



UNIVERSIDAD
POLITECNICA
DE VALENCIA



Máster Universitario
en Tecnologías, Sistemas y
Redes de Comunicaciones

Análisis, diseño y caracterización de circuitos conversores de polarización en silicio

Autor: Mariam Aamer

Director 1: Pablo Sanchís Kilders

Director 2: Jose Vicente Galán Conejos

Fecha de comienzo: 01/11/2009

Lugar de trabajo: Centro de Tecnología Nanofotónica de Valencia

Objetivos —

Analizar y diseñar estructuras capaces de separar y rotar la polarización de una luz que proviene de una fibra, con un estado de polarización aleatorio. Para ello, se escoge una estructura que permite obtener un dispositivo lo más compacto posible, que tenga una relación de extinción lo más alta posible a la longitud de onda de trabajo, y cuyo proceso de fabricación sea lo menos complicado posible.

Metodología —

- Análisis y diseño de estructuras: El primer paso es el análisis del dispositivo óptico y su diseño mediante herramientas de simulación con el fin de encontrar los valores óptimos de los parámetros necesarios para el buen funcionamiento del dispositivo en cuestión, para la aplicación y frecuencia de trabajo deseadas.
- Fabricación: Una vez obtenidos los parámetros de la estructura, se pasa al proceso tecnológico mediante el cual se fabrica la nanoestructura tomando como elemento base, en nuestro caso, una oblea SOI. El centro cuenta con 500 m² de salas limpias, equipadas con todo el material necesario para realizar circuitos ópticos integrados. Las técnicas necesarias incluyen litografía óptica y por cañón de electrones, *inductively coupled plasma reactive ion etching*, deposición de óxido, microscopía electrónica, etc. Estos procesos de fabricación se llevan a cabo por profesionales de dicha rama, sin que haya una participación activa por parte del tesinando en dichos procesos.
- Caracterización: La caracterización del dispositivo fabricado se llevó a cabo en los laboratorios de los que dispone el centro. Estos laboratorios, completamente equipados, cuentan con diversas fuentes láser (pulsadas, sintonizables y continuas, en el rango de 1.3-1.6 micras), sistemas de acoplo (con fibra, objetivo o grating) y sistemas de detección con anchos de banda superiores a 40 GHz.

Desarrollos teóricos realizados —

Para el estudio teórico de las estructuras de interés se dispone, además de las ecuaciones teóricas que describen el funcionamiento teórico de las estructuras bajo estudio, de dos herramientas de simulación basadas, una en el método de resolución de las ecuaciones de Maxwell con diferencias finitas FDTD (*Finite-Difference Time-Domain*) y otra en el método de propagación de haz BPM (*Beam Propagation Method*). Con estas herramientas, se calculan los parámetros físicos de la estructura, en base a las especificaciones objetivo que se quieren conseguir. El software tiene en cuenta todas las dimensiones físicas de los elementos presentes en el circuito, así como todos los parámetros del material con los que serán fabricados.

Desarrollo de prototipos y trabajo de laboratorio —

Con un software de diseño asistido por ordenador (CAD), se diseña el *layout* con el que será fabricado el dispositivo. Este diseño se traslada a un proceso de litografía EBL (*Electron Beam Lithography*) que grabará el diseño sobre silicio para obtener el prototipo deseado. Una vez fabricado, se pasa a su caracterización en el laboratorio, donde se realizan las medidas oportunas para estudiar la respuesta experimental del dispositivo. En estas medidas, se inyecta una polarización

de entrada y se miden las dos salidas del separador de polarización para comprobar su funcionamiento. En cuanto al rotador de polarización, se inyecta una polarización a la entrada y se mide a la salida la potencia de la señal con polarización ortogonal a la de entrada para comprobar que el dispositivo ha realizado la rotación de la polarización, como indican los estudios teóricos. A partir de ello, se trasladan los datos obtenidos a un sencillo programa realizado en Matlab para obtener la relación de extinción de los dos dispositivos y la eficiencia de conversión de polarización.

Resultados —

El estudio llevado a cabo en esta tesina tiene como resultado dos dispositivos, separador y rotador de la polarización, claves para conseguir un circuito transparente a la polarización construido a partir de componentes sensibles a la misma. Los dos dispositivos resultan ser compactos (splitter de longitud $13.5\mu\text{m}$ y rotador de $27\mu\text{m}$ de longitud), además de tener una relación de extinción experimental superior a 20 dB en el primer caso, y una eficiencia de conversión de polarización teórica del 94% en el segundo caso.

Líneas futuras —

Como trabajo futuro, nos planteamos caracterizar el rotador de polarización diseñado y comprobar la concordancia del funcionamiento experimental y los estudios teóricos, así como comprobar el correcto funcionamiento del esquema completo de diversidad en polarización (separador de polarización seguido del rotador diseñado). También faltaría mejorar el funcionamiento de los dos dispositivos dotándolos de sintonización mediante la incorporación de electrodos para tener un grado de libertad añadido, si la aplicación lo requiere.

Publicaciones —

J. V. Galan, M. Aamer, P. Sanchis, A. Griol, L. Bellieres, J. Ayucar and J. Marti, "A Compact and Broadband Polarization Splitter in SOI", Proc. of IEEE Photonics society annual Meeting 2009, Belek-Antalya (Turkey), 2009, paper TUV5.

Abstract —

Polarization sensitivity is a major problem in microphotonic, because the polarization state changes randomly in optical fibers. So integrated polarization diversity schemes have to be implemented when using rectangular SOI strip waveguides in order to avoid external polarization control and to make sure the waveguide is mostly guiding TE polarization. The main building blocks of these schemes are the polarization splitter and the polarization rotator, objects of our study. The designed splitter presents a measured extinction ratio higher than 20 dB for both TE and TM polarizations and output ports 3 and 4 in a wavelength bandwidth higher than 30 nm. The designed polarization rotator offers an extinction ratio of 12 dB and polarization conversion efficiency up to 94% for both polarization states.

Autor: Aamer Mariam, email: maaa@ntc.upv.es

Director 1: Sanchis Kilders Pablo, email: pabsanki@dcom.upv.es

Director 2: Galán Conejos, Jose Vicente, email: jogaco@ntc.upv.es

Fecha de entrega: 24-11-10

ÍNDICE

I. Introducción	4
II. Fotónica en silicio	5
II.1. Tecnología SOI (Silicon On Insulator).....	5
II.2. Bloques conversores de polarización	7
III. Diseño de un separador compacto de polarización.....	7
III.1. Introducción.....	7
III.2. Estructura propuesta.....	11
III.3. Diseño y simulación.....	13
III.4. Caracterización del dispositivo.....	15
IV. Diseño de un rotador compacto de polarización.....	18
IV.1. Introducción.....	18
IV.2. Estructura propuesta.....	20
IV.3. Diseño y simulación.....	22
IV.4. Caracterización del dispositivo.....	24
V. Conclusiones y trabajo futuro.....	25
Agradecimientos	25
Referencias	26
Anexo: Publicaciones relacionadas con la tesina	

I. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo aborda el análisis, diseño y caracterización de una estructura eficiente capaz de convertir la polarización de la luz a su entrada, separándola primero en sus dos componentes ortogonales, y rotándolas después. En esta breve introducción se presenta la necesidad de tener esquemas transparentes al estado de polarización en fotónica sobre silicio, así como los objetivos principales de este trabajo.

La capacidad de las redes de comunicaciones ha aumentado de manera considerable mediante la incorporación de la tecnología óptica en los enlaces entre nodos de red. No obstante, las principales funciones de dichos nodos, como el encaminamiento o enrutamiento, siguen realizándose en el dominio eléctrico, lo que conlleva a la aparición de cuellos de botella a la hora de hacer frente a la creciente demanda de capacidad (véase Fig.1). Es por ello que se están realizando grandes esfuerzos a nivel mundial para desarrollar tecnología óptica en los nodos de red, permitiendo así el desarrollo de redes todo ópticas con dispositivos fotónicos de muy altas prestaciones [1].

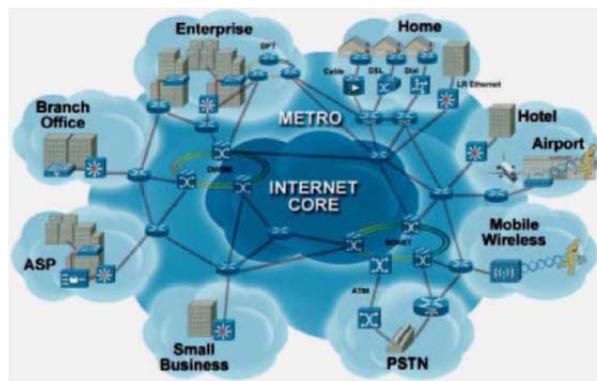


Fig.1. Esquema de una red de telecomunicaciones. Las principales funciones de los nodos de la red continúan realizándose en el dominio eléctrico.

La principal ventaja de esta tecnología de silicio es su compatibilidad con los procesos de fabricación CMOS (*Complementary Metal Oxide Semiconductor*) utilizados en la industria microelectrónica, permitiendo con ello la producción a gran escala de componentes de bajo coste. Para el desarrollo de dispositivos nanofotónicos mediante tecnología de silicio, usaremos estructuras basados en guiado por contraste de índices, las cuales consiguen el guiado de la luz mediante reflexión total interna debido a la diferencia de índices de refracción entre el núcleo y la cubierta ($N_{Si} = 3.45, N_{SiO_2} = 1.45$ respectivamente, a la longitud de onda de 1550 nm). Estas estructuras microfónicas, que presentan un alto confinamiento de la luz, poseen características únicas que supondrían un avance radical en la tecnología de hoy en día. No obstante, el control de la polarización en dichos dispositivos es complicado debido a su inherente sensibilidad a la polarización [2]. Es por ello que la sensibilidad a la polarización es uno de los mayores problemas

en microfotónica, ya que el estado de polarización cambia de forma aleatoria en la fibra óptica, lo que implica un control externo de la polarización en los dispositivos fotónicos integrados.

II. FOTÓNICA EN SILICIO

En los últimos años, la microelectrónica en silicio ha experimentado un éxito rotundo en las redes de telecomunicaciones debido, principalmente, a la gran disponibilidad y buenas propiedades térmicas y mecánicas del silicio como semiconductor por un lado, y por otro lado gracias al desarrollo de procesos de tecnología dominantes como es la tecnología CMOS. En [3] se afirma que la microelectrónica no será capaz, en un futuro, de desarrollar circuitos que operen a las de 40Gbps. Las principales características de la tecnología fotónica son una mayor velocidad de operación frente a dispositivos microelectrónicos y un mayor ancho de banda.

Numerosos dispositivos pasivos sobre esta tecnología han sido ya desarrollados [4]. Además, grandes avances en el desarrollo de dispositivos ópticos activos en silicio han sido publicados [5]. No obstante, uno de los principales problemas que presenta el silicio como semiconductor es su bajo coeficiente electro-óptico, lo que dificulta mucho la utilización de dicho material para la construcción de fuentes emisoras de luz como láseres o diodos. En la actualidad, grandes empresas a nivel mundial, como IBM o Intel, han demostrado su interés en la tecnología fotónica desarrollando fuentes emisoras de luz en silicio [6]. Las principales ventajas que ofrece la utilización de dispositivos ópticos basados en silicio son:

- Drástica reducción de costes mediante el uso de una tecnología muy bien conocida y desarrollada.
- Disminución de las dimensiones de los sistemas gracias a la alta integración de diferentes componentes opto-electrónicos en un mismo sustrato.
- Compatibilidad 100% con los procesos de fabricación CMOS utilizados en la industria microelectrónica.

Esta última es la principal ventaja que presenta el uso del silicio ya que de esta forma se pueden fabricar dispositivos fotónicos de silicio a gran escala con un bajo coste y con el añadido de que se pueden integrar junto a dispositivos electrónicos combinando funcionalidades.

Una de las tecnologías ópticas de fabricación basadas en silicio con mayor éxito es la tecnología SOI (*Silicon On Insulator*). Sobre esta tecnología, se basarán los diseños que se desarrollarán en este trabajo.

II.1. TECNOLOGÍA SOI (*Silicon On Insulator*)

Esta tecnología se caracteriza básicamente por el alto contraste de índices de refracción que existe entre sus dos materiales, siendo el índice de refracción del silicio (núcleo) de 3.45 y el del óxido (cubierta) de 1.45 aproximadamente, a la longitud de onda de 1550 nm. Una oblea de SOI consiste

en una delgada capa de silicio depositada sobre una capa de óxido de silicio (SiO_2) de espesor en torno a $1\text{-}3\mu\text{m}$, la cual se encuentra depositada a su vez sobre una capa de sustrato de mucho mayor espesor ($\sim 700\mu\text{m}$), también de silicio. En concreto, nuestras obleas tienen una capa de sustrato de $750\mu\text{m}$, una capa de óxido de $3\mu\text{m}$ y una capa superior de silicio de 220nm .

La característica más importante de esta tecnología, como ya hemos comentado, es el alto contraste entre los materiales del núcleo y la cubierta. Este contraste ($\Delta n \sim 2$) se traduce en un alto confinamiento de la luz en el núcleo de las estructuras ópticas. Dicho confinamiento resulta clave para el desarrollo de dispositivos compactos de dimensiones reducidas, y poder reducir con ello las dimensiones de los circuitos integrados, lo cual es importante ya que es la base para poder fabricar chips a gran escala y poder incluir en una misma oblea miles de ellos.

En Fig. 2, se tiene un ejemplo de las dimensiones de una guía SOI monomodo con las que hemos trabajado en esta tesina.

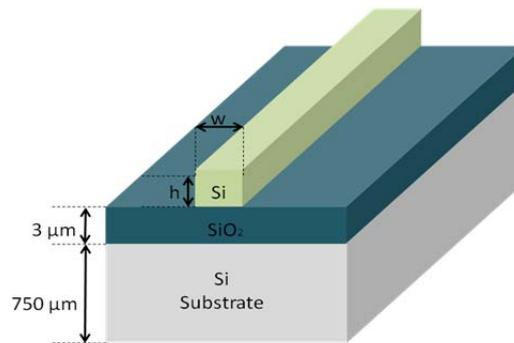


Fig.2. Detalle de una guía sobre una oblea SOI.

De la figura de arriba, cabe comentar que la altura de las guías es $h = 220\text{nm}$. Bajo estas condiciones, una guía debería tener una anchura $w = 450\text{nm}$ para asegurar la propagación monomodo. En Fig. 3 se ilustra el aspecto del modo fundamental de una guía SOI de 450nm de anchura para polarización TE (a) y polarización TM (b). Se puede observar que el confinamiento en el núcleo es mayor para una señal de entrada con polarización TE y ello es debido a la orientación del campo eléctrico en ambas polarización. Por este motivo, se suele trabajar con polarización TE en circuitos integrados sobre esta tecnología.

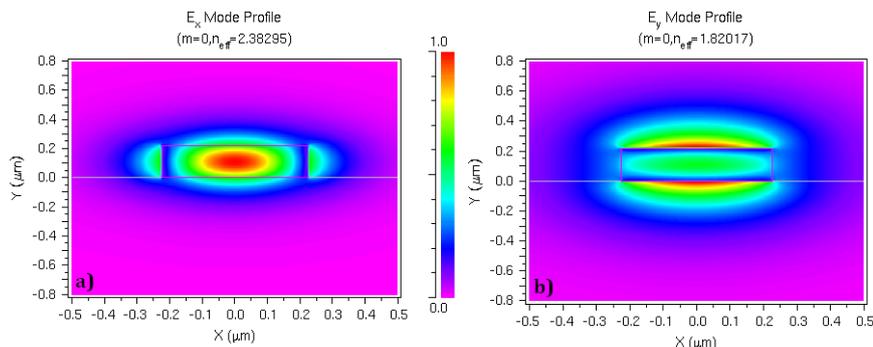


Fig.3. Aspecto del modo fundamental de una guía SOI de 450nm de anchura para polarización TE (a) y TM (b).

II.2. BLOQUES CONVERSORES DE POLARIZACIÓN

El esquema de diversidad en polarización [7] planteado es el que se muestra en Fig.4, en el cual, a partir de componentes sensibles a la polarización, se consigue un circuito transparente a la misma.

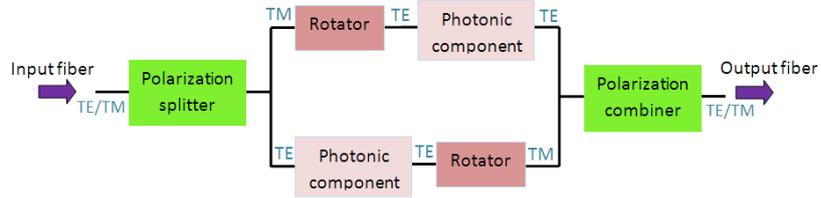


Fig.4: Esquema de diversidad en polarización

Una señal procedente de la fibra, con un estado de polarización arbitrario, es separada en sus dos polarizaciones ortogonales mediante un separador (*splitter*) de polarización, para que más tarde, una de estas dos polarizaciones (componente TM) pase por un rotador de polarización, y con ello conseguir un único estado de polarización a la entrada del chip. A su salida, una de las componentes se vuelve a rotar y combinar con la señal procedente de la otra rama. De esta forma, necesitamos fabricar dispositivos funcionales para la polarización TE únicamente, y no para ambas polarizaciones.

III. DISEÑO DE UN SEPARADOR COMPACTO DE POLARIZACIÓN

III.1. INTRODUCCIÓN

El estado de polarización de la luz es, sin duda alguna, de gran importancia en las redes de telecomunicaciones ya que muchos componentes de dichas redes son altamente dependientes de la polarización, y también porque la dispersión modal por polarización (PMD) puede degradar mucho la transmisión en una fibra óptica. Es por ellos que los separadores de polarización son componentes claves en los circuitos ópticos integrados tanto para el encaminamiento como procesado de la señal.

Una de las estructuras estudiadas es la que se presenta a continuación [8]:

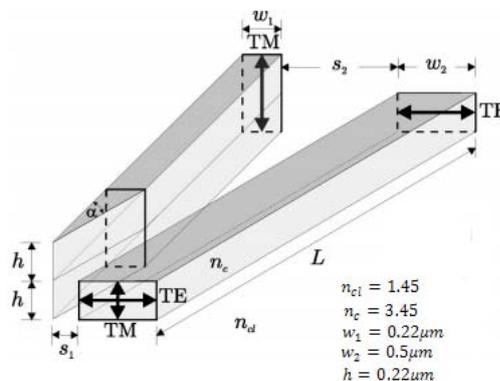


Fig.5: Esquema del splitter estudiado.

La guía de entrada es una guía rectangular orientada horizontalmente, de anchura w_2 y altura h . Una guía de altura $2 \cdot h$ orientada verticalmente es situada a una distancia s_1 de la guía horizontal, y cuya anchura varía gradualmente a lo largo de la dirección de propagación desde un valor inicial w_0 hasta una anchura w_1 . Esta guía se va separando de la guía horizontal hasta un valor s_2 .

Eligiendo adecuadamente los valores de h , w_1 , s_1 y w_2 aseguramos que el modo fundamental TE de la estructura permanece propagándose por la guía horizontal (la de entrada), mientras que el modo fundamental de la polarización TM pasa de la guía horizontal a la que está orientada verticalmente.

Para nuestro caso a estudiar, los índices de refracción de los materiales vienen impuestos por la tecnología SOI utilizada, con lo que $n_{\text{core}} = 3.45$ y $n_{\text{clad}} = 1.45$; las dimensiones también vienen fijadas por las obleas que usaremos en este estudio, con lo que tenemos que: $w_1 = 0.22\mu\text{m}$, $w_2 = 0.5\mu\text{m}$, $h = 0.22\mu\text{m}$ y $w_0 = 0.08\mu\text{m}$. Las guías son versiones rotadas la una de la otra, pero con una pequeña diferencia en una de las dimensiones para romper la degeneración de los modos TE y TM ($h_2 = 0.4\mu\text{m} \approx 2h = 0.44\mu\text{m}$).

Como primer paso, tenemos que calcular el valor de la separación inicial s_1 y de la anchura inicial w_0 para que el modo TM se acople a la guía de la izquierda. Para ello, habrá que calcular el índice efectivo de la guía de entrada sin la presencia de la otra guía. Con este valor, y haciendo uso de la estructura que aparece en Fig.5, realizamos un barrido del índice efectivo del esquemático anterior en función de w_0 para distintos valores de separación inicial, hasta encontrar la pareja de valores que cumple la condición de que tanto el splitter como la guía de entrada presentan el mismo índice efectivo. La elección de w_0 y s_1 lo más altos posibles viene impuesta por razones de facilitar la fabricación del dispositivo. En Fig.6 tenemos el barrido comentado anteriormente:

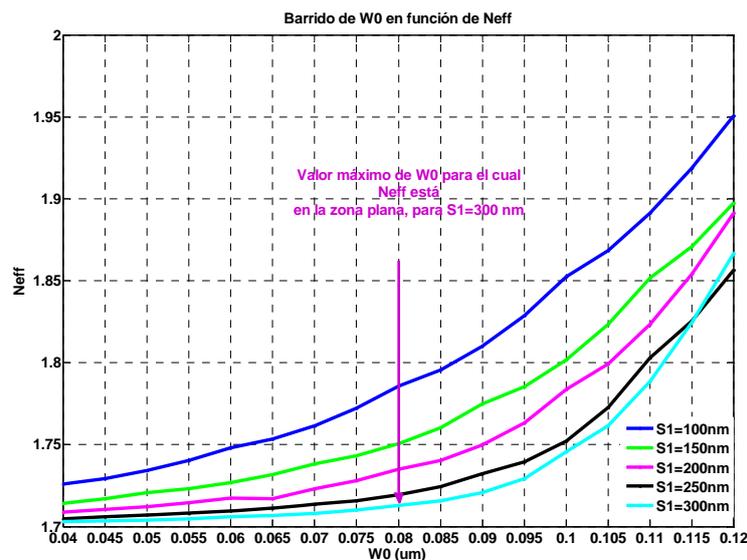


Fig.6: Barrido de la anchura inicial frente al índice efectivo de la estructura, para diferentes valores de s_1 .

De Fig.6, obtenemos que para la separación inicial $s_1 = 300$ nm, la anchura inicial máxima para la cual el splitter presenta el mismo índice efectivo que la guía de entrada es $w_0 = 80$ nm. Con estos dos valores fijados, pasamos a calcular el valor óptimo de L_t , que es la longitud que tiene la guía orientada verticalmente desde el valor w_0 hasta que alcanza la anchura w_1 . Para ello, realizamos otro barrido, ahora de L_t para encontrar el valor al cual la salida de la polarización TM es máxima en la guía vertical y la salida de la polarización TE es mínima. Esto se muestra en Fig.7:

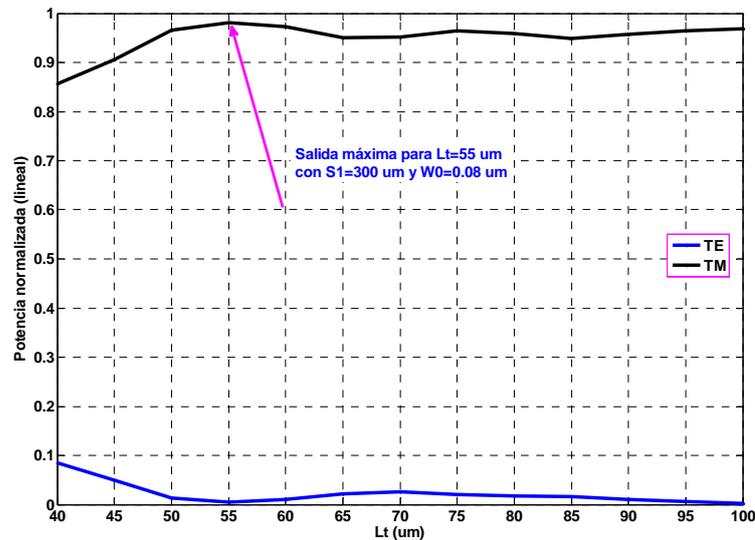


Fig.7: Barrido de L_t en función de la potencia de salida en las dos guías para los valores de w_0 y s_1 seleccionados anteriormente.

Para los valores de separación inicial $s_1 = 300$ nm y anchura inicial de la guía orientada verticalmente $w_0 = 80$ nm tenemos que la salida es máxima para la polarización TM y mínima para la TE para el valor de $L_t = 55$ μm .

En este punto ya tenemos los valores de todos los parámetros que intervienen en la estructura. Con lo cual ya podemos pasar a propagar las dos polarizaciones y comprobar que el dispositivo funciona como esperamos.

La figura Fig.8 muestra cómo se propagan las dos polarizaciones a lo largo del splitter. En la parte superior, tenemos como entrada la polarización TE que se mantiene propagándose por la guía de entrada, mientras que en la parte inferior de la misma figura, lo que aparece es la polarización TM a la entrada de la guía orientada horizontalmente y cómo se va acoplando para acabar saliendo por la guía orientada verticalmente.

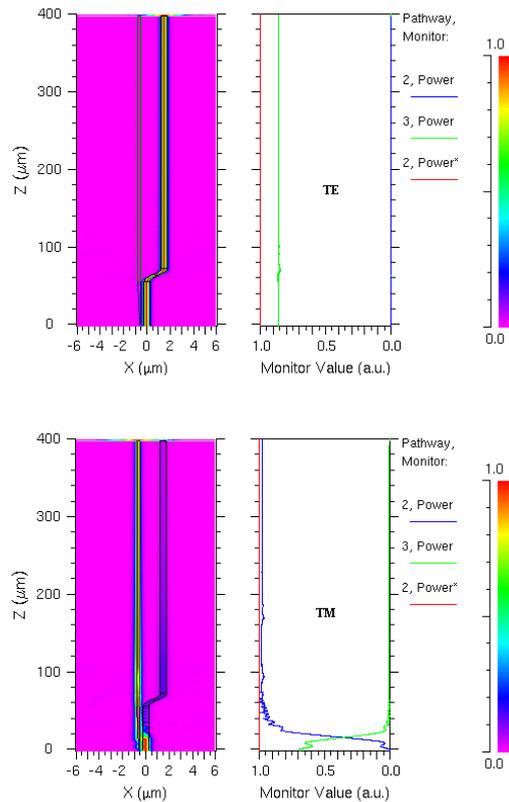


Fig.8: Propagación de la polarización TE (arriba) y la polarización TM (abajo) para los valores de $s_1 = 0.3 \mu\text{m}$, $w_0 = 0.08 \mu\text{m}$ y $L_t = 55 \mu\text{m}$ calculados anteriormente

Por último, tenemos la siguiente gráfica, Fig.9, que muestra la potencia de salida normalizada del dispositivo para las dos polarizaciones de entrada.

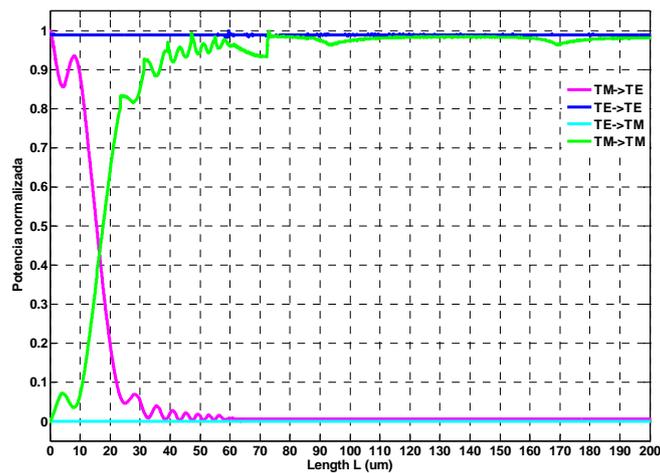


Fig.9: Para la polarización de entrada TE, tenemos las dos gráficas azul y cian que muestran la potencia de salida TE y TM respectivamente. Mientras que para la polarización de entrada TM, tenemos las curvas magenta y verde.

Podemos observar que para una longitud de dispositivo $L = 100 \mu\text{m}$, la separación de la polarización es casi perfecta. Para esta longitud, tenemos que la relación de extinción es igual o superior a 20 dB en la banda de longitudes de onda comprendida entre $1.45 - 1.75 \mu\text{m}$, como se muestra en la figura Fig.10:

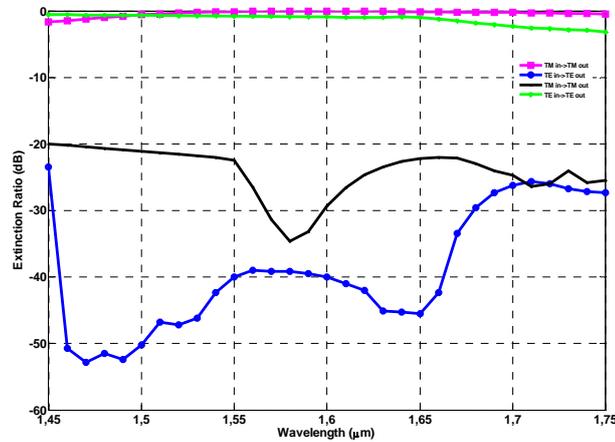


Fig.10: Relación de extinción a la salida del splitter de longitud $100 \mu\text{m}$ en función de la longitud de onda de trabajo.

No obstante, y debido a la dificultad que conlleva fabricar este tipo de estructuras (Véase Fig.21), se ha optado por buscar otra estructura más sencilla de fabricar, y más compacta para realizar el separador de polarización.

III.2. ESTRUCTURA PROPUESTA

Como ya hemos comentado, uno de los bloques importantes en el circuito de Fig. 4 es el separador de polarización, que es el encargado de obtener a su salida las dos polarizaciones separadas. Después de estudiar las posibles estructuras, se eligió utilizar un dispositivo de interferencia multimodal, MMI (*MultiModal Interference*).

La estructura central de un dispositivo MMI es una guía diseñada para soportar un elevado número de modos (típicamente ≥ 3 aunque en el siguiente punto se presentará justamente el caso en el que los modos soportados son solamente 2). Después de que los modos soportados se hayan excitado al inyectar un campo por la guía de entrada (normalmente una guía monomodo), la interferencia entre los modos que se propagan a lo largo de la guía MMI da lugar a la formación de autoimágenes (simples o múltiples) del campo de entrada, como se muestra en la figura Fig.11, que por simplicidad solamente se muestran las autoimágenes simples y dobles:

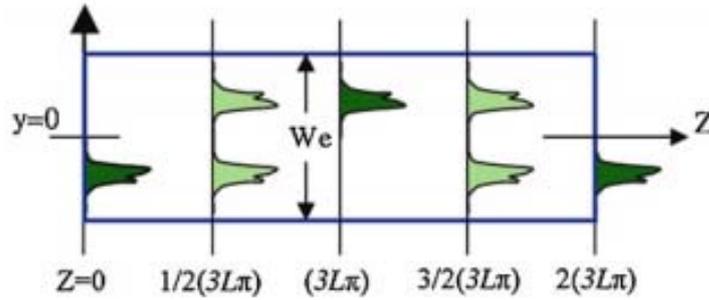


Fig.11: Formación de las autoimágenes a lo largo de la guía multimodo, mostrando únicamente las simples y dobles.

Los dispositivos MMI son muy compactos, con un gran ancho de banda óptico y mayores tolerancias en la fabricación. Su principio de funcionamiento es el de autoimagen (*Self-imaging principle*, en inglés) que formula que: la autoimagen es una propiedad de las guías multimodo por la cual, un perfil de campo de entrada es reproducido en una o varias imágenes en intervalos periódicos a lo largo de la dirección de propagación de la guía [9].

En la figura Fig.12 tenemos un esquema de la estructura utilizada para el separador de polarización. En ella, se observa que el diseño está compuesto por tres secciones: la sección de entrada y la de salida formadas por dos guías SOI monomodo situadas de tal forma que no hay ningún hueco entre ellas; Y la sección central que es denominada TMI-section, del inglés *Two-Mode Interference section*. Este caso que se presenta aquí es un caso particular de un MMI puesto que controlamos que solamente haya interferencia entre dos modos dentro de la sección TMI.

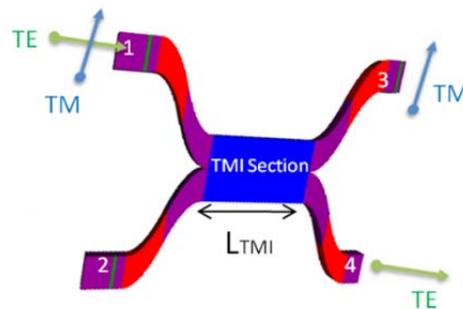


Fig.12: separador de polarización propuesto.

Bajo esta condición, y para una longitud de acoplamiento L_{TMI} aseguramos que sólo se propagaran dos modos en el acoplador, para cada polarización. Una luz polarizada linealmente que se inyecta en el puerto 1 (descompuesta en sus dos componentes, polarización TE y polarización TM) con una potencia P_1 , se propaga por la guía monomodo de entrada hacia la sección TMI. Es entonces cuando se excitan tanto el modo fundamental (0^{th} mode) como el primer modo de orden superior

(1th mode) correspondientes a la polarización presente en el plano de entrada a la sección de acoplo del acoplador.

La interferencia entre estos dos modos a lo largo de la longitud L_{TMI} produce una potencia de salida P_3 y P_4 en los puertos de salida 3 y 4 respectivamente, que se pueden expresar como:

$$P_3/P_1 = \sin^2(\pi L/2 L_c) \quad P_4/P_1 = \cos^2(\pi L/2 L_c) \quad (1)$$

donde L_c es la longitud fundamental de acoplo ($L_c^{\text{TE}} = \lambda/\Delta n_{\text{eff}}^{\text{TE}}$, $L_c^{\text{TM}} = \lambda/\Delta n_{\text{eff}}^{\text{TM}}$ siendo Δn_{eff} la diferencia de índices efectivos de los dos primeros modos para cada una de las polarizaciones).

Si consideramos $L_{\text{TMI}} = m \cdot L_c^{\text{TM}} = (m + 1) \cdot L_c^{\text{TE}}$, siendo m un número entero, el acoplador estará en estado “bar” para una polarización, y en estado “cross” para la polarización contraria. Eligiendo el valor de L_{TMI} óptimo y controlando L_c de cada polarización, el estado bar/cross del acoplador separará correctamente las dos polarizaciones [10].

III.3. DISEÑO Y SIMULACIÓN

Para las obleas SOI utilizadas ($w = 450 \text{ nm}$, $h = 220 \text{ nm}$, SiO_2 overcladding), calculamos primero la longitud fundamental de acoplo L_c para las dos polarizaciones, TE y TM, a la longitud de onda de trabajo $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$. Con estos parámetros, y haciendo uso de “*vectorial mode solver*” para calcular todos los índices efectivos involucrados, se obtiene una $L_c^{\text{TE}} = 1.93 \mu\text{m}$ y $L_c^{\text{TM}} = 2.25 \mu\text{m}$. Con estos dos valores, tenemos que $L_c^{\text{TM}}/L_c^{\text{TE}} = 1.166 = 7/6$.

Por lo tanto, la longitud teórica a la cual se produce la separación de las dos polarizaciones es $L_{\text{TMI}} = 6 \cdot L_c^{\text{TM}} = 7 \cdot L_c^{\text{TE}} = 13.5 \mu\text{m}$. La Fig.13 muestra las potencias teóricas de salida normalizadas en los puertos 3 y 4 en función de L_{TMI} tanto para la polarización TE como para la TM a $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$.

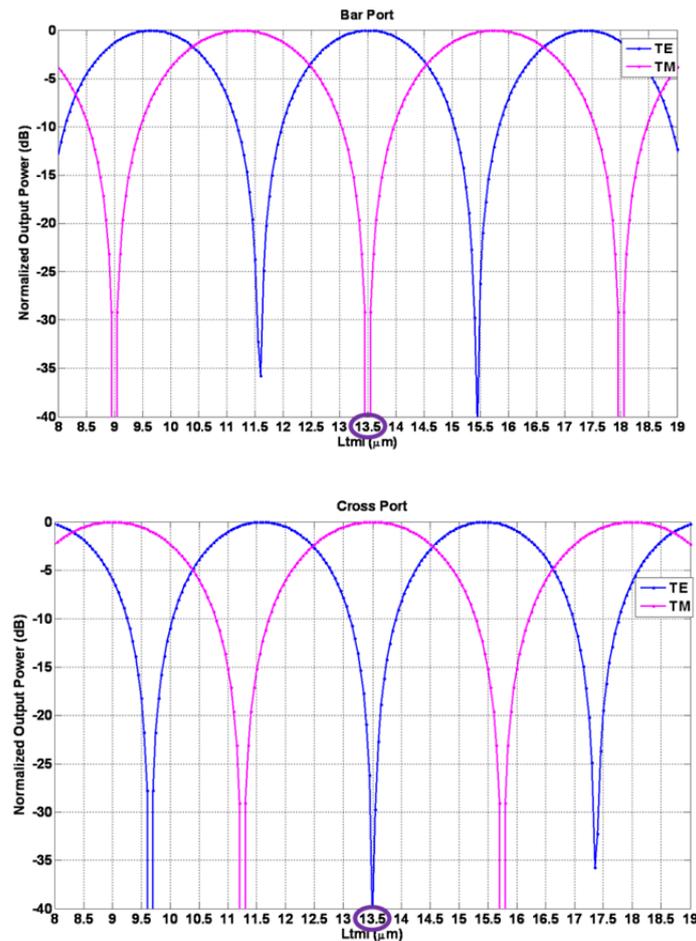


Fig.13: Potencia normalizada a) en el puerto 3 y b) en el puerto 4 para las polarizaciones TE y TM, en función de L_{TMI} , para $\lambda = 1.55\mu\text{m}$

La figura Fig.14 muestra una captura del programa de simulación usando el método de las diferencias finitas en el dominio del tiempo 3D-FDTD, en el que se comprueba que para la longitud elegida, se consigue la separación de las dos polarizaciones. También se puede observar que aparecen 7 imágenes para la polarización TE ($7 \cdot L_c^{TE}$) y 6 imágenes para la polarización TM ($6 \cdot L_c^{TM}$) dentro del TMI, concordando con la ecuación teórica del dispositivo.

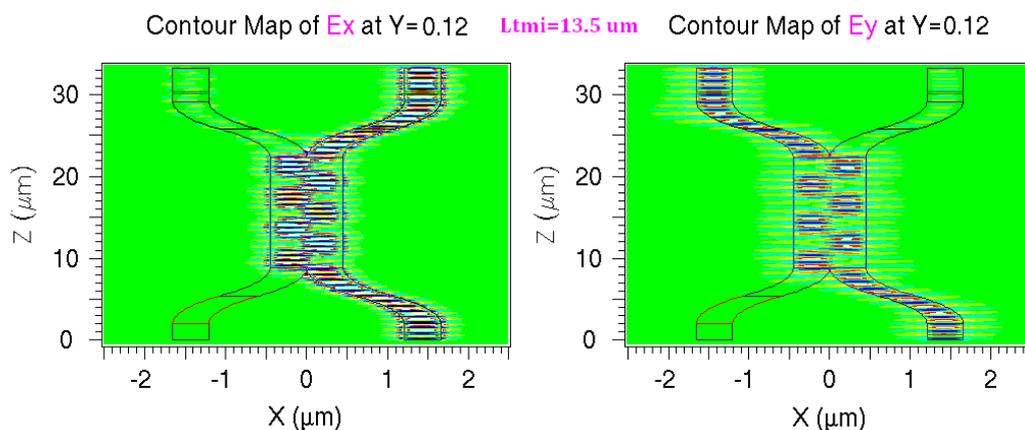


Fig.14: Comprobación de la separación de polarización usando 3D-FDTD.

III.4. CARACTERIZACIÓN DEL DISPOSITIVO

El montaje para la caracterización del splitter diseñado mediante TMI se muestra en Fig. 15.

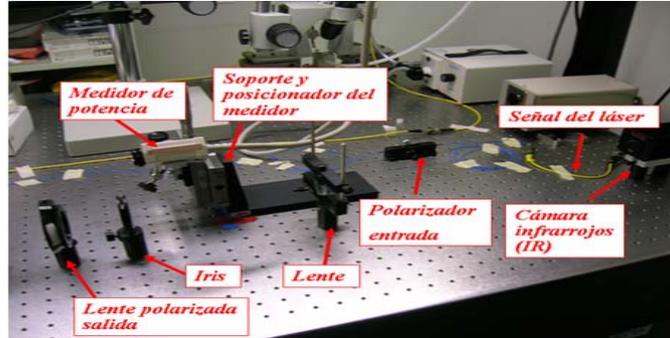


Fig.15: Montaje experimental para la caracterización del splitter MMI

Los componentes que forman el montaje de la figura anterior se ilustran en el siguiente diagrama de bloques:

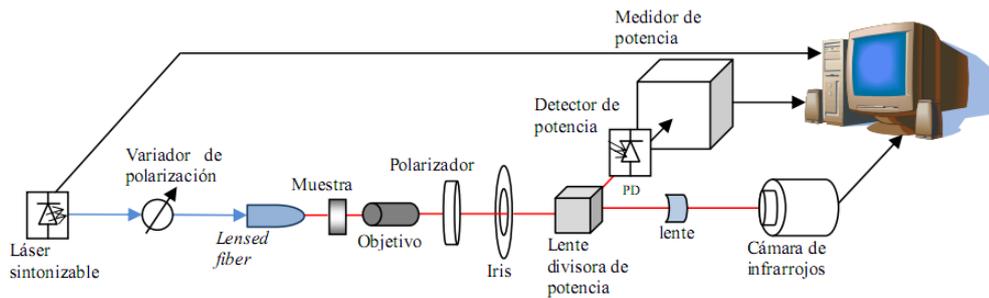


Fig.16: Diagrama de bloques de los componentes involucrados en el montaje de la Fig. 8

Como fuente de excitación se utilizará el láser de banda ancha SANTEC TSL-210F, tras el cual se coloca un controlador de polarización (variador de polarización en Fig. 16) ya que el splitter a analizar tiene que separar las dos polarizaciones, y para comprobar su correcto funcionamiento, debemos controlar la polarización de la luz que incide sobre él. Tras el polarizador, la fibra inyecta la luz a la entrada de la muestra, con la polarización elegida. Con el polarizador de salida, podemos seleccionar la polarización que se desee medir en un momento determinado, estando en posición horizontal para medir la polarización TE y en posición vertical para la TM. Después colocamos un iris de diámetro variable para discriminar la luz que pueda propagarse parcialmente por el sustrato o el aire. A continuación tenemos la cámara de infrarrojos que está conectada al PC, al igual que el medidor de potencia (ANDO Q2140) y el láser sintonizable.

En Fig.17 se ilustran unas imágenes de barrido electrónico (SEM) de uno de los separadores medidos, donde se observa tanto el dispositivo fabricado (Fig. 17 a), como la sección de acoplo del mismo (Fig. 17 b).

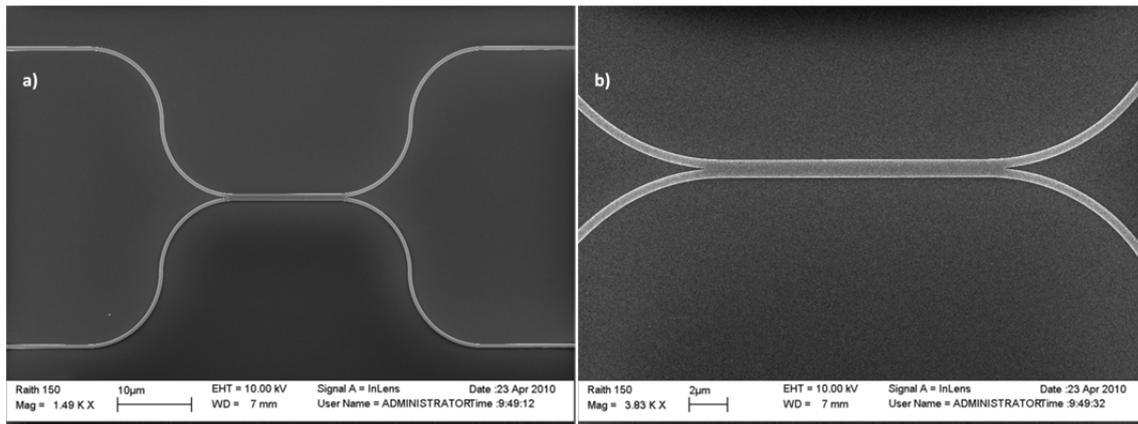


Fig.17: Imagen SEM de a) splitter de polarización fabricado y b) detalle de la sección de acoplo.

En la siguiente figura, Fig.18, tenemos las potencias normalizadas a la salida de los ocho dispositivos fabricados, tanto para la polarización TE como la TM. Como se puede observar, el separador que mejores prestaciones ofrece es el de longitud $13.5\mu\text{m}$, ya que la relación de extinción es mayor que la de los demás separadores para los dos puertos de salida.

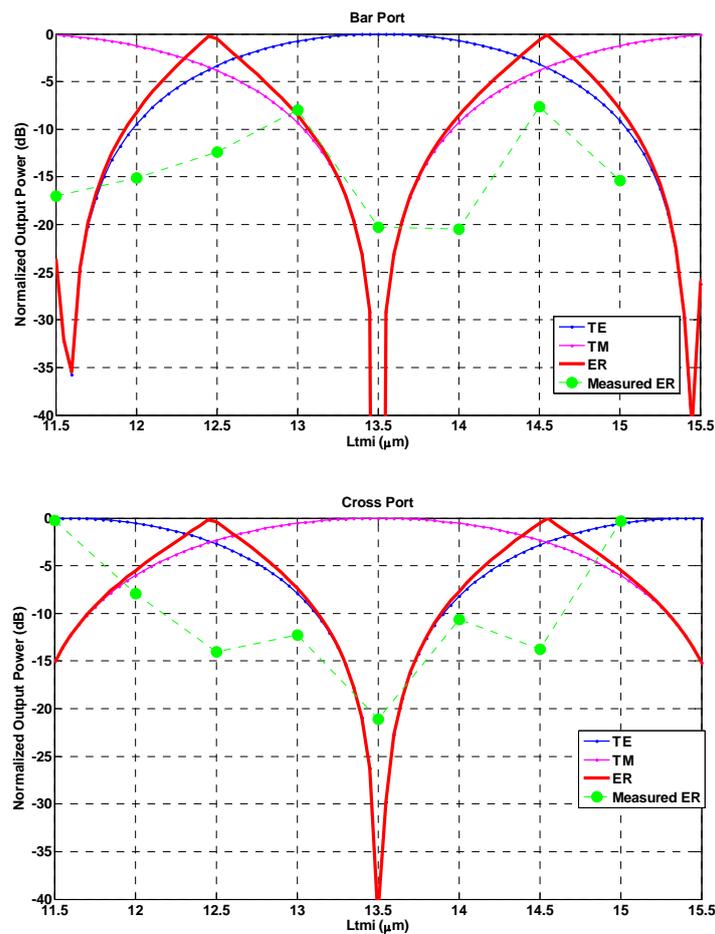


Fig.18: Potencias normalizadas, y relación de extinción teórica y experimental para los 8 dispositivos fabricados, en el puerto 3 (arriba) y puerto 4 (abajo)

En Fig. 19.a se ilustran las medidas experimentales de la potencia a la salida del puerto 3, mientras que Fig. 19.b muestra las medidas correspondientes a la potencia en el puerto de salida 4, conteniendo ambas las gráficas tanto de la polarización TE como la TM, para el separador que mejores prestaciones presenta. Como se puede observar en estas gráficas, para el puerto 3 se ha obtenido una relación de extinción de 25.67 dB y para el puerto 4 la relación de extinción es de 20.5 dB, para la longitud de onda de trabajo ($\lambda = 1.55 \mu\text{m}$). Estos valores están en consonancia con los valores teóricos obtenidos con las simulaciones realizadas (véase Fig. 13). Además, y como se puede observar de la misma figura, la relación de extinción medida se mantiene constante en un ancho de banda en términos de longitud de onda superior a los 30 nm.

En cuanto a las pérdidas de inserción introducidas por el separador de polarización, hemos obtenido que éstas son, en media, de 1 dB en un ancho de banda en términos de longitud de onda superior a 30 nm, también.

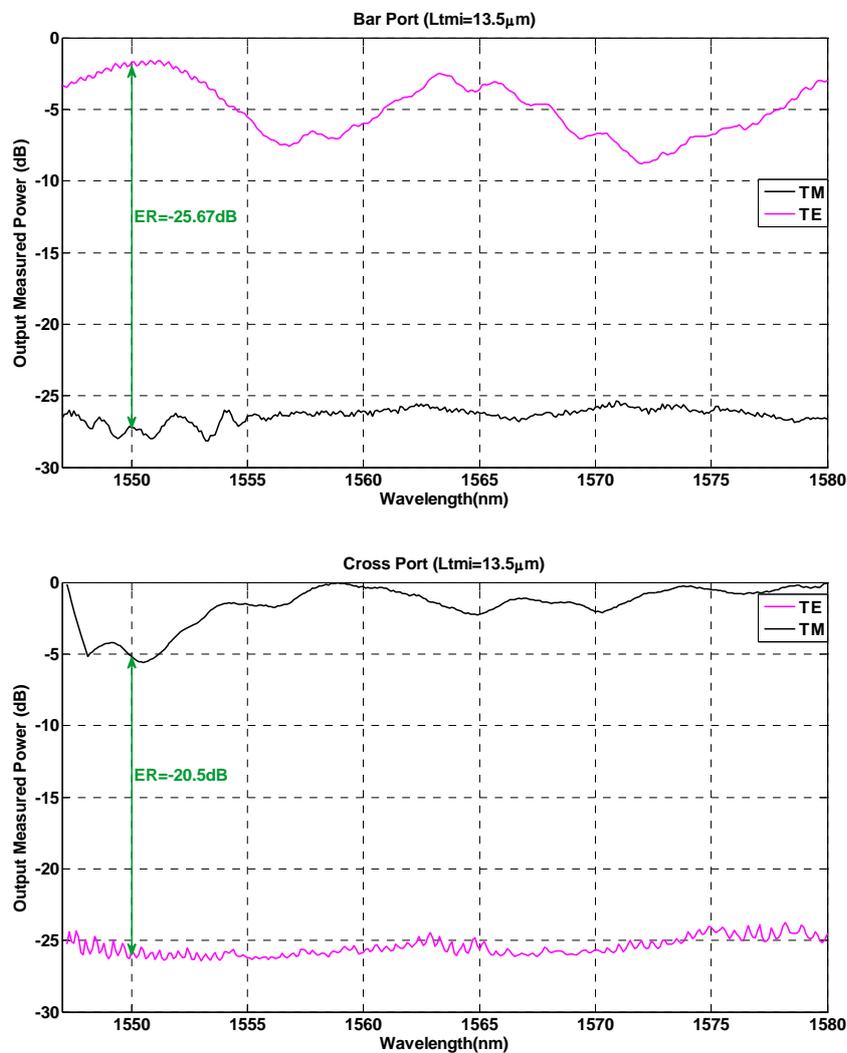


Fig.19: Espectro de las potencias medida y simulada a la salida de a) puerto 3 y b) puerto 4.

IV. DISEÑO DE UN ROTADOR COMPACTO DE POLARIZACIÓN

IV.1. INTRODUCCIÓN

A pesar de que los rotadores de polarización han sido estudiados anteriormente en la literatura, algunos de los diseños existentes son muy difíciles de fabricar usando herramientas CMOS y muchos de ellos resultan en dispositivos muy largos [11]. Es por ello que la estructura que elegiremos es la de un dispositivo compacto y fácil de fabricar.

Como hemos comentado anteriormente, el rotador de polarización es el dispositivo encargado, una vez separadas las dos polarizaciones por el splitter, de rotar una de las componentes (TM) para conseguir un único estado de polarización a la entrada del chip, teniendo que fabricar dispositivos funcionales únicamente para la polarización TE y no para ambas polarizaciones.

Siguiendo los mismos pasos que para el separador de polarización [12], en la figura Fig.20 presentamos la estructura correspondiente al rotador de polarización estudiado.

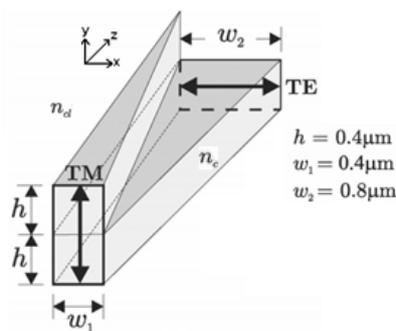


Fig.20: Esquema del rotador de polarización, formado por dos guías, la superior que se estrecha desde w_1 a 0, y la inferior se ensancha de w_1 a w_2 .

Como se puede observar en la figura anterior, el rotador está formado por dos guías, la superior de anchura inicial w_1 y anchura final 0, mientras que la inferior pasa de una anchura inicial de w_1 a una anchura final w_2 . Queda evidente que la estructura es asimétrica, por lo que la perturbación de los modos guiados será más fuerte conforme se vayan propagando por la estructura, con lo cual, es lógico asumir que una eficiente conversión de la polarización requiera de longitudes de dispositivo mayores.

Para estudiar la longitud que ha de tener el rotador para conseguir la conversión de la polarización, se lleva a cabo un barrido en la dirección de propagación. Para ello, a la entrada de Fig.19 se inyecta un pulso gaussiano con polarización TM, y se calcula el modo fundamental, que será la nueva excitación que se aplicará a la entrada del rotador. Después de propagar por la estructura, obtenemos la figura Fig.21 que nos muestra la evolución de las dos polarizaciones a lo largo del dispositivo:

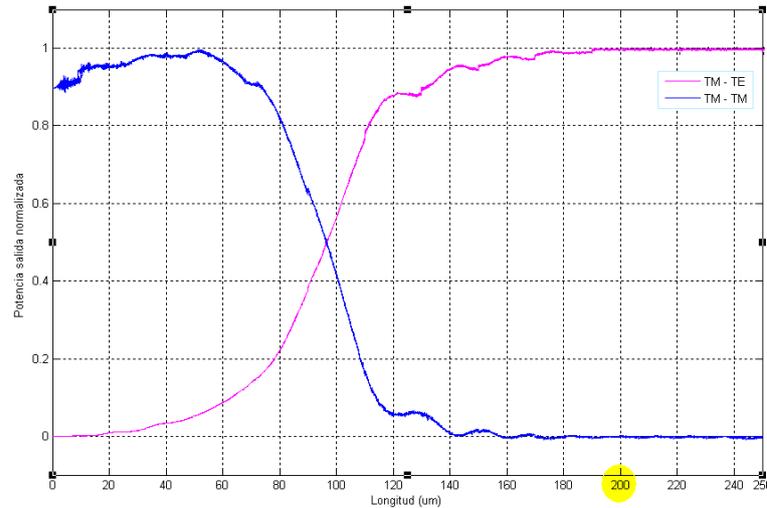


Fig.21: Potencia normalizada a la salida del rotador, para una polarización TM a la entrada.

Como se puede observar, la potencia del modo TM a la entrada disminuye a la vez que la potencia de la polarización TE aumenta; es decir, hay una transferencia de potencia entre modos, confirmando que la interacción entre los modos determina el funcionamiento del dispositivo. A la longitud de onda de trabajo, $\lambda = 1.55\mu\text{m}$, se obtiene que con una longitud de dispositivo $L = 200\mu\text{m}$ la conversión de la polarización es muy próxima al 100%.

No obstante, y al igual que para el caso del separador, la estructura escogida presenta muchas dificultades en el paso de fabricación. En la figura Fig.22 se tiene una imagen SEM del rotador fabricado de manera errónea, debido a la complejidad de la estructura.

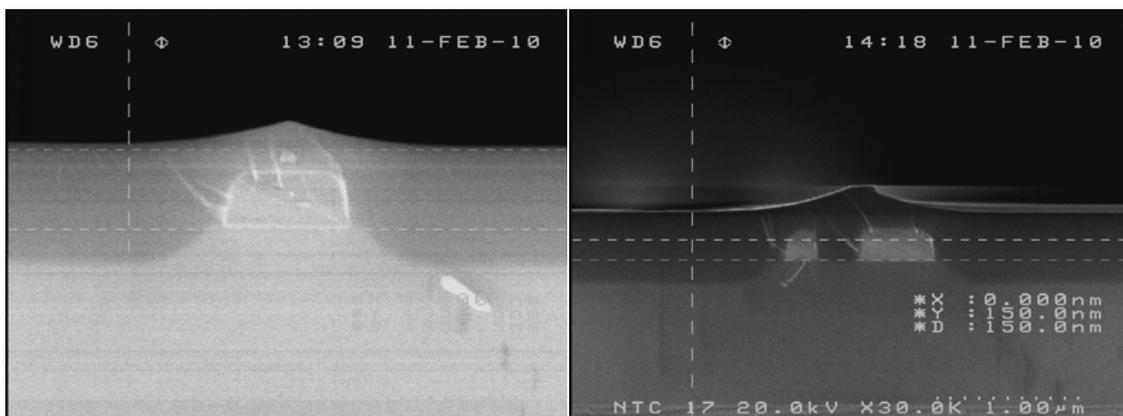


Fig.22: Imagen SEM del rotador (izquierda) y del separador (derecha) basados en evolución de modos.

IV.2. ESTRUCTURA PROPUESTA

Un esquema del rotador de polarización propuesto se muestra en la Fig.23. La estructura consiste en una guía tipo *strip* sobre la cual se realiza posteriormente un ataque parcial en uno de los bordes, a lo largo de la dirección de propagación.

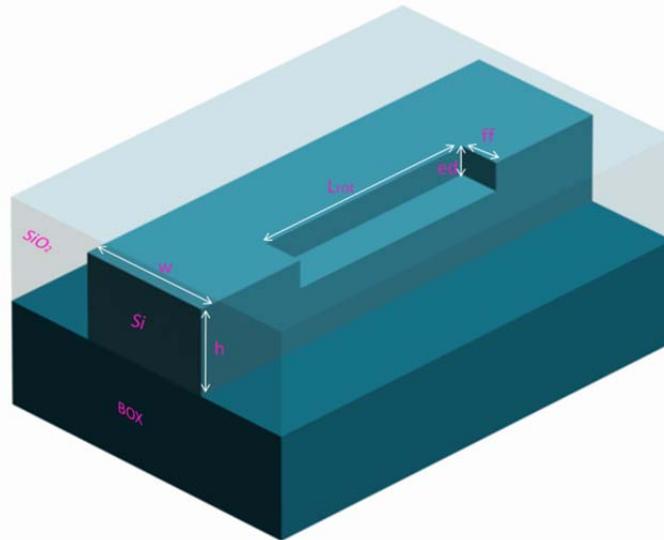


Fig.23: Esquema del rotador de polarización propuesto.

De la figura anterior, tenemos fijados varios valores: altura de la guía, $h=220\text{nm}$ por compatibilidad CMOS, y profundidad y anchura del ataque $ed=70\text{ nm}$, $ff=25\%$ respectivamente, por integración con *gratings*.

Es sabido que una guía asimétrica permite la generación de dos modos fundamentales de polarización suficientemente híbridos. Para poseer el comportamiento necesario para la conversión de la polarización, la guía asimétrica debe tener dos modos con distribuciones de intensidad similares, y cuyos ejes ópticos deben ser ortogonales entre ellos, como se muestra en la Fig. 24.

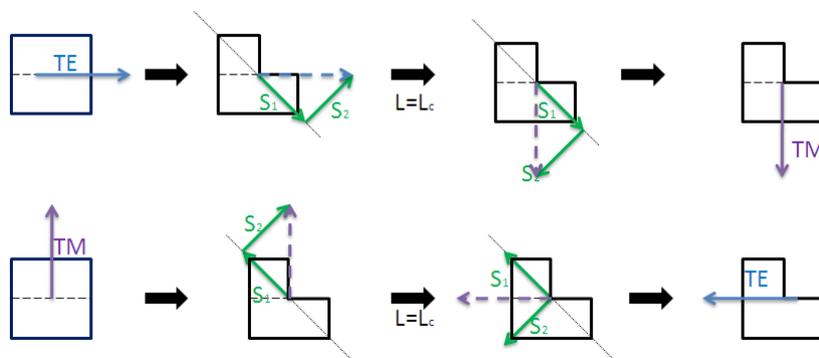


Fig.24: Rotación de los ejes ópticos después de propagar una distancia L_c .

Con los parámetros, antes indicados, fijados, realizamos un barrido en anchura para encontrar las dimensiones de la guía que permitan realizar la rotación de la polarización. Para ello monitorizamos la potencia de los dos modos híbridos presentes en la misma, y nos quedamos con aquel valor de anchura para el cual la potencia de dichos modos es la misma, como se puede observar en la Fig.25:

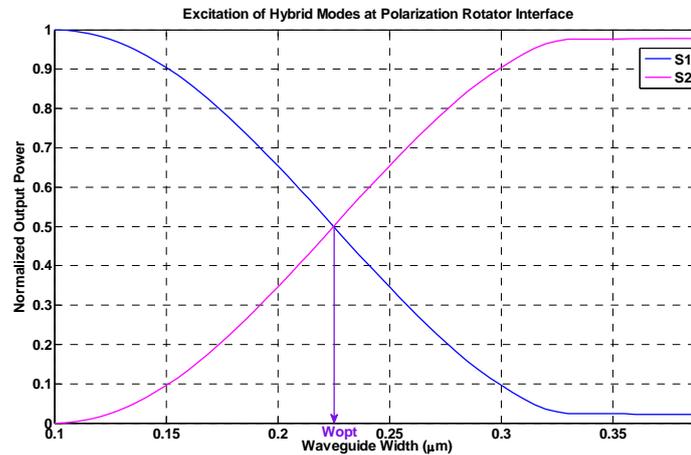


Fig.25: Potencia normalizada de los modos híbridos en la interfaz del rotador.

De la figura anterior obtenemos que la anchura óptima de la guía es $w=223$ nm.

Una vez obtenida la anchura óptima para la rotación de la polarización, y haciendo uso de la siguiente ecuación:

$$L_{\text{rot}} = \lambda / (2 * \Delta N_{\text{eff}}) \quad (2)$$

siendo ΔN_{eff} la diferencia entre los índices efectivos de los dos primeros modos (el modo fundamental y el primer modo de orden superior) que se propagan por la guía que forma el rotador.

Haciendo uso de una de las herramientas de simulación, obtenemos la siguiente figura, Fig.26, en la cual tenemos que $N_{\text{eff}}^0 = 1.512161$ y $N_{\text{eff}}^1 = 1.483361$, obteniendo que $L_{\text{rot}} = 27 \mu\text{m}$ para la longitud de trabajo $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$.

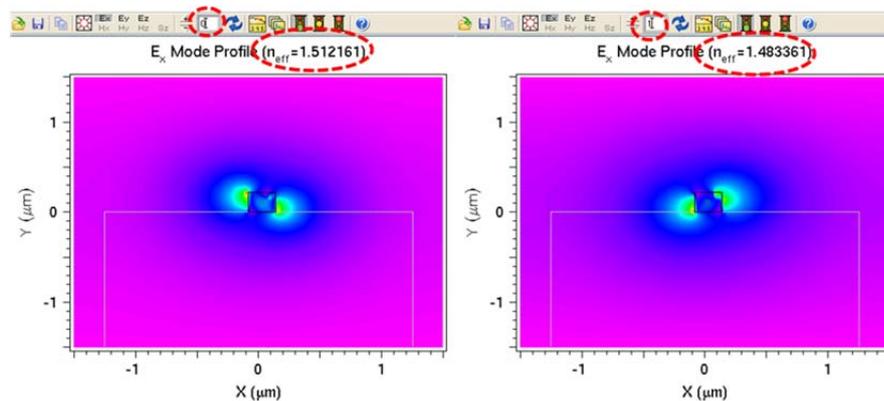


Fig.26: Captura de simulación para obtener L_{rot} óptima

IV.3. DISEÑO Y SIMULACIÓN

Llegados a este punto, y con todas las dimensiones de la guía conocidas, pasamos a realizar la simulación 3D-FDTD para conocer la longitud que ha de tener el rotador para conseguir la rotación de la polarización con la mayor relación de extinción posible, y contrastarla con la longitud teórica.

Haciendo uso la herramienta de simulación basada en diferencias finitas en el dominio del tiempo, obtenemos las siguientes figuras, Fig.27, en las que se muestran las potencias normalizadas a la salida del rotador, para las dos polarizaciones, en función de la longitud de la sección encargada de la conversión de la polarización.

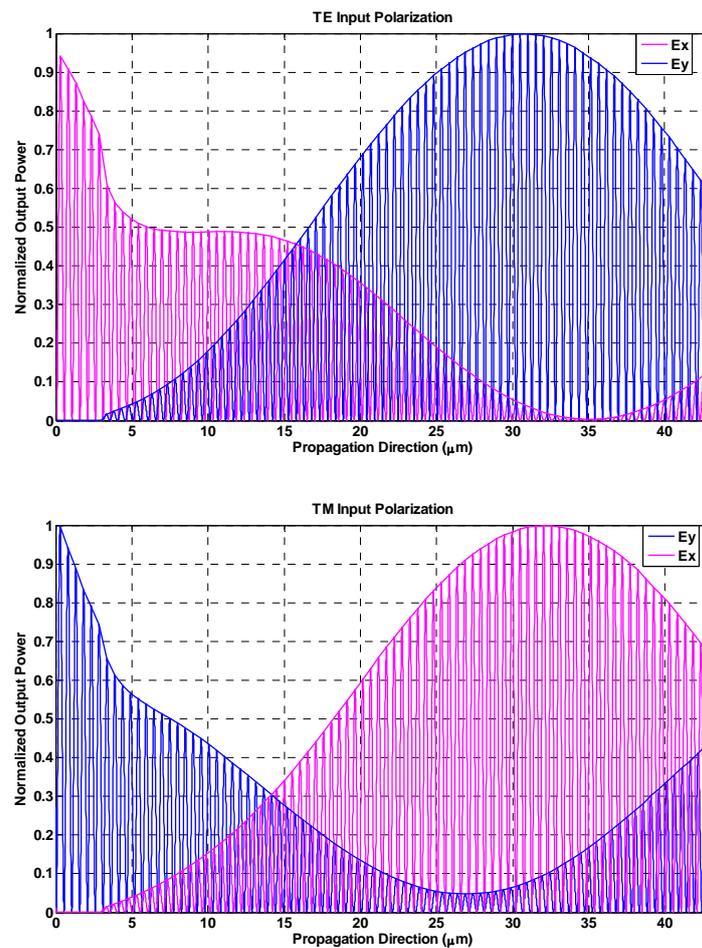


Fig.27: Potencia normalizada a la salida del rotador, en función de la dirección de propagación, para TE (arriba) y TM (abajo) como polarización de entrada.

En Fig.28, tenemos una captura de pantalla de la simulación realizada usando 3D-FDTD donde se observa que ante una señal de entrada con polarización TE (componente Ex), ésta empieza a desaparecer a la vez que aparece la componente TM, quedando clara la conversión de la polarización.

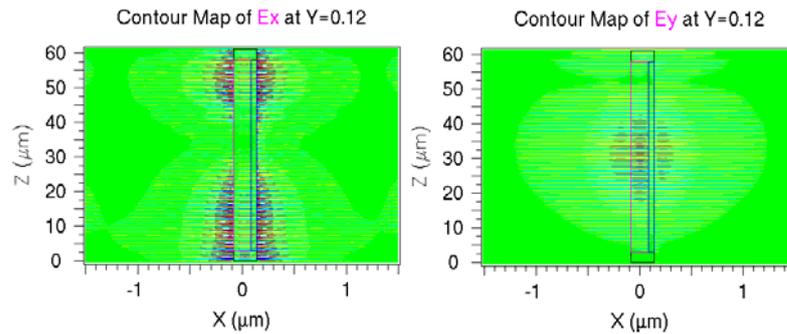


Fig.28: Captura de pantalla de la simulación 3D-FDTD.

A partir de Fig.27, podemos calcular la relación de extinción del rotador, para las dos polarizaciones de entrada, en función de la longitud del mismo. Esto se muestra en Fig.29, en la cual, podemos observar que en $z=30\mu\text{m}$, es decir, para una longitud de rotador $L_{\text{rot}} = 27\mu\text{m}$ (porque la guía de entrada tiene una longitud de $3\mu\text{m}$) obtenemos una relación de extinción de 12dB para las dos polarizaciones, lo que resulta en una eficiencia de conversión del 94%.

Observamos que el resultado obtenido de la simulación 3D-FDTD concuerda con el resultado obtenido de aplicar la ecuación teórica anteriormente descrita.

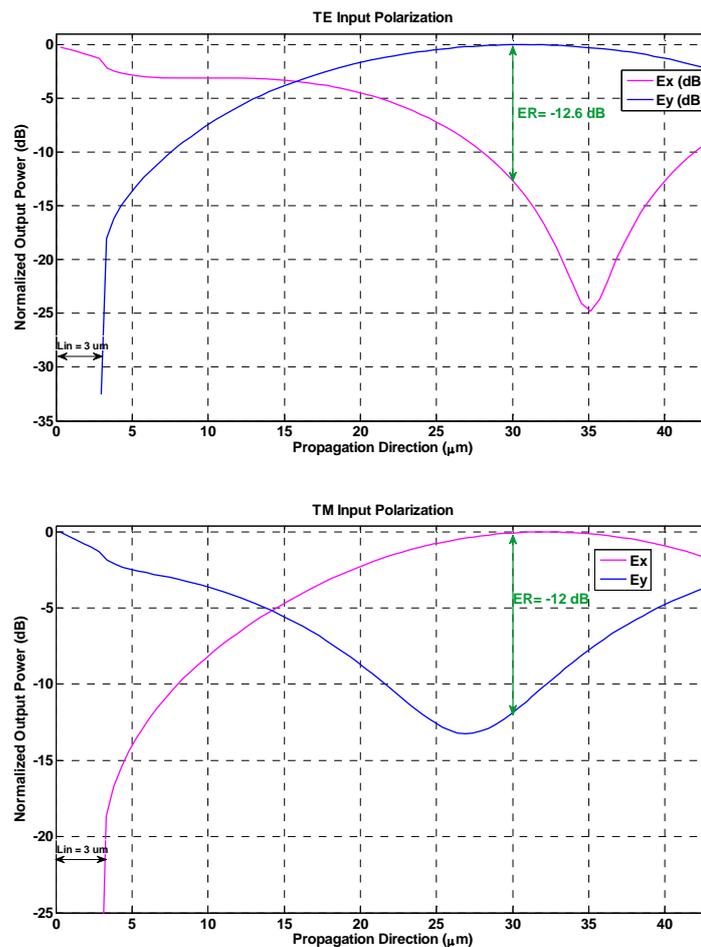


Fig.29: Relación de extinción a la salida del rotador, en función de la dirección de propagación, para TE (arriba) y TM (abajo) como polarización de entrada.

IV.4. CARACTERIZACIÓN DEL DISPOSITIVO

En cuanto a la fabricación del rotador de polarización, y debido a las posibles imprecisiones que puedan ocurrir a lo largo de dicho proceso, se ha hecho una máscara con diferentes longitudes de L_{rot} , así como diferentes valores de anchura del ataque (Véase el parámetro ff de Fig.23). Con el fin de optimizar las medidas a realizar, en el diseño del *layout* se han incluido *gratings* tanto para la polarización TE como la polarización TM. El *layout* diseñado consiste en 4 bloques, como muestran Fig.30, Fig.31 y Fig.32, conteniendo el primero, como *grating* de entrada, *gratings* diseñados para dejar pasar únicamente la polarización TE, mientras que los de salida son *gratings* para la polarización TM. Los otros tres bloques son las combinaciones de estos *gratings* para entrada/salida.



Fig.30: Diseño del *layout* de los rotadores a fabricar.

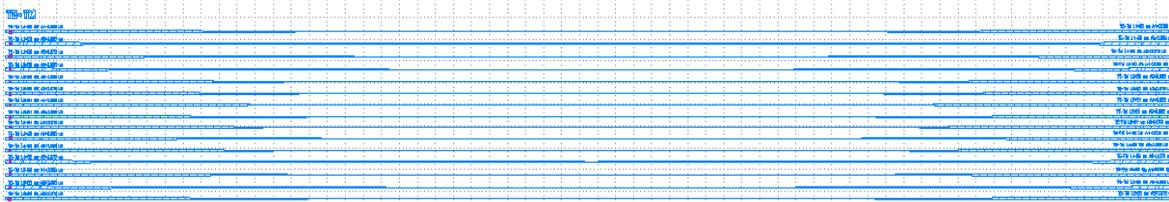


Fig.31: Detalle del bloque TE-TM de la figura anterior.



Fig.32: Zoom de la figura anterior con algunas de las longitudes del rotador diseñadas, para diferentes valores de *fill-factor*.

V. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

El objetivo principal de este trabajo ha sido el análisis, diseño y caracterización de circuitos conversores de polarización en silicio. En particular, se han estudiado dos tipos de estructuras tanto para el separador como para el rotador de polarización.

El separador de polarización, basado en MMI, resulta ser más compacto, presenta anchos de banda superiores al separador de polarización basado en evolución de modos, aparte de presentar mayores tolerancias en el proceso de fabricación. Este dispositivo, de longitud 13.5 μm , presenta una relación de extinción experimental superior a 20 dB en los dos puertos de salida, para las dos polarizaciones de entrada en un ancho de banda en términos de longitud de onda superior a 30 nm, además de unas pérdidas de inserción menores, en media, a 1dB en dicho ancho de banda.

En lo que se refiere al rotador de polarización, basado en guía *strip* con un ataque parcial a lo largo de la dirección de propagación, presenta una relación de extinción entre las dos polarizaciones superior a 12 dB, lo que resulta en una eficiencia de conversión de polarización superior al 94%, para una longitud de dispositivo de 27 μm .

Como trabajo futuro, faltaría caracterizar tanto el rotador de polarización como el conjunto separador-rotador para confirmar su correcto funcionamiento.

También resulta interesante trabajar en el diseño de separadores y rotadores de polarización sintonizables, añadiendo calentadores a dichas estructuras que nos permitirán tener un mayor grado de libertad en caso de que la aplicación lo requiriera.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos el apoyo financiero por parte del Ministerio de Ciencia e Innovación a través de los contratos de SINADEC (TEC2008-06333) y DEMOTEC (TEC2008-06360). También cabe destacar el apoyo financiero del proyecto europeo HELIOS (pHotonics ELelectronics functional Integration on CMOS) (FP7-224312).

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Special Issue on Optical Networks, IEEE J. Lightwave Technol., vol. 23, issue 10, 2005.
- [2] Pavesi, L. & Lockwood, D. J. Silicon Photonics (Springer, New York, 2004).
- [3] Pavesi, L, "Will silicon be the photonic material of the third millennium?", J. Physics: Condensed Matter 15 (2003) R1169-R1196.
- [4] Tai Tsuchizawa et al, "Microphotonics Devices Based on Silicon Microfabrication Technology", IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics, vol. 11, n° 1, 2005.
- [5] Bahram Jalili and Sasan Fathpour, "Silicon Photonics", J. Lightwave Technol., vol. 24, n° 12, 2006
- [6] http://www.intel.com/pressroom/archive/releases/2010/20100727comp_sm.htm

- [7] T. Barwicz, et al., "Polarization-transparent microphotonic device in the strong confinement limit", *Nature Photonics*, Vol.1, 2007, pp. 57-60.
- [8] M. R. Watts, H. A. Haus, "Integrated mode-evolution-based polarization splitter," *Opt. Lett.*, vol.30, no. 9, pp. 967-969 (2005).
- [9] D. A. May-Arrijoja, P. LiKamWa, "A Reconfigurable MMI splitter for sensing applications". *Measurement Science and Technology*, 18, (2007), pp. 3241-3246.
- [10] F. Rottmann, A. Neyer, "Integrated-optic wavelength multiplexers on lithium niobate based on two-mode interference," *J. Lightw. Technol.*, vol. 6, no. 6, pp. 946-952, Jun. 1988.
- [11] H. Deng, D. O. Yevick, C. Brooks, and P. E. Jessop, *Optical Engineering*, Vol.45, n°4, April 2006.
- [12] M. R. Watts and H. A. Haus, "Integrated mode-evolution-based polarization rotators," *Opt. Lett.* 30, n°2, pp. 138-140 (2005).