



UNIVERSIDAD
POLITECNICA
DE VALENCIA



Máster Universitario
en Tecnologías, Sistemas y
Redes de Comunicaciones

Conversión modal discreta mediante acopladores ópticos pasivos

Autor: David García Rodríguez

Director: Roberto Llorente Sáez

Codirector: Juan Luis Corral González

Fecha de comienzo: 10/02/2014

Lugar de trabajo: Centro de Tecnología Nanofotónica de Valencia (NTC)

Objetivos — La presente tesina tiene como objetivo el estudio del acoplo y la conversión de modos en un acoplador óptico mediante la fusión de dos fibras ópticas o guías. El objetivo concreto consta de dos partes:

- Estudio teórico del acoplo de modos para averiguar los valores que van a ser introducidos en el software de simulación, como son el índice del núcleo de la fibra óptica o guía, el índice de refracción de la cubierta, etc. De esta forma se averigua si los resultados obtenidos en la simulación concuerdan o no con los cálculos teóricos como es el caso de los índices efectivos de refracción de cada modo.
- Estudio del acoplo de modos mediante un software de simulación para averiguar antes de utilizar o fabricar el dispositivo que se obtiene la respuesta deseada y así optimizar los parámetros del dispositivo (longitud de acoplamiento, separación entre fibras/guías, etc.) en el caso de fabricarse. Además, la utilización del simulador permite estudiar la variación de la respuesta del dispositivo para longitudes de onda diferentes de la de diseño.

Metodología — La metodología aplicada en la realización de esta Tesina se puede apreciar en los siguientes puntos:

- Búsqueda bibliográfica.
- Estudio teórico del acoplo modal de la fibra/guía óptica.
- Simulación de los diferentes esquemas de acoplo modal.
- Análisis de los diferentes resultados obtenidos.

Desarrollos teóricos realizados — Se han realizado una serie de cálculos teóricos con tal de obtener los parámetros fundamentales de la fibra/guía óptica. En estos cálculos se han obtenido los índices de refracción del núcleo y cubierta de la fibra óptica para una longitud de onda de 850 nm, los índices de refracción efectivos de los modos LP_{01} y LP_{11} de la fibra óptica SMF-28 como de la fibra óptica con diámetro reducido (HI-780) para la misma longitud de onda y finalmente los índices de refracción efectivos de los modos TE y TM en caso de las guías ópticas a partir del método del índice efectivo.

Desarrollo de prototipos y trabajo de laboratorio — La presente tesina se ha realizado mediante un software de simulación con lo que no se han realizado pruebas experimentales de laboratorio y actualmente aún no se ha desarrollado ningún prototipo. Por otro lado, con la obtención de los resultados de la presente tesina se pretende diseñar e implementar el dispositivo en el Laboratorio de Redes y Sistemas del Centro de Tecnología Nanofotónica (NTC) de la Universitat Politècnica de València.

Resultados — Se han simulado los diferentes esquemas de acoplo modal propuestos en la presente tesina con lo que se dispone de cada uno de los resultados de la simulación. Los resultados de los diferentes esquemas se pueden englobar en los siguientes puntos:

1. El primer esquema simulado ha sido el acoplador simétrico. Como multiplexor el acoplador ha presentado una serie de resultados muy eficientes en el que se ha podido obtener un acoplo del modo LP_{11} a la otra fibra del 100 %. Por otro lado, como demultiplexor ha permitido desacoplar los modos y obtener por el camino directo el modo LP_{01} y por el camino acoplado el modo LP_{11} con un acoplo del 99,2 % y 100 %, respectivamente.
2. El segundo esquema simulado ha sido el acoplador asimétrico. En este caso como multiplexor se ha realizado correctamente la conversión del modo LP_{01} al modo LP_{11} en la fibra ancha con un acoplo del 99,95 % y como demultiplexor se ha separado de forma eficiente los dos modos, convirtiéndose el modo LP_{11} al modo LP_{01} a la fibra fina con un acoplo del 100 %.

3. El tercer esquema simulado ha sido el filtro de modos cuya función es eliminar modos no deseados por dicha fibra, donde se ha comprobado que el modo LP_{11} se ha eliminado en un 99,99 %.
4. El último esquema simulado ha sido la guía óptica basada en SOI. En este tipo de esquema, en el caso del multiplexor, a partir de la excitación del modo TE_0 en la guía fina ha sido posible la conversión de este modo al modo TE_1 en la guía ancha con un acoplo del 96,6 %. En cambio, como demultiplexor se ha obtenido un acoplo del 95,73 % en la conversión del modo TE_1 al TE_0 .

Líneas futuras —Una vez simulado el acoplador con sus dimensiones específicas se pasa a fabricar el acoplador modal en nuestras instalaciones con tecnología de Silicio teniendo como referencia los parámetros de la simulación. Hay 2 posibles formas de hacer el acoplador integrado:

- SOI (Silicon-on-insulator, es decir Si (silicio) sobre sustrato de SiO_2 (óxido de silicio) que es el cladding de las fibras): es la tecnología básica del NTC y con la que más experiencia se tiene. Se consiguen guías de dimensiones pequeñas (típicas de 220nm de alto, llamadas *nanowires*) gracias al alto contraste entre el núcleo (índice 3.455) y el sustrato que rodea a la guía (1.445). Es una tecnología adecuada para trabajar en tercera ventana (1550 nm) pero no en 850 ya que ahí el Silicio tiene mucha absorción, es decir, pérdidas. Tienen como inconveniente que es difícil de acoplar horizontalmente la luz que va por esa guía de 220 nm de alto con una fibra monomodo estándar de 8.2 μm de diámetro en su núcleo aunque es posible hacerlo de forma vertical inclinada mediante el uso de redes de difracción (*gratings*).
- Guías de nitruro de silicio (Si_3N_4) sobre sustrato de óxido de silicio (SiO_2). El índice de la guía es ahora del entorno de 1.97 por lo que ahora las guías tienen dimensiones del entorno de 1 μm de alto. Con estas dimensiones se facilita ligeramente el acoplo a la fibra monomodo. Esta tecnología sí se podría usar a 850 nm. Además, esta tecnología también se puede hacer íntegramente en NTC.

Publicaciones — La presente Tesina ha servido como contribución a una publicación en un congreso internacional. Dicho congreso es el *International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, que es la conferencia más relevante en el ámbito de las comunicaciones ópticas en Europa.

Abstract — This work introduces the principles and current technology of few-mode transmission in guided optical medium for systems operating in the visible band. The visible band opens up the possibility of using standard single mode fibre, as few-mode propagation media, with the advantage of lower cost than equivalent C+L components.

Autor: David García Rodríguez, email: dgarciarodriguez@ntc.upv.es

Director: Roberto Llorente Sáez, email: rllorent@dcom.upv.es

Codirector: Juan Luis Corral González, email: jlcorral@dcom.upv.es

Fecha de entrega: 14-07-2014

ÍNDICE

I. Introducción	4
I.1 Motivación y objetivos	4
II. Estado del arte	5
II.1 Acopladores por Fusión	5
II.2 Sistemas de Óptica Espacial.....	5
II.3 Esquemas de Multiplexación Modal.....	7
III. Acoplo modal mediante fibra óptica	9
III.1 Teoría de acoplo de modos	9
III.2 Cálculo índice de refracción del núcleo y cubierta.....	10
III.3 Calculo índice de refracción efectivo en fibra óptica	11
III.4 Calculo índice de refracción efectivo en guías ópticas.....	13
IV. Análisis mediante simulación de acoplo modal	15
IV.1 Acoplador simétrico	16
IV.2 Acoplador asimétrico.....	21
IV.3 Filtro de Modos	29
IV.4 Guías ópticas basadas en SOI.....	31
V. Conclusiones y líneas abiertas	35
AGRADECIMIENTOS	37
BIBLIOGRAFIA	38
ANEXO	39

I. Introducción

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 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. Hasta el momento actual, se ha propuesto la utilización de esta técnica en fibras especiales de alto coste y baja disponibilidad basadas en cristal fotónico [1]. La utilización de fibras especiales es un hándicap que limita el desarrollo de esta tecnología.

1.1 Motivación y objetivos

La motivación subyace del interés mostrado por el alumno por el tema relacionado con el campo de las comunicaciones ópticas, más concretamente, por la conversión modal. De esta forma, se estudiarán las diferentes técnicas de acoplo modal como los acopladores por fusión, donde se verá claramente el acoplo de modos de una fibra a otra.

Los estudios que se pretenden llevar a cabo se van a centrar en la conversión modal mediante un acoplador por fusión a partir de la fusión de dos fibras ópticas o mediante acopladores en guías en un dispositivo integrado. De esta forma, se estudiará previamente de forma teórica cuales son las características de la fibra óptica (índice del núcleo, índice de la cubierta, longitud de onda, etc.) para que el acoplo de modos de una fibra a otra se realice correctamente, para ello, posteriormente se habrá simulado mediante software el acoplo de modos para así obtener las características finales del acoplador.

Una de las metas de este Trabajo Fin de Máster (TFM) como bien se ha comentado es la simulación del acoplador para realizar la conversión modal controlada, que permite obtener una serie de gráficas en las cuales se puede observar como fluctúan los modos a lo largo de la estructura así como las amplitudes e intensidades de dichos modos. Además, dicho software ofrece la posibilidad de realizar una serie de cortes en los ejes (X, Y, Z) de coordenadas así como el uso de técnicas de representación como son los mapas de contorno, modelos sólidos, representaciones 3D, 2D, etc.

Una vez se han alcanzado los objetivos anteriores, se procederá a comentar las conclusiones finales alcanzadas en la presente tesina, de esta forma se podrá saber si los objetivos se han cumplido y si han sido satisfactorios.

Finalmente, se comentarán las líneas abiertas a partir de los resultados obtenidos para que se pueda mejorar en un futuro la presente tesina. Además, se incluirán en apartados posteriores los agradecimientos al realizar la presenta tesina y la referencia bibliográfica utilizada.

II. Estado del arte

En este apartado se va a realizar un estudio de las diferentes técnicas de acoplo modal que existen en la actualidad como son los acopladores por fusión, el acoplo modal mediante óptica espacial, esquemas de Multiplexación Modal, etc.

II.1 Acopladores por Fusión

Los acopladores de fibra óptica fusionada se utilizan ampliamente en las comunicaciones ópticas, por ejemplo en detección (como interferómetros, giróscopos, etc.) o láseres de fibra para dividir la señal óptica entre dos fibras o combinar dos señales en una única fibra. En la Fig. 1 se muestra un ejemplo de acoplador óptico para convertir modos. En este caso, se trata de un filtro de modos a 850 nm que consiste en un rotador espacial de modos LP_{11} y un acoplador de modos LP_{01}/LP_{11} [2].

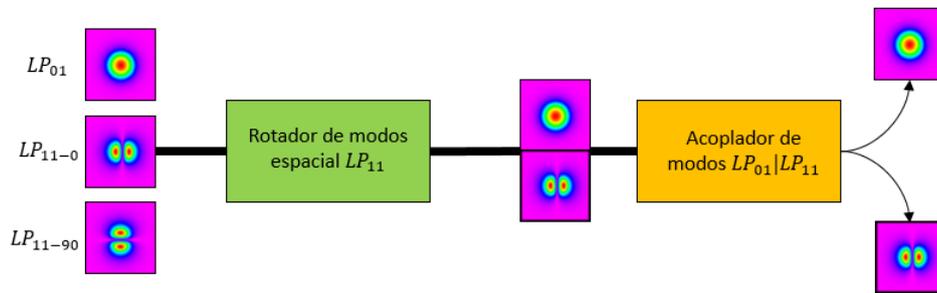


Fig. 1. Esquema de un filtro de modos a 850 nm que consiste en un rotador espacial de modos LP_{11} y un acoplador de modos LP_{01}/LP_{11} [2]

Para distinguir estos modos espaciales, el LP_{11-m} representa un modo del LP_{11} , donde m es el ángulo (en grados) entre la dirección principal de campo evanescente y el eje x , como se muestra en las imágenes de la Fig. 1. El modo LP_{11-m} se propaga sin cambiar su estado espacial a través de la fibra estándar SMF-28, pero su estado espacial se puede girar si se introduce una fibra birrefringente.

II.2 Sistemas de Óptica Espacial

Los acopladores por óptica espacial se caracterizan porque su elemento principal es el multiplexor de modos (MMUX, del inglés *Mode-Multiplexers*). Los MMUX toman la luz desde múltiples haces de luz entrantes o fibras monomodo y los combina de tal manera que cada señal de entrada está acoplada a un modo diferente. Debido a que los modos de la fibra multimodo (MMF, del inglés *Multi-Mode Fiber*) son ortogonales, es posible hacer el acoplo de modos sin pérdidas. Esto es análogo a un dispositivo que separa dos polarizaciones (PBS, del inglés *Polarization-Division Multiplexing*) para multiplexación por polarización (PDM) o una red de difracción para el caso de multiplexación por longitud de onda (WDM). Los hologramas delgados, sin embargo, solo pueden generar un modo de la fibra cada vez, por lo tanto harán falta combinadores de haz para combinar múltiples modos generados por múltiples hologramas delgados.

Se puede observar en la Fig. 2 el esquema de la estructura del multiplexor de modos.

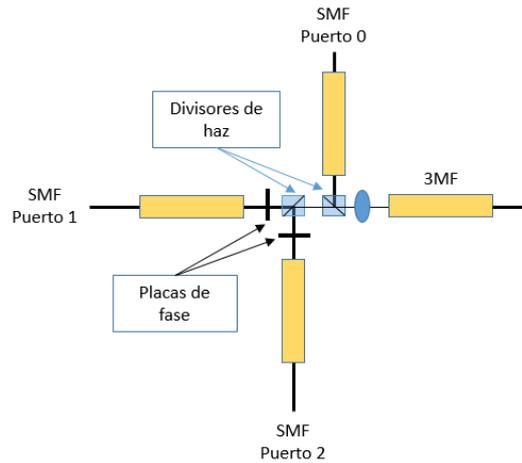


Fig. 2 Arquitectura del MMUX [3]

En la Fig. 2 se han utilizado 3 colimadores con un diámetro nominal del haz de 500 μm . Los colimadores obtuvieron las imágenes en la faceta final de la fibra de tres modos (3MF, del inglés *Three-Mode Fiber*) por medio de dos lentes, la primera con una longitud focal de 75 mm y la segunda, una lente esférica, con una longitud focal de 3,9 mm colocada en frente de la 3MF. La 3MF era una fibra con un perfil de índice de revestimiento deprimido con una frecuencia normalizada $V = 5$ a 1550 nm, diseñada de tal manera que el modo LP_{11} fuera guiado fiable, mientras que los modos superiores (LP_{21} y LP_{02}) fuesen eliminados inmediatamente.

Las placas de fase se realizaron de 0,5 mm de espesor de vidrio de borosilicato, y se utilizó un proceso fotolitográfico para crear el modelo de fase, con el fin de lograr una diferencia de espesor de 1,7 μm . Los tres haces se combinaron mediante dos divisores con una relación no ideal del 37/63 y unas pérdidas de acoplamiento de 8,3 dB, 10.6 dB y 9,0 dB fueron medidas para el modo LP_{01} y los dos modos LP_{11} respectivamente.

Otro esquema de acoplador por óptica espacial es el que se puede encontrar en la Fig. 3, donde se puede observar el esquema de un EDFA multimodo (MM-EDFA, del inglés *Multimode EDFA*) [4].

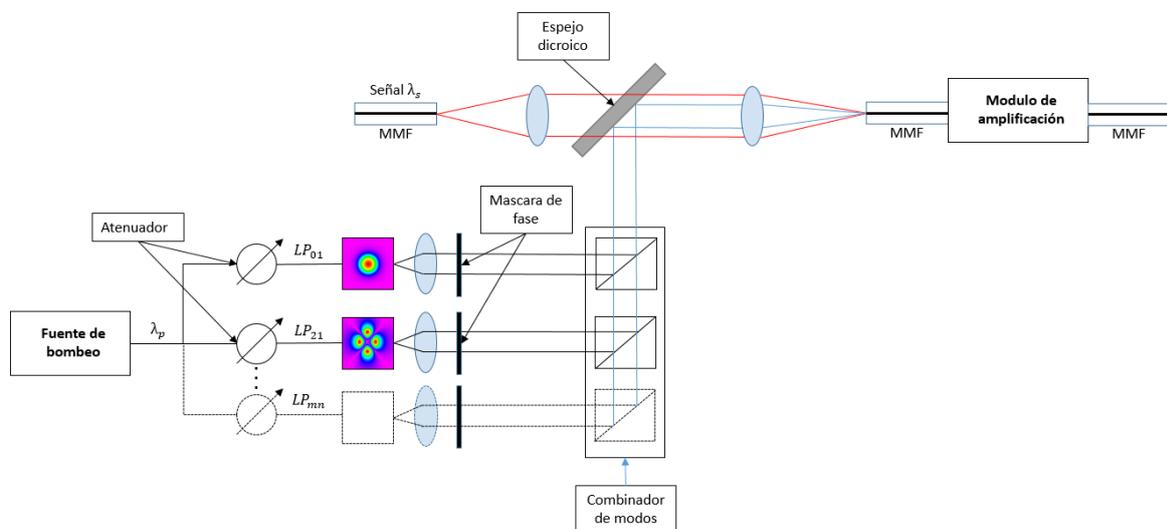


Fig. 3. Diagrama esquemático del MM-EDFA [4]

Para generar el perfil de intensidad deseado de la fuente de bombeo, se divide la fuente de bombeo en N caminos y se usa un convertidor de modos para transformar los modos espaciales de la fuente de bombeo en N modos espaciales de la MMF. Los atenuadores variables en cada camino controlan la distribución de potencia de la fuente en los modos y minimizan la ganancia dependiente del modo (MDG, del inglés *Mode-Dependent Gain*) del MM-EDFA. Los modos de la fuente son colimados, combinados espacialmente con la señal utilizando un combinador de modos de espacio libre donde adicionalmente se utiliza un espejo dicróico. Además, esta señal posteriormente es focalizada en una fibra de pocos modos (FMF, del inglés *Few Mode Fiber*) e inyectada en la MM-EDFA. Siguiendo este concepto, se utiliza una bomba multimodo reconfigurable para excitar el MM-EDFA de forma que variando el contenido del modo de la fuente el MDG pueda ser controlado [4].

II.3 Esquemas de Multiplexación Modal

El esquema que se puede encontrar en la Fig. 4 es el esquema básico en el que se va a basar la presente tesis y se trata de un esquema con un transmisor y un receptor de multiplexación por división de modos (MDM, del inglés *Mode-Division Multiplexing*) [5]. La parte de transmisión y recepción del esquema variará en función si se trata de un diseño con acopladores simétricos, asimétricos, etc. Aunque los acopladores varían en función del tipo de fibra utilizada (SMF-28 o HI-780), la longitud de onda de operación que se va a utilizar va a ser 850 nm ya que a esta longitud de onda los dispositivos son más económicos (por ejemplo los VCSEL) y se propagan dos modos utilizando fibra monomodo la cual tiene una menor dispersión cromática y atenuación, y por lo tanto, es mejor que la fibra multimodo. De esta forma, son necesario los acopladores modales para poder acoplar o desacoplar modos de una fibra a otra y así no recibir en el fotodiodo los modos en la misma fibra lo cual produciría interferencia modal.

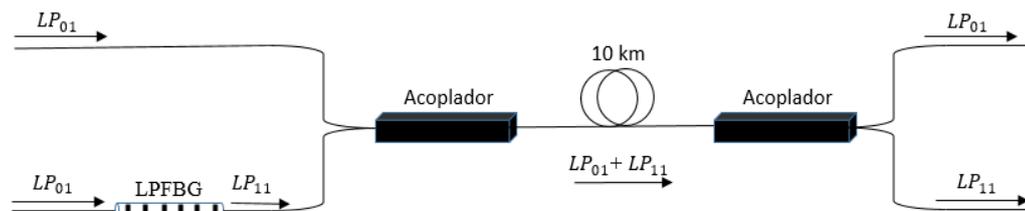


Fig. 4 Esquema básico del dispositivo de conversión de modos y del MUX/DEMUX de modos [5]

Como se puede observar en la Fig. 4, se dispone de una fibra de Bragg de periodo largo (LPFBG, del inglés *Long-Period Fiber Bragg Grating*) y de dos acopladores ópticos, los cuales se utilizan para realizar la conversión de modos y la MUX/DEMUX, respectivamente. En cuanto a la LPFBG, el periodo de la red de difracción necesario para excitar el primer modo de orden superior viene dado por la expresión $\Lambda = \lambda / (n_{eff_01} - n_{eff_11})$ donde n_{eff_01} y n_{eff_11} son los índices efectivos de los modos LP_{01} y LP_{11} a una cierta longitud de onda (λ), respectivamente. Posteriormente, se obtiene dos modos mediante el uso de una fibra SMF a una longitud de onda de 1080 nm [5]. Además, se ha

utilizado una fibra de 9 μm de diámetro y una diferencia relativa de índices del 0,35 %, el periodo de la red de difracción requerido para pasar del modo LP_{01} al modo LP_{11} fue de 480 nm a 1080 nm.

III. Acoplo modal mediante fibra óptica

En el presente apartado se verá en primer lugar la teoría de acoplo de modos para entender de forma matemática como se producen dichos acoplo de modos de una fibra/guía a otra. Posteriormente, se van a calcular los índices del núcleo y cubierta a 850 nm para las distintos tipos de fibras ópticas, así como los índices de refracción efectivos de los modos LP₀₁ y LP₁₁. Por último, se verá el método del índice efectivo el cual permite obtener los índices de refracción efectivos de los modos TE y TM de las guías ópticas.

III.1 Teoría de acoplo de modos

El acoplo de modos es un aspecto importante y relevante en las comunicaciones es por ello que se va a estudiar matemáticamente como se produce. En la Fig. 5 se puede ver el esquema genérico de un acoplador asimétrico (en este caso) pero también serviría un acoplador simétrico ya que las ecuaciones son las mismas, solo cambia el valor de los parámetros de cada fibra.

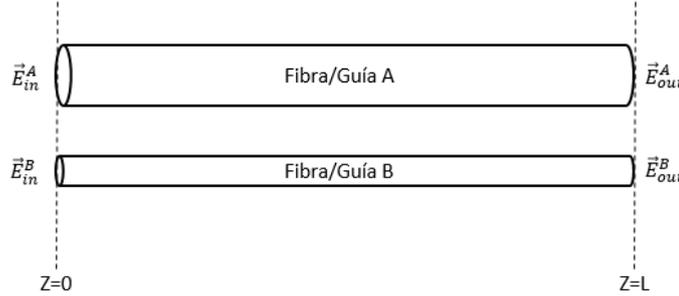


Fig. 5 Esquema genérico

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).

Las envolventes complejas a la salida del acoplador ($Z=L$) para ambos modos respecto a sus valores a la entrada del mismo ($Z=0$) se puede expresar como [6]:

$$\begin{bmatrix} A(L) \\ B(L) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\beta_c \cos(\beta_c L) - j\delta \sin(\beta_c L)}{\beta_c} e^{j\delta L} e^{jK_{aa}L} & \frac{jK_{ab} \sin(\beta_c L) e^{j\delta L} e^{jK_{aa}L}}{\beta_c} \\ \frac{jK_{ba} \sin(\beta_c L) e^{-j\delta L} e^{jK_{bb}L}}{\beta_c} & \frac{\beta_c \cos(\beta_c L) + j\delta \sin(\beta_c L)}{\beta_c} e^{-j\delta L} e^{jK_{bb}L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A(0) \\ B(0) \end{bmatrix} \quad (3)$$

Donde K_{aa} y K_{bb} , son los coeficientes de auto-acoplamiento y tienen en cuenta la variación en la constante de propagación de cada modo debido a la perturbación provocada por la presencia de la otra fibra, K_{ab} y K_{ba} son los coeficientes de acoplamiento de la fibra B hacia la A y viceversa. Además:

$$\delta = \frac{(\beta_{pq}^B + K_{bb}) - (\beta_{mn}^A + K_{aa})}{2} \quad (4)$$

$$\beta_c = \sqrt{K_{ab}K_{ba} + \delta^2} \quad (5)$$

Siendo δ el término de adaptación de fase (*phase mismatch*) que juega un papel importante en la eficiencia de acoplo del acoplador.

Suponiendo que a la entrada del acoplador solo estuviera presente el modo de la fibra A ($B(0)=0$), las potencias en las salidas directas (A) y acoplada (B) serían:

$$\frac{P_a(L)}{P_a(0)} = \left| \frac{A(L)}{A(0)} \right|^2 = \left(\frac{K_{ab}K_{ba}}{\beta_c^2} \right) \cos^2(\beta_c L) + \left(\frac{\delta}{\beta_c} \right)^2 \quad (6)$$

$$\frac{P_b(L)}{P_a(0)} = \left| \frac{B(L)}{A(0)} \right|^2 = \frac{|K_{ba}|^2}{\beta_c^2} \sin^2(\beta_c L) \quad (7)$$

De forma que la eficiencia de acoplo será:

$$\eta = \frac{P_b(L)}{P_a(0)} = \frac{|K_{ba}|^2}{\beta_c^2} \sin^2(\beta_c L) \quad (8)$$

Es decir que la potencia se intercambia de forma periódica entre ambas salidas apareciendo el primer máximo en la salida acoplada para una distancia

$$L_c = \frac{\pi}{2\beta_c} \quad (9)$$

Esta transferencia de potencia será mayor si se cumple la condición de adaptación de fase ($\delta=0$), que implica que las constantes de propagación de ambos modos en el acoplador sean iguales, es decir, que lo sean los índices de refracción de ambos modos.

Es habitual considerar que un acoplador sin pérdidas será siempre simétrico y se cumplirá $K_{ab} = K_{ba}^*$ consiguiéndose en ese caso una eficiencia del 100% para la distancia de acoplo indicada en (9); aunque se ha demostrado que esta afirmación no es totalmente cierta en todos los casos [7].

III.2 Cálculo índice de refracción del núcleo y cubierta

El índice de refracción de un material se suele expresar mediante la fórmula de Sellmeier cuyos parámetros se han obtenido de forma experimental:

$$n^2 = 1 + \frac{B_1 \lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_1^2} + \frac{B_2 \lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_2^2} + \frac{B_3 \lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_3^2} = 1 + \sum_{j=1}^3 \frac{B_j \lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_j^2} \quad (10)$$

Donde las longitudes de onda (λ y λ_j) se suelen expresar en μm .

Para el dióxido de silicio (*pure fused silica*) los valores de esos parámetros son [8]:

$$B_1=0,6961663; \lambda_1=0,0684043 \mu\text{m};$$

$$B_2=0,4079426; \lambda_2=0,1162414 \mu\text{m};$$

$$B_3=0,8974794; \lambda_3=9,896161 \mu\text{m};$$

Con esos parámetros se puede calcular el índice de refracción para cualquier λ . Concretamente para 850 nm se obtiene un valor de $n_{850 \text{ cubierta}} = 1,452498$.

La fibra con la que se quiere trabajar es la SMF-28 de Corning cuyas características son [9]:

- Diámetro del núcleo: 8,2 μm
- Diámetro de la cubierta: 125 μm
- Diferencia de índice de refracción: 0,36%

Por lo tanto, el fabricante no identifica el material usado en el núcleo de la fibra, aunque suele ser óxido de silicio dopado con óxido de germanio pero desconocemos el grado exacto de dopado. Ahora bien, a partir de la diferencia de índice de refracción y asumiendo que es un valor aproximadamente constante para ambas longitudes de onda, se podrían obtener los valores para los índices de refracción del núcleo de la fibra SMF-28.

Partiendo de:

$$\Delta = \frac{n_{\text{nucleo}} - n_{\text{cubierta}}}{n_{\text{cubierta}}} \quad (11)$$

Se obtiene el siguiente valor $n_{850 \text{ nucleo}} = 1,457727$.

III.3 Cálculo índice de refracción efectivo en fibra óptica

Asumiendo guiado débil en la fibra y siguiendo la formulación clásica de Gloge [10], se definen los siguientes parámetros para caracterizar la propagación de un modo cualquiera en la fibra:

$$u = a\sqrt{k^2 n_{\text{nucleo}}^2 - \beta^2} \quad (12)$$

$$w = a\sqrt{\beta^2 - k^2 n_{\text{cubierta}}^2} \quad (13)$$

$$v = \sqrt{u^2 + w^2} = ak\sqrt{n_{\text{nucleo}}^2 - n_{\text{cubierta}}^2} \quad (14)$$

Donde a es el radio del núcleo de la fibra (4,1 μm para la fibra SMF-28), $k=2\pi/\lambda$ siendo λ la longitud de onda en el vacío y β es la constante de propagación del modo que se esté analizando.

Con los datos de la fibra SMF-28 el parámetro v , también llamado frecuencia normalizada, toma el siguiente valor para $\lambda=850\text{nm}$, $v= 3,7387$. Para ese valor del parámetro, los únicos modos que se van a propagar en la fibra serían el modo fundamental, LP_{01} y el modo LP_{11} (en sus versiones seno y coseno).

Para cada uno de los modos se puede obtener su constante de propagación y su índice de refracción modal a partir de la ecuación (12) previa obtención del parámetro u del que se dispone de las siguientes expresiones aproximadas [10]:

$$u_{01} = \frac{(1+\sqrt{2})v}{1+\sqrt[4]{4+v^4}} \quad (15)$$

$$u_{11} = u_c e^{\frac{\left(\arcsin\left(\frac{s}{u_c}\right) - \arcsin\left(\frac{s}{v}\right)\right)}{s}} \quad (16)$$

$$s = \sqrt{u_c^2 - 2} \quad (17)$$

Donde u_c es el valor del parámetro u cuando el modo correspondiente está justamente en corte y que es igual a $u_{c11,850} = 2,404826$ para el modo LP_{11} a una longitud de onda de 850 nm.

A partir del valor del parámetro v calculado anteriormente y haciendo uso de las ecuaciones (15), (16) y (17) se obtienen los siguientes valores para los parámetros u en 850 nm $u_{01,850} = 1,89714$, $u_{11,850} = 2,94629$. Finalmente, el índice de refracción efectivo de cada modo valdrá:

$$n_{eff,01} = \frac{\beta_{01}}{k} = \sqrt{n_{nucleo}^2 - \left(\frac{u_{01}}{ak}\right)^2} = 1,45638 \quad (18)$$

$$n_{eff,11} = \frac{\beta_{11}}{k} = \sqrt{n_{nucleo}^2 - \left(\frac{u_{11}}{ak}\right)^2} = 1,45448 \quad (19)$$

Para el caso de fibras con diámetro reducido, que son fibras que se comportan como monomodo a 850 nm y que se conectan directamente a los VCSEL en el transmisor cuando el acoplador actúa como multiplexor, se puede utilizar la fibra HI-780.

En el caso de la fibra HI-780 sus características son [11]:

- Diámetro del núcleo: 4,0 μm
- Diámetro de la cubierta: 125 μm
- Diferencia de índice de refracción: $\Delta = 0,45\%$

Los índices de refracción de la cubierta no varían al seguir siendo SiO_2 . Por otro lado, a partir de la ecuación (11) se obtiene el siguiente valor para el núcleo: $n_{850\text{ nucleo}} = 1,459035$

En cuanto a los modos que se propagan por esta fibra, el parámetro v vale $v = 2,0395$ para 850 nm y por lo tanto se confirma que solo se propagará el modo LP_{01} . Haciendo uso de las ecuaciones (15) y (16) se obtiene el siguiente valor para el parámetro u en 850 nm $u_{01,850} = 1,5639$. Finalmente, el índice de refracción efectivo valdrá:

$$n_{eff,01} = 1,45519$$

Si se quisiera que el índice de refracción del modo LP_{01} en la fibra HI-780 fuera igual al del modo LP_{11} en la fibra SMF-28 habría que reducir el tamaño del núcleo de la fibra HI-780 hasta un 84,4724% de su valor, es decir, hasta 3,38 μm . Esto es así porque se quiere excitar el modo LP_{11} a la fibra SMF-28 a partir del modo LP_{01} de la fibra HI-780.

III.4 Cálculo índice de refracción efectivo en guías ópticas

El método del índice efectivo es utilizado para aproximar la propagación en una guía 3D mediante una guía planar 2D. Se puede ver el esquema de la guía 3D en la Fig. 6 .

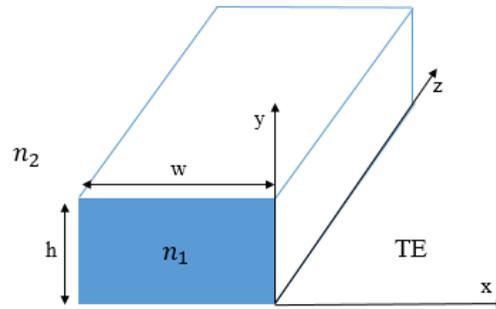


Fig. 6 Método del índice efectivo. Guía 3D

En la Fig. 6 se puede observar el esquema de este tipo de guía, que se trata de una guía de sección rectangular con índice de refracción n_1 , rodeado por todas sus caras por otro material de índice n_2 .

Para este tipo de guía no hay solución analítica con lo que una aproximación sencilla es el método del índice efectivo.

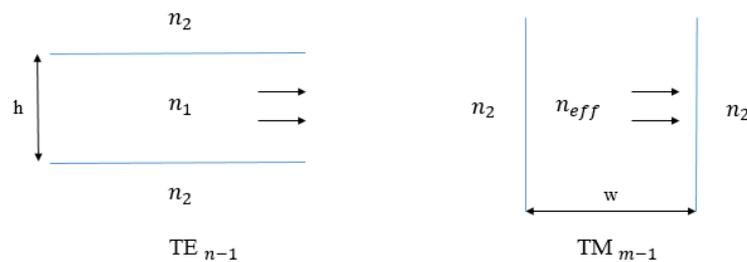


Fig. 7 Método del índice efectivo. Guía 2D

Se desea conocer el índice efectivo del modo E_{11}^x , es decir, el modo fundamental con polarización según el eje X (horizontal según los ejes de la figura). Se seguirá el método siguiente representado gráficamente en la Fig. 7.

- Obtener el índice efectivo del modo TE_0 en una *slab waveguide* de anchura h (la altura de la guía rectangular) y con los índices n_1 y n_2 de la guía rectangular.
- Obtener el índice efectivo del modo TM_0 en una *slab waveguide* de anchura w (la anchura de la guía rectangular) pero sustituyendo el índice n_1 del núcleo de la guía por el índice efectivo del modo TE_0 obtenido en el apartado anterior.

Al igual que antes, también se podría usar el método de forma inversa y analizar primero el modo TM_{m-1} de la guía de anchura w y luego el modo TE_{n-1} de la guía de altura h con el índice del núcleo cambiado.

En cuanto a la polarización vertical, el método general para cualquier modo E_{mn}^y sería:

- Obtener el índice efectivo del modo TM_{n-1} en una *slab waveguide* de anchura, h (la altura de la guía rectangular) y con los índices n_1 y n_2 de la guía rectangular.

- Obtener el índice efectivo del modo TE_{m-1} en una *slab waveguide* de anchura w (la anchura de la guía rectangular) pero sustituyendo el índice n_1 del núcleo de la guía por el índice efectivo del modo TM_{n-1} obtenido en el apartado anterior.

Como en otros casos, también se podría usar el método de forma inversa y analizar primero el modo TE_{m-1} de la guía de anchura w y luego el modo TM_{n-1} de la guía de altura h con el índice del núcleo cambiado.

IV. Análisis mediante simulación de acoplo modal

La idea principal consiste en realizar una serie de simulaciones con el software BeamPROP™ de los diferentes esquemas de acoplo modal y observar cual es el comportamiento de los modos en los diferentes esquemas.

El software utilizado ha sido el BeamPROP™ por ser la herramienta de diseño líder en la industria basada en el Método de propagación del haz (BPM) para el diseño/simulación de circuitos, dispositivos integrados y guías de onda de fibra óptica. Este software ha estado disponible comercialmente desde 1994, y está en uso por los principales investigadores e ingenieros de desarrollo, tanto en la universidad como en el entorno industrial de todo el mundo.

Las ventajas de utilizar este software son:

- El Algoritmo BPM proporciona un diseño de dispositivos rápido y preciso.
- Se ha incorporado la herramienta AWG avanzada para simplificar el enrutamiento y el diseño del demultiplexor.
- Las capacidades avanzadas permiten la simulación de dispositivos complicados.
- Totalmente integrado en el ambiente RSoft CAD.

BeamPROP tiene aplicaciones en una amplia gama de dispositivos integrados y de fibra óptica, pero no limitándose a:

- Dispositivos WDM, por ejemplo, routers AWG.
- Conmutadores, por ejemplo, los acopladores direccionales en forma de Y.
- Moduladores, por ejemplo, tipo Mach- Zehnder.
- Dispositivos de interferencia multimodo.
- Divisores pasivos 1xN o NxN.
- Análisis de modo de estructura láser transversal.
- Diseño de fibra especial y estándar.
- Rejillas.
- Estructuras de sensores.

Y en cuanto a sus características más particulares se pueden destacar:

- Resultados robustos y eficientes a través del algoritmo BPM en base a un esquema implícito de diferencias finitas.
- Capacidades de simulación 2D y 3D.
- Malla no uniforme.
- Anisótropo y materiales no lineales.
- Electrodo y efectos térmicos.
- Efectos de polarización y acoplamiento.

- Tiene en cuenta reflexiones a lo largo de la dirección de propagación.
- Herramientas de medición para calcular integrales de campos, distribución de energía, pérdidas, etc.
- Estudios paramétricos automatizados y optimización del diseño utilizando MOST.

Una vez dentro del software el aspecto es el que se puede observar en la Fig. 8.

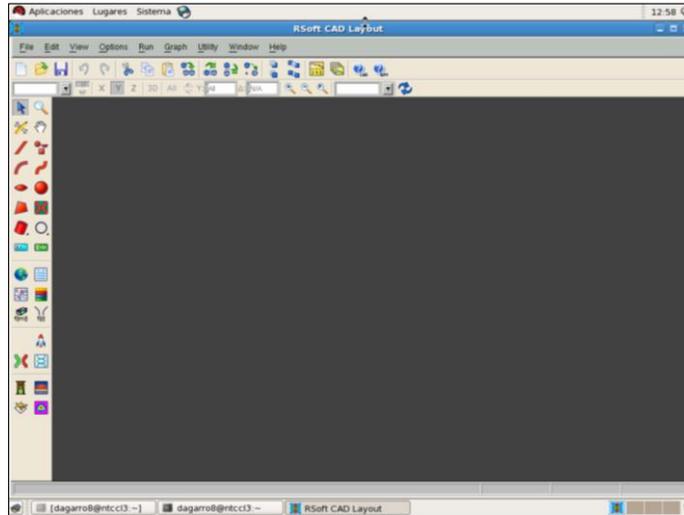


Fig. 8. Visualización del software BeamPROP™ [12]

Una vez se diseñan los diferentes esquemas se procede a ejecutar la simulación de cada esquema diseñado. Los resultados de la simulación se pueden visualizar con distintos tipos de visualización en diferentes gráficas.

IV.1 Acoplador simétrico

El primer esquema a simular es el acoplador simétrico. En este esquema se dispone de dos núcleos de fibra óptica SMF-28 (diámetro de los núcleos $8,2 \mu\text{m}$ y diferencia de índice de refracción $\Delta=0,36\%$) separadas por una distancia de $8 \mu\text{m}$ y una longitud de acoplamiento de $56,6 \text{ mm}$. Estos valores corresponden a un compromiso entre un mayor coeficiente de acoplo (y por lo tanto una menor longitud de acoplamiento) para separaciones más cortas pero que a cambio implican un rizado en el acoplo debido al acoplo no deseado entre otros modos. Este esquema se puede observar en la Fig. 9.

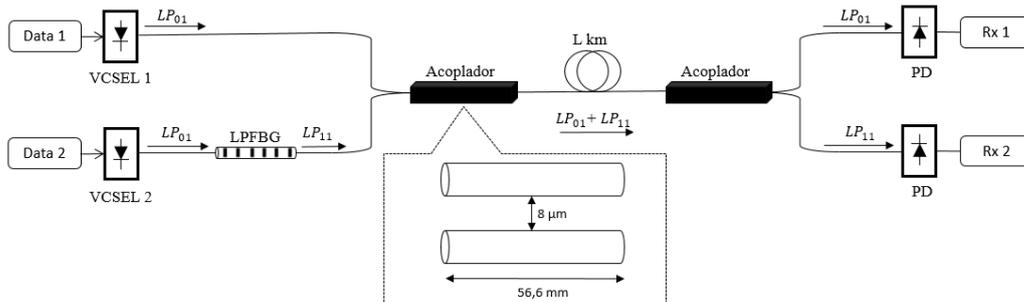


Fig. 9. Esquema del acoplador simétrico

Como se puede apreciar en la Fig. 9, 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 a cada modo. Por la fibra superior, se modulará la información correspondiente al modo LP_{01} y por la fibra inferior se modulará otra información (distinta de la que se va a transmitir por el modo LP_{01} de la fibra superior) correspondiente también al modo LP_{01} pero donde se utilizará posteriormente un conversor de modos (LPFBG en este caso) para transformar el modo LP_{01} al modo LP_{11} . También se puede observar que se dispone de dos acopladores, en el primer acoplador se produce la combinación del modo LP_{11} de la fibra inferior a la fibra superior y de esta forma se transmitirá ambos modos sobre un enlace de L km para posteriormente una vez se llega al segundo acoplador producirse la separación o demultiplexación de los modos, donde el modo LP_{01} continua por la fibra superior y el modo LP_{11} se acopla a la fibra inferior, de esta forma en el receptor se reciben los datos modulados de cada modo por separado.

Hay que tener en cuenta que este acoplador simétrico sirve para multiplexar (MUX) y demultiplexar (DEMUX) modos pero no sirve para convertir modos, por eso hace falta algún conversor de modos (LPFBG) en el transmisor ya que si las fuentes ópticas están correctamente alineadas, el modo acoplado a la fibra suele ser el LP_{01} .

Una vez se tiene claro el diseño se procede a implementarlo en el software y realizar la simulación donde hay que tener en cuenta que no se va a simular la conversión de modos que tiene lugar en la LPFBG sino que se excitará directamente el modo LP_{11} .

En la simulación del multiplexor se excita el modo LP_{01} por la fibra superior (fibra de la izquierda en el simulador) y el modo LP_{11} por la fibra inferior (fibra de la derecha en el simulador) que deberá acoplarse a la fibra superior. Por otro lado, en el demultiplexor se han excitado los modos LP_{01} y LP_{11} por la fibra superior y deberá acoplarse el modo LP_{11} a la fibra inferior.

En la Fig. 10 se pueden observar los esquemas del multiplexor y del demultiplexor junto con la definición de los parámetros que 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*).

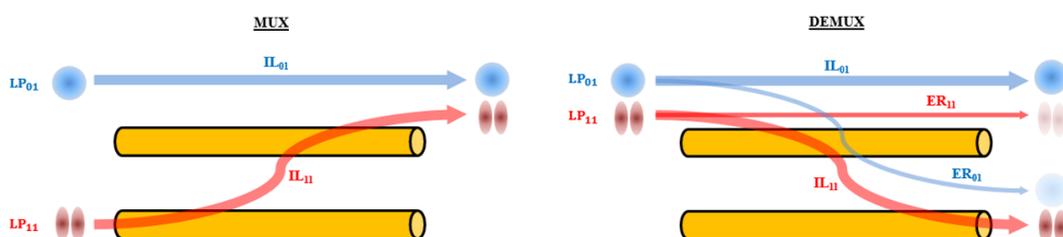


Fig. 10 a) Esquema del MUX y DEMUX en simulación

Los resultados de la simulación del multiplexor se pueden observar en la Fig. 11 a) y b) y Fig. 12 a) y b).

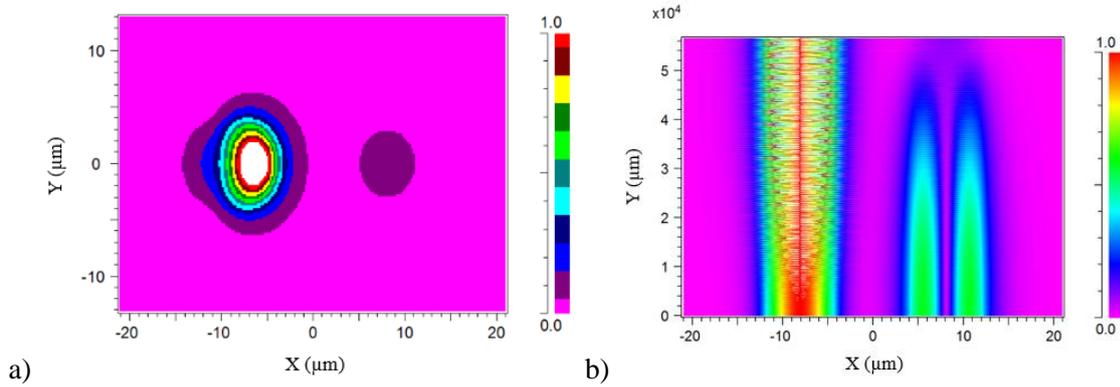


Fig. 11 a) Mapa de contorno de los modos, b) Mapa de contorno de la potencia de los modos para un acoplador simétrico con una separación de 8 μm actuando como multiplexor.

En las Fig. 11 a) y b) se puede ver el campo modal de los modos propagados tras finalizar los 56,6 mm de longitud con lo que se comprueba que el modo LP_{01} y el modo LP_{11} se propagan por la fibra de la izquierda y en la fibra de la derecha queda muy poca potencia del modo LP_{11} .

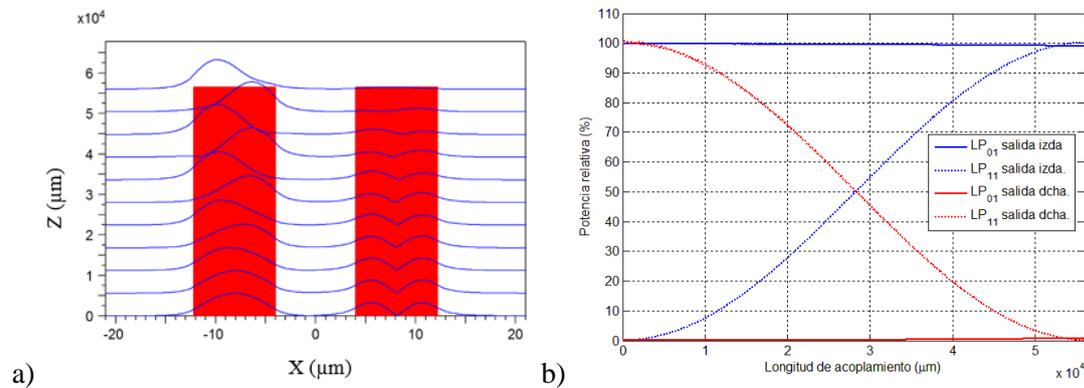


Fig. 12 a) Distribución de potencia según el tipo de visualización ‘Slices’, b) Distribución de potencia para cada modo para un acoplador simétrico con una separación de 8 μm actuando como multiplexor.

En la Fig. 12 a) se observa la distribución de potencia de cada modo en cada una de las fibras según el tipo de visualización ‘Slices’ donde se representan los cortes axiales cada 5,6 mm. Además, en la Fig. 12 b) se puede observar de una forma más exacta la potencia de cada modo en cada tramo de la fibra en relación a la potencia de cada modo a la entrada. En la gráfica se puede apreciar que el modo LP_{11} se ha acoplado totalmente a la fibra de la izquierda, quedando un valor residual del 0,0064 % en la fibra de la derecha. En cuanto al modo LP_{01} ese se mantiene de forma casi completa en la fibra de la izquierda ya que al tratarse de un modo más confinado en el núcleo de la fibra el coeficiente de acoplo es mucho menor lo que se comprueba viendo que el nivel de potencia acoplado a la fibra de la derecha es del 0,74 %.

En el caso del acoplador como demultiplexor este ha sido simulado bajo las mismas características pero excitando ahora ambos modos en la fibra de la izquierda. Se pueden observar los resultados de la simulación en las Fig. 13 a) y b) y Fig. 14 a) y b).

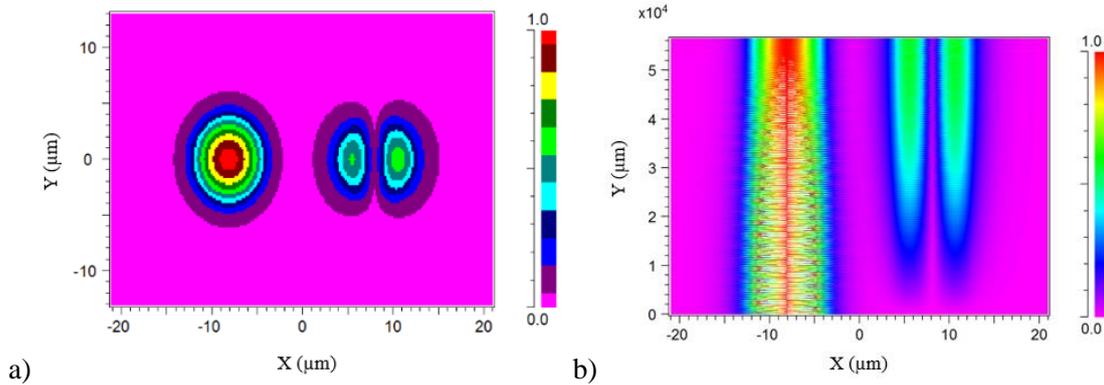


Fig. 13 a) Mapa de contorno de los modos, b) Mapa de contorno de la potencia de los modos para un acoplador simétrico con una separación de 8 μm actuando como demultiplexor.

En la Fig. 13 a) y b) el acoplo de modos se ha llevado a cabo correctamente ya que el modo LP_{11} se ha acoplado a la fibra de la derecha y el modo LP_{01} se ha mantenido confinado en la fibra de la izquierda.

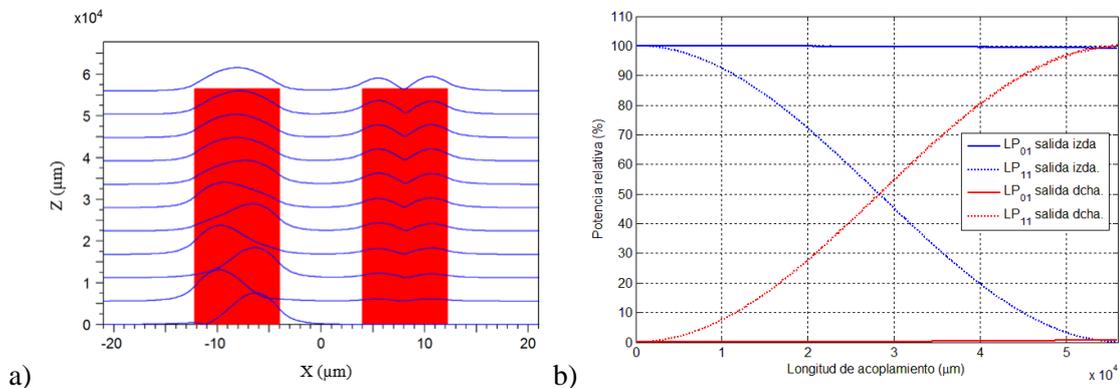


Fig. 14 a) Distribución de potencia según el tipo de visualización 'Slices', b) Distribución de potencia para cada modo para un acoplador simétrico con una separación de 8 μm actuando como demultiplexor.

En la Fig. 14 a) de nuevo se muestra la distribución de potencia de cada modo en cada una de las fibras según el tipo de visualización 'Slices' y se puede observar la evolución de los modos en cada una de las fibras. Además, en la Fig. 14 b) se aprecia de una forma más exacta la potencia de cada modo en cada tramo de la fibra. En la citada figura se comprueba el correcto funcionamiento como demultiplexor modal ya que en la fibra de la izquierda los modos LP_{01} y LP_{11} tienen un nivel relativo de potencia del 99,2 % y 0,03 %, respectivamente. Por otro lado, por la fibra de la derecha el modo LP_{11} tiene un porcentaje de potencia del 100 % lo que significa que se ha acoplado en su totalidad. Además, se puede observar como el nivel de potencia del modo LP_{01} de la fibra de la derecha es de un 0,73 % con lo cual ha permanecido confinado en la fibra de la izquierda.

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

A continuación se va a estudiar 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. Esta simulación se llevará a cabo en el demultiplexor al ser su comportamiento más crítico que el multiplexor ya que cualquier acoplo no ideal se traduciría en interferencia de los datos de ambos modos en los receptores correspondientes. En la Fig. 15 a) y b) se muestran las pérdidas de inserción y la relación de extinción de los modos LP_{01} y LP_{11} en el demultiplexor para un barrido en longitudes de onda de 840 nm a 860 nm.

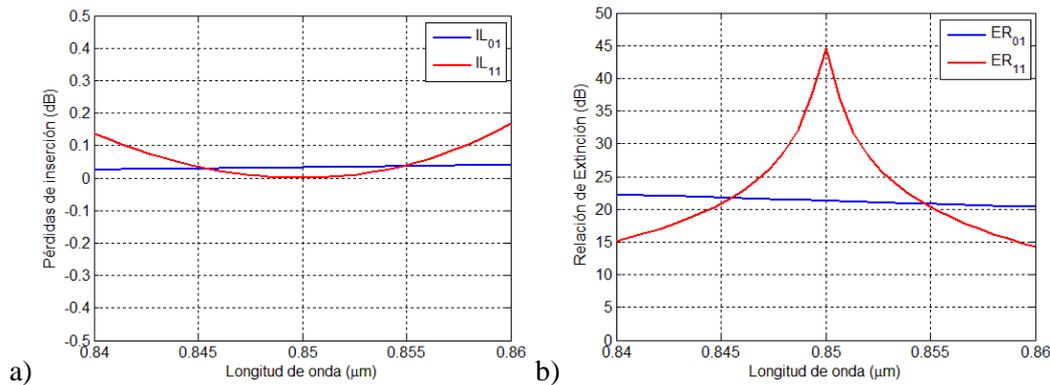


Fig. 15. a) Pérdidas de inserción, y b) Relación de extinción para diferentes longitudes de onda del acoplador simétrico con separación de 8 μm actuando como demultiplexor

En la Fig. 15 a) se puede observar las pérdidas de inserción del modo LP_{01} y LP_{11} , es decir, cuanto pierde el modo LP_{01} de la fibra directa entre la entrada y la salida, y cuanto pierde el modo LP_{11} que entra por la fibra acoplada hasta que sale por la fibra directa. Los resultados obtenidos muestran que las pérdidas de inserción son mínimas para la longitud de onda de diseño, 0,03 dB para el modo LP_{01} e inferior a 0,001 dB para el modo LP_{11} , lo que demuestra que se acopla prácticamente el 100 % de la potencia de cada modo. Por otro lado, se observa que aunque varíe la longitud de onda ± 10 nm respecto a 850 nm, las pérdidas de inserción se mantienen por debajo de 0,03 dB para el modo LP_{01} y por debajo de 0,14 dB para el modo LP_{11} , por lo que se puede concluir que el diseño del acoplador modal ofrece una gran tolerancia frente a variaciones de la longitud de onda o frente a tolerancias de fabricación.

Por otro lado, también se puede observar en la Fig. 15 b) la relación de extinción, la cual nos muestra la relación entre la potencia del modo LP_{01} y LP_{11} que entra por la fibra de la izquierda y la potencia residual de cada modo que queda en la fibra de la derecha e izquierda respectivamente.

Según la Fig. 15 b) la mejor relación de extinción se obtiene para 850 nm, obteniéndose un valor de 44,5 dB para el modo LP_{11} y de 21,3 dB para el modo LP_{01} en la longitud de onda que fue diseñado el acoplador. Por otro lado, si nos fijamos en una variación de la longitud de onda de ± 5 nm, la relación de extinción se mantiene por encima de 21,4 dB o de 15 dB para un ancho de banda de ± 10 nm. Como conclusión, podemos afirmar que el diseño del acoplador simétrico presenta una buena tolerancia frente a variaciones de la longitud de onda.

IV.2 Acoplador asimétrico

Un nuevo esquema de acoplo modal aunque muy parecido al acoplador simétrico es el que se puede observar en la Fig. 16 donde este esquema se corresponde a un acoplador asimétrico. Como bien indica su nombre, el acoplador asimétrico consta de dos núcleos de fibra que no tienen el mismo diámetro, una es de diámetro $8,2 \mu\text{m}$ y la otra de $4,166 \mu\text{m}$ (es una fibra SMF-28 pre-pulled, es decir, que es calentada y estirada previamente antes de fabricar el acoplador, con el fin de reducir el diámetro del núcleo de $8,2$ a $4,166 \mu\text{m}$), ambas separadas por una distancia de $6 \mu\text{m}$ y una longitud de acoplamiento de $15,65 \text{ mm}$.

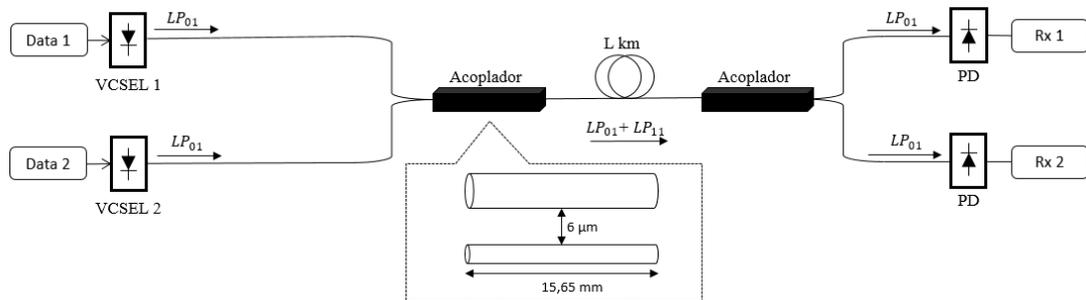


Fig. 16. Esquema del acoplador asimétrico

Como se puede observar en la Fig. 16 en este tipo de esquema ya no es necesaria la utilización de una LPFBG sino que se transmite directamente el modo fundamental por ambas ramas pero cada rama con su respectiva información modulada. Además, hay que tener en cuenta que la fibra estrecha es de $4,166 \mu\text{m}$ debido a que el índice efectivo del modo LP_{01} de la fibra estrecha debe ser igual al índice efectivo del modo LP_{11} de la fibra ancha para que se realice la conversión del modo LP_{01} al modo LP_{11} . Se puede observar mejor en la Fig. 17.

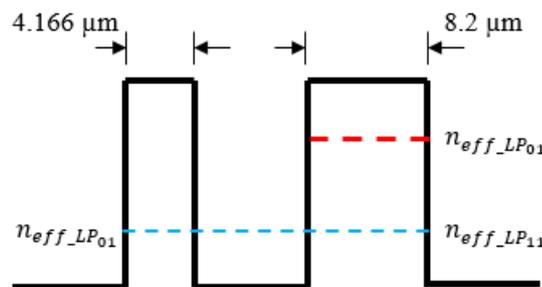


Fig. 17. Perfil del índice de refracción del acoplador. Fibra SMF-28 pre-pulled y SMF-28

En la simulación del multiplexor se excita el modo LP_{01} por la fibra superior y el modo LP_{01} por la fibra inferior que deberá convertirse en el modo LP_{11} en la fibra superior. Por otro lado, en el demultiplexor se han excitado los modos LP_{01} y LP_{11} por la fibra superior y el modo LP_{11} deberá convertirse al modo LP_{01} en la fibra inferior.

En la Fig. 18 se pueden observar los esquemas del multiplexor y del demultiplexor junto con la definición de los parámetros que se van a usar para valorar las prestaciones del acoplador: las pérdidas de inserción y la relación de extinción. En relación con la definición del parámetro ER_{01}

del demultiplexor, es importante resaltar que el modo LP_{01} que en su mayor parte se propaga por la fibra ancha se acopla ligeramente en la fibra fina tanto en el modo LP_{01} como en el LP_{11} , siendo en general, ligeramente superior el nivel acoplador al modo LP_{11} , pero que no se ha considerado este modo en la definición del parámetro ER_{01} ya que el modo LP_{11} está en corte en la fibra fina y su nivel se reducirá en gran medida antes de llegar al receptor.

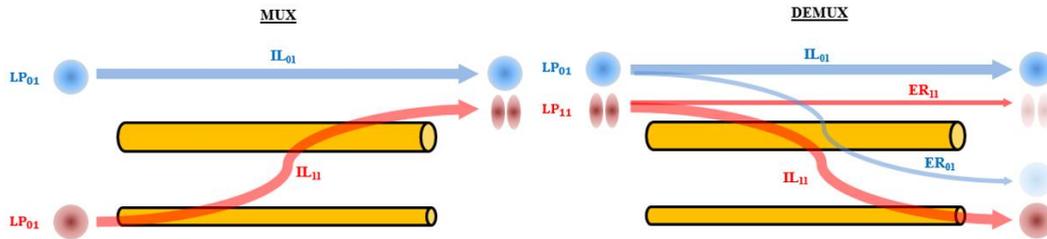


Fig. 18 a) Esquema del MUX y DEMUX en simulación

Los resultados de la simulación del multiplexor se pueden observar en la Fig. 19 a) y b) y Fig. 20 a) y b).

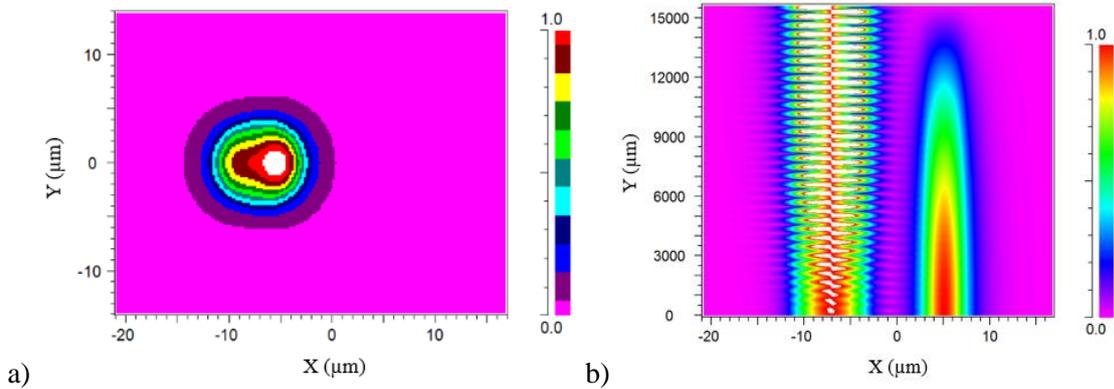


Fig. 19 a) Mapa de contorno de los modos, b) Mapa de contorno de la potencia de los modos para un acoplador asimétrico con una separación de $6\ \mu\text{m}$ actuando como demultiplexor.

Como se observa en la Fig. 19 a) y b) tras finalizar los $15,65\ \text{mm}$ del acoplador, en la fibra ancha (fibra de la izquierda) están los modos LP_{01} y LP_{11} y en la fibra fina (fibra de la derecha) solo queda un poco de potencia del modo LP_{01} debido a la conversión de este modo al modo LP_{11} en la fibra ancha.

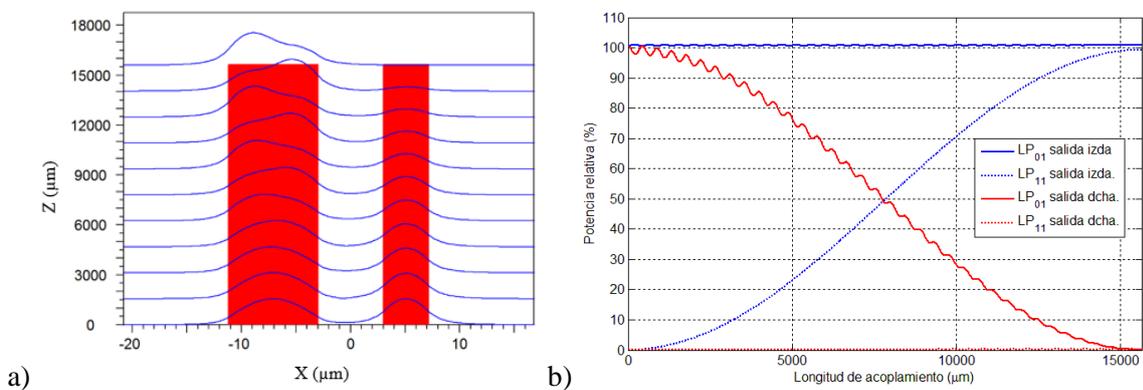


Fig. 20 a) Distribución de potencia según el tipo de visualización 'Slices', b) Distribución de potencia para cada modo para un acoplador asimétrico con una separación de $6\ \mu\text{m}$ actuando como demultiplexor.

En la Fig. 20 a) de nuevo se muestra la distribución de potencia según el tipo de visualización ‘Slices’ y se observa como inicialmente se propagan los dos modos LP_{01} en ambas fibras. Además, en la Fig. 20 b) se puede observar de una forma más exacta la potencia de cada modo en cada tramo de la fibra en relación a la potencia de cada modo a la entrada. En la gráfica se observa que el modo LP_{01} de la fibra de la derecha se ha convertido totalmente al modo LP_{11} en la fibra de la izquierda, quedando un valor residual del 0,05 %. En cuanto al modo LP_{01} de la fibra de la izquierda esta se mantiene de forma casi completa ya que al tratarse de un modo más confinado en el núcleo de la fibra el coeficiente de acoplo es mucho menor lo que se comprueba viendo que el nivel de potencia acoplado a la fibra de la derecha es del 0,28 %.

En la Fig. 20 b) se puede observar un rizado en el nivel de potencia de ambos modos LP_{01} (fibra de la izquierda y de la derecha). Observándose el acoplo deseado (LP_{01} a LP_{11}) 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 (4) se obtiene un determinado coeficiente de acoplo. Además, si se considera el posible acoplo entre los dos modos LP_{01} , 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 LP_{01} de la fibra de la izquierda y LP_{01} de la fibra de la derecha. No se sabe cuál es este coeficiente de acoplo pero lo que sí es seguro es que será inferior al de los modos LP_{01} a LP_{11} , ya que el modo LP_{01} está más confinado que el LP_{11} 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 LP_{01} de la fibra de la izquierda y LP_{01} de la fibra de la derecha se tendrá una distancia de acoplo (9) menor.

En el caso del acoplador como demultiplexor este ha sido simulado bajo las mismas características pero excitando ahora ambos modos en la fibra de la izquierda. Se pueden observar los resultados de la simulación en las figuras Fig. 21 a) y b) y Fig. 22 a) y b).

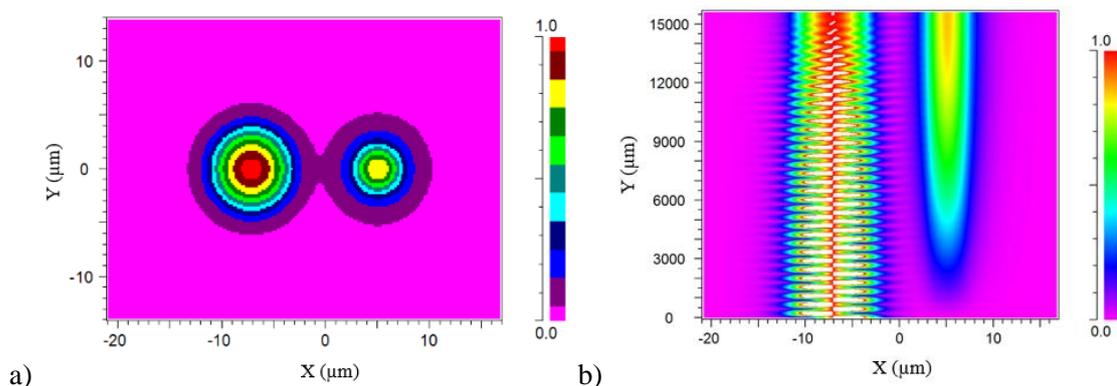


Fig. 21 a) Mapa de contorno de los modos, b) Mapa de contorno de la potencia de los modos para un acoplador asimétrico con una separación de 6 μm actuando como demultiplexor.

Como se observa en la Fig. 21 a) y b) tras finalizar los 15,65 mm tanto en la fibra ancha como en la fibra fina solo queda el modo LP_{01} . Esto se debe a las características del acoplador donde el modo LP_{11} acaba convirtiéndose y acoplándose a la fibra fina como el modo LP_{01} .

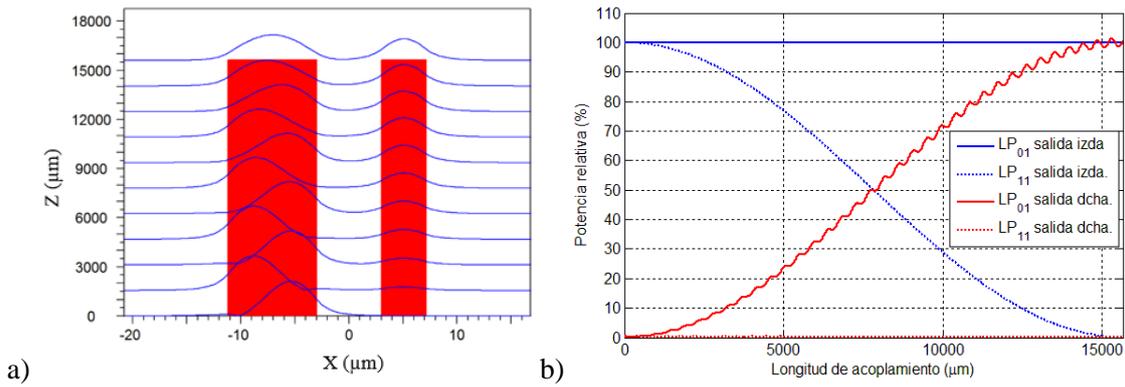


Fig. 22 a) Distribución de potencia según el tipo de visualización 'Slices', b) Distribución de potencia para cada modo para un acoplador asimétrico con una separación de 6 μm actuando como demultiplexor.

En la Fig. 22 a) se muestra la distribución de potencia en cada una de las fibras según el tipo de visualización 'Slices' y se puede observar la evolución de los modos en cada una de las fibras. Además, en la Fig. 22 b) se puede observar de una forma más exacta la potencia de cada modo en cada tramo de la fibra. En la citada figura se comprueba el correcto funcionamiento como demultiplexor modal ya que en la fibra de la izquierda los modos LP_{01} y LP_{11} tienen un nivel relativo de potencia del 99,89 % y 0,03%, respectivamente. Por otro lado, por la fibra de la derecha el modo LP_{11} no tiene potencia ya que dicho modo no se puede propagar debido a las características de la fibra óptica. Además, se puede observar como el nivel de potencia del modo LP_{01} de la fibra de la derecha es de un 100 % con lo cual se ha convertido y acoplado correctamente a la fibra de la derecha.

En este caso sucede lo mismo que en multiplexor, el rizado también aparece pero la variación del modo LP_{01} en la fibra de la izquierda es mucho más lenta aunque no sea visible a simple vista.

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

A continuación se va a estudiar el comportamiento del acoplador modal para diferentes longitudes de onda alrededor de la longitud de onda de diseño, 850 nm. En la Fig. 23 a) y b) se muestra las pérdidas de inserción y la relación de extinción de los modos LP_{01} y LP_{11} en el demultiplexor para un barrido en longitudes de onda de 840 nm a 860 nm.

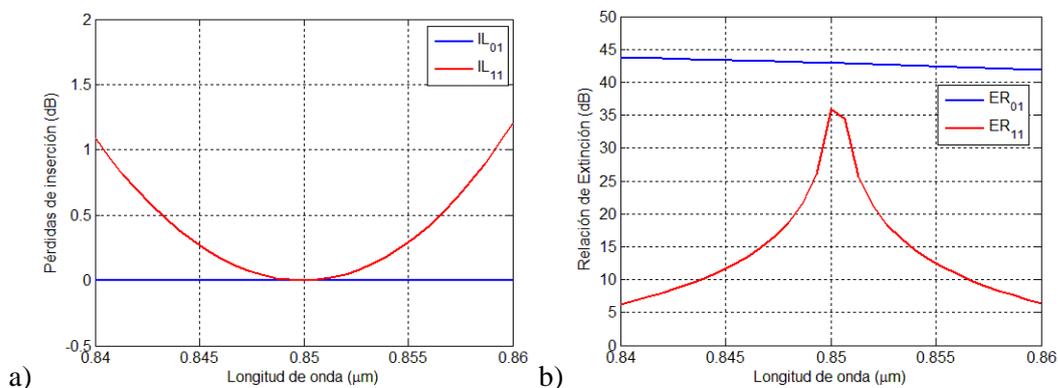


Fig. 23. a) Pérdidas de inserción, y b) Relación de extinción para diferentes longitudes de onda del acoplador asimétrico con separación de 6 μm actuando como demultiplexor

En la Fig. 23 a) los resultados obtenidos muestran que las pérdidas de inserción son mínimas para la longitud de onda de diseño, por debajo de 0,01 dB tanto para el modo LP_{01} de la fibra ancha como para el modo LP_{01} de la fibra fina, lo que demuestra que se acopla prácticamente el 100 % de la potencia de cada modo. Por otro lado, se observa que aunque varíe la longitud de onda ± 10 nm respecto a 850 nm, las pérdidas de inserción se mantienen por debajo de 0,01 dB para el modo LP_{01} de la fibra ancha y por debajo de 1,2 dB para la fibra fina, por lo que se puede concluir que el diseño del acoplador modal ofrece una gran tolerancia frente a variaciones de la longitud de onda o frente a tolerancias de fabricación.

Por otro lado, en la Fig. 23 b) se muestra la relación de extinción, donde la mejor relación de extinción se obtiene para 850 nm. Además, para dicha longitud de onda se obtiene un valor de 34,5 dB para el modo LP_{01} de la fibra ancha y de 41,6 dB para el modo LP_{01} de la fibra fina. Por otro lado, si nos fijamos en una variación de la longitud de onda de ± 5 nm, la relación de extinción se mantiene por encima de 12,2 dB o de 6,3 dB para un ancho de banda de ± 10 nm. Como conclusión, se puede afirmar que el diseño del acoplador asimétrico con fibra pre-pulled presenta una buena tolerancia frente a variaciones muy pequeñas de la longitud de onda ya que si la longitud de onda de diseño varía ± 10 nm la relación de extinción no es muy buena, con lo que este esquema es muy restrictivo.

En el esquema de la Fig. 16 en vez de utilizar la fibra SMF-28 y la fibra SMF-28 pre-pulled se puede utilizar la fibra SMF-28 y la fibra HI-780. Además, la fibra HI-780 inicialmente es de 4 μm pero debido a que el índice efectivo del modo LP_{01} de la fibra fina debe ser igual al índice efectivo del modo LP_{11} , el núcleo acaba reduciéndose hasta 3,38 μm . Se puede observar mejor en la Fig. 24 :

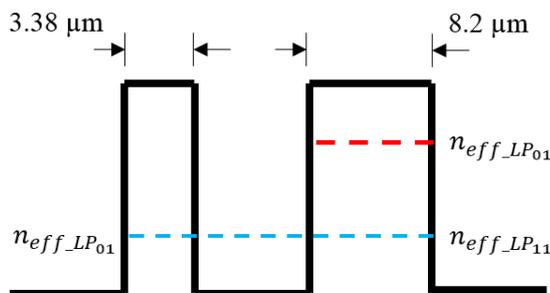


Fig. 24. Perfil del índice de refracción del acoplador. Fibra HI-780 y SMF-28

En el caso del multiplexor se han utilizado unos parámetros óptimos de separación entre fibras de 6 μm y una longitud de acoplamiento de 13,52 mm para una longitud de onda de 850 nm y utilizando las fibras ópticas SMF-28 y HI-780. Los resultados de la simulación del multiplexor se pueden observar en la Fig. 25 a) y b) y Fig. 26 a) y b).

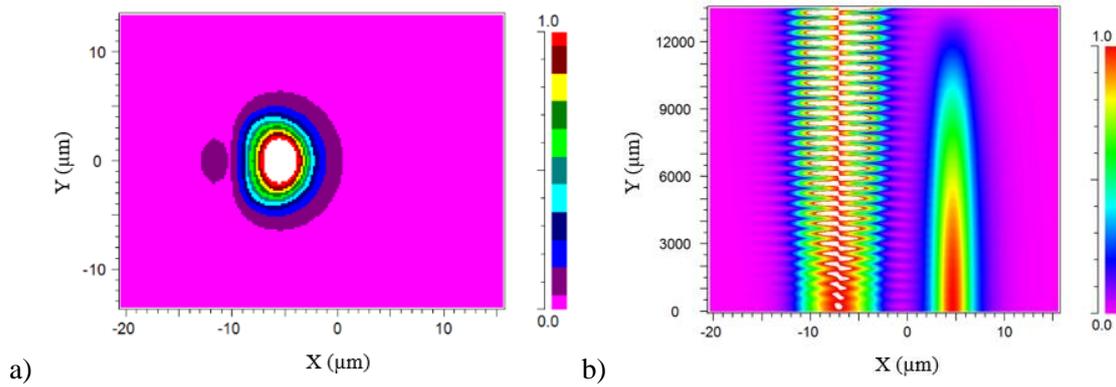


Fig. 25 a) Mapa de contorno de los modos, b) Mapa de contorno de la potencia de los modos para un acoplador asimétrico con una separación de 6 μm actuando como demultiplexor.

Como se observa en la Fig. 25 a) y b) tras finalizar los 13,52 mm en la fibra ancha están los modos LP_{01} y LP_{11} y en la fibra fina no queda prácticamente casi nada de potencia del modo LP_{01} debido a la conversión de este modo al modo LP_{11} en la fibra ancha.

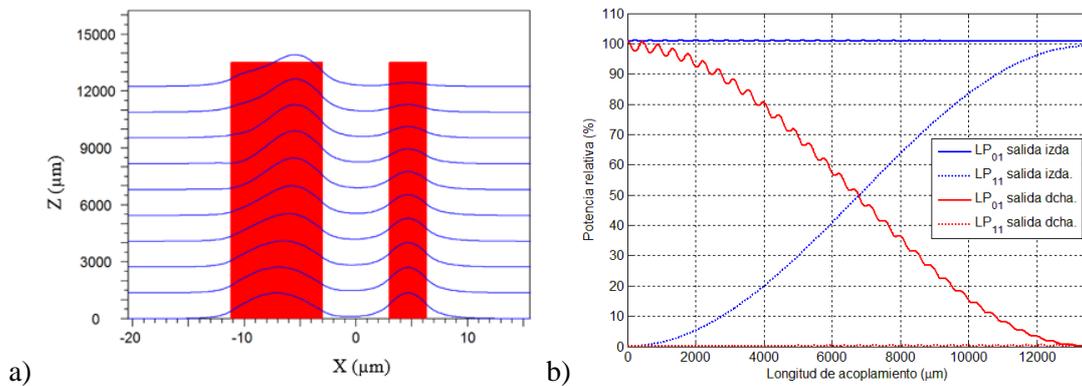


Fig. 26 a) Distribución de potencia según el tipo de visualización ‘Slices’, b) Distribución de potencia para cada modo para un acoplador asimétrico con una separación de 6 μm actuando como demultiplexor.

En la Fig. 26 a) de nuevo se muestra la distribución de potencia según el tipo de visualización ‘Slices’ y se observa como inicialmente se propagan los dos modos LP_{01} en ambas fibras. Además, en la Fig. 26 b) se puede observar la potencia de cada modo a lo largo del recorrido. En la gráfica se puede observar que el modo LP_{01} de la fibra de la derecha se ha convertido totalmente al modo LP_{11} en la fibra de la izquierda, quedando un valor residual del 0,59 %. En cuanto al modo LP_{01} de la fibra de la izquierda esta se mantiene de forma casi completa ya que al tratarse de un modo más confinado en el núcleo de la fibra el coeficiente de acoplo es mucho menor lo que se comprueba viendo que el nivel de potencia acoplado a la fibra de la derecha es del 0,1 %.

Aquí también aparece el rizado ya que son fibras con diámetro distintos como en el caso del esquema anterior y el rizado está presente en este tipo de esquemas.

En el caso del acoplador como demultiplexor este ha sido simulado bajo las mismas características pero excitando ahora ambos modos en la fibra de la izquierda. Se pueden observar los resultados de la simulación en las Fig. 27 a) y b) y Fig. 28 a) y b).

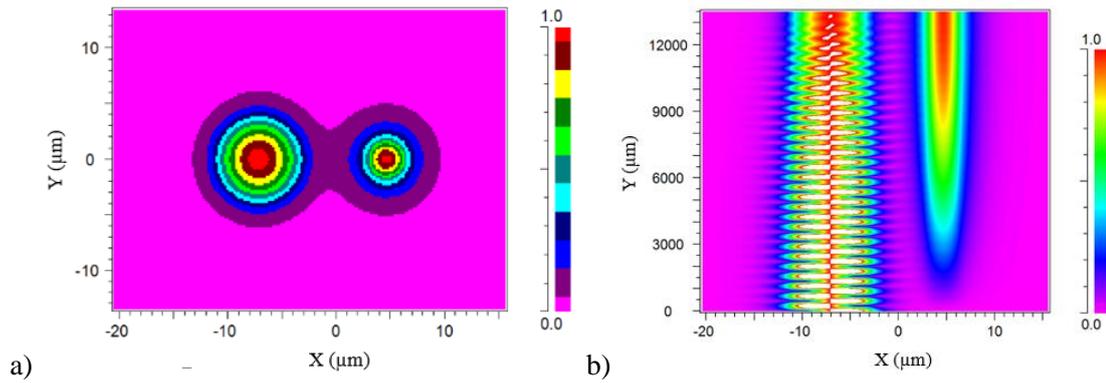


Fig. 27 a) Mapa de contorno de los modos, b) Mapa de contorno de la potencia de los modos para un acoplador asimétrico con una separación de 6 μm actuando como demultiplexor.

Como se observa en la Fig. 27 a) y b) tras finalizar los 13,52 mm tanto en la fibra ancha como en la fibra fina solo queda el modo LP_{01} . Esto se debe a las características del acoplador donde el modo LP_{11} acaba convirtiéndose y acoplándose a la fibra fina como el modo LP_{01} .

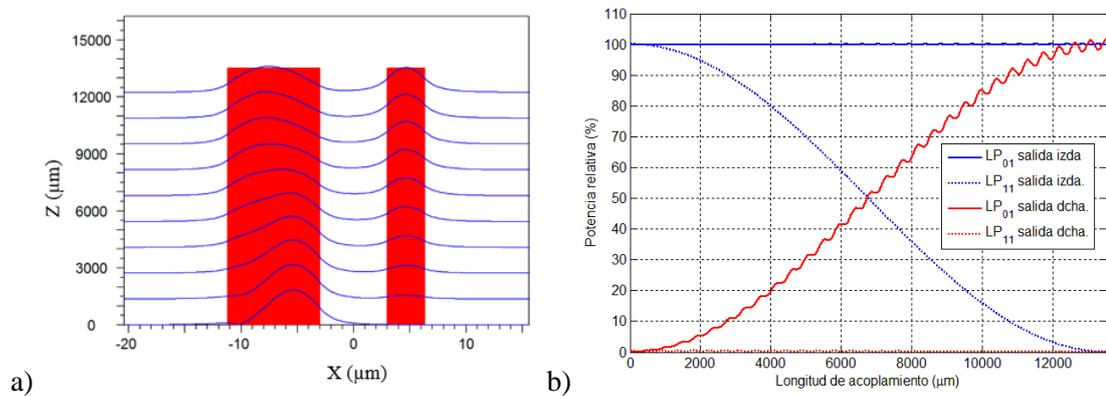


Fig. 28 a) Distribución de potencia según el tipo de visualización 'Slices', b) Distribución de potencia para cada modo para un acoplador asimétrico con una separación de 6 μm actuando como demultiplexor.

En la Fig. 28 a) se muestra la distribución de potencia en cada una de las fibras según el tipo de visualización 'Slices' y se puede observar la evolución de los modos en cada una de las fibras. Además, en la Fig. 28 b) se puede observar de una forma más exacta la potencia de cada modo en cada tramo de la fibra. En la citada figura se comprueba el correcto funcionamiento como demultiplexor modal ya que en la fibra de la izquierda los modos LP_{01} y LP_{11} tienen un nivel relativo de potencia del 99,77 % y 0,03 %, respectivamente. Por otro lado, por la fibra de la derecha el modo LP_{11} no tiene potencia ya que dicho modo no se puede propagar debido a las características de la fibra óptica. Además, se puede observar como el nivel de potencia del modo LP_{01} de la fibra de la derecha es de un 100 % con lo cual se ha convertido y acoplado correctamente a la fibra de la derecha.

De nuevo ocurre lo mismo que en el multiplexor, el rizado aparece pero igual que en el caso del esquema anterior es menos intenso en el demultiplexor.

Se puede concluir que este acoplador funciona con una eficiencia del 100 % tanto en multiplexación como en demultiplexación lo que garantiza el buen funcionamiento del sistema.

A continuación se va a estudiar el comportamiento del acoplador modal para diferentes longitudes de onda alrededor de la longitud de onda de diseño, 850 nm. En la Fig. 29 a) y b) se muestra las pérdidas de inserción y la relación de extinción de los modos LP_{01} y LP_{11} en el demultiplexor para un barrido en longitudes de onda de 840 nm a 860 nm.

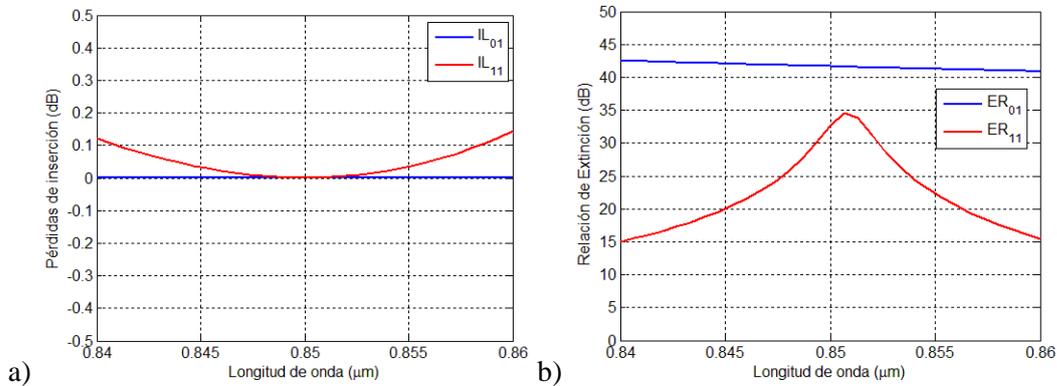


Fig. 29. a) Pérdidas de inserción, y b) Relación de extinción para diferentes longitudes de onda del acoplador asimétrico con separación de 6 μm actuando como demultiplexor

En la Fig. 29 a) los resultados obtenidos muestran que las pérdidas de inserción son mínimas para la longitud de onda de diseño, 0,01 dB tanto para el modo LP_{01} de la fibra ancha como para el modo LP_{01} de la fibra fina, lo que demuestra que se acopla prácticamente el 100 % de la potencia de cada modo. Por otro lado, se observa que aunque varíe la longitud de onda ± 10 nm respecto a 850 nm, las pérdidas de inserción se mantienen también por debajo de 0,01 dB para el modo LP_{01} de la fibra fina y por debajo de 0,14 dB para la fibra ancha, por lo que se puede concluir que el diseño del acoplador modal ofrece una gran tolerancia frente a variaciones de la longitud de onda o frente a tolerancias de fabricación.

En la Fig. 29 b) se muestra la relación de extinción, donde la mejor relación de extinción se obtiene para 850 nm. Además, para dicha longitud de onda se obtiene un valor de 32,5 dB para el modo LP_{01} de la fibra ancha y de 42,9 dB para el modo LP_{01} de la fibra fina. Por otro lado, si nos fijamos en una variación de la longitud de onda de ± 5 nm, la relación de extinción se mantiene por encima de 20,5 dB o de 15 dB para un ancho de banda de ± 10 nm. Como conclusión, se puede afirmar que el diseño del acoplador asimétrico es muy flexible a pequeñas variaciones en la longitud de onda debido a que no se produce una gran pérdida de calidad si esta cambia.

Como conclusión se puede decir que de los dos acopladores asimétricos el que presenta una mejor respuesta (menores pérdidas de inserción y mayor relación de extinción) es el acoplado asimétrico con fibra SMF-28 y fibra HI-780 ya que presenta unas pérdidas de inserción inferiores a 0,15 dB y una relación de extinción a ± 10 nm de la longitud de diseño superior a 15 dB. Si por otro lado se compara el mejor de ambos casos (simétrico y asimétrico) se observa que el acoplador simétrico obtiene valores muy parecidos al asimétrico con la peculiaridad de que los acopladores asimétricos siempre tienen una mayor dependencia con la longitud de onda, ya que al cambiar la longitud de onda cambian los índices de refracción efectivos de cada modo y lo hacen de forma distinta el LP_{01}

en la fibra fina y el LP_{11} en la ancha así que comienza a haber desacople de fase y se reduce el acoplamiento. En el simétrico esto no pasa ya que al ser ambas fibras iguales y acoplarse un modo con el mismo modo en la otra fibra, siempre tienen el mismo índice efectivo y no hay desacople de fase. Por contra, en el acoplador simétrico hace falta una LPFBG para excitar el modo LP_{11} y que se produzca el acople de este modo a la otra fibra, cosa que no es necesario en el acoplador asimétrico.

IV.3 Filtro de Modos

Otro esquema que se utiliza es el filtro de modos, cuya principal función es eliminar modos, es decir, a partir de un diámetro inicial del núcleo de la fibra este se reduce hasta un determinado diámetro (en este caso hasta $4\ \mu\text{m}$) lo que provoca que dicho modo no se pueda propagar por el nuevo diámetro por efecto de las nuevas condiciones de propagación y de esta forma provoca que el modo deje de propagarse y se pierda por la cubierta. El esquema se puede observar en la Fig. 30.

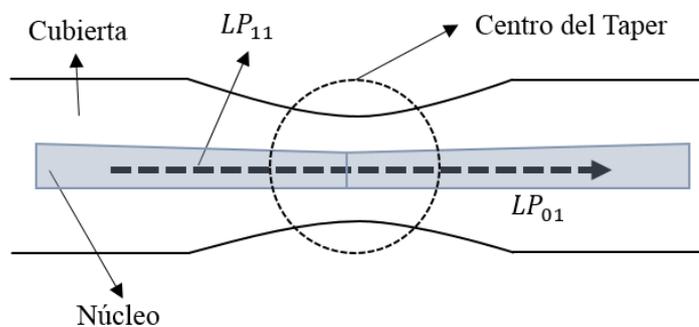


Fig. 30. Esquema del filtro de modos

Como se puede observar en la Fig. 30 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.

El filtro de modos ha sido simulado bajo las siguientes características: longitud de onda de $850\ \text{nm}$, fibra SMF-28 de $8.2\ \mu\text{m}$ y una longitud total de $12\ \text{mm}$, incluyendo los $6\ \text{mm}$ de longitud del taper. Los resultados se pueden observar en la Fig. 31 a) y b) y Fig. 32 a) y b).

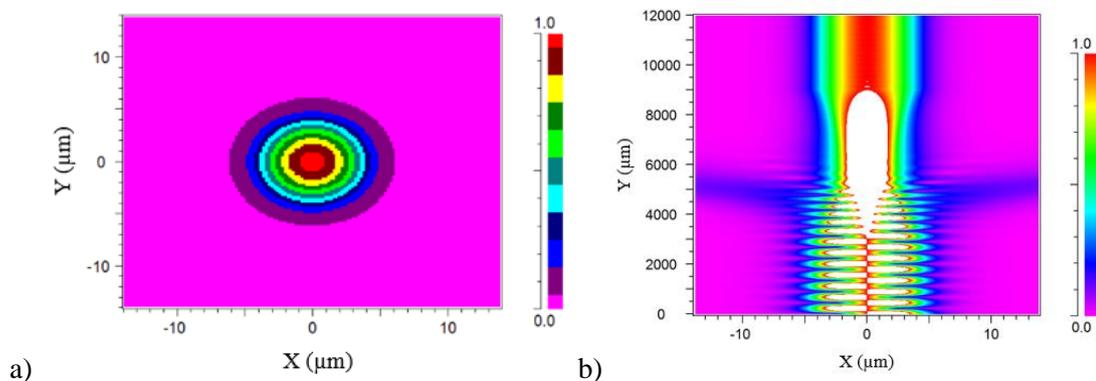


Fig. 31 a) Mapa de contorno de los modos, b) Mapa de contorno de la potencia de los modos para un filtro de modos con un taper de $6\ \text{mm}$

Como se observa en la Fig. 31 a) y b) finalmente tras el ‘taper’ solo acaba propagándose el modo LP_{01} , y el modo LP_{11} ha sido eliminado debido al estrechamiento en la zona central del ‘taper’.

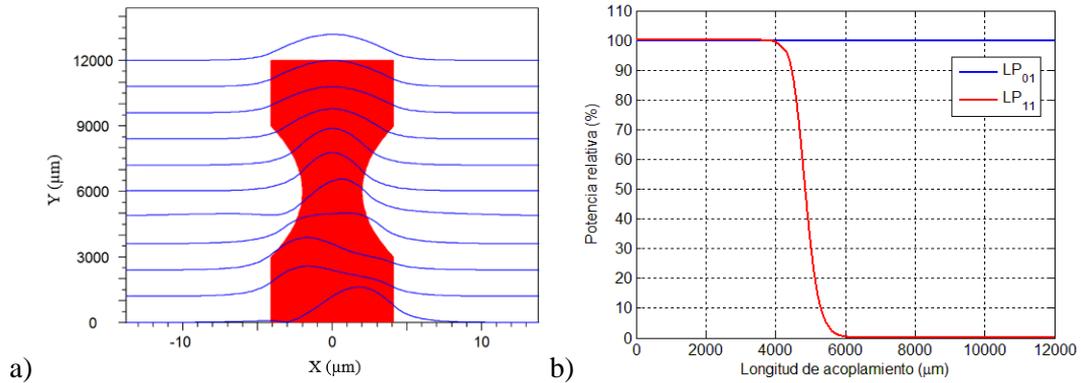


Fig. 32 Distribución de potencia según el tipo de visualización ‘Slices’, b) Distribución de potencia para un filtro de modos con un taper de 6 mm

En la Fig. 32 a) se muestra la distribución de potencia según el tipo de visualización ‘Slices’ y se puede observar como inicialmente se propagan los dos modos y cuando estos llegan a la parte más estrecha empieza a propagarse únicamente el modo fundamental, debido al cambio de diámetro de la fibra. Además, en la Fig. 32 b) se puede observar la potencia de cada modo a lo largo del recorrido. En la citada figura se puede ver como el modo LP_{01} mantiene su nivel de potencia del 100 % y, por otro lado, se observa como el modo LP_{11} cuando se acerca a la zona del taper su potencia va decayendo conforme va disminuyendo el diámetro de la fibra óptica hasta que el diámetro es tan pequeño que no se puede propagar dicho modo y su potencia es nula. Además, el valor residual del modo LP_{11} es del 0,0004 % con lo que se ha eliminado en un 99,9996 %.

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

A continuación se va a estudiar el comportamiento de este filtro de modos para diferentes longitudes de onda alrededor de la longitud de onda de diseño, 850 nm. En la Fig. 33 a) y b) se muestra las pérdidas de inserción del modo LP_{01} y la relación de extinción del modo LP_{11} para un barrido en longitudes de onda de 840 nm a 860 nm.

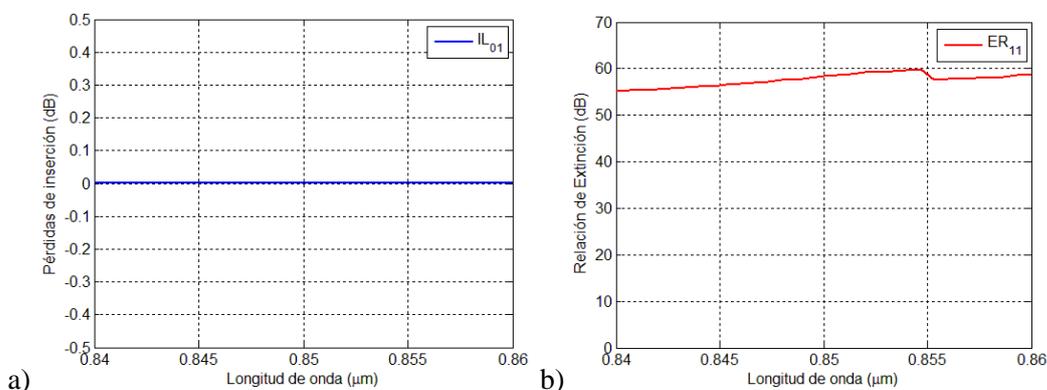


Fig. 33. a) Pérdidas de inserción, y b) Relación de extinción para diferentes longitudes de onda del filtro de modos con un taper de 6 mm

En la Fig. 33 a) los resultados obtenidos muestran que las pérdidas de inserción son mínimas para la longitud de onda de diseño, 0,01 dB para el modo LP_{01} lo que demuestra que el nivel de potencia del modo se mantiene prácticamente en el 100 %. Por otro lado, se observa que aunque varíe la longitud de onda ± 10 nm respecto a 850 nm, las pérdidas de inserción se mantienen con el mismo valor, por lo que se puede concluir que el diseño del filtro de modos ofrece una gran tolerancia frente a variaciones de la longitud de onda o frente a tolerancias de fabricación.

Por otro lado, en la Fig. 33 b) se muestra la relación de extinción, donde la mejor relación de extinción se obtiene para 855 nm. Además, para dicha longitud de onda se obtiene un valor de 58,7 dB para el modo LP_{11} . Por otro lado, si nos fijamos en una variación de la longitud de onda de ± 5 nm, la relación de extinción se mantiene por encima de 56,5 dB o de 55,1 dB para un ancho de banda de ± 10 nm. Como conclusión, se puede afirmar que el diseño del filtro de modos es muy flexible a pequeñas variaciones en la longitud de onda debido a que tiene una respuesta casi plana y los valores de extinción o de pérdidas de inserción son prácticamente los mismos para 850 nm que para 840 nm.

IV.4 Guías ópticas basadas en SOI

El último esquema a simular es la guía óptica basada en SOI. La estructura básica de una guía de ondas óptica dieléctrica consiste en un medio óptico de alto índice (núcleo) que se extiende longitudinalmente que está rodeado transversalmente por un medio de bajo índice (cubierta).

En este tipo de esquema a partir de las dimensiones del multiplexor y el demultiplexor es posible convertir modos a partir de las características de la misma. Se puede observar este esquema en la Fig. 34.

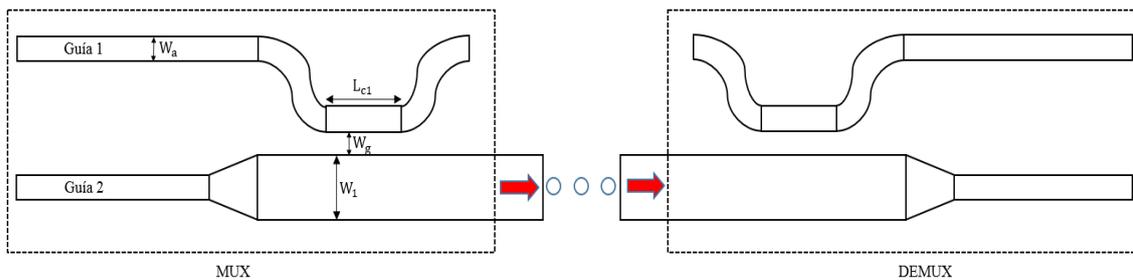


Fig. 34 Esquema de la guía óptica basada en SOI

Como se puede observar en la Fig. 34, se disponen de dos guías ópticas las cuales tienen una altura de 220 nm y una anchura (W_a) de 400 nm. Posteriormente, la Guía 2 se ensancha (W_1) hasta 865 nm para cuando se excite el modo TE_0 por la Guía 1 se produzca la conversión del modo TE_0 al modo TE_1 en la Guía 2 a través de la longitud de acoplamiento (L_{c1}) de 13 μm de la Guía 1. Además, en la región de longitud de acoplamiento la separación entre guías (W_g) es de 0,2 μm , donde inicialmente esta separadas aproximadamente 1 μm .

Los resultados de la simulación del multiplexor se pueden observar en la Fig. 35 a) y b) y Fig. 36 a) y b).

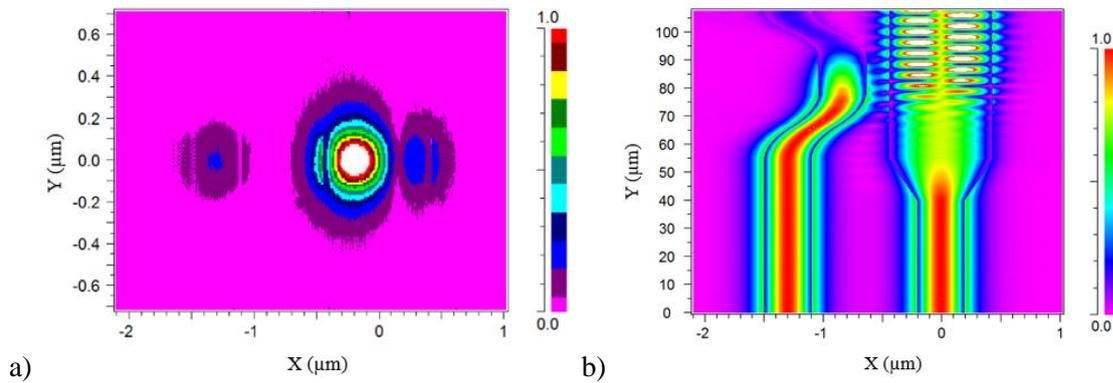


Fig. 35 a) Mapa de contorno de los modos, b) Mapa de contorno de la potencia de los modos para una separación de 0,2 μm

Como se observa en la Fig. 35 a) y b) tras finalizar los 108 μm del acoplador, en la guía fina (guía de la izquierda) se observa muy poca del modo TE_0 , debido a la conversión de este modo al modo TE_1 en la guía ancha (guía de la derecha).

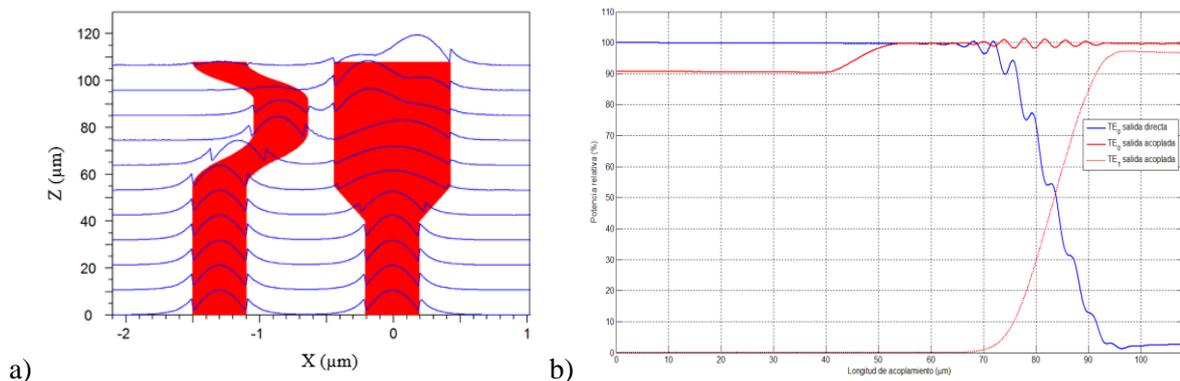


Fig. 36 a) Distribución de potencia según el tipo de visualización ‘Slices’, b) Distribución de potencia para una separación de 0,2 μm

En la Fig. 36 a) de nuevo se muestra la distribución de potencia según el tipo de visualización ‘Slices’ y se observa como inicialmente se propaga el modo TE_0 por la Guía 1 (guía de la derecha) y 2 (guía de la izquierda) y como se convierte el modo TE_0 de la guía de la izquierda al modo TE_1 en la guía de la derecha, propagándose finalmente por esta el modo TE_0 y TE_1 . Además, en la Fig. 36 b) se puede observar de una forma más exacta la potencia de cada modo en cada tramo de la guía en relación a la potencia de cada modo a la entrada. En la citada grafica el modo TE_0 de la guía de la izquierda se ha convertido totalmente al modo TE_1 en la guía de la derecha, quedando un valor residual del 2,56 %. En cuanto al modo TE_0 de la guía de la derecha esta se mantiene de forma casi completa ya que al tratarse de un modo más confinado en el núcleo de la guía el coeficiente de acoplo es mucho menor lo que se comprueba viendo que el nivel de potencia acoplado a la guía de la izquierda es del 0,49 %. Por otro lado, el nivel de potencia del modo TE_1 es del 96,6 %, lo que significa que se ha convertido y acoplado casi en su totalidad.

De nuevo se puede apreciar como aparece el efecto del rizado que ocurre exactamente igual que con los acopladores asimétricos, debido a que en este tipo de guías ópticas las guías ópticas no son iguales y por lo tanto tienen distintos índices de refracción efectivo que producen el rizado.

En el caso de la guía óptica como demultiplexor esta ha sido simulada bajo las mismas características pero excitando ahora ambos modos en la guía de la derecha. Se pueden observar los resultados de la simulación en las figuras Fig. 37 a) y b) y Fig. 38 a) y b).

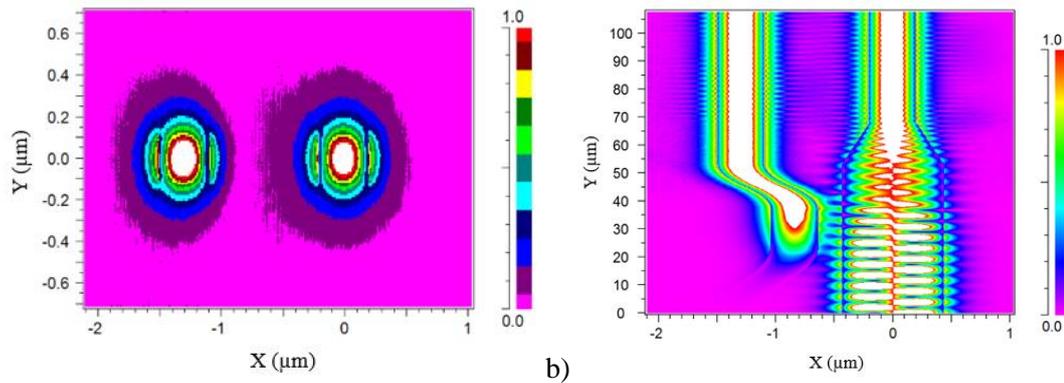


Fig. 37 a) Mapa de contorno de los modos, b) Mapa de contorno de la potencia de los modos para una separación de 0,2 μm

Como se observa en la Fig. 37 a) y b) tras finalizar los 108 μm tanto en la guía ancha como en la guía fina solo queda el modo TE_0 . Esto se debe a las características del demultiplexor donde el modo TE_1 acaba convirtiéndose y acoplándose a la fibra fina como el modo TE_0 .

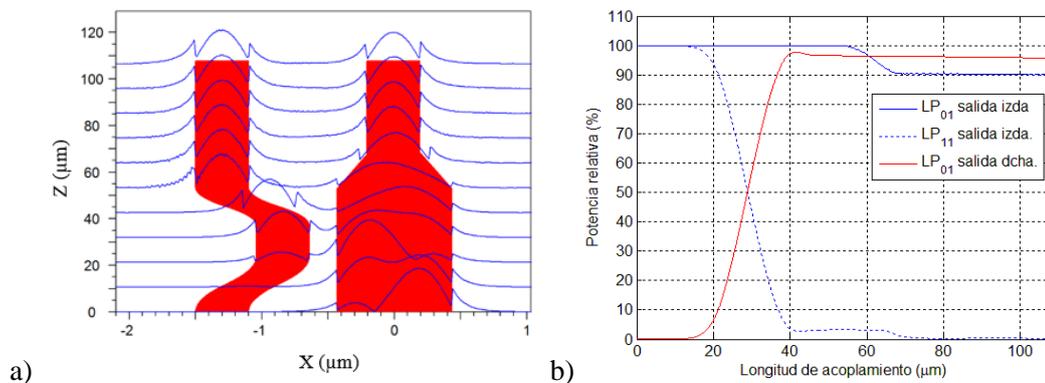


Fig. 38 a) Distribución de potencia según el tipo de visualización 'Slices', b) Distribución de potencia para una separación de 0,2 μm

En la Fig. 38 a) se muestra la distribución de potencia en cada una de las guías según el tipo de visualización 'Slices' y se puede ver la evolución de los modos. Además, en la Fig. 38 b) se puede observar de una forma más exacta la potencia de cada modo en cada tramo de la guía. En la citada figura se comprueba el correcto funcionamiento como demultiplexor modal ya que en la guía de la derecha los modos TE_0 y TE_1 tienen un nivel relativo de potencia del 90,12 % y 0,11 %, respectivamente. Por otro lado, se puede observar como el nivel de potencia del modo TE_0 de la guía de la izquierda es de un 95,73 % con lo cual se ha convertido y acoplado correctamente a dicha guía.

En este caso sucede lo mismo que en el multiplexor, el rizado también aparece debido al mismo fenómeno que ocurre en el multiplexor ya que se utiliza el mismo esquema.

Se puede concluir que la guía óptica basada diseñada ofrece una eficiencia superior al 90 % en el acoplo de modos ya sea funcionando como multiplexor o como demultiplexor.

A continuación se va a estudiar el comportamiento de la guía óptica para diferentes longitudes de onda alrededor de la longitud de onda de diseño, 1500 nm. En la Fig. 39 a) y b) se muestra las pérdidas de inserción y la relación de extinción de los modos TE_0 y TE_1 en el demultiplexor para un barrido en longitudes de onda de 1480 nm a 1520 nm.

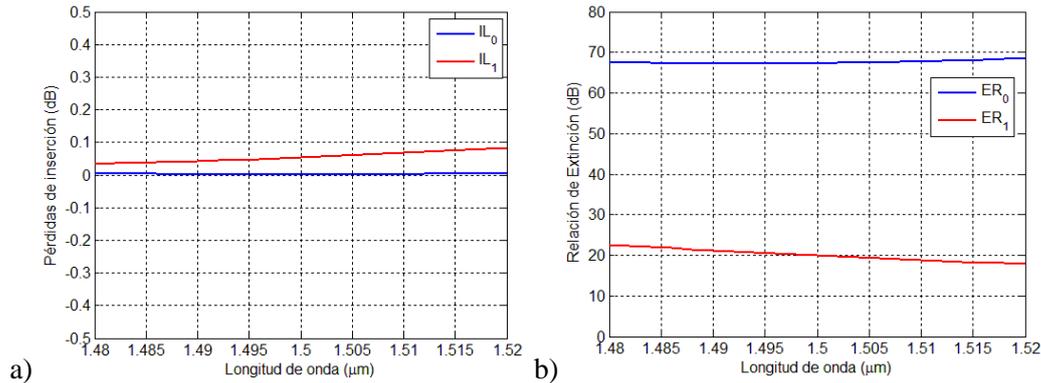


Fig. 39. a) Pérdidas de inserción, y b) Relación de extinción para diferentes longitudes de onda del acoplador de guías ópticas para una separación de 0,2 μm

En la Fig. 39 a) los resultados obtenidos muestran que las pérdidas de inserción son mínimas para la longitud de onda de diseño, por debajo de 0,01 dB para el modo TE_0 de la guía ancha y 0,05 dB para el modo TE_0 de la guía fina, lo que demuestra que se acopla prácticamente el 100 % de la potencia de cada modo. Por otro lado, se observa que aunque varíe la longitud de onda ± 20 nm respecto a 1500 nm, las pérdidas de inserción se mantienen por debajo de 0,01 dB para el modo TE_0 de la guía ancha y por debajo de 0,08 dB para la guía fina, por lo que se puede concluir que el diseño de la guía óptica ofrece una gran tolerancia frente a variaciones de la longitud de onda o frente a tolerancias de fabricación.

Por otro lado, en la Fig. 39 b) se muestra la relación de extinción, donde la mejor relación de extinción se obtiene para 1500 nm. Además, para dicha longitud de onda se obtiene 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. Por otro lado, si nos fijamos en una variación de la longitud de onda de ± 10 nm, la relación de extinción se mantiene por encima de 18,8 dB o de 17,8 dB para un ancho de banda de ± 20 nm. Como conclusión, se puede afirmar que el diseño de la guía óptica presenta una buena tolerancia frente a variaciones grandes en la longitud de onda ya que si la longitud de onda de diseño varía ± 20 nm la relación de extinción permanece prácticamente igual.

Comentar que inicialmente las dos guías ópticas en paralelo su acoplo era del 100% pero que debido al diseño de las curvas exactamente no se produce el acoplo en un 100 % ya que fuera de la longitud de acoplo se sigue acoplando potencia de una guía a otra.

V. Conclusiones y líneas abiertas

A lo largo de esta Tesina se han cumplido los objetivos fundamentales. Se han propuesto y simulado los distintos esquemas de acoplo modal mediante la utilización del software BeamPROPTM.

En el caso del acoplador simétrico este ha sido simulado como multiplexor y demultiplexor. En el caso del acoplador como multiplexor, este ha presentado una serie de resultados muy eficientes en el que se ha podido obtener un acoplo del modo LP_{11} a la otra fibra del 100 %. En cambio, como demultiplexor ha permitido desacoplar los modos y obtener por el camino directo el modo LP_{01} y por el camino transversal el modo LP_{11} con un acoplo del 99,2 % y 100 %, respectivamente. Por otro lado, en cuanto a las pérdidas de inserción y la relación de extinción se obtuvieron unas pérdidas de inserción inferiores a 0,15 dB para ambos modos y una relación de extinción a 850 nm para el modo LP_{11} de 44,5 dB y que si este variaba ± 10 nm esta se reducía hasta 15 dB, lo que asegura un buen funcionamiento. Además, se ha observado que el parámetro crítico es la relación de extinción del modo LP_{11} por lo que el ancho de banda debe fijarse respecto a este parámetro y si por ejemplo fijamos un mínimo de 15 dB de relación de extinción el ancho de banda sería de 20 nm, lo cual es suficiente para tener en cuenta las variaciones de la longitud de onda de una fuente láser a 850 nm.

En el acoplador asimétrico también se ha simulado el acoplador como multiplexor y demultiplexor. Se ha podido comprobar que en el caso del multiplexor se ha realizado correctamente la conversión del modo LP_{01} al modo LP_{11} en la fibra ancha con un acoplo del 99,95 %. En el caso del demultiplexor se ha separado de forma eficiente los dos modos, convirtiéndose el modo LP_{11} a la fibra fina con un acoplo del 100 %. También se estudió dicho comportamiento para los dos tipos de acopladores asimétricos y se vio que el que mejor prestaciones ofrecía era el acoplador asimétrico con fibra SMF-28 y HI-780 ya que ofrecía unas pérdidas de inserción inferiores a 0,15 dB y una relación de extinción a 850 nm para el modo LP_{11} de 32,5 dB y que si este variaba ± 10 nm esta se reducía hasta 15 dB. Así mismo, el modo crítico sigue siendo el modo LP_{11} así que el ancho de banda debe tenerse en cuenta para este modo ya que si se fija una relación de extinción de 15 dB se tiene un ancho de banda de 20 nm. De esta forma, hay que tener en cuenta las variaciones que sufra el laser a 850 nm ya que este nos cambiará significativamente el ancho de banda.

En el caso del filtro de modos cuya función es eliminar modos no deseados por dicha fibra óptica se ha comprobado que el modo LP_{11} se ha eliminado en un 99,99 %. Por otro lado, en este filtro de modos si se produce una variación en longitud de onda esta no es importante ya que se obtiene una respuesta casi plana obteniéndose unas pérdidas de inserción de 0 dB y una relación de extinción de 56,5 dB, con lo que asegura el filtrado de modos de forma eficiente.

El ultimo esquema simulado ha sido la guía óptica basa en SOI. En este tipo de esquema, en el caso del multiplexor, a partir de la excitación del modo TE_0 en la guía fina ha sido posible la conversión de este modo al modo TE_1 en la guía ancha con un acoplo del 96,6 %. En cambio, como demultiplexor se ha obtenido un acoplo del 95,73 % en la conversión del modo TE_1 al TE_0 . Por otro

lado, en dicho esquema no es muy importante la variación en longitud de onda ya que se obtienen respuestas prácticamente planas en el caso de las pérdidas de inserción y de la relación de extinción obteniéndose una pérdidas de inserción inferiores a 0,05 dB para la longitud de onda de diseño e inferiores a 0,1 dB para una variación de ± 20 nm. En cambio, en la relación de extinción, se obtiene para 1500 nm 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. Por otro lado, si nos fijamos en una variación de la longitud de onda de ± 10 nm, la relación de extinción se mantiene por encima de 18,8 dB o de 17,8 dB para un ancho de banda de ± 20 nm.

En cada uno de los esquemas simulados se ha conseguido el acoplo o conversión de modos de una forma exacta y eficiente.

Una vez se han comentado las distintas conclusiones se puede decir que la presente tesina dispone de varias líneas abiertas para llevar a cabo la implementación del dispositivo una vez simulado con sus dimensiones específicas. Se proponen dos líneas abiertas:

- SOI (Silicon-on-insulator, es decir Si (silicio) sobre sustrato de SiO_2 (óxido de silicio) que es el cladding de las fibras): es la tecnología básica del NTC y con la que más experiencia se tiene. Se consiguen guías de dimensiones pequeñas (típicas de 220nm de alto, llamadas nanowires) gracias al alto contraste entre el núcleo (índice 3.455) y el sustrato que rodea a la guía (1.445). Es una tecnología adecuada para trabajar en tercera ventana (1550 nm) pero no en 850 ya que ahí el Silicio tiene mucha absorción, es decir, pérdidas. Tienen como inconveniente que es difícil de acoplar horizontalmente la luz que va por esa guía de 220 nm de alto con una fibra monomodo estándar de 8.2 μm de diámetro en su núcleo aunque es posible hacerlo de forma vertical inclinada mediante el uso de gratings.
- Guías de nitruro de silicio (Si_3N_4) sobre sustrato de óxido de silicio (SiO_2). El índice de la guía es ahora del entorno de 1.97 por lo que ahora las guías tienen dimensiones del entorno de 1 μm de alto. Con estas dimensiones se facilita un poco el acoplo a la fibra monomodo. Esta tecnología sí se podría usar a 850 nm. Además, esta tecnología también se puede hacer íntegramente en NTC.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar agradecer al Ministerio de Economía y Competitividad la financiación del proyecto "Tecnología de Transmisión Modal Discreta en Fibra Monomodo (TEC2012-38558-C02-01)" liderado por Dr. Roberto Llorente y dentro el cual se ha desarrollado el presente Trabajo de Fin de Máster.

También me gustaría agradecer a Roberto Llorente la confianza depositada en mi antes de empezar esta tesina y el master, ha sido magnifico estar dirigido por el durante la presente tesina.

Por otro lado me gustaría agradecer el apoyo y ayuda de Juan Luis Corral con el tema de las comunicaciones ópticas tanto a nivel físico como a nivel de comprensión, ya que sus conocimientos han sido de gran ayuda a la hora de entender correctamente todos los parámetros característicos de la fibra óptica.

Así mismo me gustaría agradecer a María Morant sus consejos y ayuda ofrecida sobre las especificaciones y directrices a seguir así como la nomenclatura en relación a las definiciones específicas de este campo de investigación en continuo cambio.

Finalmente, y como no podía ser de otra manera, agradezco enormemente el apoyo de mis compañeros del NTC, con los que he compartido muchos momentos. Gracias a tod@s.

BIBLIOGRAFIA

- [1] T. Sakamoto, T. Mori, T. Yamamoto, L. Ma, N. Hanzawa, S. Aozasa, K. Tsujikawa, S. Tomita, *Transmission over large-core few-mode photonic crystal fiber using distance-independent modal dispersion compensation technique*. Optics Express, vol.19, no. 26, pp.478-485, 2011.
- [2] Zhaobing Tian, Student Member, IEEE, Chen, Member, IEEE, and David V. Plant, Fellow, IEEE, *850-nm VCSEL Transmission Over Standard Single-Mode Fiber Using Fiber Mode Filter*. IEEE photonics technology letters, vol. 24, no. 5, march 1, 2012.
- [3] R. Ryf*, C. Bolle*, J. von Hoyningen-Huene, *Optical Coupling Components for Spatial Multiplexing in Multi-Mode Fibers*. University of Kiel, Kaiserstraße 2, D-24143 Kiel, Germany, 2011, ISBN: 978-1-4577-1918-9.
- [4] Neng Bai, 1, 2,* Ezra Ip, 2 Ting Wang, 2 and Guifang Li1, *Multimode fiber amplifier with tunable modal gain using a reconfigurable multimode pump*. Optics Express, Vol. 19, Issue 17, pp. 16601-16611 (2011)
- [5] Nobutomo Hanzawa, Kunimasa Saitoh, Taiji Sakamoto, Takashi Matsui, Shiger Tomita, and Masanori Koshiha, *Demonstration of mode-division multiplexing transmission over 10 km two-mode fiber with mode coupler*. NTT Acces Servie Systems Laboratories, NTT Corporation, March 6-10, 2011.
- [6] Jia-Ming Liu, *Photonic Devices*. Cambridge University Press, 2005, ch 4.
- [7] Amos Hardy, William Streifer, *Coupled mode theory of parallel waveguides*. Vol. It-3, no. 5, 1985, pp 1135 – 1146.
- [8] I.H. Malitson, *Interspecimen Comparison of the Refractive Index of Fused Silica*. Journal of the Optical Society of America, Vol. 55, number 10, pp. 1205-1209, October 1965.
- [9] Corning SMF-28 Product Information. PI1036. Issued: April 2002
- [10] D. Gloge, *Weakly Guiding Fibers*. Applied Optics, vol. 10, no. 10, pp. 2252.2258 1971.
- [11] Corning Specialty Fiber. Product Information Sheets. M0500040. Issued: December 2012.
- [12] Software BeamPROP. Disponible online en: <http://optics.synopsys.com/rsoft/rsoft-passive-device-beamprop.html>

ANEXO

El trabajo realizado en esta tesina ha servido como contribución a una publicación internacional en congreso, con los siguientes datos:

1. Autores: Roberto Llorente, María Morant, **David-Garcia**, Pau medina, Juan Luis Corral, Vicenç Almenar

Título: Few-Mode Optical Transmission Systems in the Visible Band.

Congreso: ICTON 2014, paper Th.A1.3

Lugar celebración: Graz, Austria Fecha: Del 6 al 10 de Julio de 2014

Con la presente Tesina se va a contribuir a una nueva publicación sobre acopladores direccionales (simétrico y asimétrico) a 850 nm. Además, hay que decir que la presente tesina ha servido de ayuda en el programa VISICONEC.

Few-Mode Optical Transmission Systems in the Visible Band

Roberto Llorente, *Member, IEEE*, Maria Morant, *Member, IEEE*, David Garcia-Rodriguez, Pau Medina, Juan Luis Corral, *Member, IEEE*, and Vicenç Almenar, *Member, IEEE*

Universitat Politècnica de València
 Camino de Vera s/n, 46022 Valencia, Spain,
 Tel: (34)96 387 9768, Fax: (34)96 387 7827, rllorent@ntc.upv.es

ABSTRACT

This paper introduces the principles and current technology of few-mode transmission in guided optical medium for systems operating in the visible band. The visible band opens up the possibility of using standard single mode fibre, as few-mode propagation media, with the advantage of lower cost than equivalent C+L components. Few-mode transmission performance is analysed in detail considering the propagation of two degenerated modes with modal and chromatic dispersion transmission impairments. The results indicate that few-mode optical transmission systems can be used as high-capacity optical interconnects and high-performance computing networks providing 1 Gbps at 322 m operating at 850 nm or 10 Gbps at 11.8 km with 1064 nm.

Keywords: few-mode transmission, visible band, mode coupling.

1. INTRODUCTION

Currently, there are around 100 million km of installed silica single mode fibre (SMF) in use across the world. Actual SMF networks are exclusively operated in the infra-red band, at wavelengths in the range of 1.3 – 1.6 μm , exploiting the desirable transmission characteristics at those wavelengths. However, the useable capacity in the infra-red band, although substantial, is finite and the unprecedented demand on that capacity means it is diminishing at an ever increasing rate. In this scenario, few-mode optical transmission has been indicated as a suitable high-capacity technique for overcoming the capacity limit of standard single mode fibre (SSMF) dealing with the ever-increasing bitrate user demand [1].

Few-mode propagation has recently emerged as a promising approach to maximise optical transmission capacity (bitrate \times number of users); however it operates over a new form of photonic crystal fibre specifically optimised for few-mode propagation [2]. Installing that fibre throughout the world's long distance networks is an immensely costly undertaking and will take decades to approach the penetration of the existing silica SMF infrastructure. In this paper we overview the latent opportunities in operating silica SMF in the visible spectrum.

Because propagation over silica SMF at visible wavelengths is intrinsically self-extinguishing (evanescent) over a short distance (approximately 1000 m when performing transmission at 400 nm), wavelength re-use can be deployed multiple times along a single SMF route. That opens up important new opportunities for novel network architectures to reuse existing SMF infrastructures for this new application.

In the recent years, several studies have reported the transmission visible light lasers using standard single-mode fibre (SSMF) [3-4]. At 850 nm, only two linear polarization (LP) modes are supported in SSMF (*e.g.* Corning SMF-28) compared with more than 100 modes in multimode fibre (MMF). However, the modal dispersion at 850 nm in SSMF is much larger (~ 2.3 nm/km) than in MMF [4]. Fibres supporting small values of propagating modes are called "few-mode fibres" to distinguish them from multimode fibres which support hundreds of modes and are currently used in short-range data communications [5]. In this paper we propose the few-mode propagation using SSMF with the transmission of different data over two different modes at 850 nm.

2. FEW-MODE OPTICAL TRANSMISSION

The main limitation of operating the world's existing silica SMF infrastructure in the visible spectrum is the significantly higher propagation loss and the corresponding reach reduction in unamplified transmission distances. However the propagation loss of silica SMF at visible wavelengths is respectably low compared with polymer optical fibres (POF) and others of the kind more commonly favoured for operation in the visible spectrum [6]. In Fig. 1(a) a comparison of the losses for different types of fibre at different wavelengths is represented.

A further disincentive to use silica SMF in the visible spectrum is the assumed difficulties in coping with multi-mode propagation. However the ongoing research programs on few-mode propagation in the infra-red band over photonic crystal fibre are revealing the benefits of embracing rather than combatting multi-mode propagation. That applies equally to propagation in the visible band of silica SMF. Indeed, few mode or even close-to-single mode propagation at visible wavelengths can be readily achieved over silica SMF simply by restricting transmission distance. This enables silica SMF to support a significantly greater bandwidth than POFs at visible wavelengths over the same distance. Figure 1(b) shows the ratio of optical power in cladding vs. the normalized frequency given by: $V = k_0 a NA$ where $NA = n_1 \cos(\phi_c) = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$ is the numerical aperture ($NA = 0.14$ in the case of SMF-28) and $\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$ ($\Delta = 0.36\%$ in SMF-28). This implies a total of 14 modes for

the refractive indexes of the core and cladding of commercially available SMF, which are represented in Fig. 1(c).

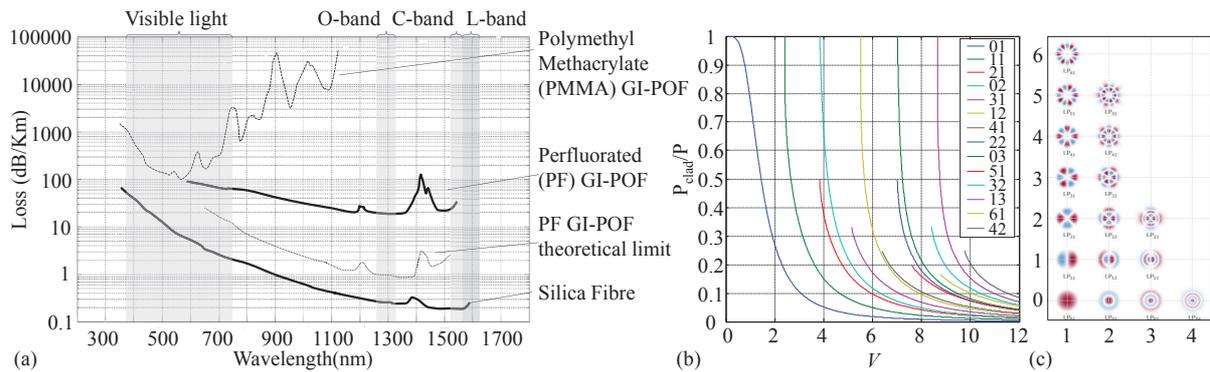


Figure 1: (a) Propagation losses for different fibre types [6], (b) Power calculations for each transmitted mode; (c) Mode pattern representation.

Table 1. Accumulated dispersion calculation for each mode at different wavelengths.

λ (nm)	n_{clad}	n_{e-clad}	n_{core}	NA	V	Mode	D_{MAT}	D_{WG}	D_{TOT}
1550 nm	1.4440	1.4626	1.4492	0.1229	2.0420	LP ₀₁	21.9	-6.6	15.3
	1.4468	1.4616	1.4520	0.1231	2.4207	LP ₀₁	3.6	-3.3	0.3
1310 nm						LP ₁₁		-56.0	-52.4
	1.4481	1.4617	1.4533	0.1232	2.6449	LP ₀₁	-7.9	-1.8	-9.7
1200 nm						LP ₁₁		-34.8	-42.7
	1.4504	1.4630	1.4557	0.1234	3.1791	LP ₀₁	-39.8	0.6	-39.2
1000 nm						LP ₁₁		-14.1	-53.9
	1.4525	1.4657	1.4577	0.1236	3.7454	LP ₀₁	-84.0	1.8	-82.1
850 nm						LP ₁₁		-4.8	-88.7
	1.4542	1.4689	1.4595	0.1237	4.2499	LP ₀₁	-135.0	2.4	-132.7
750 nm						LP ₁₁		-0.3	-135.4
						LP ₂₁		-23.3	-158.4
						LP ₀₂		-86.6	-221.6

For each wavelength we evaluated the modal dispersion for each mode in propagation, assuming a SiO₂ cladding with $\Delta = 0.36\%$ constant with wavelength and $a = 4.1 \mu\text{m}$ core radius. From the results shown in Table 1, we selected 850 nm and 1064 nm wavelengths for the evaluation of few-mode propagation, as 850 nm shows less chromatic dispersion and has more devices available in the current market, while 1064 nm has less modal dispersion.

3. TRANSMISSION PERFORMANCE ANALYSIS

The performance of the system was evaluated with the transmission of an on-off keying (OOK) signal in SSMF comparing the quality results obtained at 850 nm and at 1064 nm wavelengths, according to the results obtained in Section 2. As a first step, two degenerated modes are transmitted at 850 nm. The modal dispersion was analysed obtaining a 159.5 ps differential delay for 100 m of SSMF at 850 nm. For the evaluation of the OOK transmission, Gaussian pulses are transmitted with $T_o = 1/4 T_{bit}$ where T_o is the pulse width at 1/e optical power. The analysis considers both modes transmitted with equal power and evaluates both modal and chromatic dispersion.

In a transmission of an OOK signal at 1 Gb/s the time of bit is $T_{bit} = 1 \text{ ns}$, thus, a differential delay of $T_{bit}/4$ is obtained for 156.74 meters. In an OOK transmission of 10 Gb/s, $T_{bit} = 0.1 \text{ ns}$ and the differential delay of $T_{bit}/4$ is obtained for 15.7 meters of fibre.

The Q factor is estimated from the eye diagram of the received OOK signal, and the bit error rate (BER) is calculated from the Q factor. Figure 2 shows the BER results obtained for OOK transmission of 1 Gbps at $\lambda = 850 \text{ nm}$ and 10 Gbps at $\lambda = 1064 \text{ nm}$. An error free rate ($\text{BER} = 10^{-9}$) is obtained at 322 m for 1 Gbps operating at 850 nm, while the same BER is achieved at 11.8 km for 10 Gbps operating at 1064 nm. The obtained results confirm that modal dispersion is the limiting factor when using 850 nm, while at 1064 nm the chromatic dispersion and optical losses limit the maximum fibre length that the optical system can achieve.

4. MODE DIVISION MULTIPLEXING

Using mode division multiplexing (MDM), different data signals are transmitted over different propagation modes at a certain wavelength and using a single fibre core. MDM transmission is receiving particular attention as it can increase considerably the transmission capacity when combined with conventional wavelength division

multiplexing (WDM) or polarization-division multiplexing (PDM) transmission [3]. Although propagation over long fibre distances causes coupling between signals in different modes, the received signals can be separated using multiple-input multiple-output (MIMO) digital signal processing [5]. However, MDM transmission at 1080 nm of two modes has been demonstrated up to 10 km of SSMF with negligible modal crosstalk [3].

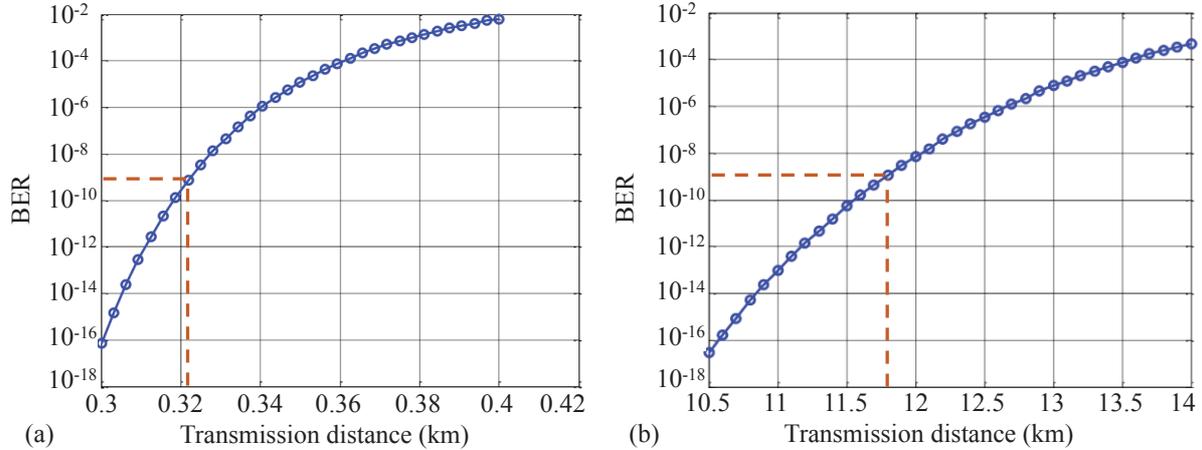


Figure 2. Calculated BER for: (a) 1 Gbps at $\lambda=850$ nm, and (b) 10 Gbps at $\lambda=1064$ nm.

Figure 3(a) shows the few-mode transmission system diagram with using MDM of two modes at 850 nm. A long-period fibre Bragg grating (LPFBG) is used as a mode converter to transform the LP_{01} mode to the LP_{11} mode [3]. Other MDM techniques could be used, as demonstrated recently, like a mode crossbar switch [7] or a single grating coupler [8].

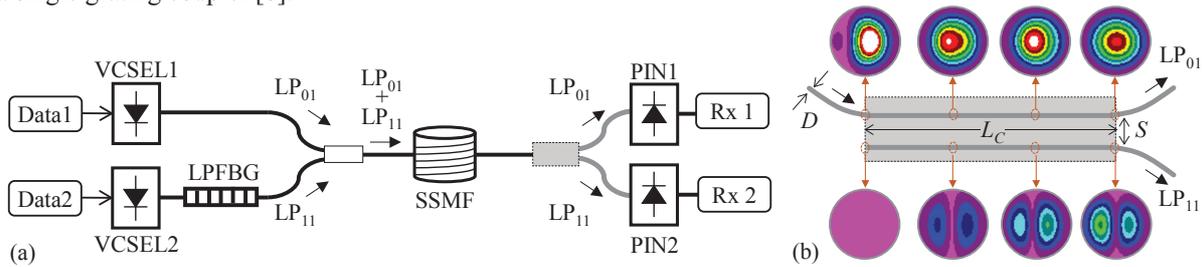


Figure 3: (a) Few-mode optical transmission system with mode division multiplexing; (b) Fibre coupler mode demultiplexer diagram with simulation parameters: core diameter (D), separation (S) and coupling length (L_C).

With MDM, different data are modulated over each mode. The information propagated over each mode is combined together and transmitted through SSMF. At the receiver, a fused-fibre coupler is used to separate each mode and detect the information separately. We analysed analytically the performance of a fused-fibre coupler for demultiplexing the few-mode transmitted data.

The mode demultiplexing performance of the few-mode transmission at 850 nm is evaluated by simulation using BeamPROP software. Figure 3(b) shows the basic structure of the fused-fibre coupler for mode demultiplexing, including the main parameters for the simulation evaluation such as the diameter of each fibre core (D), the separation (S) between the two cores, and the coupling length (L_C). The simulation characteristics used for the evaluation of the fibre coupler mode demultiplexer are summarized in Table 2.

Table 2. Simulation parameters for fibre coupler mode demultiplexer evaluation.

Parameter	Symbol	Value	Unit
Wavelength	λ	850	nm
Code index	n_{core}	1.4577	—
Cladding index	n_{clad}	1.4525	—
Core diameter	D	8.2	μm
Core separation	S	4-10	μm
Coupling length	L_C	0-30	mm

As it is represented in Fig. 4(a), the incoming light is inserted in the coupler core situated on the top. Inside the coupler, mode demultiplexing is achieved due to the propagation constant difference and most of the LP_{01} mode remains in the core on the top (straight path) and most of the LP_{11} mode is coupled to the core on the bottom (cross path), as it can be observed in the field distribution shown in Fig 4(a). Figure 4(b) shows the coupling ratio for different core separation distances (S) when the coupling length is fixed to $L_C = 9$ mm. The LP_{01} mode achieves maximum transmission in the straight path (73% coupling) and minimum transmission ($\sim 0\%$ coupling)

in the cross path (opposite core) if the separation is higher than $S \geq 5 \mu\text{m}$. For $S = 5 \mu\text{m}$, LP_{11} mode achieves a maximum transmission to the cross path (with a coupling ratio of 27%) and minimum transmission in the straight path (0%).

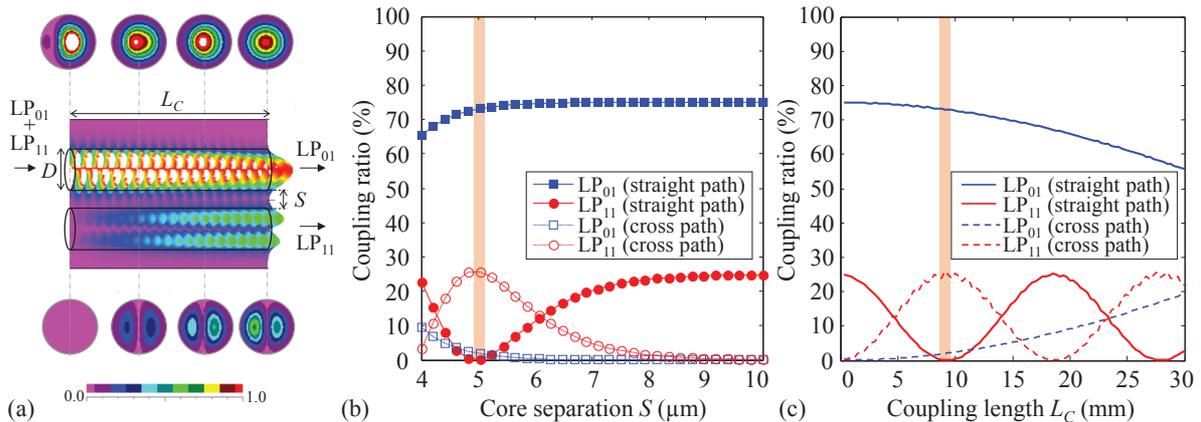


Figure 4: (a) Field distribution of the coupler in visible band; (b) Coupling ratio vs. core separation (S) for both modes; (c) Coupling ratio vs. coupling length (L_C) for both modes.

Figure 4(c) shows the coupling ratio as a function of the coupling length when the core separation is set to the optimum $S = 5 \mu\text{m}$. In this case, the optimum performance is obtained for a coupling length of $L_C = 9 \text{ mm}$. The mode profiles at each fibre core are represented in Fig. 4(a) for the optimum fibre coupler ($S = 5 \mu\text{m}$ and $L_C = 9 \text{ mm}$) measured at 0, 3, 6 and 9 mm distance from the input port. This confirms the correct separation of the optical modes LP_{01} and LP_{11} in the two output fibres of the optical coupler.

5. CONCLUSIONS

This paper overviews the few-mode transmission in optical systems operating in the visible band. The visible band opens up the possibility of using standard single mode fibre as a few-mode propagation media. Few-mode transmission performance was analysed considering the propagation of two degenerated modes with modal and chromatic dispersion transmission impairments. Error free transmission is achieved at 322 m of SSMF at 850 nm with a 1 Gbps OOK signal or up to 11.8 km for 10 Gbps OOK at 1064 nm.

Using mode division multiplexing the capacity of the system can be increased while using SSMF media. The evaluated performance of a fused-fibre coupler at 850 nm show the proper separation of optical modes LP_{01} and LP_{11} for data demultiplexing. The results presented in this paper confirm that few-mode optical transmission systems find application in high-performance computing networks and high-capacity optical interconnect technology at the network operator premises.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work was partly supported by Spain National Plan projects TEC2012-38558-C02-01 MODAL and TEC2012-38558-C02-02 OPTOPRO. M. Morant's work is supported by Generalitat Valenciana VALi+D postdoc program.

REFERENCES

- [1] An Li, Xi Chen, A.A. Amin, and W. Shieh: Fused fibre mode couplers for few-mode transmission, *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 24, no. 21, pp. 1953-1956, Nov. 2012.
- [2] T. Sakamoto *et al.*: Transmission over large-core few-mode photonic crystal fibre using distance-independent modal dispersion compensation technique, *Optics Express*, vol. 19, no. 26, pp. B478-B485, Nov. 2011.
- [3] N. Hanzawa *et al.*: Demonstration of mode-division multiplexing transmission over 10 km two-mode fibre with mode coupler, in *Proc. Optical Fibre Communication Conference and Exposition (OFC/NFOEC 2011)*, Mar. 2011, paper OWA4.
- [4] Z. Tian, C. Chen, and D.V. Plant: 850-nm VCSEL transmission over standard single-mode fibre using fibre mode filter, *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 24, no. 5, pp. 368-370, Mar. 2012.
- [5] S.O. Arik, J.M. Kahn, and Keang-Po Ho: MIMO signal processing for mode-division multiplexing: An overview of channel models and signal processing architectures, *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 31, no. 2, pp. 25-34, Mar. 2014.
- [6] H.P.A. van den Boom, W. Li, P.K. van Bennekom, I. Tafur Monroy, and G-D. Khoe: High-capacity transmission over polymer optical fibre, *IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 7, no. 3, pp. 461-470, May 2001.
- [7] H.S. Chen and A.M.J. Koonen: LP_{01} and LP_{11} mode division multiplexing link with mode crossbar switch, *Electronics Letters*, vol. 48, no. 19, pp. 1222-1223, Sept. 2012.
- [8] Yunhong Ding *et al.*: On-chip mode multiplexer based on a single grating coupler, in *Proc. IEEE Photonics Conference (IPC2012)*, pp. 707-708, Sept. 2012.