

07-006

MODAL CONVERSION IN PASSIVE COUPLERS FOR FEW-MODE OPTICAL COMMUNICATION SYSTEMS

García-Rodríguez, David ; Llorente, Roberto ; Corral, Juan Luís ; Morant, María
Centro de Tecnología Nanofotónica de Valencia, Universitat Politècnica de València

This project proposes and analyzes few-mode propagation optical transmission techniques to increase the transport capacity in optical fiber telecommunications systems. The operation wavelength considered for single-mode fiber (SMF) devices is 850 nm, while 1550 nm is evaluated for devices based on silicon-on-insulator (SOI) optical waveguides. These few-mode techniques have been simulated using the commercial software RSOFT BeamPROP. Both multiplexing and demultiplexing schemes have been designed and optimized to achieve maximal conversion and optimum coupling efficiency. According to the analysis results, we propose different schemes for symmetrical and asymmetric couplers, together with a modal filter and a mode multiplexer based on SOI optical waveguides. The proposed modal multiplexing schemes achieved near 100% conversion efficiency which confirms the correct performance of the devices for few-mode optical communications.

Keywords: *modal conversion; optical coupler; modal multiplexing; optical communication*

CONVERSIÓN MODAL MEDIANTE ACOPLADORES PASIVOS PARA SISTEMAS DE COMUNICACIONES ÓPTICAS DE MODOS LIMITADOS

Este proyecto analiza diferentes técnicas de conversión modal discreta destinadas a aumentar la capacidad de transporte en sistemas de telecomunicaciones sobre fibra óptica. La longitud de onda utilizada es de 850 nm para el caso de fibra monomodo (SMF, single-mode fibre) y de 1550 nm en el caso de guías ópticas basadas en silicio (SOI, silicon-on-insulator). Estas técnicas de conversión modal discreta se han simulado mediante el software comercial RSOFT BeamPROP, de forma que se han diseñado y optimizado cada uno de los distintos esquemas de multiplexación y demultiplexación modal hasta conseguir una conversión y un acoplo de potencia máximo. En base a los resultados del análisis, se han propuesto distintos esquemas como un acoplador simétrico y asimétrico, un filtro de modos y un dispositivo multiplexador de modos en guía óptica basada en SOI. Los esquemas de multiplexación modal propuestos han obtenido eficiencias de conversión cercanas al 100 %, comprobándose su buen funcionamiento.

Palabras clave: *conversión modal; acoplador óptico; multiplexación modal; comunicaciones ópticas*

Correspondencia: David García Rodríguez dgarciarodriguez@ntc.upv.es

Agradecimientos: Este trabajo ha sido financiado parcialmente por el Proyecto Nacional de Investigación Fundamental no orientada MODAL TEC2012-38558-C02-01 "Tecnología de transmisión modal discreta en fibra monomodo". Además el trabajo de David García Rodríguez en esta investigación está respaldado por el Proyecto Reto Colaboración HIDRASENSE RTC-2014-2232-3.

1. Motivación y finalidad del proyecto

Cerca de 100 millones de km de fibra monomodo de sílice (SMF, del inglés *single-mode fiber*) están desplegados en redes de comunicaciones en todo el mundo. Actualmente únicamente se utiliza la banda infra-roja y la banda C+L (longitudes de onda de 1.3 a 1.6 μm). Esto es debido a la gran disponibilidad comercial de dispositivos de amplificación, principalmente amplificadores ópticos EDFA, en dicha banda. La capacidad útil de la banda C+L, aunque sustancial, es finita, y se está agotando debido a la creciente demanda de capacidad exigida por los usuarios. La propagación modal discreta (conocida en la literatura científica como “*few-mode propagation*”) ha surgido recientemente como una oportunidad tecnológica para incrementar la capacidad de transmisión (régimen binario \times número de usuarios) de los enlaces ópticos. En el estado del arte, se ha propuesto la utilización de multiplexación por división de modos (MDM, del inglés *mode division multiplexing*) en fibras especiales basadas en cristal fotónico (Sakamoto et al., 2011) pero la utilización de fibras especiales es un hándicap que limita el desarrollo de esta tecnología dado su alto coste. En este proyecto se propone la transmisión MDM utilizando fibra monomodo estándar (SSMF), ampliamente desarrollada en redes ópticas comerciales y de menor coste.

En los últimos años, varios estudios han informado de la transmisión de luz visible mediante láseres utilizando SSMF (Hanzawa et al., 2011). La propagación de pocos modos es posible a través de la utilización de longitudes de onda alrededor del visible utilizando fibra SSMF, permitiendo la propagación de varios modos en fibras monomodo. A 850 nm, sólo se admiten dos modos de polarización lineal (LP, del inglés *linearly polarized*) en SSMF (por ejemplo, Corning SMF-28) en comparación con los más de 100 modos de la fibra multimodo (MMF). Sin embargo, la dispersión modal a 850 nm en SSMF es mucho más grande (~ 2.3 nm / km) que en MMF (Tian et al., 2012).

En este proyecto se propone la propagación de dos modos usando SSMF con la transmisión de datos diferentes multiplexados en la misma fibra transmitidos en los modos de orden bajo LP₀₁ y LP₁₁, trabajando en longitudes de onda en el rango de 850 nm.

1.1. Objetivos y metodología

La finalidad de este proyecto es el estudio del acoplo y la conversión de modos para la transmisión MDM en enlaces de muy alta capacidad. Para ello se definen los siguientes objetivos de investigación:

- Objetivo #1: Diseño y evaluación de los dispositivos necesarios para la transmisión con multiplexación modal.
- Objetivo #2: Fabricación y caracterización de los dispositivos basados en guías ópticas basadas en silicio (SOI).

La metodología a aplicar durante la realización de este proyecto se basa en las etapas del método científico convencional aplicada a cada uno de los objetivos detallados anteriormente:

- Fase 1: Búsqueda bibliográfica y análisis del escenario de aplicación. Este proceso de análisis bibliográfico se ha desarrollado a lo largo de todo el proyecto para conocer el estado del arte de cada una de las tecnologías a investigar.
- Fase 2: Planteamiento de diferentes soluciones. Una vez analizada la problemática, se han propuesto diferentes soluciones en base al análisis del estado del arte y a las especificaciones para la transmisión con multiplexación modal propuesta en el proyecto, en concreto en la Sección 2 de este artículo se describen los dispositivos estudiados en este proyecto incluyendo el acoplador óptico y el filtro de modos.

- Fase 3: Diseño y validación mediante simulación utilizando las herramientas de diseño comerciales, particularmente RSOFT BeamPROP para el análisis de acoplo modal. Optimización de los parámetros básicos de cada dispositivo (longitud de acoplamiento, separación entre fibras, etc.). En concreto, en la Sección 3 de este artículo se reportan los resultados obtenidos para el diseño de (i) un acoplador modal en dos configuraciones (simétrico y asimétrico) y (ii) un filtro de modos basado en fibra monomodo.
- Fase 4: Fabricación y verificación experimental: Después de realizar el diseño y la validación teórica se ha realizado una demostración en laboratorio y se han caracterizado las prestaciones de los dispositivos. En la Sección 4 de este artículo se incluyen los resultados del diseño, fabricación y caracterización de un acoplador modal asimétrico realizado en SOI.

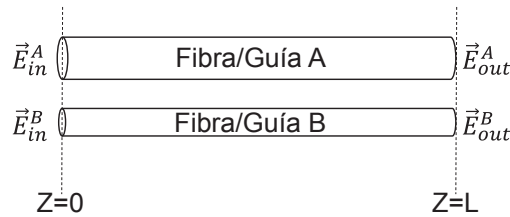
Finalmente en la Sección 5 de este trabajo se resumen los resultados obtenidos en esta investigación para la consecución de los objetivos propuestos

2. Soluciones consideradas

2.1 Dispositivo #1: Acoplador óptico

El esquema genérico de un acoplador, representado en la Figura 1, se basa en el uso de dos fibras ópticas, separadas una distancia de separación y con una longitud de acoplamiento L .

Figura 1: Esquema genérico de un acoplador



El campo a la entrada o salida de cada fibra (A o B) del acoplador se puede expresar como:

$$\vec{E}^A(x, y, z, t) = A(z)\vec{\mathcal{E}}_{mn}^A(x, y)e^{j(\beta_{mn}^A z - \omega t)} \quad (1)$$

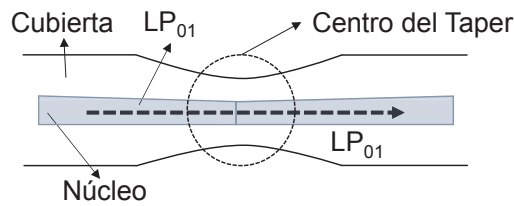
$$\vec{E}^B(x, y, z, t) = B(z)\vec{\mathcal{E}}_{pq}^B(x, y)e^{j(\beta_{pq}^B z - \omega t)} \quad (2)$$

Donde $\vec{\mathcal{E}}_{mn}^A(x, y)$ y $\vec{\mathcal{E}}_{pq}^B(x, y)$ son los perfiles modales de los modos a analizar en cada fibra (mn en la fibra A y pq en la fibra B) mientras que β_{mn}^A y β_{pq}^B son las constantes de propagación respectivas de ambos modos. Tanto los perfiles modales como las constantes de propagación están referidos a los modos de las fibras aisladas y no a los respectivos modos locales en el acoplador cuya influencia aparecerá en la variación con la dirección de propagación de las envolventes complejas $A(z)$ y $B(z)$.

2.2 Dispositivo #2: Filtro de modos

La principal función del filtro de modos es eliminar modos no deseados en recepción. El esquema mostrado en la Figura 2 consiste en reducir el diámetro del núcleo de la fibra de manera que se deje de propagar el modo no deseado debido a las nuevas condiciones de propagación. En este caso se reduce del diámetro original de $8.2 \mu\text{m}$ hasta $4 \mu\text{m}$.

Figura 2: Esquema del filtro de modos



Como se puede observar en la Figura 2 las características que definen al filtro de modos son el diámetro del núcleo en el centro del *taper* (región más estrecha), la longitud de estrechamiento y el perfil de la región de transición.

3. Diseño y validación mediante simulación

3.1. Dispositivo #1. Acoplador óptico

En este estudio se han evaluado los dispositivos necesarios para la transmisión con multiplexación modal a 850 nm. Como se ha comentado anteriormente, a 850 nm solo se propagan dos modos de polarización lineal, los modos LP_{01} y LP_{11} (Llorente et al. 2014). Por un lado se necesita un acoplador para combinar/separar los modos LP_{01} y LP_{11} . Y en recepción se necesita un filtro modal para eliminar el acoplo de modos no deseados. En esta sección se incluyen los resultados de simulación obtenidos con el software comercial RSOFT BeamPROP. Los parámetros básicos de diseño de los dispositivos basados en SMF se pueden encontrar en la Tabla 1.

Tabla 1. Parámetros de simulación

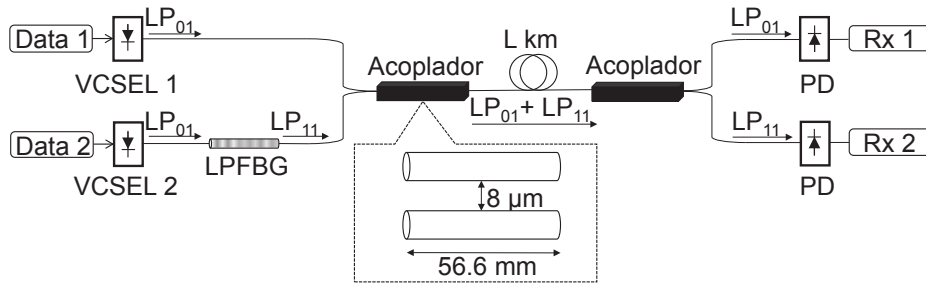
Parámetros	Símbolo	Valor	Unidades
Longitud de onda	λ	850	nm
Índice del núcleo	n_{core}	1.4577	-
Índice de la cubierta	n_{cladding}	1.4525	-
Diámetro del núcleo	D	8.2	μm

3.1.1. Diseño #1.A. Acoplador simétrico

El acoplador simétrico consta de dos fibras ópticas SMF-28 idénticas con diámetro del núcleo de $8.2 \mu\text{m}$ y diferencia de índice de refracción $\Delta=0.36 \%$. Ambas fibras están separadas una distancia de $8 \mu\text{m}$ y tienen una longitud de acoplamiento de 56.6 mm. Estos valores corresponden a un compromiso entre un mayor coeficiente de acoplo (y por lo tanto una menor longitud de acoplamiento) para separaciones entre núcleos de las fibras ópticas más cortas, pero implican un rizado en la respuesta debido al acoplo no deseado entre otros modos. El esquema del acoplador simétrico basado en fibra monomodo se muestra en la Figura 3.

Como se puede apreciar en la Figura 3, se dispone inicialmente de dos diodos laser de semiconductor (VCSEL, del inglés *vertical-cavity surface-emitting laser*) con los que se modulará la información correspondiente en cada uno de los modos. Por la fibra superior se modulará la información correspondiente al modo LP_{01} y por la fibra inferior se modulará otra información distinta también en el mismo modo LP_{01} .

Figura 3: Esquema del acoplador simétrico para transmisión con multiplexación modal

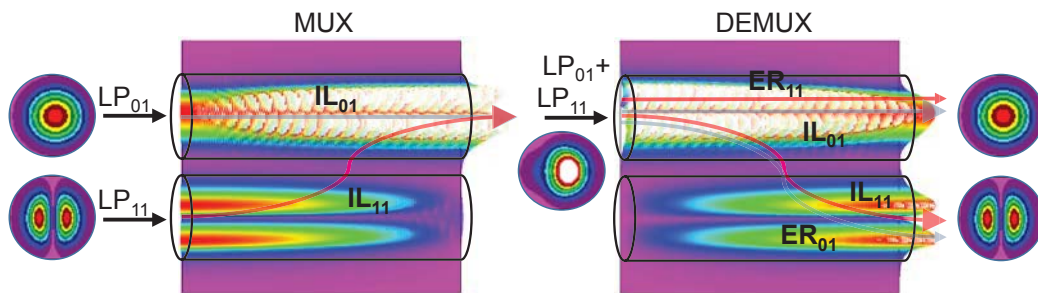


Posteriormente, en la fibra inferior se utiliza un convertor de modos (LPFBG, del inglés *long period fiber bragg grating*) para transformar el modo LP_{01} al modo LP_{11} ya que si las fuentes ópticas están correctamente alineadas, el modo acoplado a la fibra suele ser el LP_{01} tal y como se detalla en (Savin et al. 2000). Una vez realizada la conversión en el primer acoplador, se produce la combinación del modo LP_{11} de la fibra inferior y el modo LP_{01} de la fibra superior, cada uno transportando sus respectivos datos en multiplexación modal.

Una vez se han combinado los modos, la señal multiplexada es transmitida por un enlace de fibra óptica monomodo de L km y llega al segundo acoplador, donde los modos LP_{01} y LP_{11} son demultiplexados cada uno de ellos por una fibra de salida. De esta forma el modo LP_{01} continua por la fibra superior y el modo LP_{11} se acopla a la fibra inferior tal como se muestra en la Figura 4. Finalmente, en el receptor se reciben los datos modulados de cada modo por separado.

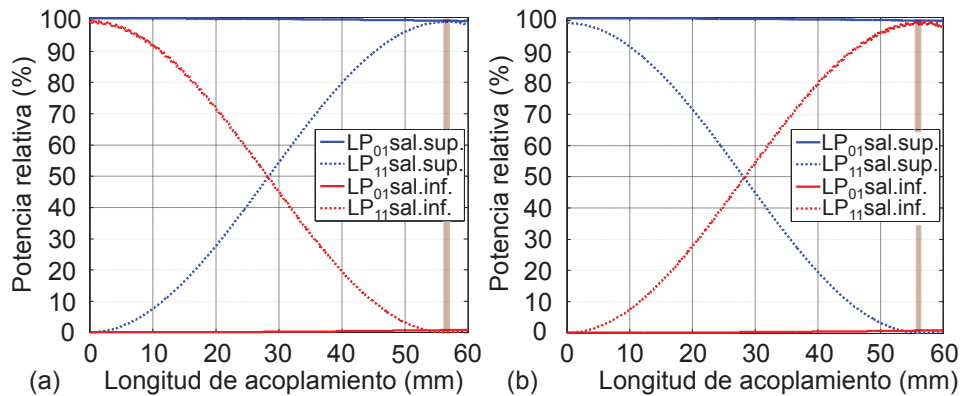
En la Figura 4 se muestran los esquemas simulados del multiplexor y demultiplexor junto con la definición de los parámetros que se van a usar para valorar las prestaciones del acoplador: las pérdidas de inserción (IL, del inglés *insertion loss*) y la relación de extinción (ER, del inglés *extinction ratio*).

Figura 4: Esquema del acoplador simétrico respecto al: (a) Multiplexor. (b) Demultiplexor



En la Figura 5 se muestran los resultados de simulación de la potencia relativa de cada uno de los modos LP_{01} y LP_{11} para el caso del multiplexor y demultiplexor. En la Figura 5(a) se observa cómo se produce un acoplo perfecto del modo LP_{11} a la fibra superior, resultando en un 100 % de eficiencia. Por otro lado, el modo LP_{01} de la fibra superior se mantiene en un 100 % de potencia ya que al tratarse de un modo más confinado en el núcleo de la fibra el coeficiente de acoplo es mucho menor. Por otro lado, en la Figura 5(b) se observa que la demultiplexación funciona perfectamente ya que se obtiene un 100 % de eficiencia en el acoplo del modo LP_{11} a la fibra inferior. De esta forma ambos modos se reciben por separado en el receptor y se detecta la información de forma individual.

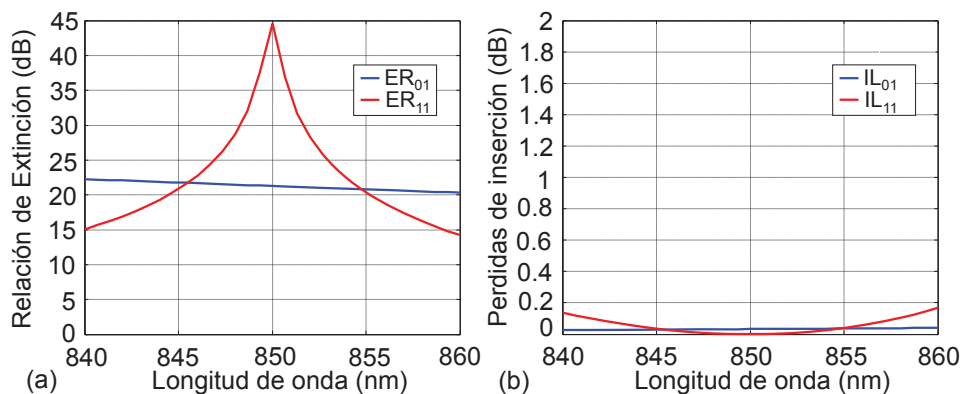
Figura 5: Potencia relativa de los modos LP₀₁ y LP₁₁ en el acoplador simétrico en el caso del:
(a) Multiplexor. (b) Demultiplexor



Se puede concluir que el acoplador simétrico diseñado ofrece una eficiencia del 100 % en el acoplo de modos ya sea funcionando como multiplexor o demultiplexor.

Otro aspecto importante es el comportamiento del acoplador modal para diferentes longitudes de onda alrededor de la longitud de onda de diseño, 850 nm. Con esta simulación se busca evaluar las prestaciones del acoplador en una situación más real y tener en cuenta diferentes fenómenos como la tolerancia de fabricación en la longitud de onda de emisión de las fuentes ópticas, el propio ancho espectral de la fuente óptica o la deriva de la longitud de onda de emisión con la temperatura o el tiempo o simplemente el ensanchado del espectro de emisión por la propia modulación del láser. Los resultados de simulación de la Figura 6 se corresponden al demultiplexor y son muy similares a los del multiplexor ya que ambos acopladores tienen los mismos parámetros de diseño.

Figura 6: Pérdidas de inserción y relación de extinción en el demultiplexor para el acoplador simétrico



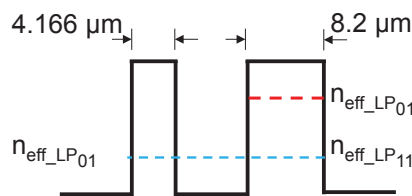
En la Figura 6 se muestran las pérdidas de inserción y la relación de extinción en el caso del demultiplexor para una longitud de onda de barrido de 840 nm a 860 nm. En la Figura 6(a) se observa la relación de extinción, que es la relación entre la potencia del modo LP₀₁ y LP₁₁ que entra por la fibra superior y la potencia residual de cada modo que queda en la fibra superior e inferior. Los resultados muestran una buena relación de extinción para los modos LP₀₁ y LP₁₁, siendo estos de 21.3 dB y 44.5 dB, respectivamente. Por otro lado, si se varía la longitud de onda ± 10 nm respecto la longitud de onda de diseño, se mantiene una buena relación de extinción a costa de una menor eficiencia del dispositivo.

En la Figura 6(b) se observan las pérdidas de inserción de los modos LP_{01} y LP_{11} , es decir, cuanto pierde el modo LP_{01} de la fibra superior entre la entrada y la salida, y cuanto pierde el modo LP_{11} que entra por la fibra superior y sale por la fibra inferior. Los resultados obtenidos muestran que las pérdidas de inserción son mínimas para la longitud de onda de diseño, siendo estas de 0.03 dB y 0.001 dB para los modos LP_{01} y LP_{11} , respectivamente. Por otro lado, si se varía la longitud de onda ± 10 nm respecto la longitud de onda de diseño, se observa que las pérdidas de inserción se mantienen por debajo de 0.2 dB. De esta forma se demuestra que el diseño del acoplador modal ofrece una gran tolerancia frente a variaciones de la longitud de onda o tolerancias de fabricación.

3.1.2. Diseño #1.B. Acoplador asimétrico

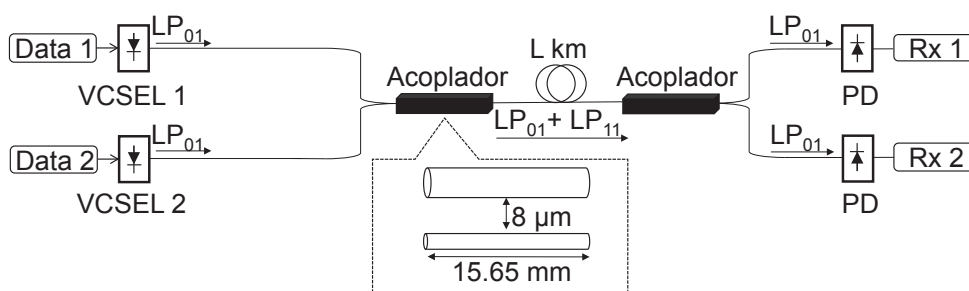
Basándonos en (Li et al. 2012), si se utiliza un acoplador asimétrico no es necesaria la conversión de modos antes del acoplador. Esto se debe a que el índice efectivo del modo LP_{01} de la fibra estrecha (es una fibra SMF-28 pre-pulled, es decir, es una fibra la cual es calentada y estirada antes de fabricar el acoplador, con el fin de reducir el diámetro del núcleo) debe ser igual al índice efectivo del modo LP_{11} de la fibra ancha (fibra SMF-28) para que se realice la conversión del modo LP_{01} al modo LP_{11} , tal y como se muestra en la Figura 7.

Figura 7: Perfil del índice de refracción del acoplador. Fibra SMF-28 pre-pulled y SMF-28



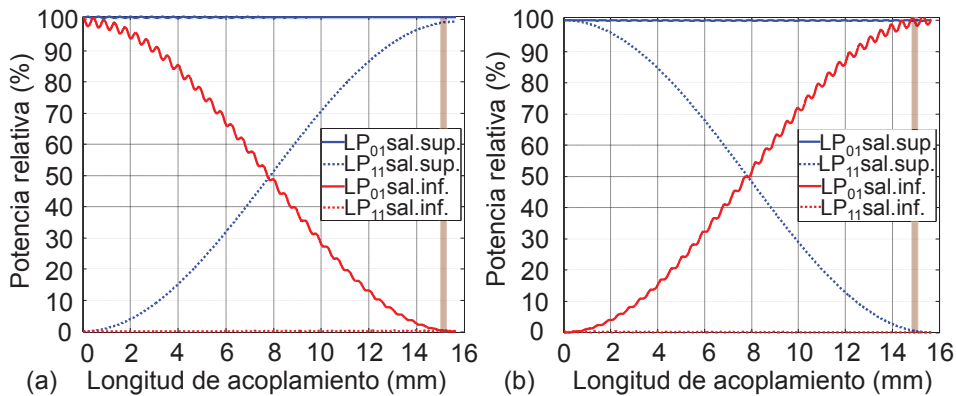
El acoplador asimétrico consta de dos núcleos de fibra óptica que no tienen el mismo diámetro, una fibra es de diámetro 8.2 μm mientras que la otra es de 4.166 μm. Además, ambas fibras ópticas están separadas una distancia de 6 μm y tienen una longitud de acoplamiento de 15.65 mm.

Figura 8: Esquema del acoplador asimétrico



Como se puede observar en la Figura 8, en el acoplador asimétrico ya no es necesaria la utilización de un convertidor de modos si no que se transmite directamente el modo fundamental (LP_{01}) por ambas ramas con su respectiva información modulada.

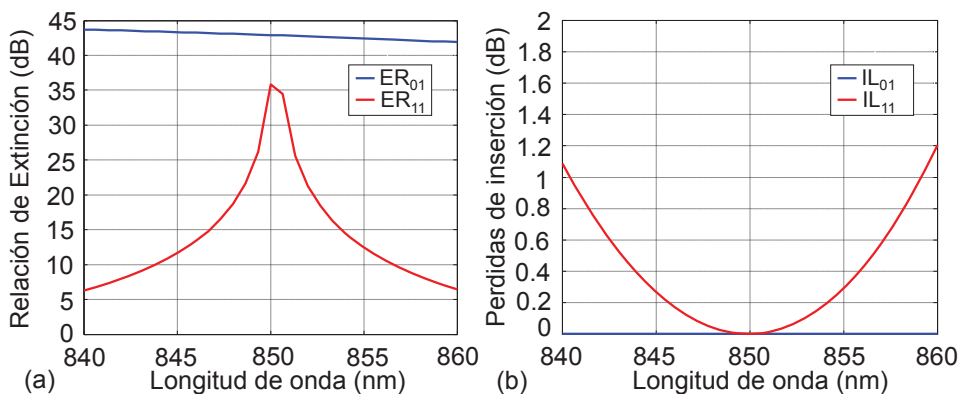
Figura 9: Potencia relativa de los modos LP₀₁ y LP₁₁ en el acoplador asimétrico en el caso del:
(a) Multiplexor. (b) Demultiplexor



En la Figura 9 se muestra la potencia relativa de los modos LP₀₁ y LP₁₁ para el caso del multiplexor y demultiplexor. Tanto en la Figura 9(a) como en la Figura 9(b) se observa cómo se produce un acoplo perfecto de los modos en cada uno de los respectivos acopladores, tanto en el multiplexor como en el demultiplexor, resultando en un 100 % de eficiencia. Hay una cosa a tener en cuenta y es que el rizado que se observa tanto en el multiplexor como en el demultiplexor es debido al auto acoplamiento de los propios modos. Observando el acoplo deseado (LP₀₁ a LP₁₁) se puede ver que la longitud de acoplo es de 15.65 mm donde si se cumple la condición de fase ($\delta=0$) en el acoplador se obtiene un determinado coeficiente de acoplo. Además, si se considera el posible acoplo entre los dos modos LP₀₁, se sabe que esos dos modos no tienen el mismo índice de refracción y por lo tanto no se cumple la condición de fase ($\delta>0$). Suponiendo que los coeficientes de auto-acoplo para esta combinación de modos es despreciable se estima el coeficiente de acoplo entre los modos LP₀₁ de la fibra superior y LP₀₁ de la fibra inferior. No se sabe cuál es este coeficiente de acoplo pero lo que sí es seguro es que será inferior al de los modos LP₀₁ y LP₁₁, ya que el modo LP₀₁ está más confinado que el LP₁₁ el cual ya tiene un coeficiente de acoplamiento un orden de magnitud inferior a δ . Por lo tanto, para el acoplo no deseado entre los modos LP₀₁ de la fibra superior y LP₀₁ de la fibra inferior se tendrá una distancia de acoplo menor.

En la Figura 10 se muestra un barrido en longitudes de onda para evaluar el comportamiento del dispositivo alrededor de la longitud de onda de diseño, 850 nm.

Figura 10: Pérdidas de inserción y relación de extinción en el demultiplexor para el acoplador asimétrico

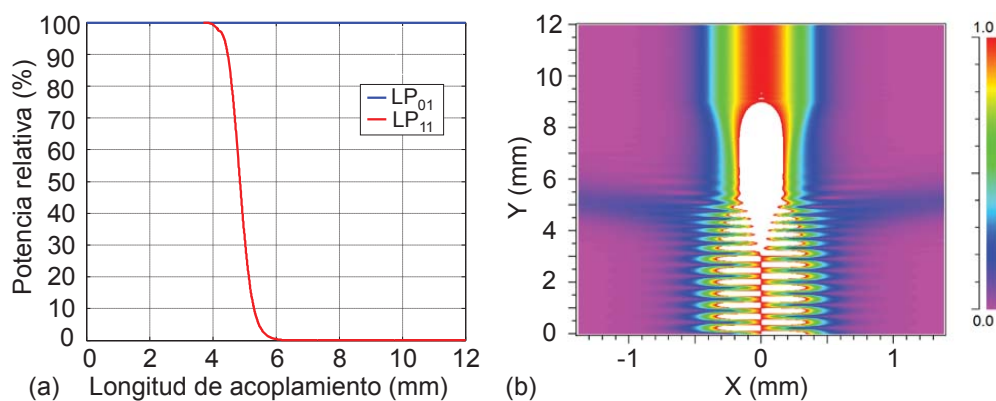


La Figura 10(a) muestra una relación de extinción muy similar a la del acoplador simétrico aunque en este caso la relación de extinción es mejor para el modo LP_{01} (alrededor de 42 dB) y peor para el modo LP_{11} (alrededor de 35 dB). En cambio, en la Figura 10(b) se muestran las pérdidas de inserción de ambos modos, siendo estas pérdidas muy bajas para la longitud de onda de diseño. Por otro lado, si se produce una variación de ± 10 nm las pérdidas del modo LP_{11} se incrementan hasta 1 dB siendo inferiores a 0.2 dB en el caso del acoplador simétrico.

3.2 Dispositivo #2. Filtro de modos

El filtro de modos se ha sido simulado bajo las siguientes características: longitud de onda de 850 nm, fibra SMF-28 de $8.2 \mu\text{m}$ y una longitud total de 12 mm, incluyendo los 6 mm de longitud del taper, tal y como se muestra en la Figura 11.

Figura 11: (a) Potencia relativa de los modos LP_{01} y LP_{11} del filtro de modos. (b) Mapa de contorno del filtro de modos



En la Figura 11(a) se muestra la distribución de potencia que tienen los modos LP_{01} y LP_{11} cuando se propagan por el filtro de modos. Se puede observar claramente como disminuye de potencia el modo LP_{11} cuando empieza a disminuir el diámetro del núcleo de la fibra, debido a las nuevas condiciones de propagación. En concreto, el modo LP_{11} se acaba eliminando casi en su totalidad quedando un valor residual del 0.0004 %.

En la Figura 11(b) se muestra el mapa de contorno del filtro de modos y se visualiza para una longitud de 6 mm como el modo LP_{11} se disipa por la cubierta cuando el diámetro del núcleo de la fibra óptica alcanza su punto más estrecho.

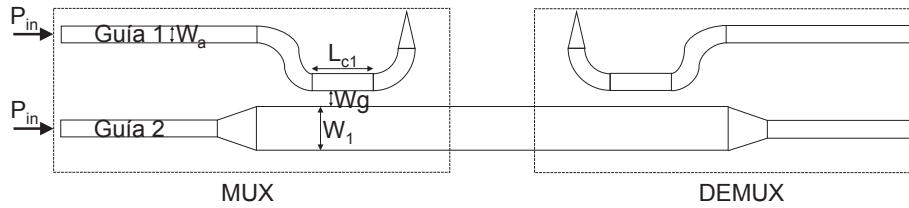
Se puede concluir que el filtro de modos diseñado ofrece una eficiencia del 100 % en la eliminación de modos indeseados.

4. Fabricación y verificación experimental dispositivo de prueba

La estructura básica de una guía de ondas óptica dieléctrica consiste en un medio óptico de alto índice (núcleo) que se extiende longitudinalmente y que está rodeado transversalmente por un medio de bajo índice (cubierta).

En este tipo de esquema, a partir de las dimensiones del multiplexor y demultiplexor, es posible convertir modos. En la Figura 12 se muestra el esquema de una guía óptica basada en SOI, la cual dispone de dos guías ópticas de altura 220 nm y anchura (W_a) de 400 nm. Por otro lado, la Guía 2 se ensancha (W_1) desde 400 nm hasta 865 nm para realizar la conversión del modo TE_0 de la Guía 1 al modo TE_1 de la guía 2, a través de una longitud de acoplamiento (L_{c1}) de $13 \mu\text{m}$ en la Guía 1. Además, la separación entre las guías (W_g) es de $0.2 \mu\text{m}$ en la región de longitud de acoplamiento.

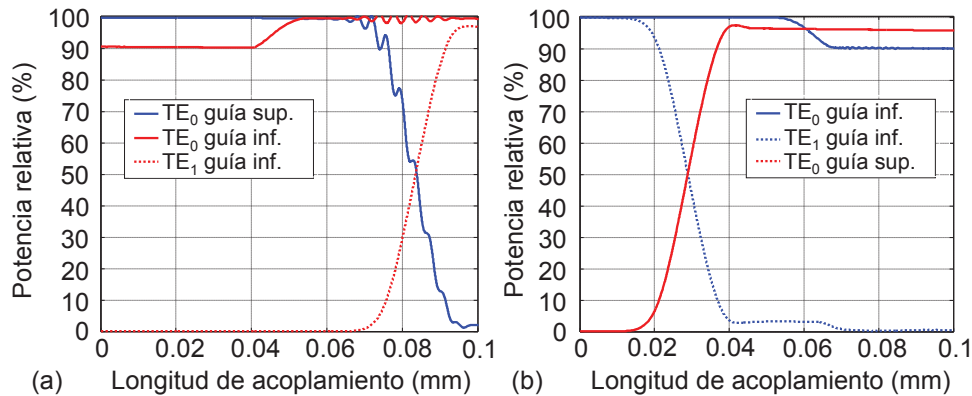
Figura 12: Esquema de la guía óptica basada en SOI



4.1 Diseño del acoplador asimétrico basado en SOI

Basándonos en (Dai et al. 2014), es posible realizar la conversión de modos en guías ópticas basadas en silicio a 1550 nm. La ventaja de utilizar 1550 nm en vez de 850 nm es que el silicio a 1550 nm tiene bajas pérdidas en comparación con la absorción producida a 850 nm.

Figura 13: Potencia relativa de los modos TE_0 y TE_1 en la guía óptica en el caso del: (a) Multiplexor. (b) Demultiplexor

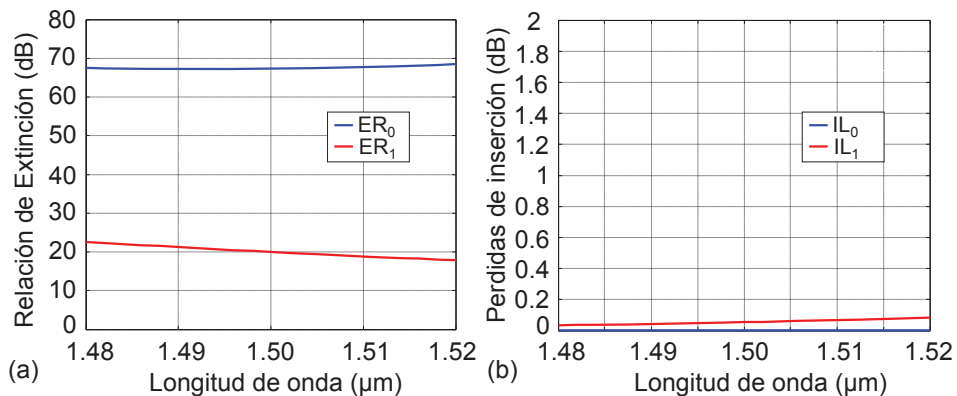


En la Figura 13(a) se muestra como el modo TE_0 de la guía superior acaba convirtiéndose casi en su totalidad en el modo TE_1 en la guía inferior, resultando en una eficiencia de acoplo del 96.6 %. Por otro lado, el modo TE_0 de la guía inferior mantiene prácticamente el 100 % de potencia ya que al tratarse de un modo más confinado en el núcleo de la guía el coeficiente de acoplo es mucho menor.

En la Figura 13(b) se muestran los resultados de potencia en el caso del demultiplexor y como este realiza la conversión del modo TE_1 de la guía inferior al modo TE_0 de la guía superior con una eficiencia del 95.7 %.

Finalmente, se ha evaluado el comportamiento del acoplador modal para diferentes longitudes de onda alrededor de la longitud de onda de diseño, 1550 nm. En la Figura 14(a) se muestra la relación de extinción del acoplador en guía óptica obteniendo un valor de 67,3 dB para el modo TE_0 de la guía ancha y de 20 dB para el modo TE_0 de la guía fina. Además, si se observa los resultados en una variación de ± 20 nm se muestra como son muy similares a los de la longitud de onda de diseño, 1550 nm. Por otro lado, en la Figura 14(b) se muestran las pérdidas de inserción, siendo estas prácticamente nulas tanto para la longitud de onda de diseño como en una variación de ± 20 nm.

Figura 14: Pérdidas de inserción y relación de extinción en el demultiplexor para la guía óptica

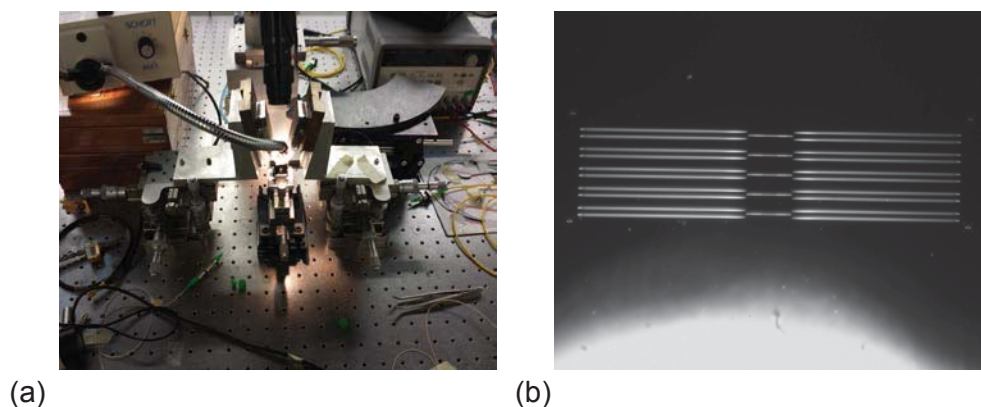


4.2. Fabricación y caracterización del acoplador basado en SOI

Siguiendo los resultados de los análisis obtenidos en la sección anterior, se ha procedido con la fabricación y caracterización del acoplador modal a 1550 nm en los laboratorios del Centro de Tecnología Nanofotónica de la Universidad Politécnica de Valencia. La fabricación y caracterización de las estructuras basadas en SOI requieren un proceso complejo y una serie de pasos muy precisos. Las estructuras se han fabricado sobre muestras estándar de SOI del proveedor de obleas SOITEC con una capa superior de silicio de 220 nm de espesor (resistividad $\rho \sim 1-10 \Omega\text{cm}^{-1}$, con un ligero dopado tipo p de $\sim 10^{15} \text{cm}^{-3}$) y una capa de óxido enterrada de unas 2 μm . La fabricación está basada en la tecnología de grabado directo con haz de electrones llevado a cabo sobre una capa cubierta de resina HSQ de 100 nm. La exposición a haz de electrones anteriormente mencionada y realizada con la herramienta Raith150, fue optimizada para conseguir las dimensiones requeridas, empleando un voltaje de aceleración de 30 KeV y una apertura numérica de 30 μm . Tras revelar la resina HSQ usando el revelador TMAH, los patrones de resina fueron transferidos a las muestras SOI empleando el también optimizado proceso "Inductively Coupled Plasma- Reactive Ion Etching" y gases fluorados. Se deposita un revestimiento superior de óxido de silicio y 700 nm de espesor sobre la muestra SOI empleando el equipo PECVD de Applied Materials.

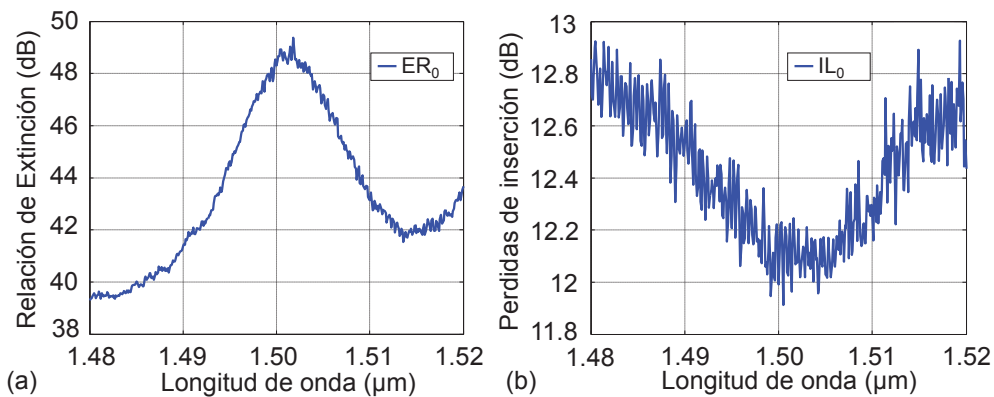
En la Figura 15 se muestran dos capturas del dispositivo. La Figura 15(a) es una captura correspondiente al proceso de montaje para la medición del dispositivo y la Figura 15(b) es una captura durante el proceso de caracterización.

Figura 15: (a) Montaje del proceso de caracterización. (b) captura del dispositivo fabricado durante caracterización



La Figura 16 muestra los resultados medidos en el laboratorio de caracterización en el caso del demultiplexor pero como ya se dijo estos resultados serán muy similares al multiplexor. En la Figura 16(a) se representa la relación de extinción y se puede ver como la mejor relación de extinción (alrededor de 48.5 dB) se obtiene para 1551 nm, muy cerca de la longitud de onda de diseño, 1550 nm. Por otro lado, en la Figura 16(b) las pérdidas de inserción son mínimas para 1551 nm, obteniendo un valor de 12.1 dB.

Figura 16: Resultados de caracterización para (b) pérdidas de inserción salida directa-directa y (c) relación de extinción salida directa-acoplada



Estas medidas difieren de los resultados simulados debido a que en la simulación solo se tiene en cuenta la propagación de los modos por las guías ópticas y no el acoplo fibra-grating y grating-fibra, además de errores de fabricación, derivas en la longitud de onda del láser, etc.

5. Conclusiones

A lo largo de este proyecto se han cumplido los objetivos de investigación propuestos y descritos en la Sección 1 de este artículo con la fabricación de un dispositivo real para acoplo el modal. En este artículo se resumen los resultados obtenidos en las fases de análisis, diseño y fabricación de los distintos dispositivos para conseguir una transmisión óptica de alta capacidad con multiplexación modal. Siguiendo con la metodología de trabajo propuesta, en la Fase #3 se ha confirmado mediante simulación que los acopladores basados en fibra óptica (simétricos y asimétricos) funcionan como multiplexor y como demultiplexor de modos LP_{01} y LP_{11} , obteniendo eficiencias de conversión de prácticamente el 100%. Por otro lado, se evaluó el comportamiento de estos dispositivos a otras longitudes de onda diferentes de la de diseño y se obtuvieron buenos resultados en cuanto a pérdidas de inserción y relación de extinción.

En este proyecto también se ha estudiado el comportamiento de un filtro de modos cuya función es eliminar modos no deseados en la transmisión. Los resultados obtenidos indican que se consigue eliminar correctamente el modo LP_{11} en un 99,99%.

Finalmente, en la Fase #4 se ha diseñado y fabricado el acoplador modal basado en guía óptica con tecnología SOI a 1550 nm. En el proceso de fabricación se ha seleccionado 1550 nm en vez de 850 nm ya que el silicio a 1550 nm tiene bajas pérdidas en comparación con la absorción producida a 850 nm. En este análisis se ha podido comprobar que el acoplador basado en SOI funciona perfectamente tanto como multiplexor que como demultiplexor de modos, obteniendo eficiencias de acoplo del 97 % y 96 %, respectivamente. Por otro lado, el estudio con la variación en longitud de onda ha demostrado que el dispositivo funciona perfectamente frente a variaciones en la fabricación obteniendo pérdidas de inserción inferiores a 0.2 dB y una relación de extinción de 70 dB. Por último, el diseño y caracterización del dispositivo se ha realizado correctamente obteniendo resultados esperados en cuanto a pérdidas de inserción y relación de extinción.

6. Referencias bibliográficas

Dai, D., & Wang, J. (2014). Multi-channel Silicon Mode (de)multiplexer based on Asymmetrical Directional Couplers for on-chip Optical Interconnects. *Photonics Society*, vol. 28, paper IM2A.2

Hanzawa, N., Saitoh, K., Sakamoto, T., Matsui, T., Tomita, S., & Koshihara, M. (2011). Demonstration of mode-division multiplexing transmission over 10 km two-mode fibre with mode coupler. *Proc. Optical Fibre Communication Conference and Exposition (OFC/NFOEC 2011)*, Los Angeles, USA, paper OWA4. DOI: 10.1364/OFC.2011.OWA4

Li, A., Chen, X., Al Amin, A., & Shieh, W. (2012). Fused Fiber Mode Couplers for Few-Mode Transmission. *IEEE Photonics Technology Letters*. vol. 24, pp. 1953-1956

Llorente, R., Morant, M., Garcia, D., Medina, P., Corral, J. L., & Almenar, V. (2014). Few-Mode Optical Transmission Systems in the Visible Band. *International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, Graz, Austria, paper Th.A1.3 DOI: 10.1109/ICTON.2014.6876664

Sakamoto, T., Mori, T., Yamamoto, T., Ma, L., Hanzawa, N., Aozasa, S., Tsujikawa, K., & Tomita, S. (2011). Transmission over large-core few-mode photonic crystal fiber using distance-independent modal dispersion compensation technique. *Optics Express*, vol. 19, 478-485.

Savin, S., Digonnet, M.J.F., Kino, G.S., & Shaw, H.J. (2000). Tunable mechanically induced long-period fiber gratings. *Optics Letters*, vol. 25, pp. 710-712

Tian, Z., Chen, C., & Plant, D. V. (2012). 850-nm VCSEL transmission over standard single-mode fibre using fibre mode filter. *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 24, pp. 368-370.

