



UNIVERSIDAD
POLITECNICA
DE VALENCIA



Máster Universitario
en Tecnologías, Sistemas y
Redes de Comunicaciones

Análisis y caracterización de guías corrugadas de onda lenta para aplicaciones de modulación electro-óptica en silicio.

Autor: Ana M^a Gutiérrez Campo

Director 1: Pablo Sanchis Kilders

Director 2: Antoine Brimont

Fecha de comienzo: 01/11/2009

Fecha de finalización: 26/11/2009

Lugar de trabajo: Centro de Tecnología Nanofotónica (NTC) en UPVLC.

Objetivos —

El objetivo de este trabajo es demostrar experimentalmente el funcionamiento pasivo de estructuras de onda lenta. Se han caracterizado guías corrugadas en obleas SOI con el fin de validar sus características de onda lenta teóricamente alcanzables, de las cuales se espera que mejoren el funcionamiento de un modulador basado en una estructura interferométrica en términos de reducción de tamaño y consumo de potencia. Se han medido y analizado una variedad de guías corrugadas así como Interferómetros Mach-Zehnder con una guía corrugada en uno de sus brazos con el fin de evaluar tanto la dependencia espectral de la velocidad de grupo como la penalización potencial de pérdidas de propagación que se produce en el régimen de onda lenta. El objetivo final que se persigue es obtener un modulador a 40Gbit/s con 2 dB de profundidad de modulación y 6 dB de pérdidas de inserción (proyecto HELIOS).

Metodología —

-Diseño de estructuras: Previamente a la fabricación de las muestras se llevó a cabo el diseño y la simulación de las estructuras. Para ello el centro cuenta con licencias de paquetes de simulación y amplia experiencia en el diseño de guías de onda e Interferómetros Mach-Zehnder.

-Fabricación: La fabricación de las estructuras diseñadas se ha llevado a cabo en la sala limpia de CEA-LETI, en Grenoble (Francia). Este tipo de colaboraciones permiten a los investigadores contar con muestras que requieran procesos no disponibles en nuestro centro.

-Caracterización: La caracterización de dispositivos se realizó en los laboratorios de caracterización completamente equipados del Centro de Tecnología Nanofotónica en UPVLC. Para estas medidas el centro cuenta con diversas fuentes láser (sintonizables, pulsadas y continuas), sistemas de acoplo (con fibra, objetivo o grating), y sistemas de detección con anchos de banda por encima de 40GHz. Concretamente, las medidas realizadas se han llevado a cabo mediante acoplo vertical con gratings.

Desarrollos teóricos realizados —

Se han desarrollado varios programas en Matlab para procesar y analizar los resultados de las medidas y obtener los parámetros deseados como el índice de grupo y las pérdidas de propagación. Además se ha realizado un desarrollo teórico para obtener unas ecuaciones que relacionen el índice de grupo de los MZIs asimétricos diseñados con el espectro de transmisión medido de dichos dispositivos.

Desarrollo de prototipos y trabajo de laboratorio —

El trabajo de laboratorio se ha dividido en varias medidas:

-1ª Medida: Búsqueda de la muestra de la fila central de la oblea cuyo band-gap esté centrado en la longitud de onda de 1550nm. Con esta medida hemos obtenido además la influencia de la dosis UV en el desplazamiento espectral del band-gap.

-2ª Medida: Medida de guías corrugadas de distinta longitud y obtención de la dependencia de esta longitud en la profundidad del band-gap.

-3ª Medida: Medida de los espectros de transmisión de los MZIs con guías corrugadas para la obtención del índice de grupo y con ello la velocidad de grupo para demostrar la propagación de luz lenta.

-4ª Medida: Obtención de las pérdidas de propagación mediante el método cut-back a partir del espectro de 3 guías corrugadas de distinta longitud.

Resultados —

El índice de grupo máximo medido es $n_G=25$ para un MZI con una guía corrugada de $L=500\mu\text{m}$ correspondiente a una velocidad de grupo mínima de $v_G=0.04c$. Por lo tanto, queda demostrado que se pueden lograr fácilmente velocidades de grupo moderadamente bajas en estructuras simples con guías corrugadas fabricadas con un proceso CMOS convencional. Estos resultados permiten demostrar que las guías de onda lenta pueden ser, sin duda, implementadas en circuitos fotónicos integrados para la realización de dispositivos más eficientes y más pequeños. Además, se han estimado las pérdidas de propagación alrededor de 5-10dB/cm en la región de frecuencia plana fuera del band-gap y como era de esperar, se ha observado un claro y abrupto incremento de las pérdidas conforme nos acercamos a la región de onda lenta.

Líneas futuras —

- Medidas activas de los moduladores diseñados para obtener parámetros ópticos como el ancho de banda de modulación, la frecuencia de corte y la velocidad demostrando la mejora en la modulación introducida por las estructuras de onda lenta.
- Fabricación de un conjunto de MZIs con guías corrugadas y distintos ΔL para aplicar el método que hemos desarrollado para obtener las pérdidas de propagación teniendo en cuenta la estructura completa del MZI con el fin de obtener unos resultados más exactos de las pérdidas de propagación que los obtenidos con el método cut-back.
- Diseño, fabricación y caracterización de guías corrugadas con defectos lineales para aumentar el ancho de banda de la región de onda lenta.

Publicaciones —

-**Ana M. Gutiérrez**, A. Brimont, J. Martí, P. Sanchis, "Method to simultaneously extract the propagation losses and branching asymmetry of a Mach- Zehnder Interferometer," *Photonics Technology Letters*, Submitted and under review, 2010.

-A. Brimont, P. Sanchis, J. V. Galan, J. M. Fedeli, **A. M. Gutiérrez**, and J. Marti, "Experimental demonstration of moderately low group velocity in silicon rib photonic wire Bragg gratings," in *LEOS Annual Meeting Conference Proceedings, 2009. LEOS '09. IEEE*, 2009, pp. 713-714.

Abstract —

We demonstrate experimentally the passive performance of the slow-wave structures. Corrugated waveguides are characterized on 220 nm thick silicon wafer in order to validate their theoretically achievable slow wave features, expected to improve the performance of a modulator. The spectral responses of a variety of corrugated waveguides are worked out so as to evaluate both group velocity spectral dependence and potential loss penalty.

ÍNDICE

I. Introducción	4
I.1. Fotónica de silicio	4
I.2. Propagación en guías ópticas de silicio	5
I.3. Modulación electro-óptica en silicio.....	10
II. Estructuras de onda lenta	14
II.1. Ventajas y aplicaciones	14
II.2. Propagación de luz lenta.....	15
II.3. Pérdidas de propagación en estructuras de onda lenta	16
II.4. Diseño de la guía corrugada de onda lenta	17
III. Fabricación, caracterización y resultados	21
III.1. Montaje experimental para la caracterización de las estructuras diseñadas.....	23
III.2. Medidas y resultados de las estructuras diseñadas.....	25
IV. Conclusiones	32
Agradecimientos	33
Referencias	34
Anexo I. Proceso de nanofabricación	35
Anexo II. Justificante de envío de artículo	39

I. INTRODUCCIÓN.

I.1. FOTÓNICA DE SILICIO.

Muchos han sido los materiales dieléctricos sobre los que se han desarrollado todo tipo de estructuras ópticas. Debido en gran parte a los requerimientos de mayores velocidades y anchos de banda y a una mayor integración de los componentes ópticos, se han ido buscando materiales nuevos para hacer frente a las nuevas exigencias.

La fotónica en silicio tiene sus orígenes a finales de la década de los 80 y principios de los 90 aunque su crecimiento más significativo se está produciendo en los últimos cinco años y se prevé un despliegue comercial importante en la próxima década que será llevado a cabo, entre otras, por compañías tan importantes como Intel, Luxtera, IBM y Kotura [1]. Las aplicaciones más importantes están orientadas a redes ópticas, telecomunicaciones de bajo coste, sensores ópticos y biosensores.

Un material dieléctrico se caracteriza principalmente por su índice de refracción. Materiales de gran variedad de índices han sido propuestos para los numerosos componentes ópticos que se han ido desarrollando a lo largo de la historia. La mayoría de los componentes ópticos utilizados actualmente en los sistemas de telecomunicaciones usan tecnologías de fabricación empleando diversos materiales semiconductores comprendidos entre los grupos III-V de la tabla periódica, como el fosfuro de Indio (InP), el arseniuro de Galio (GaAs), niobato de Litio (LiNbO_3), etc. Estas tecnologías implican un elevado coste debido a que estos materiales son más caros, y dificultan el avance tecnológico hacia una mayor integración.

La principal ventaja de utilizar tecnología de silicio es que ya hay antecedentes satisfactorios del silicio como semiconductor en la microelectrónica. Es por esta razón por la que se ha generado un gran interés en incorporar esta tecnología a aplicaciones orientadas a las comunicaciones ópticas. Las principales ventajas de la incorporación de este tipo de dispositivos ópticos basados en silicio son:

- Una reducción drástica de costes haciendo uso de una tecnología suficientemente conocida y desarrollada.
- Una disminución de las dimensiones de los sistemas gracias a la alta integración de diversos componentes opto-electrónicos en el mismo sustrato.
- Compatibilidad total con los procesos de fabricación CMOS utilizados en la microelectrónica.

1.2. PROPAGACIÓN EN GUÍAS ÓPTICAS DE SILICIO.

1.2.1. PROPIEDADES ÓPTICAS DEL SILICIO.

El silicio es un material dieléctrico que se caracteriza por tener un elevado índice de refracción ($n=3.45$) y un coeficiente de absorción despreciable entre $1.11 \mu\text{m}$ y $7 \mu\text{m}$, por lo que es muy apropiado para comunicaciones ópticas en segunda y tercera ventana.

No obstante, y debido a algunas de sus propiedades, el silicio plantea una serie de problemas para la fotónica. Las altas pérdidas de propagación (debidas básicamente a la rugosidad de las paredes de las estructuras), el bajo coeficiente electro-óptico, la baja eficiencia de emisión de luz y unas elevadas pérdidas de acoplo a fibra óptica son los desafíos más importantes que tiene que superar el silicio como material fotónico. Sin embargo, el continuo progreso en las técnicas de nanofabricación ha permitido la demostración de un gran número de componentes fotónicos de altas prestaciones, superando las limitaciones tradicionales del silicio [2].

En los últimos años, los esfuerzos en dispositivos ópticos sobre silicio se han centrado más concretamente en dispositivos como moduladores, amplificadores, y emisores de luz como los láseres. Moduladores electro-ópticos de velocidades superiores a 40 Gb/s han sido desarrollados en silicio [3].

1.2.2. TECNOLOGÍA SOI.

Una de las tecnologías basadas en silicio que más desarrollo está experimentando es la llamada 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 una longitud de onda de 1550 nm .

Una oblea SOI consiste en una delgada capa de silicio (de espesor de $200\text{-}250 \text{ nm}$) 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 (alrededor de $700 \mu\text{m}$), también de silicio. Existen en el mercado obleas SOI de diversos espesores y dimensiones. En concreto, nuestras obleas tienen una capa de sustrato de alrededor de $750 \mu\text{m}$, una capa de óxido de $3 \mu\text{m}$ y una capa de silicio superior a 205 nm .

En estas obleas, podemos fabricar guías ópticas de dimensiones muy reducidas (guías nanofotónicas) ya que el alto contraste entre índices de refracción facilita el guiado óptico con un gran confinamiento del haz. Gracias a esta característica se pueden diseñar circuitos ópticos con una elevada densidad de integración (del orden de nanómetros). No obstante, este alto confinamiento del haz conlleva un mayor número de reflexiones en las paredes de las guías y con ello unas elevadas pérdidas de propagación. El gran desafío, ya superado en gran medida, era el de minimizar la rugosidad de las paredes de las guías para reducir estas pérdidas de propagación.

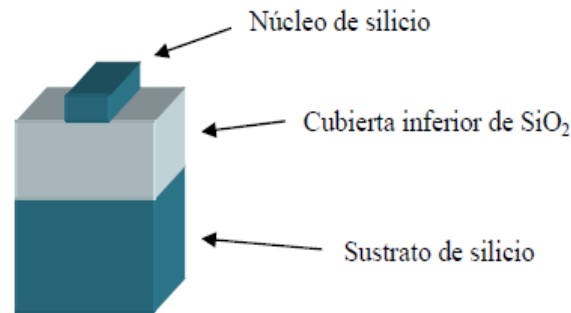


Fig.1: Guía grabada sobre el núcleo de silicio de una oblea SOI.

El interés puesto en los circuitos integrados ópticos basados en silicio es debido tanto a razones tecnológicas como económicas. En lo referente a la parte tecnológica, este tipo de dispositivos son compatibles con los procesos de fabricación CMOS usados en microelectrónica, lo que permitiría la producción a gran escala de componentes de bajo costes, considerándose como una plataforma prometedora para la integración conjunta de circuitería electrónica y óptica [4]. En cuanto a las razones económicas, el coste del silicio y consecuentemente de las obleas SOI es mucho menor comparado con otros elementos utilizados anteriormente. Esto se debe a que el silicio es el elemento electropositivo más abundante de la corteza terrestre, además de ser un material muy robusto y cuyas propiedades son largamente conocidas y estudiadas especialmente por la industria microelectrónica.

La clave de desarrollar componentes ópticos más avanzados y baratos es integrarlos en chips. Cuando esto se realiza, hablamos de circuitos ópticos integrados ó ph ICs (del inglés, photonic Integrated circuits). La siguiente Fig. 2 muestra la apariencia física de una oblea SOI compuesta por miles de circuitos ópticos integrados.

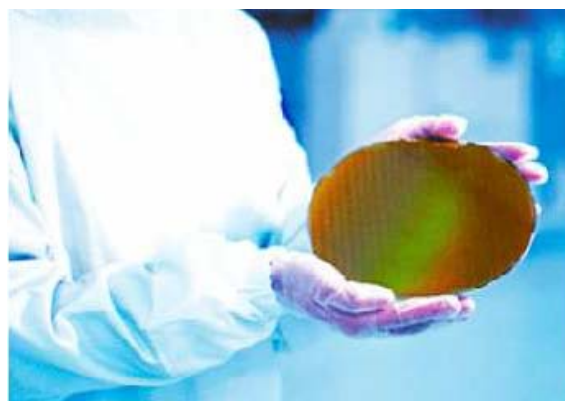


Fig. 2: Miles de circuitos integrados ópticos en una oblea de SOI de 200 nm de espesor

La comunicación entre los distintos dispositivos que forman el circuito integrados se realiza gracias a guías ópticas, y se debe llevar a cabo de manera eficiente y con bajas pérdidas. Las guías también se suelen utilizar para interconectar el circuito integrado con la fibra óptica, es por ello que

es de especial importancia realizar un buen estudio de guías cuando tratamos con este tipo de circuitos integrados.

1.2.3. GUÍAS ÓPTICAS.

Una guía es una estructura capaz de confinar la luz en una cierta área y transportarla a una distancia dada. Este confinamiento se lleva a cabo mediante guiado por índices de refracción, donde la luz queda atrapada en un núcleo de un material cuyo índice de refracción es mayor que el de la cubierta. La mayoría de las guías ópticas que se usan en comunicaciones son monomodo y sólo soportan un modo guiado (para cada polarización TE y TM). En la siguiente Fig. 3, se muestran diferentes tipos de guías:

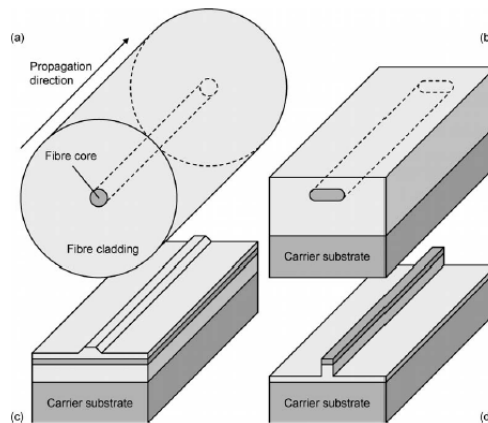


Fig. 3: Secciones de distintos tipos de guías. (a) Fibra óptica monomodo. (b) Guía enterrada. (c) Guía "Rib Waveguide". (d) Guía óptica SOI.

Una fibra óptica es un tipo de guía en la que el contraste entre los índices de refracción entre el núcleo y la cubierta es siempre inferior al 1% (un valor típico es 0.36% para fibras ópticas monomodo estándar ó SMF del inglés Single Mode Fibers y a una longitud de onda de 1550 nm.). Debido al bajo contraste entre índices, la luz se puede escapar fácilmente del núcleo, simplemente curvando la fibra a partir de radios de curvatura en torno a 1 cm. Lo mismo sucede con una guía fabricada sobre silicio, pero con el añadido de que al ser mayor el contraste entre índices de refracción, los radios de curvatura a partir de los cuales la luz se escapa del núcleo son mucho menores y se sitúan en torno a los micrómetros.

Puesto que el contraste de índices en la tecnología SOI es alto, las dimensiones de este tipo de guías deben ser muy concretas para que sólo propaguen un modo, ya que como se indica en [5], cuanto mayor sea el contraste entre índices, menor tiene que ser el tamaño de las guías para ser monomodo. Las dimensiones típicas de una guía SOI monomodo son $220 \times 500 \text{ nm}^2$. Así pues, nos referiremos a ellas como guías nanofotónicas.

La Fig. 4 muestra un ejemplo de las dimensiones de una guía SOI monomodo sobre las que hemos ido trabajando a lo largo de este proyecto.

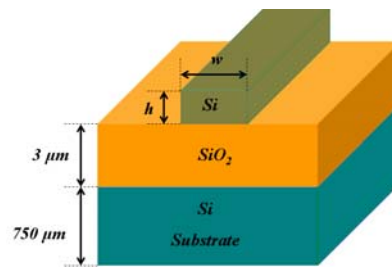


Fig. 4: Detalle de una guía sobre una oblea SOI de las usadas en el proyecto. La altura (h) es de 220 nm. La anchura (w) debería ser de 500 nm para monomodo.

Como se puede ver en la Fig. 4, nuestras obleas SOI tiene una capa de sustrato de unos 750 μm aproximadamente, una capa de óxido de silicio de 3 μm y una última capa superior de silicio de 220 nm (h en la figura). Bajo estas condiciones, una guía debería tener unos 500 nm de anchura para asegurar la propagación monomodo.

En la siguiente Fig. 5, se muestra un ejemplo del aspecto fundamental de una guía cuadrada de 500 nm de lado y el aspecto del modo fundamental de una guía rectangular de altura 205 nm y anchura 500 nm, ambos para polarización TE.

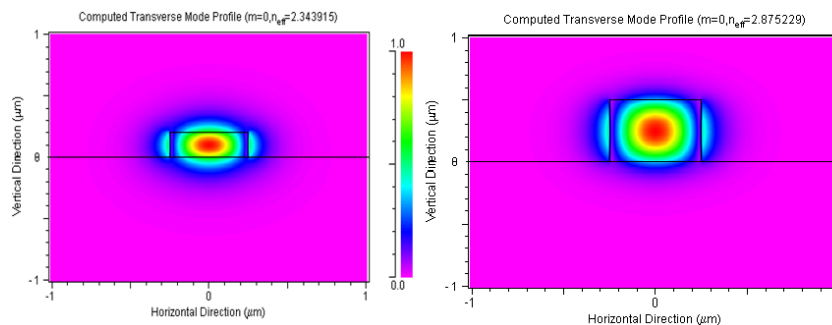


Fig. 5: Aspecto del modo fundamental TE para una guía cuadrada de lado 500 nm (izquierda) y para una guía de altura 205 nm y anchura 500 nm (derecha).

1.2.4. ALTO CONTRASTE.

La diferencia de índices de refracción entre el núcleo y la cubierta de una guía dieléctrica, denominada normalmente “contraste”, juega un papel fundamental en la determinación de las características de la guía y de los circuitos ópticos. Hasta hace relativamente poco, el contraste no era considerado un parámetro flexible en el diseño de guías, sino que se pensaba que venía predeterminado por implicaciones tecnológicas como puede ser la disponibilidad de materiales, compatibilidad de capas ó técnicas de deposición. Pero recientemente, el diseño de circuitos y la tecnología han tratado de buscar y encontrar conceptos relacionados con el contraste de índices con el fin de optimizar el comportamiento de las guías en diversos aspectos.

En la Fig. 6 tenemos algunos ejemplos de guías basadas en técnicas tanto de bajo como alto contraste. El ejemplo de estructura de bajo contraste más común es la fibra óptica (Fig. 6(a)). Otro ejemplo de estructura de bajo contraste es el de las guías de sílice dopado (doped silica), las cuales poseen un contraste de índices de refracción que ronda el 0.69% y cuyo modo posee unas dimensiones muy similares al modo de una fibra óptica. Como el sílice se halla localizado sobre un sustrato de silicio, se les denomina sílice sobre silicio (silica on silicon) y un ejemplo de ello se puede ver en la Fig. 6(b). En la Fig. 6(c), se presentan las guías SiON (Si oxynitride). A diferencia de las estructuras presentadas hasta ahora, las guías SOI poseen un contraste de índices alrededor de un 40% a la longitud de onda $\lambda=1550$ nm, lo cual conlleva una diferencia de índices de refracción entre el núcleo ($n_1=3.5$) y la cubierta ($n_2=1.5$) de aproximadamente 2 (véase Fig. 6(e)).

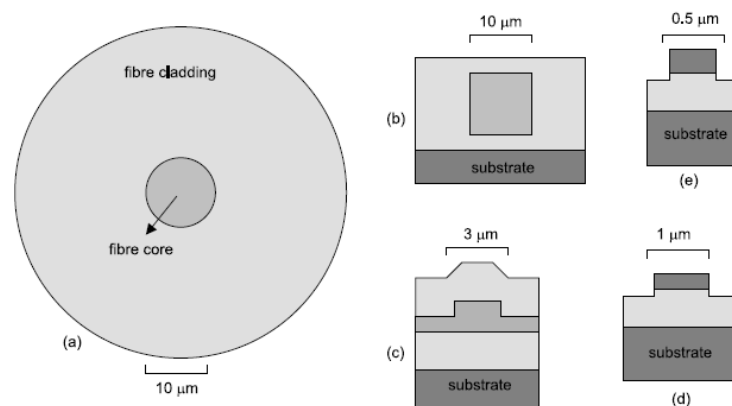


Fig. 6: Secciones de guías de distintas tecnologías según el contraste de índices. Un color más claro indica un menor índice de refracción. (a)fibra óptica, (b)dopado sílice, (c)silicio oxynitride, (d)silicio nitride, (e)SOI.

Las tecnologías basadas en sílice dopado poseen un contraste de índices de $\Delta n=0.69\%$ que corresponde a una diferencia de índices entre el núcleo y la cubierta de 0.01. Estas tecnologías ya han sido bastante estudiadas en el pasado y se han obtenido bajas pérdidas de propagación en torno a 0.05 dB/cm, y buena eficiencia de acoplo a fibras monomodo estándar. Una de las principales desventajas del bajo contraste de índices es el mínimo radio de curvatura que se puede conseguir en guías basadas en esta tecnología, que ronda los 5-7 mm. Esta limitación impide la posibilidad de alta integración de los componentes fotónicos, puesto que las dimensiones típicas de un componente de estas características están alrededor de 1-2 cm y con ello el aumento de costes de producción a gran escala ya que supone pocos chips por oblea.

El uso de tecnología de alto contraste soluciona en gran medida estas limitaciones comentadas en el párrafo anterior. Las dos ventajas principales derivadas del uso de técnicas de fabricación de guías y componentes fotónicos por guiado de alto contraste son: integración a gran escala y la posibilidad de considerar nuevos circuitos hasta ahora inviables con la tecnología de bajo contraste.

A mayor contraste de índices, mayor es la escala de integración, o lo que es lo mismo, mayor es el número de componentes por chip ya que el alto contraste reduce considerablemente las

portadores no tienen esta limitación, por consiguiente los moduladores más acertados en silicio en términos de ancho de banda de modulación están basados en este último efecto.

El efecto de dispersión de plasma, como ya hemos mencionado anteriormente, está basado básicamente en la variación de la concentración de portadores libres en un semiconductor, lo cual cambia la parte real y la parte imaginaria del índice de refracción. Estos efectos son conocidos, respectivamente, como electro-refracción y electro-absorción. Estos fenómenos fueron demostrados experimentalmente por R.A.Soref [7, 8] a partir de las ecuaciones de Drude-Lorenz en las longitudes de onda específicas de telecomunicaciones (1,3 μm y 1,55 μm) y sus conclusiones llevaron a las siguientes ecuaciones empíricas para $\lambda=1,55\mu\text{m}$:

$$\Delta n = \Delta n_e + \Delta n_h = -[8,8 * 10^{-22} \Delta n_e + 8,5 * 10^{-18} (\Delta n_h)^{0,8}] \quad (1)$$

$$\Delta \alpha = \Delta \alpha_e + \Delta \alpha_h = 8,5 * 10^{-18} \Delta n_e + 6,0 * 10^{-18} \Delta n_h \quad (2)$$

donde Δn_e es el cambio en el índice de refracción resultante del cambio en la concentración de los electrones libres; Δn_h es el cambio en el índice de refracción resultante del cambio en la concentración de los huecos libres; $\Delta \alpha_e$ es el cambio de la absorción resultante del cambio en la concentración de los electrones libres; $\Delta \alpha_h$ es el cambio de la absorción resultante del cambio en la concentración de los huecos libres.

Como se muestra en la ecuación (1), el índice de refracción real cambia cuando la concentración de portadores libres se modifica dentro del dispositivo óptico.

Consideramos ahora que la luz que llega en una onda continua de un láser puede ser confinada y guiada por medio de la reflexión total interna (TIR) en una guía rib de silicio monomodo. Para los dispositivos electrónicos, el silicio debe ser dopado con elementos de las columnas tercera y quinta de la clasificación periódica de elementos para formar uniones semiconductoras capaces de inyectar, agotar o acumular portadores de carga (electrones y huecos). Esto permite un control preciso de la respuesta eléctrica de dispositivos basados en silicio. Tal control se requiere para crear transistores, detectores, diodos y otros dispositivos. Utilizando convenientemente la tecnología existente, es posible combinar estructuras ópticas que guíen el modo de propagación con estructuras eléctricas que permitan la inyección, depleción o acumulación de un plasma de portadores libres superponiéndose al modo en cuestión.

Como ejemplo, consideramos una guía rib de silicio dopada PIN inversamente polarizada, como muestra la Fig. 8.

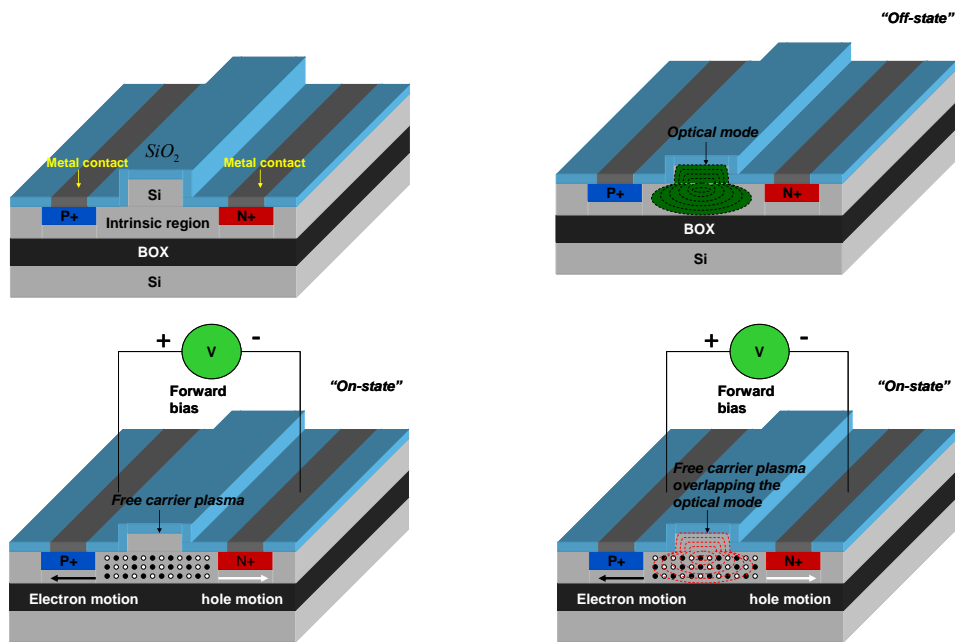


Fig. 8: Ejemplo de una guía rib en silicio embebida en una unión PIN. Estado OFF: el modo óptico se propaga a través de la guía sin ser alterado. Estado ON: se aplica la unión una polarización directa lo que conlleva a un flujo de corriente de portadores libres a través de la región intrínseca donde el modo se propaga.

Se puede conseguir fácilmente de manera experimental que las concentraciones de los portadores libres inyectados a través de las uniones sean del orden de $5 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ lo cual lleva a una variación del índice de refracción (para $\lambda=1,55\mu\text{m}$) de $\Delta n=-1,7 \cdot 10^{-3}$. Este resultado permite evaluar cuál debería ser la longitud de la guía rib PIN para que una onda electromagnética propagándose a través de ella experimente el deseado cambio de fase dado por:

$$\delta\phi = \frac{2\pi L}{\lambda} \delta n_{eff} \quad (3)$$

donde L es la longitud de la guía, λ la longitud de onda y δn_{eff} la variación del índice efectivo del modo.

Normalmente, se asume que el cambio en el índice de refracción real para obtener un cambio de fase de π radianes debe ser aproximadamente igual al cambio en el índice efectivo del modo fundamental. Sin embargo, el índice de refracción real de un modo generalmente no se corresponde con el índice efectivo del modo que se propaga. Por tanto, se requieren unos pasos de cálculo para hallar el cambio del índice efectivo del modo mediante métodos de resolución tales como BeamProp de Rsoft [9].

Asumiendo que el cambio del índice de refracción es uniforme en la guía y que el plasma de portadores de carga se superpone completamente con el modo óptico (caso ideal), podemos obtener la longitud teórica requerida para conseguir un cambio de fase π como:

$$L_{\pi} = \frac{\lambda}{2\Delta n_{eff}} \quad (4)$$

Lo que en el ejemplo considerado ($\Delta n = -1,7 \cdot 10^{-3}$) resulta en $L_{\pi} \approx 455 \mu\text{m}$.

Esta estructura vista en la Fig. 8 se denomina modulador de fase ya que solamente altera la fase de la onda que se propaga y se puede convertir en un modulador de amplitud integrando dos desplazadores de fase en ambos brazos de un interferómetro Mach-Zehnder (MZI), como se muestra en Fig. 9.

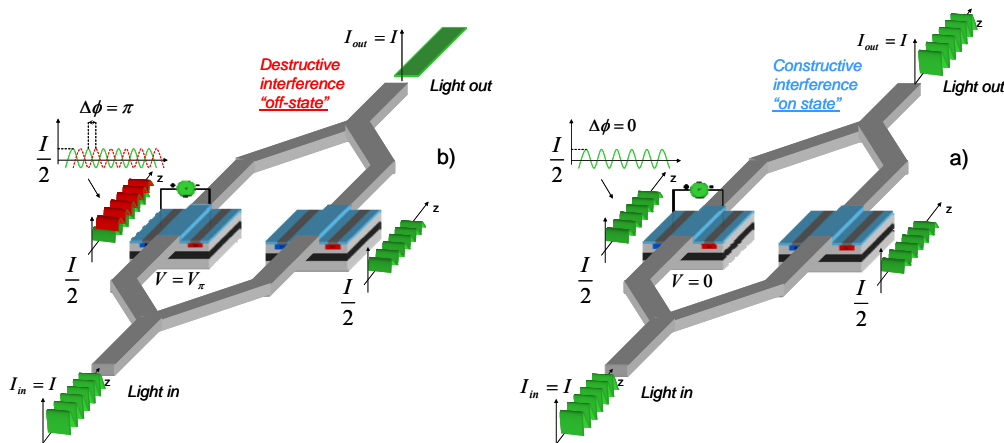


Fig. 9: Modulador de amplitud Mach-Zehnder ideal consistente en dos desplazadores de fase integrados en ambos brazos del dispositivo.

El principio de funcionamiento de este modulador de amplitud está basado en el hecho de que la parte activa del primer brazo desplaza π radianes la fase de la onda de entrada aplicando un voltaje adecuado V_{π} con respecto al segundo brazo. Como resultado, las ondas separadas interfieren destructivamente llevando idealmente a la ausencia de señal óptica en la salida. El modulador está entonces en estado OFF y se transmite un “0” (Fig. 9(b)). En el caso contrario, si no se aplica voltaje al desplazador de fase, la fase de la onda incidente permanece invariante y por tanto las dos ondas interfieren constructivamente a la salida lo que lleva a una no alteración de la señal óptica. En este caso el modulador está en estado ON y se transmite un “1” (Fig. 9(a)).

El principal problema que encontramos en dispositivos basados en MZI es la longitud de interacción necesaria para conseguir un desfase (desplazamiento de fase) de π radianes en un brazo

respecto al otro. Reducir la longitud de interacción requiere que los diodos operen bajo un gran voltaje lo que conduce a una corriente de inyección alta (PIN), una rápida depleción (PN) y más acumulación de portadores (MOS). En el caso del diodo PIN, por ejemplo, los problemas térmicos derivados y el tiempo de recombinación de los portadores de carga inyectados pueden afectar severamente la velocidad y la operación del modulador aunque existen maneras de superar estas cuestiones bien usando una estructura óptica alternativa (anillo resonante) o bien maximizando la superposición entre los portadores de carga y el modo óptico (estructuras de onda lenta).

II. ESTRUCTURAS DE ONDA LENTA

II.1. VENTAJAS Y APLICACIONES.

El fenómeno de onda lenta ha atraído a numerosos investigadores en los últimos años debido a que ofrece un control más profundo sobre la luz. De hecho, las estructuras de onda lenta, debido a su naturaleza periódica, presentan la gran ventaja de reducir la velocidad de propagación de luz.

La luz lenta se ha observado experimentalmente en estructuras SOI dieléctrica tales como PhC [10, 11] y anillos resonantes [12]. La brillante demostración hecha por F. Xia et al. [13] en el campo de líneas de retardo ópticas marcó el mayor hito en almacenamiento óptico. Además, la fuerte mejora de las interacciones no lineales debido a la compresión local de energía que ocurre en el régimen de luz lenta, fue predicha por M. Soljacic et al. [14]. En este último caso se demostró la potencial reducción de la longitud de la interacción y del consumo de energía en dispositivos electro-ópticos lo que desencadenó una serie de publicaciones de conmutadores [15], líneas de retardo [16], mejora no lineal en guías [17] y moduladores electro-ópticos [18].

La siguiente ecuación, la cual se definió en [14], refleja la longitud requerida para conseguir un cambio de fase de π radianes:

$$\frac{L}{\lambda} \approx \frac{1}{2\sigma} \left(\frac{n}{\delta n} \right) \left(\frac{v_G}{c} \right) \quad (5)$$

Esta ecuación muestra que para una perturbación dada del índice de refracción (δn), la longitud del dispositivo depende linealmente de la velocidad de grupo (v_G). Otro parámetro importante es el factor de superposición (σ) el cual representa la fracción de la energía total del modo que se almacena en la región donde se aplica δn . Entonces, por ejemplo, para $\delta n=10^{-3}$, $n=3.47$ y $\lambda=1550\text{nm}$, la longitud del dispositivo se puede reducir por debajo de $100 \mu\text{m}$ si se puede conseguir que la velocidad de grupo sea $v_G=0.04c$ y $\sigma=1$.

II.2. PROPAGACIÓN DE LUZ LENTA.

II.2.1. DEFINICIONES PREVIAS.

- **Diagrama de bandas:** Las estructuras periódicas se caracterizan por su diagrama de bandas (o relación de dispersión) que es una representación 2D o 3D de la relación existente entre la frecuencia (normalizada en unidades de $\omega a/2\pi c$ siendo 'a' el periodo) y el vector de onda (normalizado en unidades de ka/π). Otra definición típica del diagrama de bandas es la representación de las frecuencias o energías de los modos permitidos en una estructura periódica en función del vector de onda.
- **Photonic Band-Gap:** intervalos de frecuencias o energías para los que no existe ningún modo de propagación (la luz no se propaga) independientemente de la dirección de incidencia, es decir, independientemente del vector de onda. Mayores contrastes de índices proporcionan band-gaps más anchos.
- **Modos de Bloch:** Las estructuras periódicas permiten la existencia de modos EM de propagación sin pérdidas con forma de ondas de Bloch y representables en un diagrama de bandas.
- **Zona de Brillouin:** Por la periodicidad de la estructura, el diagrama de bandas se repite con periodo $G_z=2\pi/a$, por tanto, nos basta con representar los vectores de onda en el espacio $-G_z/2 < k < G_z/2$ ($-\pi/2 < k < \pi/2$) y esta región se denomina zona de Brillouin.

II.2.2. EL FENÓMENO DE ONDA LENTA.

El periodo, tamaño y forma del patrón de repetición de la estructura periódica define la frecuencia donde la velocidad de la luz debe caer dentro de la guía proporcionando libertad total al diseñador. La naturaleza de la luz lenta consiste en el acoplo en fase y amplitud entre las sucesivas reflexiones hacia delante y hacia atrás que experimenta la onda que se propaga en cada célula unidad, que de manera intuitiva se puede describir teniendo en cuenta la teoría de rayos ópticos. Aquí, nosotros vamos a centrar en una estructura unidimensional periódica corrugada lateralmente, aunque el principio de propagación de onda lenta es el mismo que para otros tipos de PhCs. Un diagrama de bandas típico de una guía corrugada de silicio 1D se muestra en la Fig. 10. En este caso, el mecanismo de propagación de onda lenta que nos interesa es el que se produce en el borde de banda ($k=0.5*2\pi/a$) y se denomina backscattering.

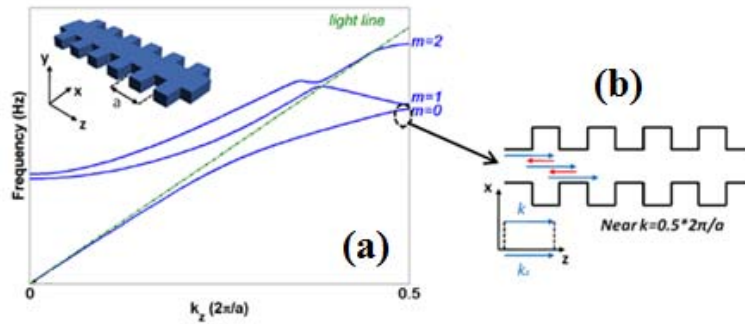


Fig. 10: (a) Diagrama de bandas típico de una guía de silicio corrugada. Las líneas azules representan los 3 primeros modos de la estructura óptica de los cuales sólo se propagan aquellos localizados por debajo de la línea de luz (línea verde). (b) Propagación de onda lenta por backscattering.

La luz que se propaga con incidencia paralela (es decir, $k_z=0.5*2\pi/a$) experimenta múltiples reflexiones en cada celda unidad debido al grating periódico. La interacción coherente en fase y amplitud entre los modos propagantes hacia delante y hacia atrás forman una onda permanente con velocidad de grupo cero en forma de modos de Bloch. Cuando la luz se propaga cerca de la incidencia paralela, es decir, en las inmediaciones del borde de la zona de Brillouin, las componentes que viajan hacia delante y hacia atrás interactúan, dando lugar a un patrón de interferencia con movimiento lento hacia adelante: un modo lento. Esto se refleja con un movimiento con tres pasos hacia delante y dos hacia atrás como se muestra la Fig. 10(b). Conforme uno se aleja de la zona de Brillouin, las componentes que viajan hacia adelante y hacia atrás están casi completamente fuera de fase y la reflexión total interna se convierte en el mecanismo de propagación dominante como en guías rectas con velocidad de grupo regular. Desde tal visión física, uno puede pensar que la luz lenta se produce sólo en el borde de la zona de Brillouin en un ancho de banda reducido. Sin embargo, trabajos recientes en 2D PhCs con defecto lineal, es decir, un 2D PhCs con una línea en la que falta agujero [19] refutaron esta hipótesis mostrando que la luz lenta también se puede lograr dentro de la Zona de Brillouin en un amplio ancho de banda mediante el incremento del acoplo entre los modos de diferentes órdenes que interactúan entre sí. Estos PhCs son de gran interés para las aplicaciones de EOM, debido a su aumento artificial de ancho de banda óptico.

II.3. PÉRDIDAS DE PROPAGACIÓN EN ESTRUCTURAS DE ONDA LENTA.

La posibilidad de obtener bajos valores de velocidad de grupo es uno de los aspectos más atractivos de las estructuras que poseen periodicidad en la dirección de propagación. La aplicación directa de esta baja velocidad de grupo es la creación de líneas de retardo de tamaño compacto, un elemento fundamental para la creación de dispositivos ópticos de mayor complejidad, debido a la

imposibilidad de disponer de memorias ópticas de funcionamiento similar a las que se tienen en el campo de la electrónica. Pero además del incremento en el retardo experimentado por la señal al propagarse por la estructura, la reducción de la velocidad de grupo del modo guiado provoca también una mayor interacción entre la energía electromagnética del modo guiado y la propia estructura. Esta mayor interacción campo-materia aumentará la eficiencia de cualquier efecto que se produzca en la estructura, ya sea de carácter positivo como los efectos no lineales del material, amplificación, variaciones de fase, etc., o negativo como el calentamiento de la estructura, absorción del material, pérdidas por rugosidad, etc.

Así, uno de los efectos negativos de más relevancia en el diseño de estructuras de onda lenta es el aumento de las pérdidas de propagación por rugosidad y desorden posicional cuando la velocidad de grupo del modo guiado es baja. Pese a que los procesos de fabricación de dispositivos fotónicos integrados han experimentado un enorme desarrollo en los últimos años, existe una limitación en la rugosidad mínima que se puede conseguir. Esta rugosidad es la principal responsable de las pérdidas de propagación de las estructuras fotónicas fabricadas debido a la radiación que estos defectos provocan hacia el medio exterior. Para el caso de las estructuras de onda lenta, las pérdidas también se verán influenciadas por la baja velocidad de grupo, del mismo modo que para el caso de las no linealidades. En este caso también habrá una mayor interacción entre el modo guiado por la estructura y los defectos de fabricación, por lo que se radiará una mayor cantidad de energía durante más tiempo, provocándose un aumento de las pérdidas. Diversos trabajos indican que la relación entre pérdidas y velocidad de grupo es proporcional a $1/v_G$, para velocidades de grupo por encima de $0.01c$, $(1/v_G)^2$ para velocidades de grupo por debajo de dicho valor o incluso $(1/v_G)^{1/2}$ (todavía no se ha determinado de forma clara esta relación).

Finalmente, comentar que para disminuir las pérdidas de propagación en la estructura creada será necesario tener un proceso de fabricación de gran precisión, de forma que se reduzcan las imperfecciones que aparecen en la guía creada. Esto será aun más importante para el caso de estructuras de onda lenta, debido al considerable aumento de las pérdidas que se produce al trabajar en regiones de la banda guiada con baja velocidad de grupo. Una de las formas de conseguir una mayor precisión en la fabricación será utilizando diseños lo más sencillos posibles, en los que las limitaciones del proceso de fabricación disponible no sean tan problemáticas [20].

II.4. DISEÑO DE LA GUÍA CORRUGADA DE ONDA LENTA.

Como ya se ha comentado previamente, la principal característica de estas estructuras es su capacidad para disminuir la velocidad de grupo de la onda que se propaga fortaleciendo la interacción entre el modo óptico y los portadores de carga agotada, inyectada o acumulada. Esto se lleva a una reducción significativa de la longitud de interacción y por lo tanto, permite la reducción

del dispositivo de hasta unos cientos de micras. La selección de guías corrugadas para la mejora de luz-lenta entre otras arquitecturas se justifica por los siguientes puntos:

- Proceso de fabricación estándar CMOS compatible
- Geometría cuadrada como la de las guías SOI rib convencionales
- La desadaptación de impedancia entre la guía rib y el modo lento se puede compensar con un taper adecuado [16]
- La alta dispersión debido el modo lento puede ser compensada mediante la combinación de dos secciones con velocidad de grupo positiva y negativa
- Gran ancho de banda de modulación alcanzable de 40 Gbits/s [17].
- Alta superposición posible entre los portadores de carga y el modo óptico debido al alto confinamiento del modo.

La guía corrugada considerada se muestra en la Fig. 11 y consiste en una guía rib con elementos periódicos transversales de corrugación. Esta repetición periódica de elementos transversales idénticos resulta en modos de Bloch y por lo tanto en un band-gap (un rango de frecuencias donde la propagación de la luz no es posible). Dependiendo de las dimensiones de los elementos transversales (W_e , W_i), las bandas se aplanan o elevan y el band-gap se estrecha o ensancha. Obviamente se requiere una banda plana ya que cuanto más plana sea la banda, menor será la velocidad de grupo aunque, por otro lado, una velocidad de grupo muy baja puede conducir a efectos indeseables como altas pérdidas (como se ha comentado en el apartado anterior II.3. Por tanto, se tiene que llegar a una solución de compromiso para obtener ventajas que las propiedades de la guía corrugada (y de las estructuras periódicas en general) pueden ofrecer y a la vez eliminar los efectos indeseados mencionados arriba.

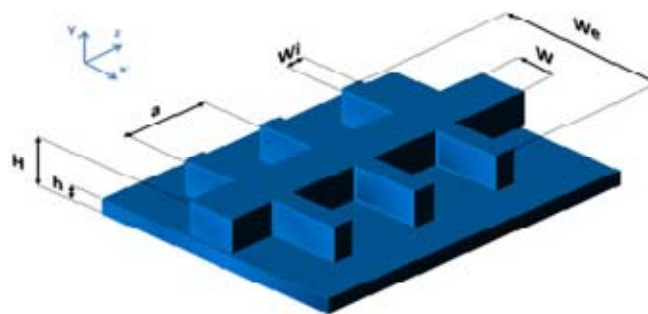


Fig. 11: Guía corrugada 1D para mejora lineal de luz lenta.

La guía óptica considerada en el modelo consiste en una estructura rib en lugar de una estructura stripe. Esto es porque la naturaleza eléctrica del índice de refracción sintonizable requiere un slab de silicio con una altura distinta de cero para permitir el contacto con los electrodos para futuras medidas activas de los dispositivos fabricados.

Como hemos visto previamente, permitir que la luz se propague con velocidad de grupo baja en forma de modo de Bloch es cuestión de inducir múltiples reflexiones dentro cualquier guía con patrón periódico. De tal modo, la amplia variedad de arquitecturas potencialmente disponibles deberían estar limitadas por las limitaciones tecnológicas, es decir, la resolución de la litografía, el proceso de grabado, y otros factores restrictivos. Las consecuencias de las limitaciones por el proceso de fabricación y/o desviaciones que pueden provocar las estructuras de ondas lentas pueden dar lugar a varios problemas, tales como romper la periodicidad y la variación de la forma en la guía de onda, que a la larga pueden desencadenar trastornos inducidos por la pérdida de dispersión y divergencia en comparación con el comportamiento óptico que se espera. Por tanto, la elección de los parámetros de la guía se basa principalmente en la Dimensiones Críticas (Critical Dimensions, CD), es decir, las dimensiones mínimas que se deben escogerse para el proceso de litografía, que para las guías corrugadas 1D no debe ser menor a 100nm. Esto establece un límite inferior de la dimensión mínima de la guía corrugada de onda lenta.

El plan de diseño consiste entonces en fijar el periodo ‘a’ de los elementos transversales y variar las dimensiones W_e y W_i de estos elementos con el objetivo de hacer coincidir la región de onda lenta con longitudes de onda alrededor de $1.55\mu\text{m}$.

Así el método para fijar el periodo de repetición se basa en la condición de Bragg que, para la guía corrugada bajo estudio, se define como:

$$\Lambda = m \frac{\lambda_{Bragg}}{(n_{eff,W} + n_{eff,W_e})} \quad (6)$$

donde Λ es el periodo de Bragg del grating, n_{eff} es el índice efectivo del modo óptico, m es el orden del modo y λ_{Bragg} es la longitud de onda de Bragg que en nuestro caso debe ser igual a $1.55\mu\text{m}$. Así, teniendo en cuenta esta ecuación y siguiendo el mismo procedimiento que en [21], hemos obtenido un periodo de Bragg de $\Lambda=320\text{nm}$. Por tanto, fijamos el período de repetición de los elementos transversales de nuestra guía corrugada en $a=\Lambda=320\text{nm}$.

Por otro lado, el dimensionado de la guía corrugada consiste en realizar un escaneo de ambos parámetros (W_e , W_i) los cuales definen el tamaño del elemento transversal. En estos cálculos, el diagrama de bandas se elabora para cada combinación de estos parámetros mediante la herramienta de simulación BandSolve de Rsoft [22]. Los valores de ambos parámetros se eligen, como se ha comentado al principio de este apartado, en función de la capacidad de fabricación, teniendo en cuenta que la máxima resolución del proceso de litografía obviamente depende de la máquina involucrada (deep-uv, e-beam,...). Considerando que el periodo del elemento transversal ‘a’ se fija a 320nm como acabamos de obtener, entonces W_i no puede ser ni demasiado pequeña debido a la

limitada resolución de la litografía, ni demasiado grande debido a la distancia ‘d’ que separa dos corrugaciones consecutivas ($W_i=a-d$). Entonces, las dimensiones máxima y mínima de W_i se han elegido dentro del rango $W_i=80\text{nm}-200\text{nm}$. Un problema similar se plantea para W_e a pesar de que este parámetro es menos restrictivo. En efecto, el valor mínimo debe ser lo suficientemente grande como para no introducir corrugaciones demasiado estrechas. De hecho, la distancia ‘d’ al menos debería ser de 100 nm en ambos lados.

Teniendo en cuenta todo lo anterior, el rango de valores de variación que se eligió para obtener el diseño de la guía corrugada se lista a continuación:

- $W=400$, $H=220\text{nm}$ y $h=50\text{nm}$
- W_e varia en el rango $[300\text{nm},800\text{nm}]$
- W_i varia en el rango $[80\text{nm},200\text{nm}]$
- a se fija a 330nm

Estos rangos tan estrechos (especialmente el de W_i) se deben a las restricciones impuestas en las dimensiones para la guía para trabajar alrededor de $1.55\ \mu\text{m}$. La Fig. 12 muestra la longitud de onda del el modo fundamental ($m=0$) respecto a (W_i , W_e). Los resultados se representan en el borde de banda, donde la onda se propaga más lentamente.

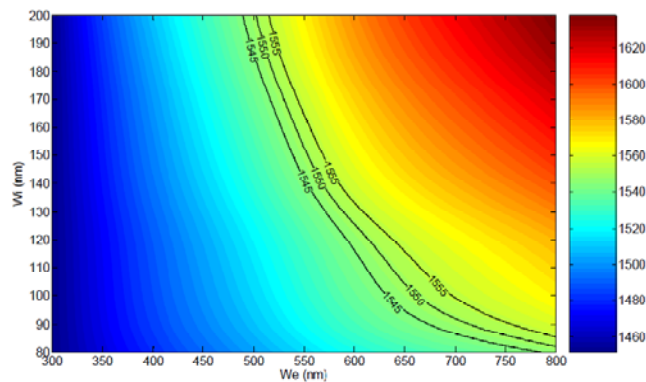


Fig. 12: Longitud de onda del modo fundamental ($m=0$) versus parámetros de variación del elemento transversal (W_e , W_i) para una guía de $400\text{nm}\times 220\text{nm}$ con una altura del slab de 50 nm. Los resultados se representan en el borde de la banda, es decir, a $k=0.5*(a/2\pi)$

El resultado interesante aquí es que la sensibilidad de la longitud de onda con W_e o W_i depende del valor de estos parámetros. Como cuestión de hecho, para grandes valores de W_i , (mitad superior de la Fig. 12), el dispositivo se vuelve más sensible a la longitud de onda que W_e y viceversa, para valores grandes de W_e (parte inferior derecha de la Fig. 12) el dispositivo se vuelve más sensible a longitud de onda que W_i . Por otra parte, aumentar el valor de un parámetro implica la disminución del tamaño del otro para mantener la propagación de onda lenta (en el borde de la banda) a una longitud de onda constante (a lo largo de la isolínea seleccionada de 1550nm).

Pero la característica más interesante de la Fig. 12 es que proporciona toda la gama de parámetros (W_e , W_i) para la cual el borde de la banda coincide con las longitudes de onda de interés, es decir, alrededor de 1550 nm, a pesar de que es imposible en la práctica que las guías fabricadas se adapten con rigor al diseño. Esto implica que los parámetros (W_i , W_e) deben ser elegidos a lo largo o cerca de la isolínea de 1550 nm.

Finalmente, teniendo en cuenta todo lo anterior, las dimensiones del diseño elegido se resumen en la Tabla 1 siguiente:

W (nm)	W_i (nm)	W_e (nm)	a (nm)	Altura del slab (nm)	Orden del modo
400	140	800	320	50	1

Tabla 1: Resumen de los parámetros elegidos para la guía corrugada de onda lenta.

La estructura pasiva final se muestra en la Fig. 13 y consiste en una guía rib monomodo de $W=400\text{nm}$ x $H=220\text{nm}$ con una altura del slab de $h=50\text{nm}$ y los elementos transversales de dimensiones $W_e=800\text{nm}$ y $W_i=140\text{nm}$ que se repiten periódicamente cada $a=330\text{nm}$.

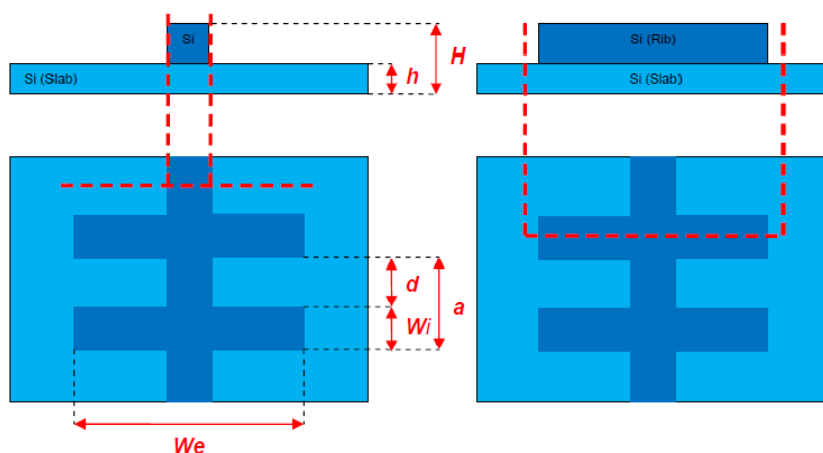


Fig. 13: Parámetros de diseño de la guía corrugada.

III. FABRICACIÓN, CARACTERIZACIÓN Y RESULTADOS

Desde que el dispositivo es diseñado, simulado y parametrizado hasta que finalmente es caracterizado en el laboratorio, básicamente el proceso completo de cualquier estructura pasa por las siguientes etapas, ilustradas también en la Fig. 14:

- **Diseño teórico de la estructura:** En esta etapa se diseña el dispositivo óptico y se simula mediante herramientas de simulación con tal de encontrar los parámetros deseados para el buen funcionamiento del mismo en la aplicación y frecuencia de trabajo deseada.

Básicamente se usan herramientas de simulación basadas en los métodos comúnmente usados para la simulación de estructuras ópticas como pueden ser el método de diferencias finitas en el dominio del tiempo (FDTD, Finite Difference Time Domain), el método de propagación de rayos (BPM, Beam Propagation Method) y el método de expansión del plano de onda (PWE, Plane Wave Expansion).

- **Proceso tecnológico de nanofabricación:** Una vez obtenidos los parámetros de la estructura simulada por cualquiera de los métodos mencionados se procede al proceso tecnológico mediante el cual se fabrica la estructura tomando como elemento base en nuestro caso una oblea SOI. El proceso de nanofabricación, debido a su importancia vital en todo el proceso básico, se explica posteriormente en el Anexo I.
- **Inspección y caracterización del dispositivo:** Una vez el dispositivo ha sido fabricado, se procede a la inspección del mismo para proceder a detectar las posibles imperfecciones que hayan podido surgir tras los procesos de fabricación. El cañón de electrones es el elemento encargado de la exposición de los motivos, y es posible con el mismo inspeccionar las muestras. En este punto es donde se procede a caracterizar el dispositivo en el laboratorio mediante el correspondiente montaje dedicado a ello y comprobar que funciona correctamente con respecto a lo simulado en el primer paso. El montaje para la caracterización de los prototipos fabricados se explicará posteriormente en el siguiente apartado.
- **Conclusiones y retroalimentación:** Después de la inspección y caracterización del motivo diseñado se puede concluir con el mismo si todo ha ido correctamente y como esperábamos o volver a lanzar otro diseño, si hemos detectado errores en el proceso de fabricación, o incluso volver a rediseñar la estructura si se requiere. La realimentación hacia cualquiera de los pasos anteriores es total.

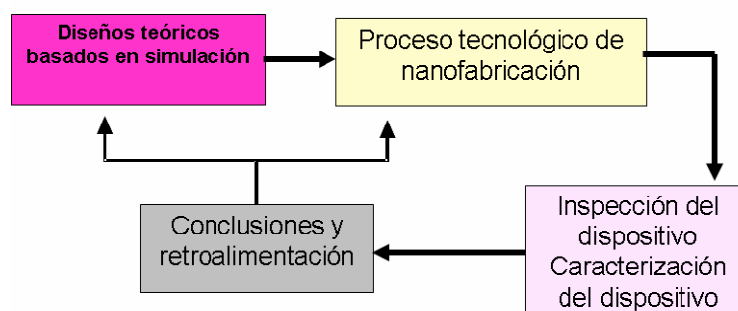


Fig. 14: Esquema de los pasos en que se divide el proceso básico de fabricación de estructuras ópticas.

III.1. MONTAJE EXPERIMENTAL PARA LA CARACTERIZACIÓN DE LAS ESTRUCTURAS DISEÑADAS.

Para la caracterización óptica pasiva de las estructuras diseñadas se ha usado acoplo vertical mediante gratings de entrada/salida para mejorar la eficiencia de acoplo y evitar resonancias Fabry-Perot.

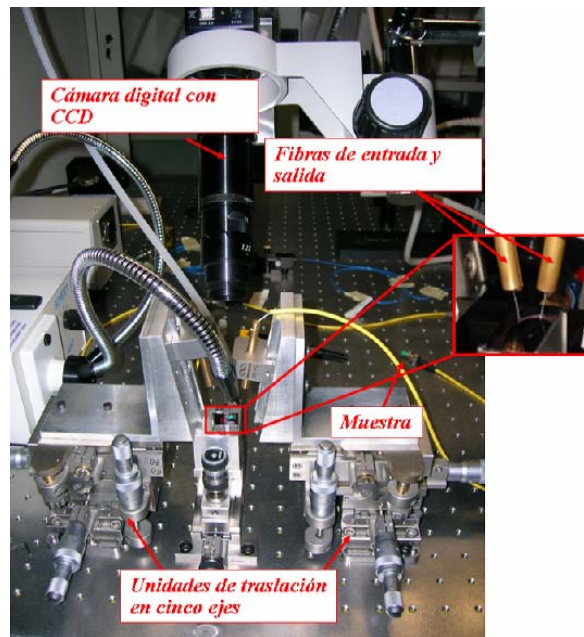


Fig. 15: Montaje experimental para la caracterización de las estructuras diseñadas.

Los componentes que componen el montaje de la Fig. 15 se ilustran en un diagrama de bloques en la Fig. 16.

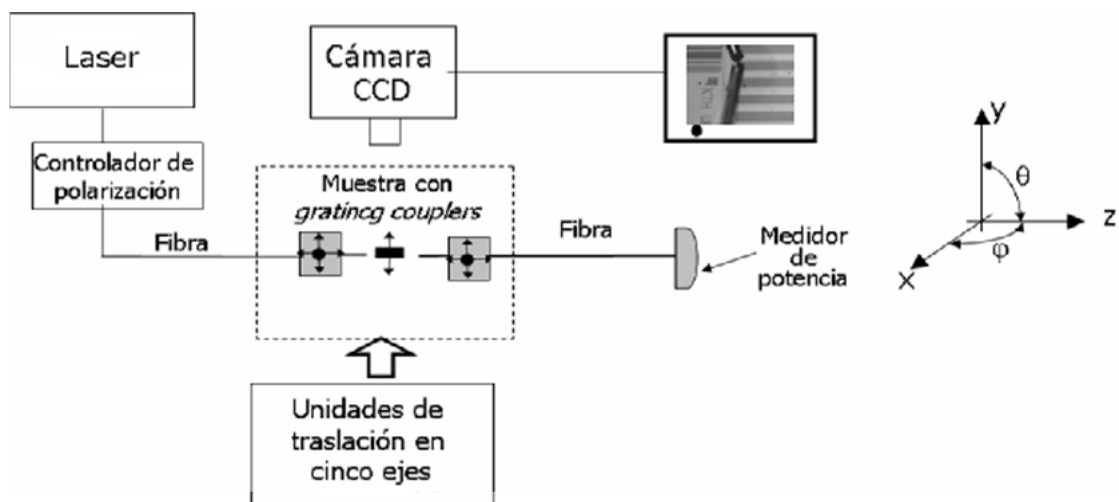


Fig. 16: Diagrama de bloques de los componentes involucrados en el montaje de la Fig. 15.

Como fuente de excitación se utilizará un láser de banda ancha (PHOTONETICS) que abarca el rango de longitudes de onda comprendidas entre 1500 nm y 1580 nm. Tras el láser se coloca un controlador de polarización, puesto que los gratings de entrada/salida fueron diseñados para polarización TE y debemos controlar la polarización de la luz que incide sobre el mismo. Tras el polarizador, la fibra de entrada inyecta la luz sobre el grating a la entrada de la muestra, así como la fibra de salida extrae la luz del grating de salida. En este caso las fibras tanto de entrada como de salida son fibras monomodo estándar del tipo SMF-28.

Finalmente la potencia a la salida de la fibra es recogida por un medidor de potencia. Tanto el láser como el medidor se controlan desde el PC mediante un controlador del bus GPIB. En primer lugar, la muestra con los gratings debe alinearse con las fibras de entrada y salida. El alineamiento se consigue mediante el empleo de unidades de traslación, con control en cinco ejes (x, y, z, θ, ϕ) y precisiones de hasta 20nm. El control en la dirección del eje θ nos servirá para poder ajustar la inclinación de la fibra. Disponemos de una cámara digital con CCD, a la que se ha acoplado un conjunto de lentes de gran aumento para controlar el alineamiento, conectada al PC. Para el alineamiento entre la fibra y el grating se realizan básicamente dos ajustes: un primer ajuste grueso, basado en la observación del acercamiento de la fibra sobre la muestra en la pantalla del PC gracias a la imagen proporcionada por la cámara CCD, y un segundo ajuste fino, basado en la búsqueda de un máximo nivel de potencia en el medidor. En el ajuste grueso del alineamiento, la manera de controlar el acercamiento de la fibra a la muestra radica en observar en la imagen captada por la cámara tanto la fibra óptica dispuesta sobre la muestra, como la sombra que dicha fibra que proyecta sobre la muestra al ser iluminada con un foco de luz blanca proveniente de una lámpara alógena. De esta forma se controla la posición de la fibra sobre el grating. En la Fig. 17 se muestra una imagen tomada por la cámara donde puede observarse tanto el grating como la fibra óptica y su sombra sobre la muestra.

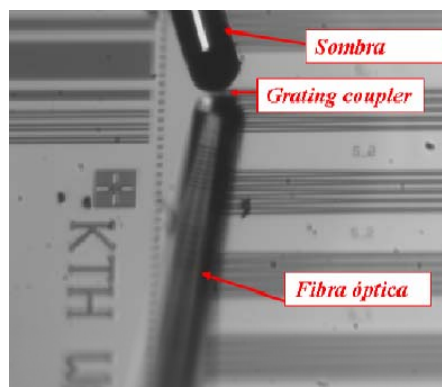


Fig. 17: Imagen tomada durante el alineamiento entre el grating y la fibra. El alineamiento se controla según la proximidad entre la fibra y su propia sombra proyectada sobre la muestra.

III.2. MEDIDAS Y RESULTADOS DE LAS ESTRUCTURAS DISEÑADAS.

Tras el proceso de diseño de la guía corrugada de onda lenta, los siguientes pasos deben ser tanto la fabricación como la demostración experimental de los moduladores de onda lenta. De cualquier forma, antes de proceder a la fabricación del modulador completo, es importante caracterizar el funcionamiento pasivo de las estructuras de onda lenta con el objetivo de comparar el diseño con los resultados experimentales y analizar la influencia de las pérdidas y las desviaciones de fabricación. El principal resultado debe ser la selección de la estructura de onda lenta óptima para la implementación de los moduladores de onda lenta.

Como ya se ha comentado en la sección anterior, se ha usado acoplo vertical mediante gratings en la caracterización óptica para mejorar la eficiencia de acoplo y evitar resonancias Fabry-Perot. Además, comentar que la fabricación se ha llevado a cabo en la sala limpia de CEA-LETI y las medidas se han llevado a cabo en el laboratorio de caracterización del Centro de Tecnología Nanofotónica de UPVLC.

Como concluimos en el apartado de diseño, la estructura de onda lenta diseñada es una guía rib corrugada de $W=400\text{nm}$ x $H=220\text{nm}$ con 50nm de altura del slab. Los elementos transversales de corrugación tienen las dimensiones $W_e=800\text{nm}$ y $W_i=140\text{nm}$ con período de repetición de $a=320\text{nm}$. La guía se ha diseñado para presentar características de onda lenta a longitudes de onda lo más cerca posible de $\lambda=1.55\mu\text{m}$, como ya comentamos también en el apartado de diseño. De cualquier forma, se han producido redondeos en los elementos corrugados durante el proceso de fabricación, como se puede ver en la Fig. 18, los cuales además afectarán al modo de la guía aunque, como podemos observar, se mantiene la periodicidad, por lo que sigue siendo posible la propagación de onda lenta. Cabe mencionar aquí que estos defectos de fabricación (redondeos) se han conseguido mejorar respecto al trabajo realizado en [23] y esta mejora ha sido posible gracias a la introducción de ángulos distintos de 90° en el diseño de la estructura.

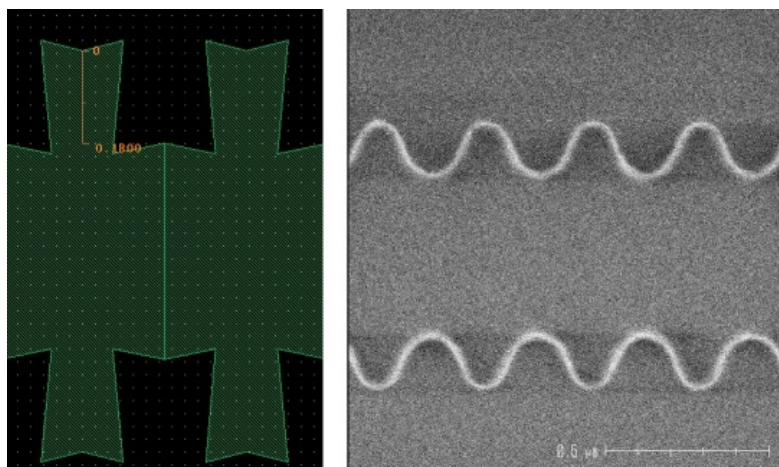


Fig. 18: Imágenes SEM de las guías corrugadas fabricadas.

Así, el primer paso en la caracterización ha sido medir una de las guías (en este caso se ha elegido la de longitud $L=1000\mu\text{m}$) en todas las muestras de una fila de la oblea (como se muestra en la Fig. 19, se ha elegido la fila central) con el fin de obtener la muestra que contiene las guías cuyo band-gap está centrado aproximadamente en $\lambda=1.55\mu\text{m}$. Cabe explicar que la dosis de deep-UV varía en la oblea por columnas, es decir, la columna central (G) tiene una dosis de $21\text{mJ}/\text{cm}^2$ y esta dosis varía en $1\text{mJ}/\text{cm}^2$ de una columna a otra (de menor a mayor dosis y de izquierda a derecha).

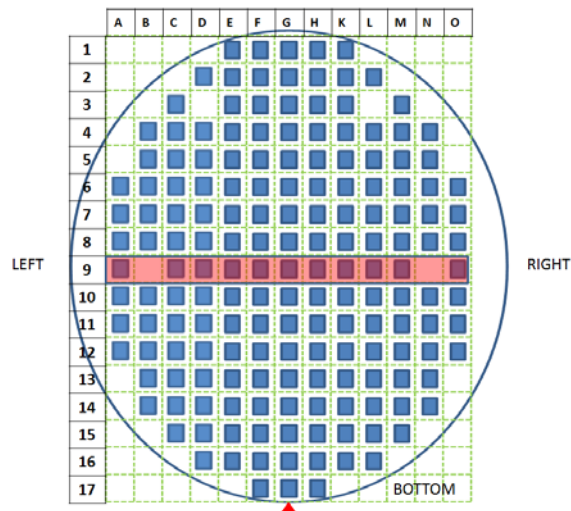


Fig. 19: Esquema de la oblea. Se ha escogido la fila central para caracterizar las estructuras fabricadas.

Tras esta primera medida preliminar hemos podido comprobar que, conforme la dosis de deep-UV aumenta de izquierda a derecha en la oblea, el band-gap se desplaza a longitudes de onda menores como ilustra la Fig. 20, todo ello debido al cambio de forma que sufren las guías en el proceso de litografía. A mayor dosis deep-UV, las guías se hacen más estrechas, y a menor dosis deep-UV, las guías se hacen más anchas. Además, hemos podido comprobar que el desplazamiento del band-gap es $8\text{-}10\text{nm}$ por $1\text{mJ}/\text{cm}^2$ (es decir, entre columnas adyacentes) y la muestra cuyo band-gap está centrado aproximadamente en $\lambda=1.55\mu\text{m}$ es la D9 (cuya dosis es $18\text{mJ}/\text{cm}^2$). Por tanto, esta será la muestra que elegiremos para posteriormente caracterizar los MZIs y por tanto para calcular el índice y la velocidad de grupo.

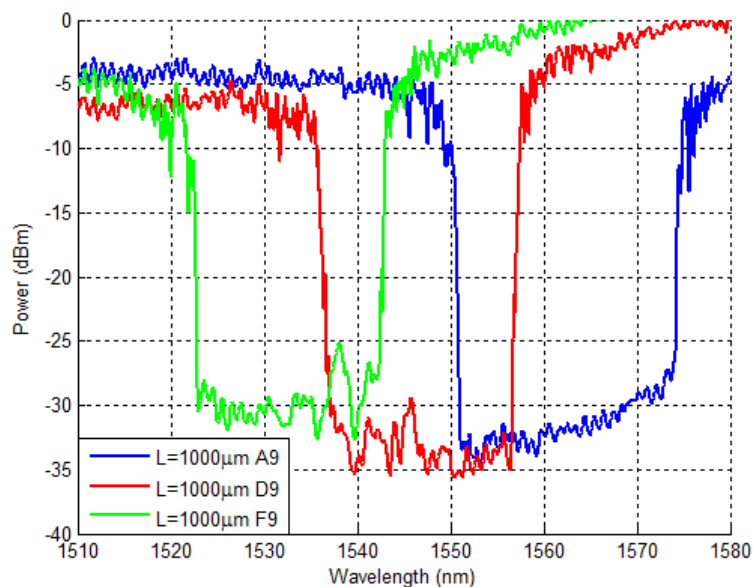


Fig. 20: Dependencia espectral del band-gap en función de la posición de la muestra en la oblea, y por tanto, de la dosis de exposición deep-UV.

La siguiente medida tiene como objetivo estudiar la influencia de la longitud de la guía corrugada en la profundidad del gap. La siguiente figura (Fig. 21) muestra esta influencia.

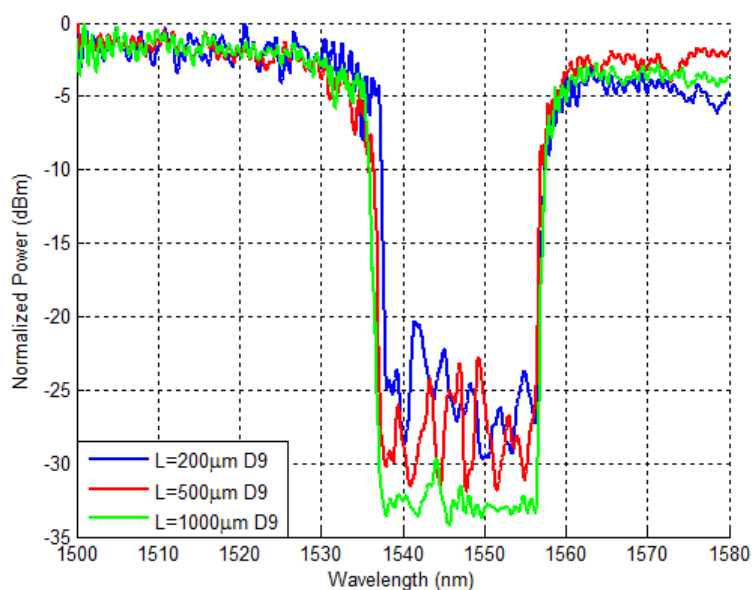


Fig. 21: Espectro óptico normalizado de las guías corrugas en función de su longitud.

Esta gráfica muestra una clara dependencia de la relación de extinción del band-gap con la longitud de la guía corrugada. La guía corrugada de 200µm de longitud exhibe un gap de 10 nm de anchura y unos 20 dB de relación de extinción, lo que significa que el modo excitado en la guía corrugada no está totalmente atenuado a la salida. De la misma forma, tanto la guía corrugada de

500 μm como de 1000 μm de longitud presentan características similares, con un band-gap un poco más profundo de alrededor de 25dB y 30 dB respectivamente.

Como ya se ha comentado varias veces a lo largo del trabajo, la incorporación de estas estructuras de onda lenta en moduladores ópticos puede ofrecer ventajas tanto en la longitud reducida del dispositivo como en el consumo de potencia y todo ello vendrá determinado por una reducción de la velocidad de grupo. Por tanto, el siguiente paso es obtener el índice de grupo (y a partir de este, la velocidad de grupo) a lo largo de la frecuencia en los moduladores fabricados.

El tipo de modulator elegido en este caso es el propuesto y diseñado por el partner UNIS y la sección transversal de este modulator se muestra en la Fig. 22. Como se puede observar, la estructura eléctrica empleada es una unión PN asimétrica.

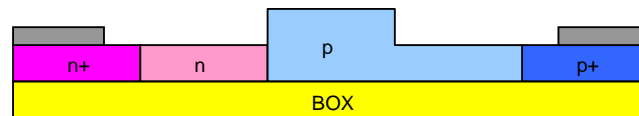


Fig. 22: Sección transversal del modulator empleado para obtener el índice de grupo.

Así, este modulator de fase se ha embebido en una estructura de interferómetro Mach-Zehnder (MZI) desbalanceada para posteriormente extraer la velocidad de grupo a partir de su espectro de transmisión como en [23]. El MZI desbalanceado consiste en un brazo con guía corrugada y en el otro una guía rib convencional. Además, y a diferencia del MZI que empleamos en [23], estos MZI tienen una diferencia de caminos entre sus brazos de $\Delta L=720\mu\text{m}$ estando la guía corrugada en el brazo corto y la guía rib convencional en el brazo largo (Fig. 23). Se espera, por tanto, que estas estructuras interferométricas proporcionen importantes mejoras en la capacidad de ralentizar la luz de las guías corrugadas.

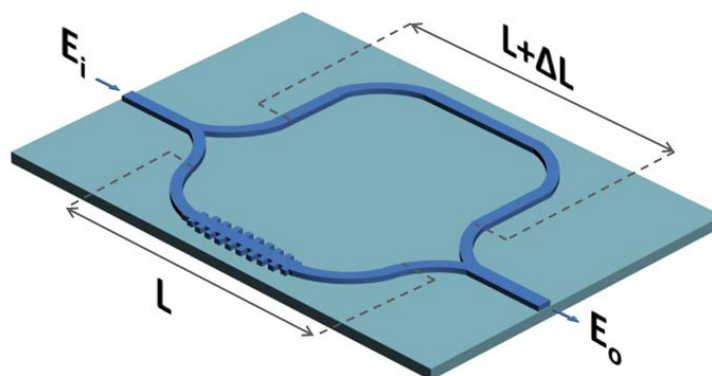


Fig. 23: Esquema del modulator interferométrico caracterizado.

Por tanto, la siguiente medida consiste en obtener los espectros de transmisión de los distintos MZIs fabricados. La Fig. 24 muestran los espectros ópticos medidos de estos MZIs con guías corrugadas de distintas longitudes.

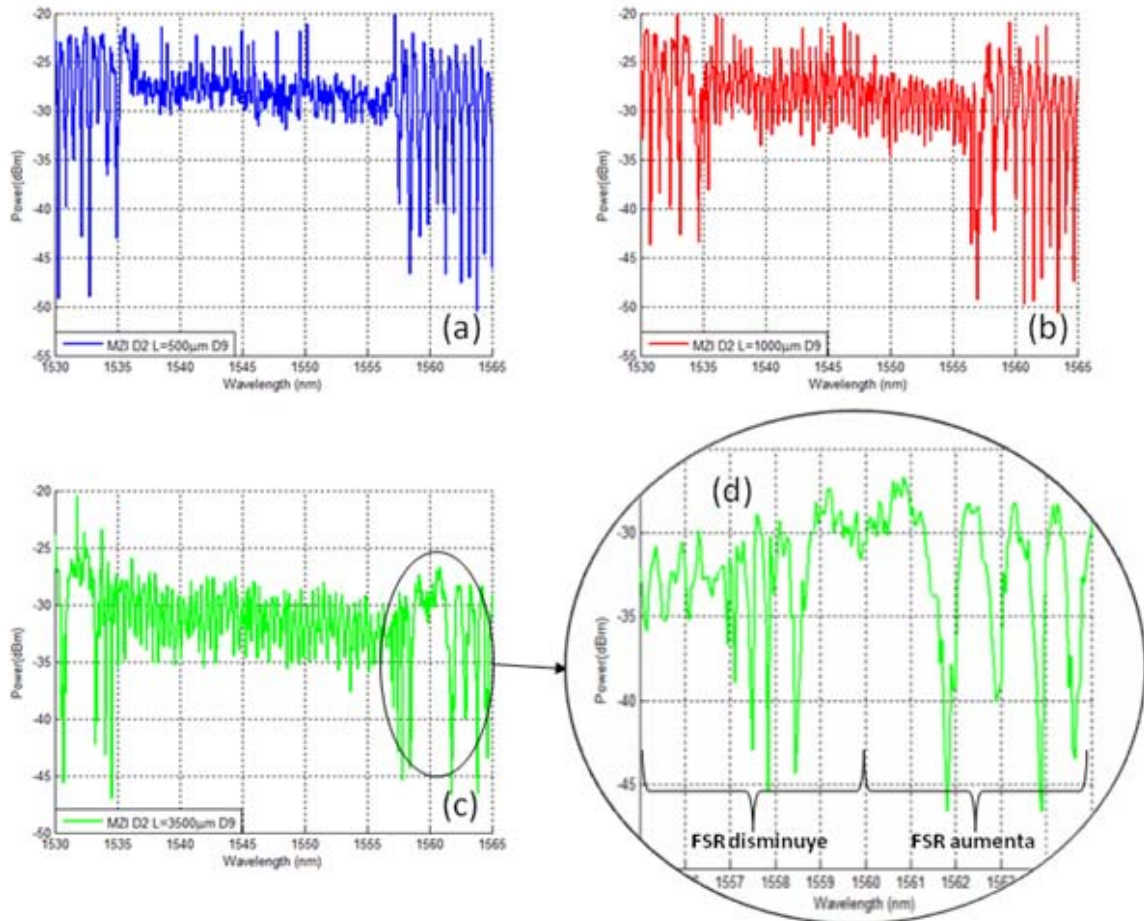


Fig. 24: Espectros ópticos de los MZIs medidos con distintas longitudes de la guía corrugada: (a) $L=500\mu\text{m}$, (b) $L=1000\mu\text{m}$, (c) $L=3500\mu\text{m}$, (d) Detalle del cambio de tendencia en el FSR.

Los espectros muestran claramente donde está localizado el band-gap. Las pequeñas resonancias en el medio del espectro pueden ser debidas a interferencias con potencia residual provenientes de la guía corrugada. De este espectro podemos extraer la dependencia espectral del índice de grupo $n_G=c/v_G$ determinando las posiciones de las resonancias mínimas e incluyéndolas en unas ecuaciones que relacionen estas posiciones con el índice de grupo.

Antes de presentar estas ecuaciones cabe destacar el cambio que se produce en la tendencia del FSR (distancia entre resonancias) cerca del borde de banda a ambos lados del gap (es decir, tanto para la primera como para la segunda banda). En la Fig. 24(d) se muestra el detalle de este cambio para el MZI con longitud de la guía corrugada $L=3500\mu\text{m}$. Este cambio implica que existe una

conversión de brazo dominante en el cambio de fase que se produce en el MZI. Esto es, en el rango de longitudes de onda en cual el FSR disminuye (la forma de las resonancias es más estrecha conforme nos acercamos al borde de banda), el desfase es mayor en el brazo largo y este hecho es una clara indicación de la región de propagación de onda lenta; por el contrario, en el rango de longitudes de onda en cual que el FSR aumenta, el desfase es mayor en el brazo corto donde está la guía corrugada. Tras esta aclaración y después de realizar el desarrollo teórico partiendo del hecho de que el desfase entre dos mínimos es 2π , se ha llegado a las siguientes ecuaciones:

$$N_G(\text{Desfase mayor en brazo largo}) = n_G^{\text{ref}} \left(1 + \frac{\Delta L}{L} \right) + \frac{\lambda_{\text{min1}} \lambda_{\text{min2}}}{\Delta L (\lambda_{\text{min1}} - \lambda_{\text{min2}})} \quad (7)$$

$$N_G(\text{Desfase mayor en brazo corto}) = n_G^{\text{ref}} \left(1 + \frac{\Delta L}{L} \right) - \frac{\lambda_{\text{min1}} \lambda_{\text{min2}}}{\Delta L (\lambda_{\text{min1}} - \lambda_{\text{min2}})} \quad (8)$$

donde $\Delta L=720\mu\text{m}$ es el incremento de longitud existente entre el brazo corto y el largo del MZI, L es la longitud de la guía corrugada y $n_G^{\text{ref}}=4.6$ es el índice de grupo de referencia aproximado de una guía de silicio de 400 nm de ancho y 220 nm de alto.

Así, la dependencia espectral resultante de la velocidad de grupo se deduce de las ecuaciones anteriores y se representa en la Fig. 25.

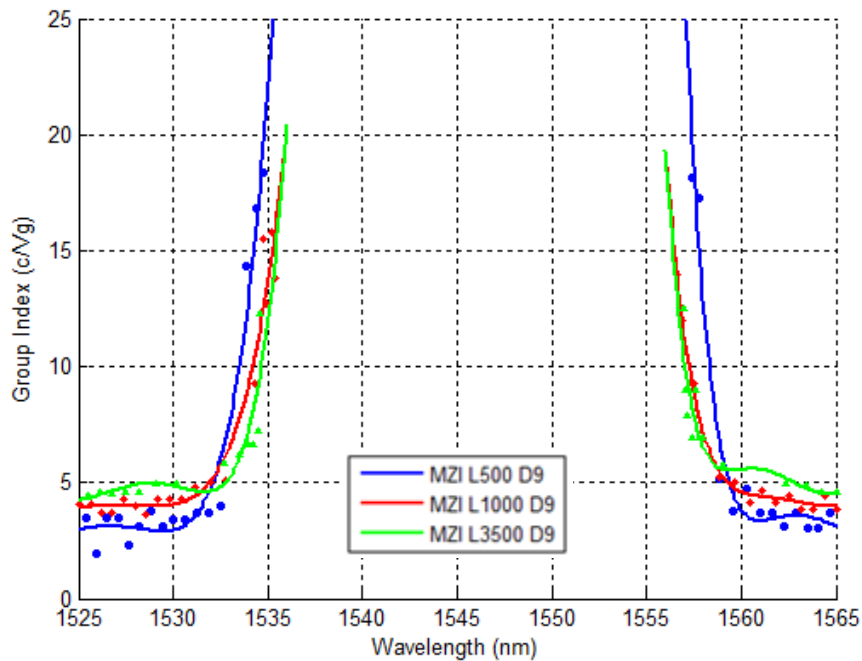


Fig. 25: Dependencia espectral del índice de grupo para los MZIs con guías corrugadas de distinta longitud.

El índice de grupo máximo medido es $n_G=25$ para el MZI con la guía corrugada de $L=500\mu\text{m}$ correspondiente a una velocidad de grupo mínima de $v_G=0.04c$. Por lo tanto, queda demostrado que se pueden lograr fácilmente velocidades de grupo moderadamente bajas en estructuras con guías corrugadas fabricadas con un proceso CMOS convencional. Estos resultados permiten demostrar que las guías de onda lenta pueden ser, sin duda, implementadas en circuitos fotónicos integrados para la realización de dispositivos más eficientes y más pequeños.

Como se ha comentado en el apartado II.2, la baja velocidad de grupo proporciona efectos beneficiosos como estructuras más cortas y con menores consumos de potencia. Sin embargo, también se comentó el hecho de que esta reducción en la velocidad de grupo del modo aumentará el efecto de cualquier otro fenómeno físico que se dé en la estructura, incluyendo los negativos: absorción, pérdidas por rugosidad,... Así, uno de los efectos negativos de más relevancia en el diseño de estructuras de onda lenta es el aumento de las pérdidas de propagación por rugosidad cuando la velocidad de grupo del modo guiado es baja. Además, este parámetro es de gran importancia cuando hablamos de moduladores porque afecta mucho a la relación de extinción del dispositivo y por tanto al funcionamiento de este. Es por ello que se ha querido estimar las pérdidas de propagación de las estructuras diseñadas.

Las pérdidas de de propagación se han estimado usando el método cut-back [24]. Para tal propósito, se han empleado las guías corrugadas de diferente longitud diseñadas (en este caso se han usado las guías de $L=500$, 1000 y $3500\mu\text{m}$ de longitud).

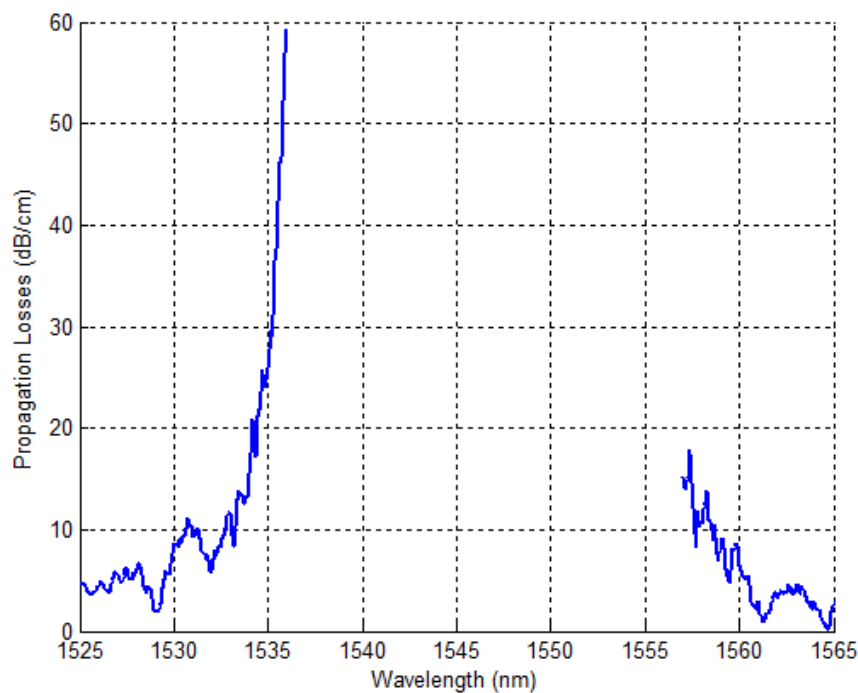


Fig. 26: Dependencia espectral de las pérdidas de propagación estimadas con el método cut-back.

Como se puede observar en la Fig. 26, las pérdidas de propagación se han estimado alrededor de 5-10dB/cm en la región de frecuencia plana fuera del band-gap. Además, y como era de esperar, se observa un claro y abrupto incremento de las pérdidas conforme nos acercamos a la región de onda lenta alcanzando pérdidas de propagación de hasta 60dB/cm.

De cualquier forma, es difícil predecir como incrementan las pérdidas de propagación en el régimen de luz lenta y, debido a problemas de alineamiento en la medida de laboratorio, el método cut-back no te permite obtener una estimación exacta de las pérdidas de propagación en el régimen de onda lenta.

Es por ello que hemos desarrollado y demostrado experimentalmente un nuevo método basado en el análisis del espectro de transmisión de MZIs asimétricos que te permite calcular las pérdidas de propagación teniendo en cuenta la estructura completa del MZI (incluyendo el divisor/combinador de entrada/salida) y no sólo las guías rectas como en el método cut-back.

La principal ventaja de nuestro método es que no depende del alineamiento en la medida del laboratorio, es decir, que el alineamiento no es un factor crítico en la caracterización. Para aplicar dicho método, se necesita un conjunto de MZIs idénticos pero con distintas diferencias de caminos (ΔL), y las pérdidas de propagación se calculan a partir de los campos mínimo y máximo del espectro interpolándolos linealmente en función de ΔL .

Este método se demostró para un conjunto de MZIs con guías rib convencionales y uno de los trabajos futuros que se pretender llevar a cabo es diseñar y fabricar una muestra con un conjunto de 3 MZIs con distintos ΔL y una guía corrugada en el brazo corto como los que se han caracterizado, con el fin de aplicar nuestro método para poder así obtener de forma más exacta y fiable las pérdidas de propagación que se producen en las estructuras diseñadas [25].

IV. CONCLUSIONES

Se han fabricado y caracterizado guías corrugadas en una oblea de silicio de 220 nm de altura. Primero, se ha evaluado la influencia de la dosis de exposición deep-UV en la posición espectral del borde de banda. De hecho, las corrugaciones se han redondeado durante la fabricación lo que conlleva a desviaciones en la longitud de onda con respecto a los valores deseados. De cualquier forma, una primera medida preliminar nos ha permitido localizar eficientemente las muestras que tienen características relevantes estableciendo, por tanto, la correspondencia entre la dosis de exposición deep-UV y la posición espectral adecuada del band-gap.

A continuación se ha evaluado la influencia de la longitud de la guía corrugada en la profundidad del band-gap, y hemos obtenido una relación de extinción máxima del band-gap de 33dB aproximadamente para una guía de longitud $L=1000\mu\text{m}$.

En tercer lugar, se han caracterizado Interferómetros Mach-Zehnder asimétricos con una guía corrugada en el brazo corto y una guía rib convencional en el brazo largo. Los resultados experimentales muestran valores del índice de grupo por encima de $n_G=20$ para el MZI con la guía corrugada de $L=500\mu\text{m}$ mostrando comportamiento de onda lenta cerca de 1550 nm. El índice de grupo obtenido corresponde a la mínima velocidad de grupo de $v_G=0.04c$. Por tanto, esto demuestra que velocidades de grupo relativamente bajas se pueden conseguir en estructuras de guías corrugadas fabricadas con procesos CMOS convencionales.

Finalmente, se han estimado las pérdidas de propagación en 5-10dB/cm para las longitudes de onda en la región plana de frecuencia y se ha demostrado la penalización de pérdidas de propagación en el régimen de onda lenta aunque no se ha podido medir de manera fiable debido a variaciones de potencia y desplazamientos de frecuencia entre las distintas guías fabricadas de distinta longitud ya que el método empleado ha sido el método cut-back en el cual el problema del alineamiento en la medida de laboratorio es un factor crítico.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos el apoyo financiero por parte del Ministerio de Ciencia e Innovación a través de los contratos de SINADEC TEC2008-06333, DEMOTEC TEC2008-06360 y PROMETEO 2010-087 R&D Excellency Program (NANOMET) así como el del proyecto europeo HELIOS FP7-ICT 224312.

También me gustaría aprovechar dar las gracias a Pablo, por su gran ayuda y apoyo como director de este trabajo. Gracias también a Javier Martí, director del NTC, por darme la oportunidad de disfrutar del NTC. Dar también las gracias a mis compañeros Antoine, Mariam y Sara a los que les deseo mucha suerte en su futuro profesional.

Finalmente, me gustaría dedicar este trabajo a mis padres y hermana que lo son todo para mí.

A todos, gracias.

Valencia, Noviembre 2010.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Luxtera, Inc, "Fiber will displace Cooper sooner than you think."
- [2] M. Lipson, "Guiding, Modulating, and Emitting Light on Silicon-Challenges and Opportunities," *J. Lightwave Technol.*, vol. 23, p. 4222, 2005.
- [3] Intel, Inc., http://blogs.intel.com/research/2007/07/40g_modulator.php.
- [4] C. Gunn, "CMOS Photonics - SOI Learns a New Trick," *Luxtera*.
- [5] W. B. D. Taillaert, R. Baets, "Efficient coupling between submicron SOI-waveguides and single-mode fibers," University of Gent, 2003.
- [6] R. C. A. Melloni, G. Cusmai, F. Morichetti and M. Martinelli, "Waveguide index contrast: implications for passive integrated optical components," Politecnico di Milano
- [7] R. Soref and B. Bennett, "Electrooptical effects in silicon," *Quantum Electronics, IEEE Journal of*, vol. 23, pp. 123-129, 1987.
- [8] R. Soref and J. Lorenzo, "All-silicon active and passive guided-wave components for $\lambda= 1.3$ and $1.6 \mu\text{m}$," *Quantum Electronics, IEEE Journal of*, vol. 22, pp. 873-879, 1986.
- [9] I. Rsoft Design Group, "BeamPROP 8.0 User Guide," 2000.
- [10] H. Gersen, T. J. Karle, R. J. P. Engelen, W. Bogaerts, J. P. Korterik, N. F. van Hulst, T. F. Krauss, and L. Kuipers, "Real-Space Observation of Ultraslow Light in Photonic Crystal Waveguides," *Physical Review Letters*, vol. 94, p. 073903, 2005.
- [11] Y. A. Vlasov, M. O'Boyle, H. F. Hamann, and S. J. McNab, "Active control of slow light on a chip with photonic crystal waveguides," *Nature*, vol. 438, pp. 65-69, 2005.
- [12] F. Xia, L. Sekaric, M. Oboyle, and Y. Vlasov, "Coupled resonator optical waveguides based on silicon-on-insulator photonic wires," *Applied Physics Letters*, vol. 89, pp. 041122-041122-3, 2006.
- [13] F. Xia, L. Sekaric, and Y. Vlasov, "Ultracompact optical buffers on a silicon chip," *Nat Photon*, vol. 1, pp. 65-71, 2007.
- [14] M. Soljacic, S. G. Johnson, S. Fan, M. Ibanescu, E. Ippen, and J. D. Joannopoulos, "Photonic-crystal slow-light enhancement of nonlinear phase sensitivity," *J. Opt. Soc. Am. B*, vol. 19, pp. 2052-2059, 2002.
- [15] D. M. Beggs, T. P. White, L. O'Faolain, and T. F. Krauss, "Ultracompact and low-power optical switch based on silicon photonic crystals," *Opt. Lett.*, vol. 33, pp. 147-149, 2008.
- [16] M. Povinelli, S. Johnson, and J. Joannopoulos, "Slow-light, band-edge waveguides for tunable time delays," *Opt. Express*, vol. 13, pp. 7145-7159, 2005.
- [17] J. Garcia, P. Sanchis, A. Martinez, and J. Martí, "1D periodic structures for slow-wave induced non-linearity enhancement," *Opt. Express*, vol. 16, pp. 3146-3160, 2008.
- [18] L. Gu, W. Jiang, X. Chen, L. Wang, and R. T. Chen, "High speed silicon photonic crystal waveguide modulator for low voltage operation," *Applied Physics Letters*, vol. 90, pp. 071105-3, 2007.
- [19] A. Brimont, J. Vicente Galán, J. Maria Escalante, J. Martí, and P. Sanchis, "Group-index engineering in silicon corrugated waveguides," *Opt. Lett.*, vol. 35, pp. 2708-2710.
- [20] J. G. Rupérez, "Estudio de los fenómenos de onda lenta y dispersión en estructuras periódicas de fotónica integrada," in *Departamento de Comunicaciones Valencia: Universidad Politécnica Valencia*, 2008.
- [21] A. Brimont, "Toward compact and high speed silicon modulators," in *Departamento de comunicaciones Valencia: Universidad Politécnica Valencia*, 2010.
- [22] I. Rsoft Design Group, "BandSOLVE 4.1 User Guide," 2000.
- [23] A. Brimont, P. Sanchis, J. V. Galan, J. M. Fedeli, A. M. Gutierrez, and J. Martí, "Experimental demonstration of moderately low group velocity in silicon rib photonic wire Bragg gratings," in *LEOS Annual Meeting Conference Proceedings, 2009. LEOS '09. IEEE*, 2009, pp. 713-714.
- [24] Y. Vlasov and S. McNab, "Losses in single-mode silicon-on-insulator strip waveguides and bends," *Opt. Express*, vol. 12, pp. 1622-1631, 2004.
- [25] Ana M. Gutierrez, A. Brimont, J. Martí, P. Sanchis, "Method to simultaneously extract the propagation losses and branching asymmetry of a Mach-Zehnder Interferometer," *Photonics Technology Letters*, Submitted and under review, 2010.

ANEXO I. PROCESO DE NANOFABRICACIÓN

Se entiende por proceso de fabricación el proceso mediante el cual a partir de la oblea SOI de partida, se obtiene físicamente nuestra estructura diseñada previamente. El proceso tecnológico de fabricación es, a grandes rasgos, el siguiente:

El primer paso es depositar una capa de resina sobre la oblea de partida. El elemento encargado de la distribución de la resina sobre la oblea es el Coater. La funcionalidad del Coater es buscar una relación entre el espesor de la resina con la que cubrir la oblea y la velocidad para cubrirla de la manera más uniforme posible. La Fig. 27 muestra una imagen de una oblea sobre la que se depositará la resina y una imagen del Coater.

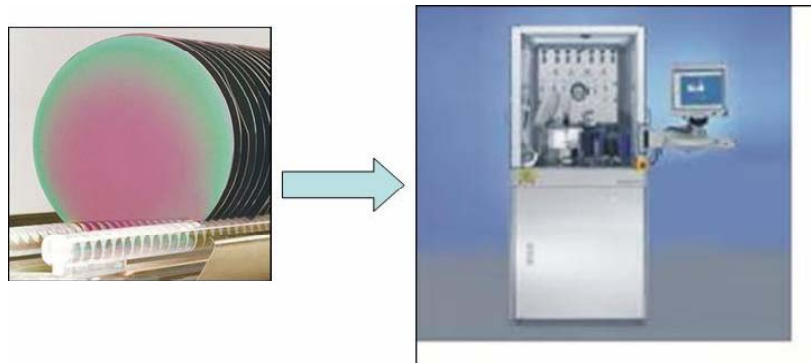


Fig. 27: Detalle de una oblea sobre la que se depositará la resina y del Coater.

Las estructuras que desean fabricarse se exponen sobre dicha capa de resina mediante litografía óptica donde una máscara con el patrón de la estructura se proyecta sobre una película fotosensible, y el patrón en la película se transfiere a la oblea. La resolución en la fabricación depende de la longitud de onda de iluminación usada en el proceso litográfico. Se consigue una mayor resolución cuanto más baja sea la longitud de onda de iluminación. Básicamente se utilizan dos tipos de litografía: litografía *deep-UV* y litografía por haz de electrones (EBL, *e-beam lithography*). La primera es el tipo de litografía más usada en la industria microelectrónica para la fabricación a gran escala de circuitos microelectrónicos CMOS. Se utilizan longitudes de onda menores a 250 nm. Sin embargo, la adaptación de estas técnicas CMOS a estructuras nanofotónicas se traduce en resoluciones bajas y alto coste de producción. La litografía por haz de electrones es una alternativa a la litografía *deep-UV* y en este caso, el patrón de la estructura se escribe de manera secuencial en la foto-resina usando un haz de electrones muy focalizado ubicado en un sistema de vacío. Con EBL se consiguen mejores resoluciones y menores costes que con la litografía *deep-UV*. El elemento encargado de la exposición es el cañón de electrones. El cañón de electrones permite grabar motivos sobre resinas especiales que cambian sus propiedades al recibir electrones. El

dispositivo comercial usado para la litografía EBL es el Raith 150. La Fig. 28 muestra una imagen del cañón de electrones Raith.



Fig. 28: Detalle del cañón de electrones para la exposición de las muestras.

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

A continuación se revela la capa de resina, normalmente mediante ataques químicos, obteniéndose la máscara que permite transferir los diseños a la capa de silicio de la oblea mediante ataque inductivo de plasma (ICP, Inductive Coupled Plasma). El ICP permite pasar el motivo en la resina al substrato. Para ello crea un plasma de gases fluorados que atacan el silicio o el óxido de silicio, tanto mediante procesos físicos (sputtering) como químicos (recombinación). La Fig. 29 muestra una imagen del dispositivo encargado del ICP. El último paso será la limpieza de los restos de resina que quedan sobre la oblea.



Fig. 29: Detalle del dispositivo encargado del ataque inductivo de plasma ICP.

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

- **Resina positiva:** En este tipo de resinas se debe exponer, mediante el proceso de litografía, las zonas de la oblea en las que se quiere atacar el silicio. Es lo que se denomina diseño inverso ya que, por ejemplo, para fabricar una guía no hay que exponer la guía, sino dos franjas a ambos lados de la guía, denominadas trincheras, para así formar la guía original. El proceso de fabricación se muestra en la parte superior de la Fig. 30. Un ejemplo de guía fabricada siguiendo este proceso se muestra en la Fig. 31(a), donde se ilustra una imagen de barrido electrónico (SEM) de una guía donde se puede observar tanto la guía como las trincheras a ambos lados de la misma.
- **Resina negativa:** En este tipo de resinas será la parte no expuesta la que será eliminada cuando se realice el revelado, por lo que únicamente habrá que exponer las regiones de la oblea en las que no se atacará el silicio. Es lo que se denomina proceso directo ya que en este caso, siguiendo el ejemplo anterior, únicamente hay que exponer la guía. El proceso de fabricación se muestra en la parte central de la Fig. 30. Mediante el uso de resina negativa se consigue una menor rugosidad en las paredes de las guías, como se muestra en la Fig. 31, donde puede observarse una guía fabricada con resina positiva (Fig. 32(a)) y una guía fabricada con resina negativa (Fig. 32(b)).

El diseño directo es preferible ya que permite reducir los tiempos de exposición del proceso de litografía. Existe otra alternativa para conseguir un diseño directo utilizando una resina positiva:

- **Resina positiva + máscara de metal:** En este caso se siguen los mismos pasos descritos anteriormente para la resina positiva. Una vez obtenemos la máscara de resina después del revelado se deposita una máscara de metal haciendo uso de una técnica de evaporación (VPE – Vapor Phase Epitaxy). De esta forma, al eliminar la resina se obtendrá una máscara de metal directamente sobre las zonas de la oblea en las que no se quiere atacar el silicio (proceso conocido como lift-off). El proceso se muestra en la parte inferior de la Fig. 30. Este proceso permite una mayor verticalidad de las paredes pero sin embargo resulta más complejo. Un ejemplo de guía fabricada siguiendo este proceso se muestra en la imagen SEM de la Fig. 31(b).

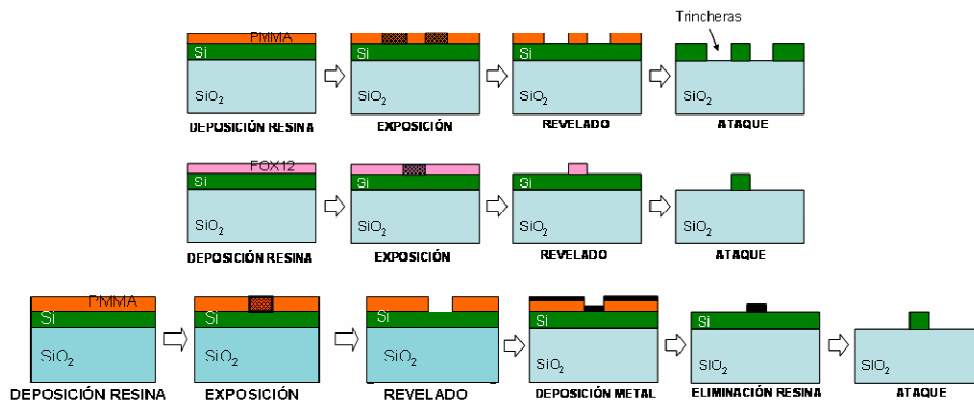


Fig. 30: Distintos procesos de fabricación basados en: resina positiva (arriba), resina negativa (centro) y resina positiva más una capa de metal ó lift-off (abajo).

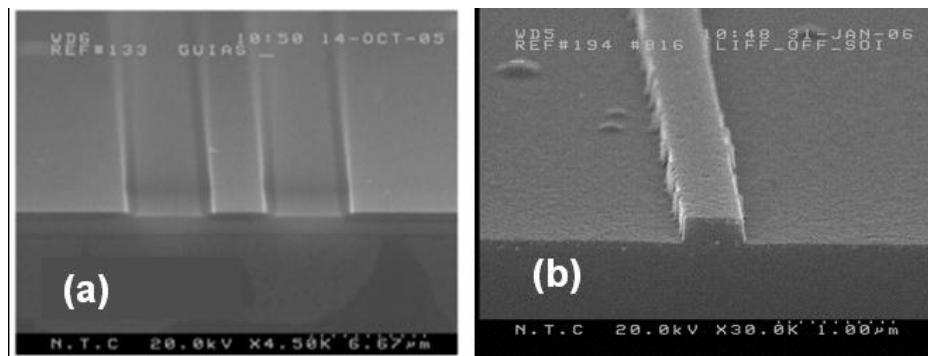


Fig. 31; Imágenes de barrido electrónico (SEM) de estructuras fabricadas mediante (a) resina positiva y (b) resina positiva más máscara de metal.

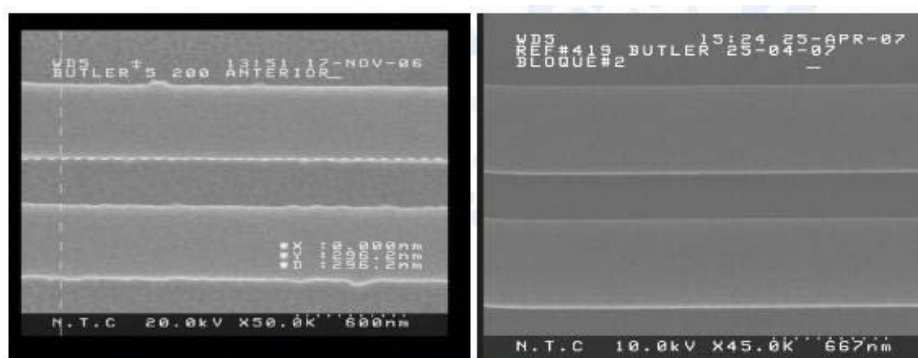


Fig. 32: Imágenes de guías fabricadas mediante (a) resina positiva y (b) resina negativa, donde puede observarse una menor rugosidad empleando resina negativa.

ANEXO II. JUSTIFICANTE DE ENVÍO DE ARTÍCULO

Como se comenta en la referencia [25], este artículo está enviado a la revista *Photonics Technology Letters* desde el día 19/10/2010 y está pendiente de aceptación.

Photonics Technology Letters



Method to simultaneously extract the propagation losses and branching asymmetry of a Mach-Zehnder Interferometer

Journal:	<i>Photonics Technology Letters</i>
Manuscript ID:	PTL-22776-2010
Manuscript Type:	Original Paper
Date Submitted by the Author:	19-Oct-2010
Complete List of Authors:	Gutierrez, Ana; Nanophotonic Technology Center, Photonics Devices; Nanophotonic Technology Center, Photonics Devices Brimont, Antoine; Nanophotonic Technology Center, Photonics Devices Sanchis, Pablo; Nanophotonic Technology Center, Photonics Devices Martí, Javier; Valencia Nanophotonics Technology Center, UPV
Key Words:	Integrated optics, Optical waveguides, Propagation, Silicon on insulator technology

SCHOLARONE™
Manuscripts