

# Separador de polarización integrado de altas prestaciones basado en estructuras sub-longitud de onda

José Manuel Luque-González<sup>(1)</sup>, Alaine Herrero-Bermello<sup>(2)</sup>, Alejandro Ortega-Moñux<sup>(1)</sup>, Marina Sánchez-Rodríguez<sup>(1)</sup>, Aitor V. Velasco<sup>(2)</sup>, Jens H. Schmid<sup>(3)</sup>, Pavel Cheben<sup>(3,4)</sup>, Íñigo Molina-Fernández<sup>(1,5)</sup>, Robert Halir<sup>(1,5)</sup>.  
 jmlg@ic.uma.es, alaine.herrero@csic.es, aom@ic.uma.es, msr@ic.uma.es, a.villafranca@csic.es, jens.Schmid@nrc-cnrc.gc.ca, pavel.Cheben@nrc-cnrc.gc.ca, imf@ic.uma.es, robert.halir@ic.uma.es.

<sup>(1)</sup> Universidad de Málaga, Departamento de Ingeniería de Comunicaciones, ETSI Telecomunicación, Málaga 29071, Spain.

<sup>(2)</sup> Instituto de Óptica Daza de Valdés, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), Madrid 28006, Spain.

<sup>(3)</sup> National Research Council Canada, 1200 Montreal Road, Bldg. M50, Ottawa K1A 0R5, Canada.

<sup>(4)</sup> Center for Research in Photonics, University of Ottawa, Ottawa K1N6N5, Canada.

<sup>(5)</sup> Bionand Center for Nanomedicine and Biotechnology, Parque Tecnológico de Andalucía, Málaga 29590, Spain.

**Abstract-** Polarization management is a key factor in photonics integration platforms with high birefringence such as Silicon-On-Insulator. Here we design a directional coupler polarization beam splitter composed of two subwavelength waveguides, which only differ in the tilt angle of the silicon segments. Our simulations predict an extinction ratio higher than 20 dB over an 86 nm bandwidth with negligible losses. The fabricated device is only 14  $\mu\text{m}$  long, covers a 72 nm bandwidth with sub-decibel insertion losses and exhibits an extinction ratio in excess of 15 dB.

## I. INTRODUCCIÓN

Los acopladores direccionales son una solución frecuente para separar las polarizaciones en las plataformas de fotónica integrada que tienen alta birrefringencia, como es el caso de Silicon-on-Insulator (SOI) [1-5]. Estos dispositivos pueden ser clasificados en dos tipos, acopladores direccionales simétricos y asimétricos. En un acoplador direccional simétrico las dos guías que lo constituyen son idénticas, cumpliéndose para ambas polarizaciones la condición de *phase matching*. Si se utilizan guías de onda muy birrefringentes, como se suele hacer en SOI, cada polarización presenta una longitud de acoplo diferente, esto es,  $L_{\pi}^{\text{TE}} \neq L_{\pi}^{\text{TM}}$ . Diseñando adecuadamente el acoplador se puede conseguir que estas dos longitudes cumplan con la condición:  $L_{PBS} = mL_{\pi}^{\text{TE}} = nL_{\pi}^{\text{TM}}$ , donde  $m$  y  $n$  son enteros y  $|m - n|$  es un número impar. De esta forma, cada polarización aparecerá a la salida del dispositivo en un puerto diferente, consiguiendo implementar la funcionalidad de divisor de polarización. Sin embargo, para satisfacer la condición anterior se requiere habitualmente imponer valores de  $m$  y  $n$  relativamente grandes, lo que conduce finalmente a dispositivos muy largos. Además, estos separadores de polarización basados en acopladores direccionales simétricos suelen ser muy sensibles a los errores de fabricación, ya que dichos errores afectan de forma diferente a cada polarización y la condición referida anteriormente deja de cumplirse. Una forma bien conocida de superar estos problemas es diseñar separadores de polarización implementados mediante acopladores direccionales asimétricos. Este tipo de dispositivos se diseñan para conseguir que la condición de *phase matching* se cumpla para una y sólo una de las dos polarizaciones, acoplándose ésta al segundo brazo del acoplador direccional y apareciendo a la

salida en el puerto *cross*. La otra polarización, al no cumplir el *phase matching*, no acoplará potencia alguna al otro brazo del acoplador, apareciendo a la salida en el puerto *bar* con independencia de la longitud del dispositivo. En general, los separadores de polarización basados en acopladores asimétricos suelen ser mucho más compactos y robustos frente a errores de fabricación, ya que la condición de diseño es mucho más fácil de cumplir. Por ejemplo, si la polarización TM es la que satisface el *phase matching*, la longitud del dispositivo es simplemente  $L_{PBS} = L_{\pi}^{\text{TM}}$ . La principal dificultad a la hora de implementar acopladores direccionales asimétricos recae normalmente en conseguir la asimetría deseada entre los brazos del acoplador sin añadir ninguna dificultad adicional en el proceso de fabricación.

En este trabajo se propone un separador de polarización compacto de altas prestaciones implementado mediante un acoplador direccional asimétrico basado en guías periódicas sub-longitud de onda (SWG - *subwavelength gratings*) [6-7].

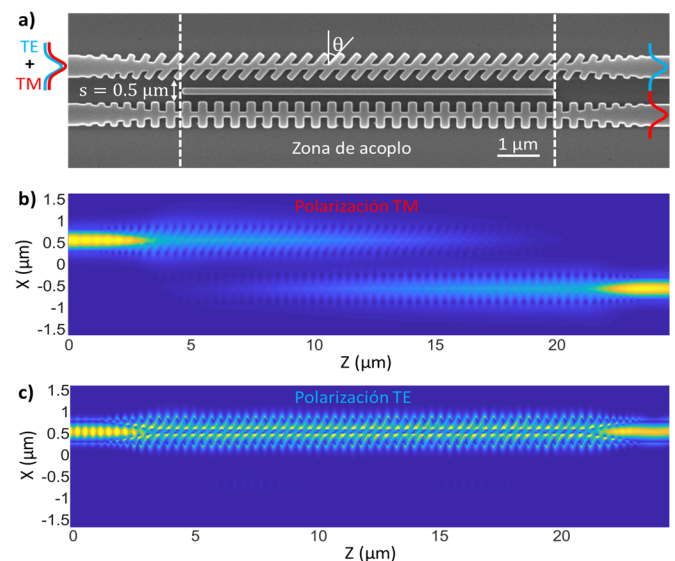


Fig. 1. (a) Imagen SEM (*scanning electron microscope*) de uno de los dispositivos fabricados antes de la deposición de la cubierta de  $\text{SiO}_2$ . (b), (c) Simulación electromagnética de la propagación de campo para las polarizaciones TM y TE respectivamente.

En el dispositivo diseñado, la asimetría entre los brazos del acoplador se consigue girando los segmentos de silicio de una de las dos guías SWG, tal y como se muestra en la Fig. 1 (a). Se puede demostrar que la inclinación de estos segmentos afecta únicamente a la polarización TE, con una mínima influencia en la polarización TM [8]. Por lo tanto, la polarización TM seguirá cumpliendo la condición de *phase matching* con independencia del ángulo de giro  $\theta$ , permitiendo el acoplo de luz a la otra guía y apareciendo a la salida en el puerto *cross* [ver Fig. 1(b)]. Por otro lado, el giro de los segmentos de silicio rompe la condición de *phase matching* para la polarización TE, apareciendo a la salida en el puerto *bar* [ver Fig. 1(c)]. Finalmente, la fina tira central situada entre ambos brazos permitirá optimizar el ancho de banda de funcionamiento del dispositivo, tal y como se explicará más adelante. El dispositivo ha sido fabricado y caracterizado experimentalmente, consiguiendo un ancho de banda de 72 nm para un ratio de extinción superior a 15 dB con pérdidas sub-decibelio en toda la banda.

## II. DISEÑO DEL DISPOSITIVO

De acuerdo con la teoría de modos acoplados [9], la potencia transferida entre dos guías paralelas es inversamente proporcional a la diferencia entre los índices efectivos de los modos de cada guía,  $\Delta n_{\text{eff}}$ . En nuestro diseño se parte de dos guías SWG paralelas de ancho  $w = 0.6 \mu\text{m}$ , período  $\Lambda = \Lambda_0 / \cos(\theta)$  ( $\Lambda_0 = 0.275 \mu\text{m}$ ) y ciclo de trabajo del 50%, separadas entre sí una distancia  $s = 0.5 \mu\text{m}$ . En la Fig. 2 se muestran las diferencias de índices efectivos entre los modos fundamentales de ambas guías para ambas polarizaciones. Tal y como predice la teoría [8], la influencia del ángulo de inclinación es mínima para la polarización TM, siendo ésta mucho más notoria en la polarización TE. Para este diseño se ha escogido un ángulo de inclinación  $\theta = 40^\circ$ , ya que aumentar más dicho ángulo incrementaría demasiado el período  $\Lambda$  y sacaría la estructura periódica del régimen de funcionamiento SWG.

Una vez conseguida la asimetría, se optimiza el dispositivo para la polarización TM. Los acopladores direccionales son en general dispositivos de banda estrecha, limitados por la gran variación con la longitud de onda de la longitud de acoplo:

$$L_{\pi}^{TM}(\lambda) = \frac{\lambda}{2(n_1^{TM}(\lambda) - n_2^{TM}(\lambda))} \quad (1)$$

donde  $n_{1,2}^{TM}$  son los índices efectivos de los supermodos par e impar de la estructura completa. Se puede demostrar que la variación con la longitud de onda de la longitud de acoplo en un acoplador direccional es, en primera instancia,

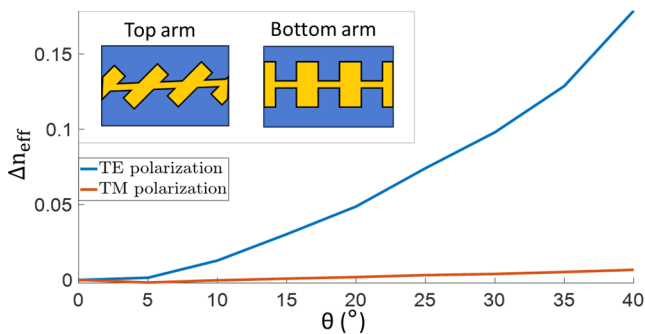


Fig. 2. Diferencia entre los índices efectivos de los modos fundamentales de la guía superior e inferior del acoplador direccional, en función del ángulo de inclinación  $\theta$ . La condición de *phase matching* se cumple sólo para  $\Delta n_{\text{eff}} = 0$ .

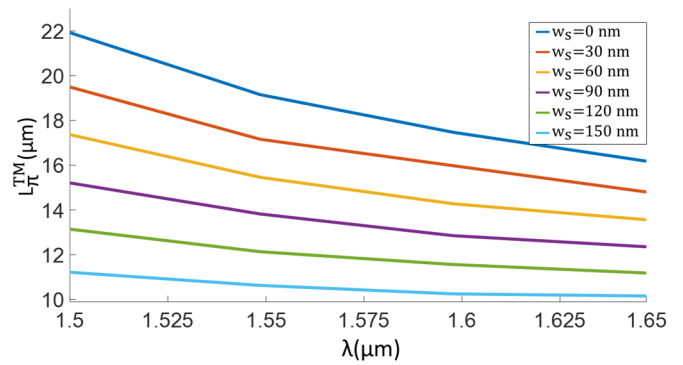


Fig. 3. Longitud de acoplo  $L_{\pi}^{TM}$ , en función de la longitud de onda, para distintos valores de anchura de la tira central de silicio  $w_s$ .

proporcional a  $(L_{\pi}^{TM})^2$ . Por lo tanto, disminuyendo la longitud de acoplo del dispositivo se conseguirá aumentar su ancho de banda. Para conseguir dicha disminución en la longitud de acoplo, se añade entre las dos guías SWG una estrecha tira de silicio de anchura  $w_s$ . El índice efectivo del supermodo impar,  $n_2^{TM}$ , apenas cambia tras añadir esta tira, al ser prácticamente nulo y con simetría impar en el punto donde ésta se ha colocado. Por otro lado, el supermodo par no es nulo en el centro de la estructura, viendo aumentado su índice efectivo  $n_1^{TM}$  ante la presencia de la guía central. Por lo tanto, el denominador de la Eq. (1) aumenta notablemente tras añadir esta tira de silicio, disminuyendo la longitud de acoplo y reduciendo de esta forma su variación con la longitud de onda. En la Fig. 3 se muestra como la longitud de acoplo  $L_{\pi}^{TM}$  disminuye a medida que aumenta la anchura de la tira central de silicio  $w_s$ . Asimismo, también se puede ver claramente como disminuye la dependencia de  $L_{\pi}^{TM}$  con la longitud de onda para valores crecientes de  $w_s$ . En la Fig. 4(a) se muestra el funcionamiento en simulación del dispositivo diseñado para

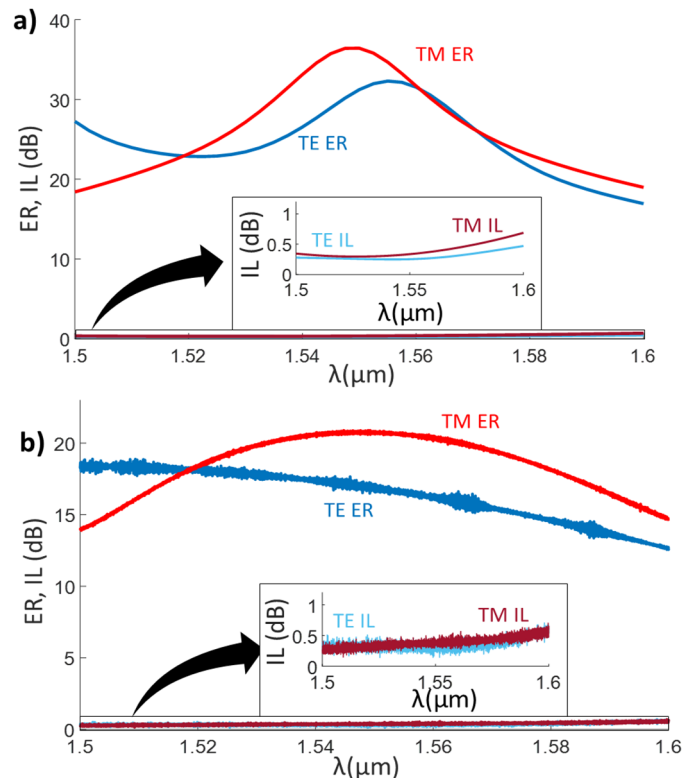


Fig. 4. (a) Simulación numérica de las pérdidas de inserción (IL) y el ratio de extinción (ER) del dispositivo propuesto. (b) Resultados experimentales de las pérdidas de inserción y el ratio de extinción del dispositivo fabricado.

una anchura de la tira central  $w_s = 150$  nm. Las figuras de mérito del dispositivo son las pérdidas de inserción y el ratio de extinción para cada polarización, definidas como:  $IL^{TE} = P_{\text{bar}}^{TE}/P_{\text{in}}^{TE}$ ,  $IL^{TM} = P_{\text{cross}}^{TM}/P_{\text{in}}^{TM}$ ,  $ER^{TE} = P_{\text{cross}}^{TE}/P_{\text{bar}}^{TE}$ , y  $ER^{TM} = P_{\text{bar}}^{TM}/P_{\text{cross}}^{TM}$ , donde  $P_{\text{bar}}^{TE/TM}$  y  $P_{\text{cross}}^{TE/TM}$  son las potencias en los modos fundamentales TE/TM en el puerto bar y en el puerto cross y  $P_{\text{in}}^{TE/TM}$  es la potencia en el modo fundamental TE/TM en el puerto de entrada. El dispositivo optimizado tiene un ratio de extinción mayor a 20 dB y unas pérdidas de inserción menores a 1 dB en un ancho de banda de 86 nm.

### III. RESULTADOS EXPERIMENTALES

El dispositivo propuesto ha sido fabricado en una oblea de silicio de 220 nm de grosor que reposa sobre  $2 \mu\text{m}$  de sustrato de  $\text{SiO}_2$ . Tras el grabado del dispositivo, se añade una cubierta protectora de  $2.2 \mu\text{m}$  de grosor [12]. Una vez fabricado, el dispositivo es caracterizado utilizando el siguiente *setup* (Ver Fig. 5): Un haz de luz linealmente polarizado emitido por un láser sintonizable es inyectado en una fibra mantenedora de la polarización. Para controlar la polarización en el chip, la fibra mantenedora se encuentra montada sobre una etapa giratoria que, junto con un polarizador Glan-Thomson, permiten colocar la fibra de tal forma que se inyecte en el chip la polarización deseada. Una vez la luz pasa por el chip es enfocada en un fotodetector mediante un objetivo de microscopio. En la Fig. 4(b) se muestran las prestaciones del dispositivo medido, consiguiendo un ratio de extinción mayor a 15 dB y unas pérdidas de inserción menores a 1 dB en un ancho de banda de 72 nm para el dispositivo nominal.

### IV. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha propuesto y demostrado experimentalmente un separador de polarización basado en un metamaterial sub-longitud de onda. El dispositivo propuesto es un acoplador direccional donde se controla la condición de *phase matching* de la polarización TE con un mínimo impacto en la polarización TM. Este control sobre la simetría del dispositivo se ha conseguido utilizando estructuras sublongitud de onda inclinadas. Posteriormente, se ha optimizado el dispositivo añadiendo una tira central que permite aumentar el ancho de banda del dispositivo de una forma sencilla. El dispositivo propuesto en este trabajo no solo presenta altas prestaciones, sino que además muestra como las guías SWG inclinadas abren un nuevo abanico de dispositivos ópticos integrados para el control de la polarización.

### AGRADECIMIENTOS

Universidad de Málaga; Ministerio de Economía y Competitividad (MINECO) (TEC2016-80718-R); Ministerio de Educación, Cultura y Deporte (MECD) (FPU16/06762), Fondo Europeo de Desarrollo Regional—FEDER, Proyecto I+D+i en el marco del Programa Operativo FEDER Andalucía 2014-2020 (UMA18-FEDERJA-219), Spanish Ministry of Science, Innovation and Universities (MÍCINN) under grants CDTI SNEO-20181232 (Alcyon Photonics S.L.) and RTI2018-097957-B-C33; Community of Madrid – FEDER funds (S2018/NMT-4326); Horizon 2020 research and innovation program under the Marie Skłodowska-Curie grant No. 734331.

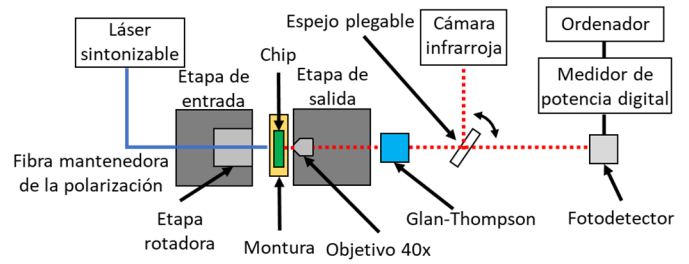


Fig. 5. Esquemático del *setup* utilizado para la caracterización experimental del dispositivo.

### REFERENCIAS

- [1] D. Dai and J. E. Bowers, "Novel concept for ultracompact polarization splitter-rotator based on silicon nanowires," *Opt. Express* 19, 10940 (2011).
- [2] J. Wang, D. Liang, Y. Tang, D. Dai, and J. E. Bowers, "Realization of an ultra-short silicon polarization beam splitter with an asymmetrical bent directional coupler," *Opt. Lett.* 38, 4 (2013).
- [3] F. Zhang, H. Yun, Y. Wang, Z. Lu, L. Chrostowski, and N. A. F. Jaeger, "Compact broadband polarization beam splitter using a symmetric directional coupler with sinusoidal bends," *Opt. Lett.* 42, 235 (2017).
- [4] B. Ni and J. Xiao, "Ultracompact and Broadband Silicon-Based Polarization Beam Splitter Using an Asymmetrical Directional Coupler," *IEEE J. Quantum Electron.* 53, 1 (2017).
- [5] Y. Tian, J. Qiu, C. Liu, S. Tian, Z. Huang, and J. Wu, "Compact polarization beam splitter with a high extinction ratio over S + C + L band," *Opt. Express* 27, 999 (2019).
- [6] R. Halir, A. Ortega-Moñux, D. Benedikovic, G. Z. Mashanovich, J. G. Wangüemert-Pérez, J. H. Schmid, Í. Molina-Fernández, and P. Cheben, "Subwavelength-grating metamaterial structures for silicon photonic devices," *Proc. IEEE*, 106, 2144 (2018).
- [7] P. Cheben, R. Halir, J. H. Schmid, H. A. Atwater, and D. Smith, "Subwavelength integrated photonics," *Nature*, 560, 565 (2018).
- [8] J. M. Luque-González, A. Herrero-Bermello, A. Ortega-Moñux, Í. Molina-Fernández, A. V. Velasco, P. Cheben, J. H. Schmid, S. Wang, and R. Halir, "Tilted subwavelength gratings: controlling anisotropy in metamaterial nanophotonic waveguides," *Opt. Lett.*, 43, 4691 (2018).
- [9] C.-L. Chen, *Foundations for Guided-Wave Optics* (John Wiley & Sons, Inc., 2006).
- [10] D. W. Kim, M. H. Lee, Y. Kim, and K. H. Kim, "Planar-type polarization beam splitter based on a bridged silicon waveguide coupler," *Opt. Express* 23, 998 (2015).
- [11] Y. Kim, M. H. Lee, Y. Kim, and K. H. Kim, "High-extinction-ratio directional-coupler-type polarization beam splitter with a bridged silicon wire waveguide," *Opt. Lett.* 43, 3241 (2018).
- [12] "Applied Nanotools Inc. Canada," <https://www.appliednt.com/nanosoi/>.