

Demostración experimental de un acoplador de interferencia multimodal insensible a la polarización basado en un metamaterial sublongitud de onda

Experimental demonstration of a polarization insensitive multimode interference coupler based on a subwavelength grating metamaterial

Carlos PÉREZ-ARMENTA ⁽¹⁾, Alejandro ORTEGA-MOÑUX ⁽¹⁾, José Manuel LUQUE-GONZÁLEZ ⁽¹⁾, Robert HALIR ⁽¹⁾, Jens SCHMID ⁽²⁾, Pavel CHEBEN ⁽²⁾, Iñigo MOLINA-FERNÁNDEZ ⁽¹⁾ y J. Gonzalo WANGÜEMERT-PÉREZ ⁽¹⁾

1. Telecommunication Research Institute (TELMA), Universidad de Málaga, E.T.S. Ingeniería de Telecomunicación, Bulevar Louis Pasteur 35, 29010, Málaga (Spain)
2. National Research Council Canada, Ottawa, Ontario K1A 0R6, Canada

Persona de contacto: Carlos PÉREZ-ARMENTA (cpa@ic.uma.es).

RESUMEN:

En este trabajo se demuestra experimentalmente un acoplador 3 dB 90° basado en un dispositivo de interferencia multimodal 2×2 independiente a la polarización. El dispositivo se ha desarrollado en una plataforma de silicio sobre aislante de 220 nm de grosor. Haciendo uso de metamateriales periódicos que ofrecen un control avanzado de las propiedades electromagnéticas de la luz, se consigue diseñar un acoplador que presenta, tanto para las polarizaciones TE y TM, unas pérdidas de inserción, pérdidas dependientes de la polarización y desbalanceo menores que 1 dB y un error de fase inferior a 5° en el rango de longitudes de onda de 1500 nm a 1560 nm. El área ocupada por el dispositivo es de solo 3.5 μm × 47.25 μm y se ha fabricado utilizando un proceso de un solo paso de grabado con un tamaño mínimo fabricado de 100 nm, compatible con litografía de ultravioleta profundo.

Palabras clave: metamateriales, guías periódicas sublongitud de onda, interferencia multimodal, insensibilidad a la polarización.

ABSTRACT:

In this work a 3 dB 90° coupler based on a polarization independent multimode interference coupler is demonstrated. The device has been fabricated on a 220 nm-thick SOI platform. Leveraging the advanced control of light's electromagnetic properties offered by periodic metamaterials, the fabricated multimode interference coupler achieves for both TE and TM polarizations insertion loss, polarization dependent loss and imbalance of less than 1 dB and phase errors below 5° in the wavelength range of 1500 nm to 1560 nm. The device footprint is 3.5 μm × 47.25 μm and it has been fabricated using a single-etch process with a minimum feature size of 100 nm compatible with immersion deep-UV lithography.

Keywords: metamaterials, subwavelength gratings, multimode interference, polarization insensitivity.

1.- Introducción

La plataforma de silicio sobre aislante (silicon-on-insulator, SOI) constituye una de las alternativas más maduras para implementar dispositivos ópticos integrados [1]. El alto contraste de índice de refracción y la compatibilidad con los procesos de fabricación de dispositivos microelectrónicos hacen posible el desarrollo de circuitos ópticos muy compactos y de bajo coste como transceptores para comunicaciones [2], sensores bioquímicos [3], circuitos programables fotónicos [4], arrays de antenas ópticas [5] y dispositivos para procesado cuántico de la información [6].

Los dispositivos de interferencia multimodal (multimode interference, MMI) son bloques funcionales básicos empleados en muchos sistemas ópticos integrados, ya que proveen de grandes anchos de banda y buenas tolerancias a errores de fabricación [7]. Sin embargo, los MMI utilizan guías de onda multimodales anchas y muy birrefringentes habitualmente optimizadas para modos Transversales Eléctricos (TE) en lugar de los Transversales Magnéticos (TM). Esto hace difícil conseguir acopladores MMI insensibles a la polarización.

La insensibilidad a la polarización se requiere en aplicaciones que utilizan multiplexación por división en polarización o en aquellas que operen con luz en un estado de polarización desconocido [8]. Una forma de conseguir un dispositivo insensible a la polarización es utilizar diversidad de polarización, a costa de duplicar el área de chip requerida e introducir pérdidas adicionales por combinación y separación de modos. Por otro lado, aunque con guías de sección cuadrada se puede conseguir anular la birrefringencia, no es aplicable a acopladores MMI debido a los requisitos de anchura en sus guías multimodo. Por último, es posible diseñar dispositivos MMI independientes de la polarización usando una anchura para la cual la longitud de batido de los modos TE y TM sea la misma. Sin embargo, este enfoque solo funciona para grosores de silicio superiores a los 300 nm [9], siendo necesario alternativas para conseguir la insensibilidad a la polarización

en la plataforma SOI con grosor estándar de 220 nm.

Tras su demostración por primera vez en guías fotónicas de silicio [10], los metamateriales basados en estructuras sublongitud de onda (subwavelength gratings, SWG) se han utilizado ampliamente para hacer ingeniería del índice efectivo, de la dispersión y de la birrefringencia de dichas guías [11]. Entre otros tipos de componentes, las estructuras SWG se han usado para desarrollar acopladores MMI de banda ancha [12].

En este trabajo se demuestra experimentalmente un acoplador MMI 2×2 independiente de la polarización, fabricado en una plataforma SOI convencional de 220 nm de grosor. Este utiliza como núcleo un metamaterial periódico SWG para conseguir la insensibilidad a la polarización en el rango de longitudes de onda de 1500 a 1560 nm. El tamaño mínimo fabricado es de 100 nm, compatible con procesos litográficos de ultravioleta profundo.

2.- Principio de funcionamiento y diseño

La geometría del dispositivo se muestra en la Fig. 1(a). El MMI está compuesto por una guía multimodo central hecha a partir de un metamaterial SWG y de transiciones entre el metamaterial y las guías convencionales de interconexión del chip. Como se representa en la Fig. 1(b), la guía multimodo es periódica en las direcciones x y z con periodos Λ_x y Λ_z , respectivamente. Las periodicidades se crean entrelazando huecos de dióxido de silicio de tamaño $a \times a$ en el núcleo de silicio de una guía. La anchura de la guía multimodo es W_{MMI} y su longitud es $L_{\text{MMI}} = \Lambda_z N_{\text{MMI}}$, donde N_{MMI} es el número de periodos de la guía en la dirección de propagación. A la longitud de onda de trabajo de 1550 nm, el silicio y el dióxido de silicio tienen los índices de refracción, 3.476 y 1.444, respectivamente.

Las transiciones adiabáticas son necesarias para adaptar las guías convencionales a la guía SWG y para ensanchar los puertos de acceso, de manera que se restrinja el número de modos excitados en el MMI. Estas se

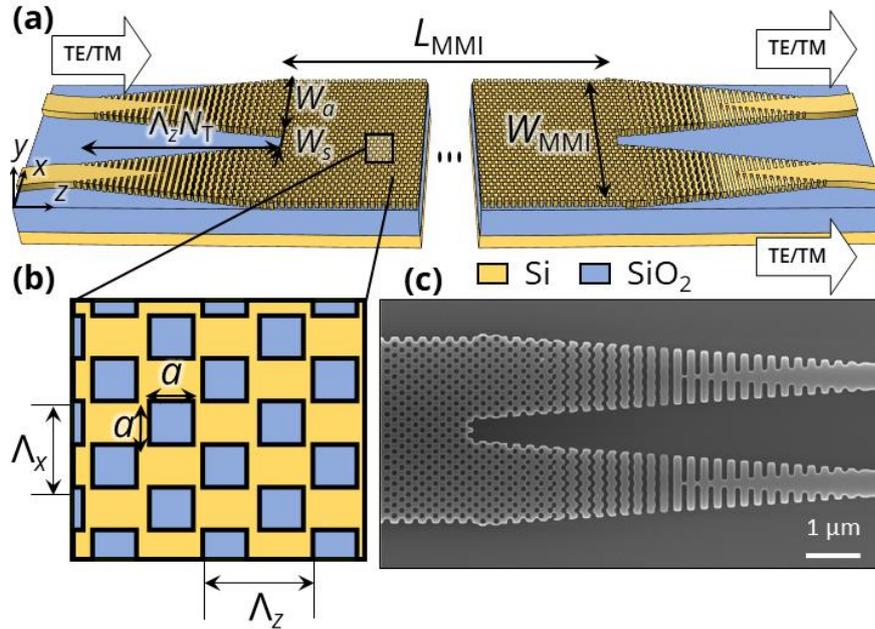


Fig. 1. (a) Vista en perspectiva del dispositivo. (b) Detalle de la guía periódica. (c) Imagen SEM del dispositivo.

componen de N_T periodos divididos en de dos secciones de $N_T/2$ periodos. En la primera sección, la guía homogénea se convierte gradualmente en una guía SWG convencional (periódica en z , únicamente). La segunda sección introduce la periodicidad transversal desplazando parte de las tiras que componen la guía SWG. De esta forma se reducen reflexiones indeseadas debidas a la zona de Bragg [12]. Ambas secciones se ensanchan de forma lineal desde los 500 nm de ancho de las guías homogéneas hasta la anchura de los puertos de acceso W_a . Los puertos de acceso están separados por una distancia W_s .

El principio de autoimagen permite calcular la distancia a la que se forma una imagen doble de un perfil de campo arbitrario a la entrada de una guía multimodo [7]

$$L_{\text{MMI}} = \frac{3\lambda}{4(n_{\text{eff}}^{(0)} - n_{\text{eff}}^{(1)})} \quad (1)$$

siendo $n_{\text{eff}}^{(i)}$ el índice efectivo del i -ésimo modo para una polarización dada. Idealmente, un MMI 2×2 con esta longitud divide por igual la potencia incidente en cualquiera de los puertos de entrada con un desfase relativo de 90° a la salida. Para que un MMI sea insensible a la polarización se debe cumplir que $L_{\text{MMI}}^{(\text{TE})} = L_{\text{MMI}}^{(\text{TM})}$. Esta condición no puede cumplirse usando una guía homogénea de

220 nm de grosor. Sin embargo, diseñando adecuadamente el metamaterial de la Fig. 1(b) es posible superar esta limitación.

En la Fig. 2(a) se muestra un barrido en los periodos Λ_x y Λ_z de la diferencia $L_{\text{MMI}}^{(\text{TE})} - L_{\text{MMI}}^{(\text{TM})}$, revelando un conjunto de soluciones que satisfacen la condición de independencia a la polarización. Para ello se han calculado los índices efectivos de los dos primeros modos Bloch-Floquet de la guía periódica usando el simulador MPB [13]. El diseño nominal se marca en verde, el cual se corresponde con los parámetros $\Lambda_x = 200$ nm, $\Lambda_x = 250$ nm y $L_{\text{MMI}} = 32$ μm , donde se han fijado $W_{\text{MMI}} = 3.5$ μm y $a = 100$ nm.

Posteriormente, se ha introducido el dispositivo completo de la Fig. 1(a) en el simulador 3D-FDTD Meep [14]. Las dimensiones utilizadas para las transiciones son $W_a = 1.6$ μm , $W_s = 400$ nm y $N_T = 30$. En esta fase del diseño se ha corregido levemente el número de periodos de la guía multimodo a $N_{\text{MMI}} = 129$ ($L_{\text{MMI}} = 32.25$ μm). Las Figs. 2(b) y 2(c) muestran la propagación de los modos TE y TM a lo largo del MMI cuando se excita un puerto de entrada con una fuente de onda continua a $\lambda = 1550$ nm. Se aprecia claramente que para ambas polarizaciones se forma la imagen doble a la misma distancia.

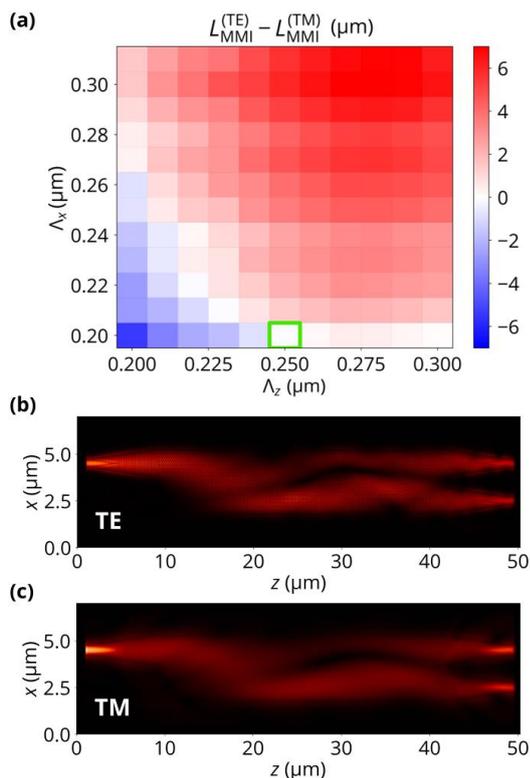


Fig. 2. (a) Diferencia entre las longitudes de batido de la polarización TE y la polarización TM. El diseño nominal se marca en verde. (b) Propagación de la componente $|E_x|$ del modo TE y (c) propagación de la componente $|E_y|$ del modo TM. Los parámetros geométricos empleados son $a = 100$ nm, $W_{MMI} = 3.5$ μm y $\lambda = 1550$ nm.

3. Fabricación y caracterización experimental

Las estructuras de prueba se han fabricado en una plataforma SOI de 220 nm de grosor de Si y 2 μm de BOX (buried oxide). Se han utilizado litografía por haz de electrones para trazar las estructuras y un proceso de grabado mediante iones reactivos usando un plasma acoplado inductivamente. Sobre el chip se ha depositado una cubierta de SiO_2 de 2.2 μm de espesor. La Fig. 1(c) muestra una imagen de microscopio por escaneo de electrones (SEM) de la sección de salida de un MMI fabricado antes de depositar la cubierta. Para la caracterización del dispositivo se han diseñado interferómetros de Mach-Zehnder (MZI) que incorporan dos MMI idénticos como divisores de potencia. Se seleccionó una distancia de 100 nm como diferencia de

longitud entre los brazos de los MZI, correspondiente a un rango espectral libre de 5 y 7 nm para las polarizaciones TE y TM, respectivamente. También se han incluido acopladores MMI individuales para su caracterización.

Durante las medidas, se ha inyectado luz linealmente polarizada de una fuente láser sintonizable utilizando una fibra óptica acabada en lente y un acoplador SWG por canto de banda ancha [15]. En el chip, la luz es guiada a las estructuras de prueba, incluyendo MZI desbalanceados y MMI individuales. Los dos puertos de salida de los MMI han sido conectados de nuevo a acopladores SWG en el otro borde del chip. A la salida del chip, la luz ha sido colimada con un objetivo de microscopio, filtrada mediante un polarizador Glan-Thompson y finalmente captada con un fotodetector de germanio conectado a un medidor de potencia digital.

En el chip se han incluido varias estructuras de prueba con pequeñas variaciones en los parámetros geométricos para compensar posibles errores en el grosor de la capa de silicio, la anchura del MMI y forma y tamaño de los huecos de la guía [16]. La estructura en la que se ha observado el mejor funcionamiento ha sido el diseño nominal con un ligero ajuste de 6 periodos adicionales (1.6 μm) en la región multimodo, es decir, para $N_{MMI} = 135$. En la Fig. 3 se muestra la luz captada con una cámara de infrarrojos a la salida del MMI aislado para las dos polarizaciones y tres longitudes de onda diferentes. Las transmitancias medidas de los dos puertos de salida del MZI correspondiente para ambas polarizaciones se muestran en la Fig. 4 en línea continua. Las curvas azules se corresponden con el puerto A en el recuadro de la Fig. 4(b) y las curvas naranjas se corresponden con el puerto B. Dichas transmitancias se han obtenido normalizando la potencia de salida respecto a una guía de referencia, eliminando así las pérdidas de acoplamiento a la entrada y la salida del chip, así como las pérdidas de propagación. En la polarización TE se observa una distorsión en el rango de longitudes de onda entre 1525 y 1535 nm. Esto se debe a un fallo de fabricación que ha provocado una resonancia en las guías de interconexión en torno a 1530 nm.

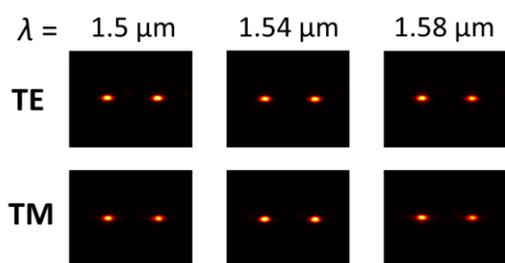


Fig. 3. Imágenes captadas con una cámara de infrarrojos de las salidas de un MMI independiente a la polarización con $N_{\text{MMI}} = 135$.

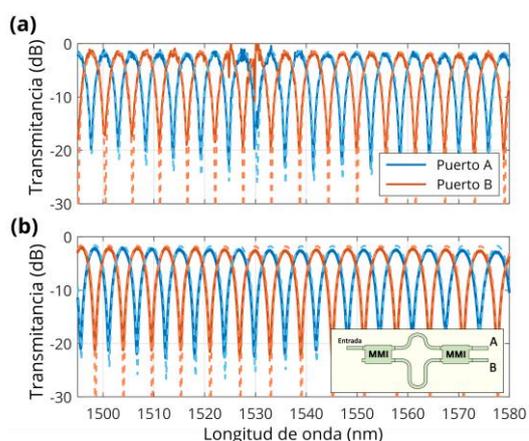


Fig. 4. Transmitancias de los dos puertos de salida del MZI desbalanceado (ver recuadro) medidas (línea continua) y modeladas (línea discontinua) para las polarizaciones (a) TE y (b) TM.

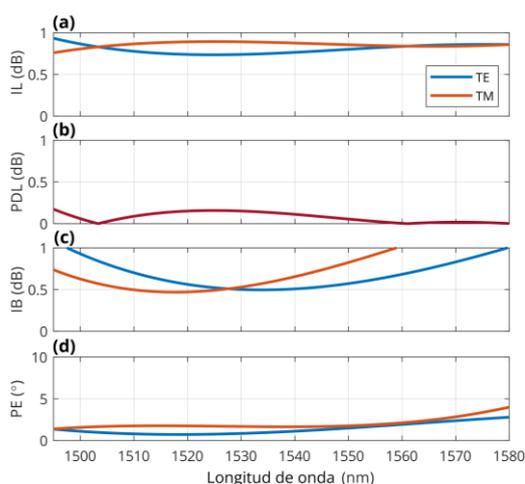


Fig. 5. Figuras de mérito del MMI extraídas de los interferogramas de la Fig. 4: (a) pérdidas de inserción, (b) pérdidas dependientes de la polarización, (c) desbalanceo y (d) error de fase.

Para evaluar el buen funcionamiento de los MMI fabricados, se ha usado el siguiente modelo de un MZI desbalanceado con dos MMI idénticos no ideales. Las transmitancias de los puertos A y B (véase el recuadro de la Fig. 4(b)) vienen dadas por

$$T_A = |S_{21}|^4 + |S_{31}|^4 - 2|S_{21}|^2|S_{31}|^2 \cos(2\text{PE} - \Delta\phi) \quad (2)$$

$$T_B = 2|S_{21}|^2|S_{31}|^2[1 + \cos\Delta\phi] \quad (3)$$

donde S_{ij} son los parámetros S del MMI, $\text{PE} = \angle(S_{31}/S_{21}) - 90^\circ$ es el error de fase y $\Delta\phi = 2\pi n_{\text{eff}}\Delta L/\lambda$ es la diferencia de fase entre los brazos del MMI. Siguiendo la metodología de [17], se han obtenido los parámetros S del MMI y se han calculado las figuras de mérito incluyendo: el error de fase; las pérdidas de inserción, $\text{IL} = -10 \log_{10}(|S_{21}|^2 + |S_{31}|^2)$; y el desbalanceo, $\text{IB} = 10 \log(|S_{31}|^2/|S_{21}|^2)$. Las métricas calculadas se representan en la Fig. 5 junto con las pérdidas dependientes de la polarización, $\text{PDL} = |\text{IL}_{\text{TE}} - \text{IL}_{\text{TM}}|$. Las transmitancias del MZI modeladas utilizando las figuras de mérito calculadas se representan en la Fig. 4 en línea discontinua. Se observan unas pérdidas de inserción entre 0.7 y 1 dB para ambas polarizaciones, resultando en unas PDL inferiores a 0.25 dB en todo el rango de medida (1495 nm – 1580 nm). El desbalanceo del MMI es menor a 1 dB entre 1500 nm y 1560 nm y el error de fase es inferior a 5° en todo el rango de medida. A excepción del desbalanceo, el cual limita el ancho de banda a 60 nm, ambas polarizaciones se comportan de forma muy similar y presentan buenas figuras de mérito en todo el rango de medida (85 nm).

4. Conclusiones

Se ha diseñado, fabricado y caracterizado experimentalmente un acoplador 3 dB 90° basado en un MMI 2×2 insensible a la polarización para la plataforma SOI 220 nm y operación en banda C. La independencia de la polarización se consigue mediante ingeniería de la birrefringencia de un metamaterial SWG. El MMI propuesto ocupa un área de solo $3.5 \mu\text{m} \times 47.25 \mu\text{m}$ y se ha fabricado utilizando un solo paso de grabado con un tamaño mínimo fabricado de 100 nm. Posee pérdidas de inserción y desbalanceo inferior

res a 1 dB, pérdidas dependientes de la polarización menores que 0.25 y un error de fase por debajo de 5° en un ancho de banda de 60 nm. Los resultados demostrados en este trabajo se pueden extender a acopladores MMI con un número arbitrario de puertos y abre nuevas vías de desarrollo de componentes integrados insensibles a la polarización de altas prestaciones para la fotónica del silicio, aprovechando las ventajas de las estructuras periódicas SWG.

Agradecimientos: Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad (PID2019106747RB-I00), la Junta de Andalucía (P18-RT-1453, UMA-FEDERJA-158), el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades (FPU16/06762, FPU19/02408), y la Universidad de Málaga.

Referencias

- [1] Abdul RAHIM et al., “Open-Access Silicon Photonics: Current Status and Emerging Initiatives”, *Proceedings of the IEEE*, vol. 106, n° 12, págs. 2313-2330, 2018.
- [2] Roberto SABELLA et al., “Silicon Photonics for 5G and Future Networks”, *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol. 26, n° 2, 9301611, 2020.
- [3] Enxiao LUAN et al., “Silicon photonic biosensors using label-free detection”, *IEEE Sensors.*, vol. 18, n° 10, 3519, 2018.
- [4] Wim BOGAERTS et al., “Programmable photonic circuits”, *Nature*, vol. 586, n° 7828, 207-216, 2020.
- [5] Christopher ROGERS et al., “A universal 3D imaging sensor on a silicon photonics platform”, *Nature*, vol. 590, n° 7845, 256-261, 2021.
- [6] Jianwei WANG et al., “Integrated photonic quantum technologies”, *Nature Photonics*, vol. 14, n° 5, 273-284, 2020.
- [7] Lucas B. SOLDANO y Erik C. M. Pennings, “Optical Multi-Mode Interference Devices Based on Self-Imaging: Principles and Applications”, *J. Lightwave Technol.*, vol. 13, n° 4, págs. 615-627, 1995.
- [8] Daoxin DAI et al., “Polarization management for silicon photonic integrated circuits”, *Laser & Phot. Rev.*, vol. 7, n° 3, págs. 303-328, 2013.
- [9] Daoxin DAI y Sailing HE, “Optimization of ultracompact polarization-insensitive multimode interference couplers based on Si nanowire waveguides”, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 18, n° 19, págs. 2017-2019, 2006.
- [10] Pavel CHEBEN et al., “A broad-band waveguide grating coupler with a subwavelength grating mirror”, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 18, n° 1, págs. 13-15, 2006.
- [11] José Manuel LUQUE-GONZÁLEZ et al., “A review of silicon subwavelength gratings: Building break-through devices with anisotropic metamaterials”, *Nanophotonics*, vol. 10, n° 11, págs. 2765-2797, 2021.
- [12] José Manuel LUQUE-GONZÁLEZ et al., “Bricked Subwavelength Gratings: A Tailorable On-Chip Metamaterial Topology”, *Laser & Phot. Rev.*, vol. 15, n° 6, 2000478, 2021.
- [13] Steven G. JOHNSON et al., “Block-iterative frequency-domain methods for Maxwell’s equations in a planewave basis”, *Opt. Express*, vol. 8, n° 3, págs. 173-190, 2001.
- [14] Ardavan F. OSKOOI et al., “Meep: A flexible free-software package for electromagnetic simulations by the FDTD method”, *Comput. Phys. Commun.*, vol. 181, n° 3, págs. 687-702, 2010.
- [15] Pavel CHEBEN et al., “Broadband polarization independent nanophotonic coupler for silicon waveguides with ultra-high efficiency”, *Opt. Express*, vol. 23, n° 17, págs. 22553-22563, 2015.
- [16] Hatef SHIRAN et al., “Impact of SiO₂ Cladding Voids in SiPh Building Blocks”, en *Proceedings de IEEE Photonics Conference (IPC)*, 2020.
- [17] Callum J. STIRLING et al., “Broadband 2 × 2 multimode interference coupler for mid-infrared wavelengths”, *Opt. Lett.*, vol. 46, n° 21, págs. 5300-5303, 2021.

Otros:

(Marque la casilla haciendo doble click y seleccionando activar)

Deseo presentar esta comunicación como candidata a alguno de los premios (sólo si el primer autor es un estudiante; debe acreditar dicha condición con un documento oficial que debe ser enviado a optoel2023@us.es).

En este caso recuerde marcar la casilla **SI** en la pregunta correspondiente del formulario.