

# Dispositivos de interferencia multimodal 2×2 de banda ultraancha basados en estructuras periódicas sub-longitud de onda para las bandas O-E-S-C

## Ultra-wideband subwavelength grating-based 2×2 multimode interference couplers for the O-E-S-C bands

Carlos PÉREZ-ARMENTA <sup>(1)</sup>, Alejandro ORTEGA-MOÑUX <sup>(1)</sup>, José Manuel LUQUE-GONZÁLEZ <sup>(1)</sup>, Robert HALIR <sup>(1,2)</sup>, Jens H. SCHMID <sup>(3)</sup>, Pavel CHEBEN <sup>(3)</sup>, Íñigo MOLINA-FERNÁNDEZ <sup>(1,2)</sup> y J. Gonzalo WANGÜEMERT-PÉREZ <sup>(1)</sup>

1. Departamento de Ingeniería de Comunicaciones, ETSI Telecomunicación, Universidad de Málaga, Campus de Teatinos s/n, 29071 Málaga, España.
2. Bionand Center for Nanomedicine and Biotechnology, Parque Tecnológico de Andalucía, 29590 Málaga, Spain.
3. National Research Council Canada, 1200 Montreal Road, Ottawa, Ontario K1A0R6, Canada.

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

### RESUMEN:

Los dispositivos de interferencia multimodal (MMI) son un bloque funcional fundamental en óptica integrada. La creciente demanda de capacidad en los enlaces de comunicaciones ópticas motiva la búsqueda de nuevas formas de incrementar el ancho de banda de componentes fotónicos como los MMI. En este trabajo se diseña y evalúa las prestaciones de un MMI 2×2 para la plataforma Silicon on Insulator de 300 nm de espesor basado en una nueva estructura sub-longitud de onda: la guía Bricked-SWG (Subwavelength Grating). Este diseño se compara con uno basado en guía photonic wire y otro basado en guía SWG para la misma plataforma. Los resultados de simulación muestran que es posible conseguir anchos de banda similares (350 nm) a los ya conseguidos anteriormente con guías SWG, pero operando con un periodo mayor significativamente mayor (60 %). Por tanto, las guías Bricked-SWG permiten diseñar dispositivos de altas prestaciones y más fáciles de fabricar.

**Palabras clave:** Óptica integrada, fotónica del silicio, dispositivos de interferencia multimodal, estructuras periódicas sub-longitud de onda.

### ABSTRACT:

Multimode Interference devices (MMI) are fundamental building blocks of integrated optics. The increasing demand of capacity in optical data links encourage the search of new techniques to enlarge the bandwidth of photonic components such as MMIs. In this work we design and evaluate the performance of a 2×2 MMI based on the novel Bricked-SWG (Subwavelength Grating) waveguide and built on the 300-nm thick Silicon on Insulator platform. The design is compared with a conventional photonic wire based MMI and a SWG-based MMI built on the same platform. Simulation results show that the previously demonstrated bandwidths (350 nm) with SWG waveguides are also achievable with Bricked-SWG waveguides while using larger (60 %) periods. Therefore, Bricked-SWG waveguides enable high performance photonic devices with less challenging fabrication.

**Key words:** Integrated optics, silicon photonics, multimode interference devices, subwavelength gratings.

## 1.- Introducción

La fotónica del silicio es una tecnología clave en el desarrollo de circuitos fotónicos integrados. Los transceptores ópticos de muy alta velocidad para grandes centros de datos, los *lab-on-a-chip* basados biosensores fotónicos, o los sistemas LiDAR (*Light Detection And Ranging*), son solo algunos ejemplos de las múltiples aplicaciones que ahora mismo se encuentran en pleno desarrollo. Ventajas como su bajo consumo, la alta densidad de integración y su compatibilidad con procesos de fabricación de microelectrónica CMOS, ha hecho que la plataforma SOI (*Silicon on Insulator*) se haya consolidado como una de las más prometedoras a nivel comercial [1].

Uno de los bloques funcionales fundamentales en el diseño de dispositivos ópticos integrados son los dispositivos de Interferencia Multimodal (*Multimode Interference*, MMI). Los MMI permiten implementar híbridos de 3-dB 90°, receptores coherentes de 6 puertos, divisores y combinadores de potencia de un número arbitrario de puertos integrables en interferómetros de Mach-Zehnder, anillos resonantes o conmutadores, entre otros [2]. Sin embargo, es difícil superar los 100 nm de ancho de banda en la plataforma SOI con guías *silicon wire* convencionales.

Como alternativa, en [3], se propuso el uso de estructuras periódicas sublongitud de onda (*Subwavelength Grating*, SWG) [4] como guía central multimodo del MMI. Haciendo uso del comportamiento anisótropo de estas guías periódicas, es posible conseguir que la longitud del MMI sea prácticamente independiente de la longitud de onda en gran parte de la banda de comunicaciones del infrarrojo cercano, superando los 300 nm de ancho de banda medidos en laboratorio y 500 nm en simulación. Además, se consiguió reducir el área por un factor 3, comparado con un MMI convencional. No obstante, el principal inconveniente que presentan es que se requiere que el periodo de la estructura sea de 190 nm, lo cual puede comprometer la fabricación en masa de los dispositivos con técnicas de litografía de ultravioleta profundo (*Deep UV*).

Por otro lado, existe un creciente interés en la industria por utilizar la banda O de comunicaciones ópticas ( $\lambda$ : 1260-1360 nm) [5], debido a la menor dispersión cromática que tiene la fibra óptica monomodo convencional en esta banda. Sin embargo, escalar diseños SWG hechos en banda C a banda O puede comprometer aún más los tamaños de fabricación. En consecuencia, surge la necesidad de que los diseñadores de dispositivos ópticos integrados dispongan de bloques funcionales de altas prestaciones y gran ancho de banda y que además cubran este rango de longitudes de onda.

Para superar esta dificultad, proponemos hacer uso de un nuevo tipo de guía periódica sub-longitud de onda: la guía Bricked-SWG. Esta nueva topología tiene la enorme ventaja de poder sintetizar materiales con características similares a las de la guía SWG convencional, pero pudiendo utilizar periodos superiores [6, 7]. Esto se debe a una deslocalización adicional de la luz que desplaza la zona de Bragg (régimen en el que la luz incidente en la guía se refleje) a longitudes de onda menores. Por ello, la guía Bricked-SWG posee un gran potencial para desarrollar dispositivos ópticos integrados de altas prestaciones, con tamaños mínimos de fabricación menos exigentes, y por tanto, más compatibles con procesos de fabricación en masa.

En este trabajo se propone utilizar la nueva guía Bricked-SWG para realizar dispositivos MMI 2x2 de banda ultraancha. Para verificar su viabilidad y evaluar sus prestaciones se ha llevado a cabo un estudio comparativo de las características de tres dispositivos MMI: uno basado en guías homogéneas, otro basado en guías SWG y otro basado en la nueva guía Bricked-SWG. Dicho estudio ha sido realizado por medio de simulaciones electromagnéticas y suponiendo que la plataforma de fabricación es SOI con grosor de 300 nm. Las simulaciones revelan que con la guía Bricked-SWG se obtienen anchos de banda similares a la guía SWG, aproximadamente 350 nm, cubriendo las bandas de comunicaciones O, E, S y C, frente a los 100 nm conseguidos con guía *photonic wire*. Además se ha podido aumentar el periodo de la guía un 60 %, respecto al MMI SWG, sin que entre en zona de Bragg.

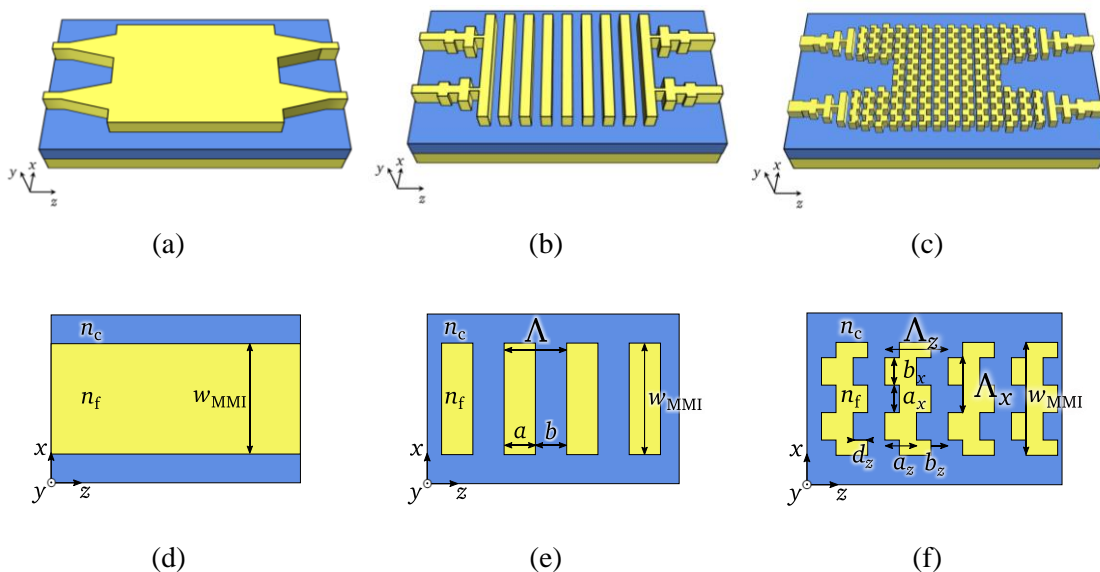


Fig. 1: Vista en perspectiva de los tres MMI abordados en este trabajo: (a) homogéneo, (b) SWG y (c) Bricked-SWG y (d, e, f) detalle de la vista superior de las respectivas guías multimodo utilizadas. Los materiales utilizados son: silicio en el núcleo (con índice de refracción  $n_f$ ) y dióxido de silicio ( $n_c$ ) en la cubierta superior e inferior.

## 2.- Principio de funcionamiento

### 2.1.- Geometría de los dispositivos

En la Fig. 1 se representa la geometría de los tres tipos de MMI  $2 \times 2$  estudiados. Todos han sido diseñados para la plataforma SOI con un espesor  $h = 300$  nm.

En el caso del MMI homogéneo [Fig. 1(a,d)] solo han de diseñarse la anchura y longitud de la guía multimodo, así como la longitud y anchura final de las guías de acceso. En todos los casos se ha considerado que las guías de interconexión tienen una anchura de 250 nm, que garantiza un comportamiento monomodo.

La geometría del MMI basado en guía SWG [Fig. 1(b,e)] es idéntica a la utilizada en [3]. A los parámetros de diseño del MMI homogéneo se añaden el periodo de la guía  $\Lambda_z = a_z + b_z$  y el ciclo de trabajo  $DC_z = a_z/\Lambda_z$ , siendo  $a_z$  y  $b_z$  la longitud de los bloques de silicio y los huecos de la guía, respectivamente. Las longitudes de la guía multimodo y de la transición quedan restringidas a un número entero de periodos:  $N_T$  y  $N_{MMI}$ , respectivamente.

La guía multimodo del MMI Bricked-SWG [Fig. 1(c,f)] se forma a partir de una guía SWG donde los segmentos de silicio se trocean en la dirección transversal a la de propagación, con una periodicidad definida por

$\Lambda_x = a_x + b_x$  y  $DC_x = a_x/\Lambda_x$ . Los segmentos de dimensiones  $a_x \times a_z$  son desplazados una distancia  $d_z$  en la dirección de propagación. En este caso, las transiciones de entrada quedan divididas en dos secciones: la primera, de  $N_{T1}$  periodos, para adaptar el photonic wire de entrada a guía SWG y la segunda, de  $N_{T2}$  periodos, para convertir la guía SWG en Bricked-SWG. Con esta forma de proceder se evita que los periodos con mayor índice efectivo entren en zona de Bragg y, por tanto, que haya reflexiones indeseadas.

### 2.2.- Dispositivos de interferencia multimodal

El funcionamiento de los dispositivos MMI está determinado por el efecto Talbot o principio de autoimagen [2]. Dada una guía multimodo, cuya longitud de batido  $L_\pi$  es

$$L_\pi = \frac{\pi}{\beta_0 - \beta_1} = \frac{\lambda}{2(n_{\text{eff}}^{(0)} - n_{\text{eff}}^{(1)})} \quad (1)$$

donde  $\beta_0$  y  $\beta_1$  son las constantes de propagación de los dos primeros modos y  $n_{\text{eff}}^{(0)}$  y  $n_{\text{eff}}^{(1)}$  sus respectivos índices efectivos, se verifica que la distancia más corta a la que se forman dos imágenes de una excitación arbitraria a la entrada viene dada por

$$L_{\text{MMI}} = \frac{3}{2} L_\pi. \quad (2)$$

Además, idealmente, dichas imágenes tendrán un desfase relativo de  $90^\circ$  y transportarán cada una la mitad de la potencia de entrada.

### 3.- Diseño de los dispositivos

#### 3.1.- Guías multimodo

Las anchuras de los tres MMI se han fijado a  $w_{\text{MMI}} = 3 \mu\text{m}$  para su posterior comparativa. En el caso del MMI homogéneo una vez fijado el ancho solo se ha de calcular la longitud de batido y con esta la longitud de la guía multimodo, al no haber más parámetros para controlar el ancho de banda del MMI. En el caso del MMI SWG, se ha realizado un barrido en el periodo manteniendo fijo su ciclo de trabajo al 50 %, al igual que se hacía en [3]. Así, se ha determinado que el periodo  $\Lambda_z = 180 \text{ nm}$  es el que ofrece una dependencia con la longitud de onda de  $L_\pi$  más plana. Para calcular la longitud de batido se ha utilizado la Ec. (1) junto con los índices efectivos calculados con el simulador de código abierto 3D Full-Vectorial MIT Photonics Bands (MPB) [8]. Los parámetros empleados han sido un tamaño de celda de  $4 \times 7 \mu\text{m}$  y una resolución de  $128 \text{ px}/\mu\text{m}$ .

En el caso del MMI Bricked-SWG, se ha fijado la periodicidad transversal a  $\Lambda_x = 200 \text{ nm}$  y el ciclo de trabajo a  $DC_x = 50 \%$  para simplificar el diseño. Posteriormente, se han tomado como periodicidad longitudinal  $\Lambda_z = 290 \text{ nm}$  y como ciclo de trabajo  $DC_z = 40 \%$ . Nótese que, en este caso, el periodo longitudinal es significativamente superior a la del diseño anterior, y con un ciclo de trabajo menor para alejar la zona de Bragg de la banda de operación. A continuación, se ha realizado un barrido en el desplazamiento de los bloques  $d_z$ , mostrado en la Fig. 2, para hallar cuál es el que minimiza la dependencia de  $L_\pi$  con  $\lambda$ . En la Fig. 3 se representan las curvas de  $L_\pi(\lambda)$  de las tres guías diseñadas en esta sección. Utilizando la Ec. (2) se obtiene la longitud de los distintos MMI:  $L_{\text{MMI}} = 43.80 \mu\text{m}$  en el caso del MMI homogéneo,  $L_{\text{MMI}} = 14.04 \mu\text{m}$  ( $N_{\text{MMI}} = 78$  periodos) en el caso del MMI SWG y  $L_{\text{MMI}} = 24.07 \mu\text{m}$  ( $N_{\text{MMI}} = 83$  periodos) en el caso del MMI Bricked-SWG.

Nótese que, aunque esté método ofrece un buen punto de partida, las transiciones pueden

suponer un aumento de la longitud efectiva de la guía multimodo. Por tanto, los parámetros diseñados en esta fase deben ser ajustados en la etapa final donde se integren guías de acceso y guías multimodo.

#### 3.2.- Guías de acceso

El criterio para diseñar la transición de acceso al MMI ha sido que el acoplo entre guías de entrada sea inferior a 40 dB. Este ha sido calculado para diferentes combinaciones de

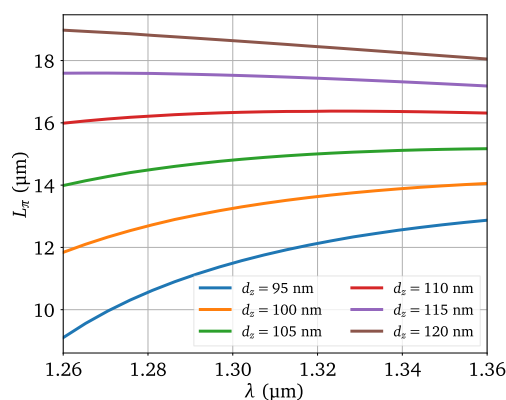


Fig. 2: Dependencia con la longitud de onda  $\lambda$  y el desplazamiento  $d_z$  de la longitud de batido del MMI Bricked-SWG. Con  $d_z = 110 \text{ nm}$  se aplanan la respuesta de  $L_\pi(\lambda)$ . Otros parámetros de simulación:  $w_{\text{MMI}} = 3 \mu\text{m}$ ,  $\Lambda_x = 200 \text{ nm}$ ,  $DC_x = 50 \%$ ,  $\Lambda_z = 290 \text{ nm}$ ,  $DC_z = 40 \%$

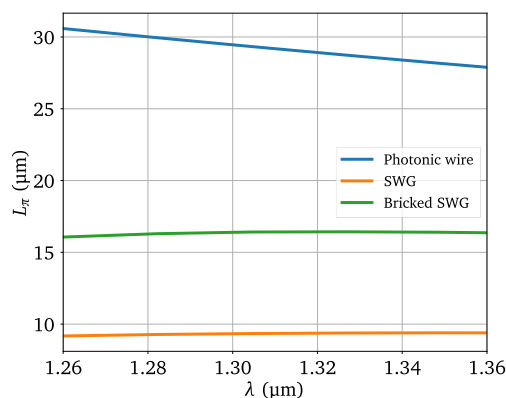


Fig. 3: Longitud de batido de cada una de las guías multimodo diseñadas.

anchura de guía de acceso  $w_a$  y separación entre guías  $w_s$ .

La combinación  $w_a = 1.1 \mu\text{m}$  y  $w_s = 0.8 \mu\text{m}$  cumple este requisito al utilizar la guía Bricked-SWG diseñada en la sección anterior, asumiendo que la longitud de los tapers no es superior a las  $20 \mu\text{m}$ . Este es el caso más restrictivo de los tres al ser esta guía la que menos confina el campo electromagnético. Por lo tanto, ha de funcionar con los otros dos dispositivos. En los tres casos se utilizarán los mismos valores de  $w_a$  y  $w_s$  para que la posterior comparación sea más justa.

El siguiente paso consiste en determinar la longitud exacta de los tapers de acceso. En todos los casos se varía linealmente los parámetros geométricos implicados. Para evitar reflexiones de Bragg indeseadas, en el caso de la guía Bricked-SWG el periodo longitudinal se mantiene constante a un valor de  $200 \text{ nm}$  en la primera parte la transición, a medida que se ensancha la guía, y en la segunda parte, a medida que se va haciendo el desplazamiento de los bloques (desde  $d_z = 0$  hasta  $d_z = 110 \text{ nm}$ ) se comienza también a aumentar linealmente el periodo hasta el valor diseñado en la guía multimodo. Haciendo uso de simulaciones 3D Full-Vectorial FDTD utilizando el simulador de código abierto Meep [9] y utilizando como criterio que las pérdidas de inserción de un taper sean inferiores a  $0.2 \text{ dB}$ , se ha determinado que las respectivas longitudes son  $L_T = 5 \mu\text{m}$  para el caso homogéneo,  $L_T = 1.8 \mu\text{m}$  ( $N_T = 10$ ) periodos en el caso SWG y  $L_{T1} = 2 \mu\text{m}$  ( $N_{T1} = 10$  periodos) y  $L_{T2} = 6.79 \mu\text{m}$  ( $N_{T2} = 20$  periodos) en el caso Bricked-SWG.

### 3.3.- Integración completa

Una vez diseñadas las guías de acceso y las guías multimodo de cada uno de los MMI, finalmente se realiza la simulación completa FDTD del dispositivo. Los parámetros de simulación empleados son una resolución de  $100 \text{ px}/\mu\text{m}$ , espesor de PML (*Perfectly Matched Layers*) de  $1 \mu\text{m}$  y un tamaño transversal de la ventana de cómputo de  $4 \times 7 \mu\text{m}$ . Se ha utilizado como fuente un pulso gaussiano para así calcular los parámetros  $S$  del dispositivo en toda la banda de comunicaciones.

## 4.- Comparativa de los dispositivos

Para medir cuanto se aleja el dispositivo diseñado de su funcionamiento ideal se definen las

siguientes figuras de mérito en función de los parámetros  $S$  de los MMI obtenidos a partir de las simulaciones FDTD: *i*) pérdidas de exceso  $EL \text{ (dB)} = -10 \log(|S_{21}|^2 + |S_{31}|^2)$ , *ii*) desbalanceo  $IB \text{ (dB)} = 10 \log(|S_{21}|^2 / |S_{31}|^2)$  y *iii*) error de fase  $PE \text{ (}^\circ\text{)} = \angle(S_{31}/S_{21}) - 90^\circ$ . En la Fig. 4 se representan los resultados obtenidos.

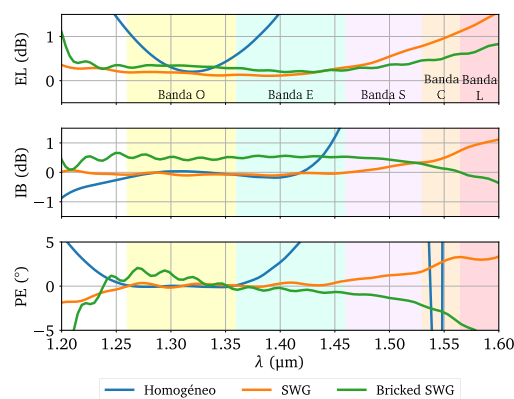


Fig. 4: Figuras de mérito de los tres MMI diseñados en este trabajo.

El ancho de banda se ha definido como el rango de frecuencias o longitudes de onda donde  $EL < 1 \text{ dB}$ ,  $|IB| < 1 \text{ dB}$  y  $|PE| < 5^\circ$  [3]. Partiendo de este criterio, se observa que el MMI homogéneo presenta alrededor de  $100 \text{ nm}$  de ancho de banda. En cambio los MMI periódicos exhiben un ancho de banda notablemente superior como se obtuvo en [3], en torno a  $350 \text{ nm}$  y siendo capaces de cubrir las bandas O, E, S y C ( $1260\text{-}1565 \text{ nm}$ ). La única diferencia significativa observada es un desplazamiento positivo del desbalanceo del MMI Bricked-SWG, situándose en  $0.5 \text{ dB}$  mientras que en el caso del MMI SWG se sitúa en torno a su valor ideal de  $0 \text{ dB}$ .

Los resultados obtenidos con la guía Bricked-SWG son prácticamente igual de competitivos que los de la guía SWG, pero con la ventaja de que se está trabajando con periodos longitudinales mayores ( $290 \text{ nm}$  frente a  $180 \text{ nm}$ ). Como contrapartida, la zona de Bragg queda más cerca de la banda de trabajo al haber aumentado tanto el periodo, comenzando en  $\lambda_B = 1.18 \mu\text{m}$ . La zona de Bragg de la guía SWG comienza, en cambio, en  $\lambda_B = 1.07 \mu\text{m}$ .

## 5.- Conclusiones

En este trabajo se ha propuesto y diseñado el uso de una nueva guía dieléctrica, la guía Bricked-SWG, para la realización de dispositivos MMI. Para ello se ha realizado un estudio comparativo del funcionamiento de un MMI Bricked-SWG frente a un MMI convencional y un MMI SWG, diseñados para la plataforma SOI. Frente a los MMI convencionales basados en guías homogéneas photonic wire, que solo cubren 100 nm, los MMI periódicos poseen un ancho de banda notablemente superior, de 350 nm. Además, se ha demostrado que el MMI Bricked-SWG ofrece unas características muy similares a las del MMI SWG pero utilizando periodos mayores que facilitarían su fabricación en masa con técnicas de litografía *Deep UV*. En el futuro se verificarán experimentalmente los diseños mostrados en este trabajo y se abordará el diseño de MMIs de un mayor número de puertos utilizando este tipo de guías.

*Agradecimientos:* Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad (PID2019-106747RB-I00); la Junta de Andalucía (P18-RT-1453); el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades (FPU19/02408) y la Universidad de Málaga.

Este trabajo está protegido bajo la patente N.º P202030367 [6].

## Referencias

- [1] Abdul RAHIM, Thijs SPUESENS, Roel BAETS y Wim BOGAERTS, “Open-Access Silicon Photonics: Current Status and Emerging Initiatives”, *Proceedings of the IEEE*, Vol. 106, N° 12, pp. 2313-2330, 2018.
- [2] Lucas B. SOLDANO y Erik C. M. Pennings, “Optical Multi-Mode Interference Devices Based on Self-Imaging: Principles and Applications”, *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 13, N° 4, pp. 615-627, 1995.
- [3] Robert HALIR, Pavel CHEBEN, José Manuel LUQUE-GONZÁLEZ, José Darío SARMIENTO-MERENGUEL, Jens H. SCHMID, Gonzalo WANGÜMERT-PÉREZ, Dan-Xia XU, Shurui WANG, Alejandro ORTEGA-MOÑUX e Íñigo MOLINA-FERNÁNDEZ, “Ultra-Broadband nanophotonic beamsplitter using an anisotropic sub-wavelength metamaterial”, *Laser & Phot. Rev.*, Vol. 10, N° 6, pp. 1039-1046, 2016.
- [4] Pavel CHEBEN, Robert HALIR, Jens H. Schmid, Harry A. Atwater y David R. Smith, “Subwavelength integrated photonics”, *Nature*, Vol. 560, N° 7720, pp. 565-572, 2018.
- [5] Roberto SABELLA, “Silicon Photonics for 5G and Future Networks”, *IEEE Journal of Sel. Top. In Quan. Elec.*, Vol. 26, N° 2, pp. 1-11, 2019.
- [6] J. Gonzalo WANGÜMERT PÉREZ, Íñigo MOLINA FERNÁNDEZ, Alejandro ORTEGA MOÑUX, Robert HALIR y José Manuel LUQUE GONZÁLEZ. “Guía de onda periódica sub-longitud de onda enladrillada, adaptador modal y divisor de polarización que hacen uso de dicha guía de onda”, Patente P202030367 (2020).
- [7] J. Manuel LUQUE-GONZÁLEZ, Alejandro ORTEGA-MOÑUX, Robert HALIR, Jens H. SCHMID, Pavel CHEBEN, Íñigo MOLINA-FERNÁNDEZ y J. Gonzalo WANGÜMERT-PÉREZ, “Bricked subwavelength gratings: A tailorable on-chip metamaterial topology”, *Laser & Phot. Rev.*, aceptado para publicación, 2021.
- [8] Steven G. JOHNSON y John D. JOANNOPOULOS, “Block-iterative frequency-domain methods for Maxwell’s equations in a planewave basis”, *Opt. Express*, Vol. 8, N° 3, pp 173-190, 2001.
- [9] Ardavan F. OSKOOI, David ROUNDY, Mihai IBANESCU, Peter BERMEL, John D. JOANNOPOULOS y Steven G. JOHNSON, “Meep: a flexible free-software package for electromagnetic simulations by the FDTD method”, *Computer Physics Communications*, Vol. 181, N° 3, pp. 687-702, 2010.

**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 [optoel2021@unizar.es](mailto:optoel2021@unizar.es)).

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