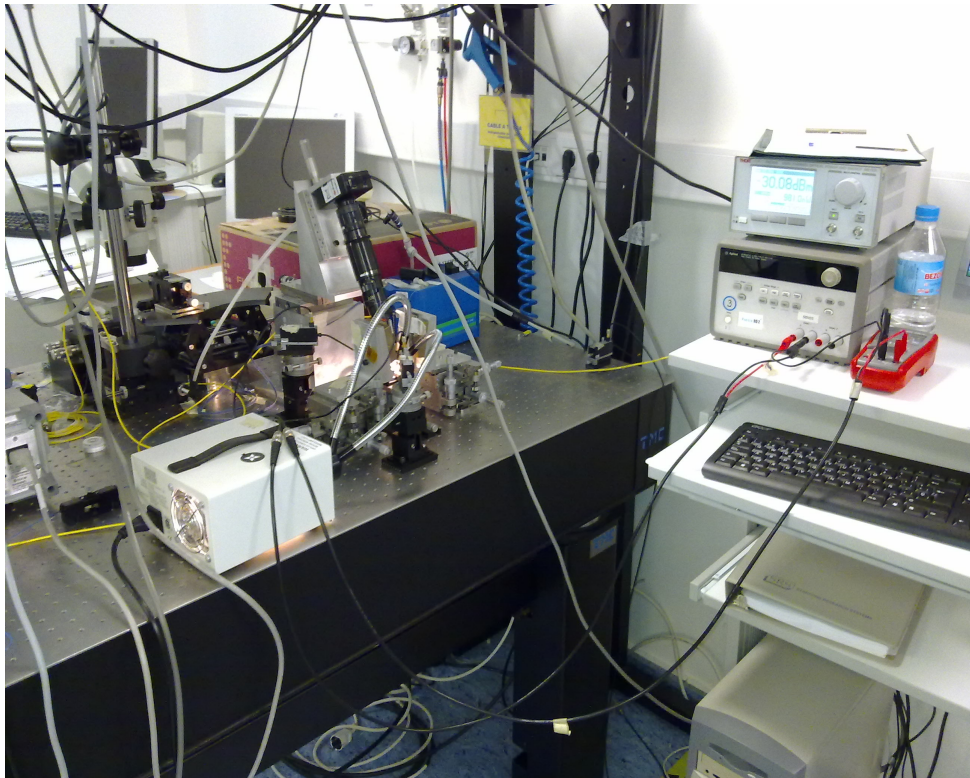


Fig.36: Vista exterior del montaje listo para medir los MMIs en modo activo. Puede apreciarse la fuente de alimentación, el multímetro digital y los soportes para las puntas.

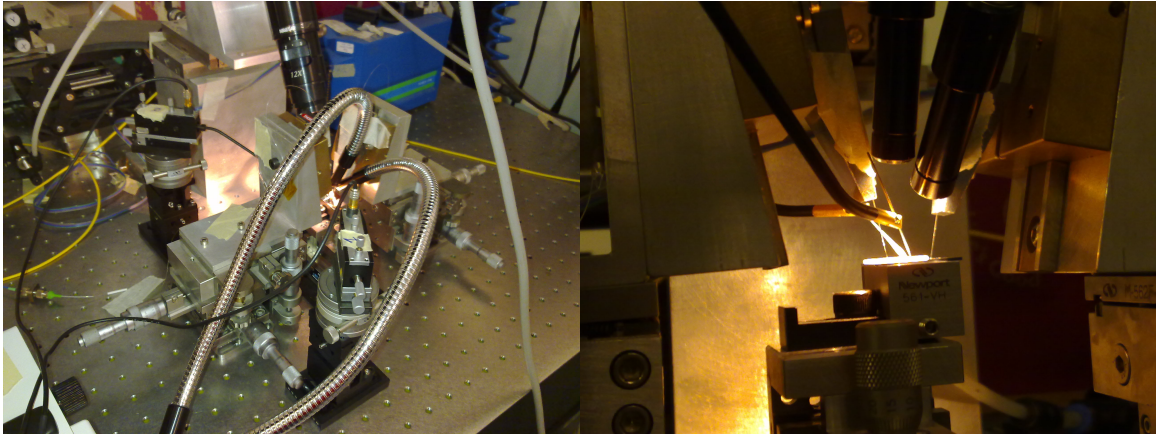


Fig.37 y 38: En la figura 37 se muestran los soportes de la puntas desde cerca de modo que se aprecien mejor y en la figura 38 se puede observar junto con la fibras de entrada y salida, las puntas que entran en contacto con los electrodos.

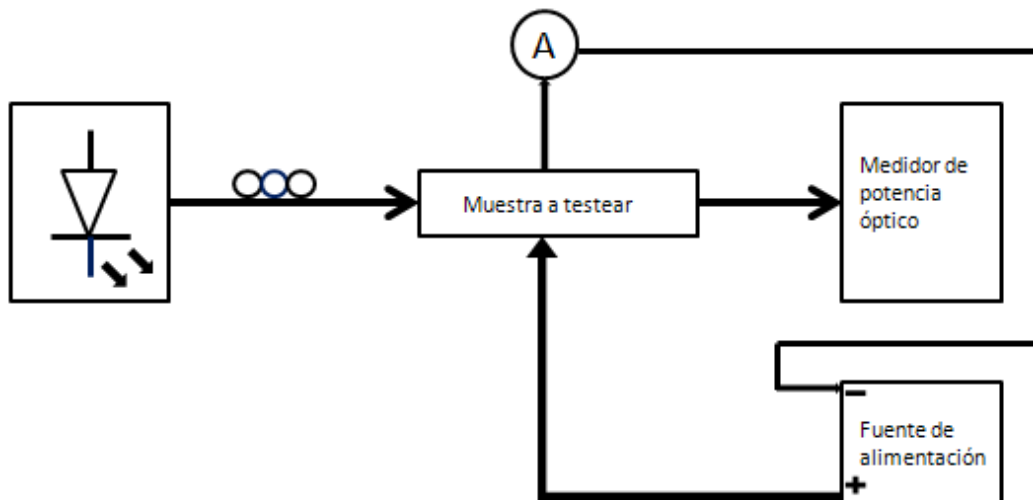


Fig.39: Set-up para medir los MMI sintonizables usando las puntas para darle corriente a los calentadores.

Una vez listo el set-up, se pasa a tomar las primeras medidas. Primero en pasivo, comprobando que todo el set-up esta correctamente montado y luego se pasa a tomar las medidas en activo, aumentado el nivel de tensión aplicada al calentador y tomando los datos de los niveles de potencia óptica para el puerto de salida correspondiente junto con los valores de tensión y corriente (teniendo como referencia para tomar los datos el nivel de tensión). Una vez alcanzado el punto en el que la potencia de los puertos esta cruzada respecto al estado pasivo, se mantendrá el nivel de tensión alcanzado y se medirá la potencia óptica que hay en la otra salida del MMI y en este caso, se irá bajando el nivel de tensión aplicado al calentador y tomando constancia de dichas medidas. Una vez terminada esta medida utilizando los datos recogidos, se puede hacer una gráfica donde se puedan ver dicha información y ser comparada con las simulaciones realizadas anteriormente.

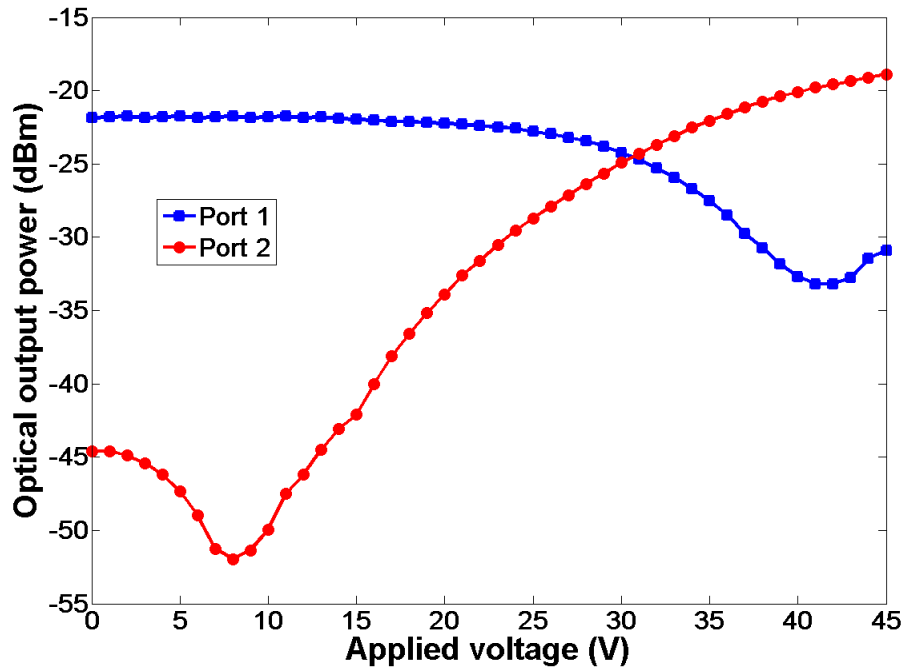


Fig.40: Respuesta del MMI cuando se le aplica distintos valores de tensión al calentador para 1550nm.

En la figura 40 se muestra la gráfica mencionada anteriormente, en ella se puede ver que es necesario llegar hasta unos 42V aproximadamente, para conseguir el efecto deseado sobre el MMI. En el caso activo, se puede observar que ha empeorado el cross-talk, puesto que la diferencia entre el puerto activo y el aislado se ha reducido hasta los 13dB. Gracias a las medidas de corriente tomadas (1.855 mA en para 42V), se ha podido estimar el consumo de potencia del calentador en 77mW, haciendo necesario reducir el consumo de potencia para lo cual ya se tienen algunas ideas respecto a la optimización de los calentadores junto con la ampliación de la zona donde se debe cambiar el índice, lo cual haría que el cambio de índice necesario para realizar la sintonización fuera menor que el actual y por lo tanto los niveles de tensión y corriente también serían menores.

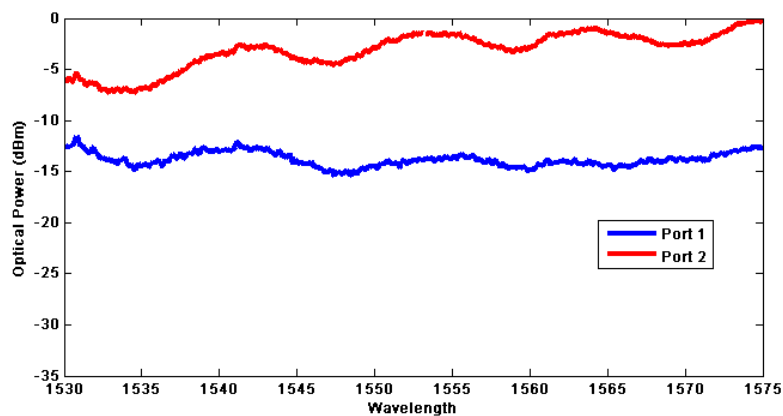


Fig.41: Espectro normalizado del MMI en estado activo.

Como se puede ver en la figura 41, el comportamiento para distintas longitudes de onda es bastante plano, lo confirma que el MMI en estado activo mantiene su característica de disponer de un gran ancho de banda. Y además se puede ver que el cross-talk que se ha reducido a 1550nm también se mantiene en el espectro medido.

Así pues se puede concluir que se ha conseguido demostrar el funcionamiento de un MMI sintonizable. Primero con un desarrollo teórico que luego fue comprobado con simulaciones y finalmente demostrado en el laboratorio.

VI. Conclusiones y líneas futuras.

A lo largo de este trabajo se ha demostrado, primero mediante desarrollo teórico, luego con simulaciones y finalmente con medidas de laboratorio, que es posible diseñar y fabricar un MMI sintonizable mediante el efecto termo-óptico en tecnología fotónica de silicio. El consumo de potencia obtenido experimentalmente ha sido de 77mW. Por otra parte, la pérdidas de inserción obtenidas experimentalmente han estado por debajo de 1dB con niveles de cross-talk por encima de 20dB para el caso pasivo y de hasta 14dB para el caso activo.

El principal trabajo futuro es la reducción del consumo de potencia. Queda claro que donde más se puede mejorar es en el estudio de los calentadores, consiguiendo que consuman menos o que puedan calentar más soportando temperaturas más altas lo cual podría acortar la longitud necesaria para provocar el cambio de fase necesario y por lo tanto pudiendo reducir la longitud del MMI. Otro aspecto a estudiar en el futuro será la excitación selectiva, ya que si se coloca la guía de entrada en un punto del MMI donde evitemos la excitación de algunos modos, conseguiremos reducir su longitud manteniendo sus principales características para que sea sintonizable, que en este caso es el tamaño de la autoimagen sobre la cual se aplica el cambio de temperatura.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos el apoyo financiero por parte de la Generalitat Valenciana a través del proyecto PROMETEO-2010-087 R&D Excellency Program (NANOMET). También cabe destacar el apoyo financiero del proyecto europeo HELIOS (Photonics ELelectronics functional Integration on CMOS) (FP7-224312).

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Soldano, L.B.; Pennings, E.C.M.; , "Optical multi-mode interference devices based on self-imaging: principles and applications," *Lightwave Technology, Journal of*, Apr 1995, vol.13, no.4, pp.615-627
- [2] Juerg Leuthold and Charles H. Joyner, "Multimode Interference Couplers with Tunable Power Splitting Ratios," *J. Lightwave Technol.* **19**, 700- (2001)
- [3] Abdulaziz M. Al-hetar, I. Yulianti, Abu Sahmah M. Supa'at, A.B. Mohammad, "Thermo-optic multimode interference switches with air and silicon trenches", *Optics Communications*, 15 September 2008, Volume 281, Issue 18, Pages 4653-465
- [4] Cocorullo, G.; Rendina, I.; , "Thermo-optical modulation at 1.5 μ m in silicon etalon," *Electronics Letters* " ,2 Jan. 1992, vol.28, no.1, pp.83-85.
- [5] T. Guan, R. Puers, "Thermal analysis of a Ag/Ti based microheater", *Procedia Engineering*, Volume 5, 2010, Pages 1356-1359.
- [6] G. Roelkens, D. Van Thourhout, and R. Baets, "High efficiency Silicon-on-Insulator grating coupler based on a poly-Silicon overlay," 2006, *Opt. Express* **14**, 11622-11630.

ANEXO