

Diseño de antena óptica integrada de haz estrecho en tecnología *silicon-on-insulator*

Design of integrated optical antenna with small beam divergence in silicon-on-insulator

Pablo GINEL-MORENO⁽¹⁾, Alejandro ORTEGA-MOÑUX⁽¹⁾, Daniel PEREIRA-MARTÍN⁽¹⁾, Abdelfettah HADIJ-ELHOUATI⁽¹⁾, Winnie N. YE⁽²⁾, Daniele MELATI⁽³⁾, Dan-Xia XU⁽⁴⁾, Siegfried JANZ⁽⁴⁾, Alejandro SÁNCHEZ-POSTIGO⁽¹⁾, J. Gonzalo WANGÜEMERT-PÉREZ⁽¹⁾, Robert HALIR⁽¹⁾, Íñigo MOLINA-FERNÁNDEZ⁽¹⁾, Jens H. SCHMID⁽⁴⁾ y Pavel CHEBEN⁽⁴⁾

1. Dpto. de Ingeniería de Comunicaciones, E.T.S.I de Telecomunicación, Universidad de Málaga, Campus de Teatinos s/n, 29071, Málaga, España.
2. Department of Electronics, Carleton University, 1125 Colonel By Drive, Ottawa, Ontario K1S5B6, Canada.
3. Centre de Nanosciences et de Nanotechnologies, Université Paris-Saclay, CNRS, 91120 Palaiseau, France.
4. National Research Council Canada, 1200 Montreal Road, Bldg. M50, Ottawa, Ontario K1A0R6, Canada.

Persona de contacto: pgm@ic.uma.es

RESUMEN:

Las antenas ópticas acopladas en fase son un elemento clave en sistemas de *Light Detection and Ranging* (LIDAR) integrados, en los que se necesita emitir un haz óptico con ancho angular estrecho en un amplio número de ángulos. En este trabajo se muestra una nueva topología de antena óptica integrada para la plataforma *silicon-on-insulator* (SOI). La antena presenta una gran longitud de 3.65 mm, lo que permite emitir un haz óptico cuyo ancho angular es de 0.025° , uno de los más estrechos reportados hasta la fecha en esta tecnología. El *minimum feature size* (MFS) de la geometría propuesta es compatible con los procesos de fabricación en masa basados en deep-UV (MFS > 80 nm).

Palabras clave: OPA, LIDAR, Fraunhofer, Antenas, Campo lejano, Fourier, MFS.

ABSTRACT:

Optical antennas are pivotal components in Optical Phased Arrays (OPAs) for Light Detection and Ranging (LIDAR), which requires long sensing range and high scanning resolution. In this work, we report on a new type of surface-emitting antenna in silicon-on-insulator (SOI). The antenna exhibits a large aperture of 3.65 mm, resulting in a far-field diffracted beam width of 0.025° , which is a record small beam divergence for this technology. The proposed geometry is compatible with the minimum feature size (MFS) allowed in state-of-the-art deep-UV silicon photonic foundries (MFS > 80 nm).

Key words: OPA, LIDAR, Fraunhofer, Antennas, Far field, Fourier, MFS.

1.- Introducción

En los últimos años se ha llevado a cabo una intensa investigación en el campo de la integración de antenas ópticas acopladas

controladas por fase u OPAs (*Optical Phased Arrays*). Estos sistemas proporcionan un direccionamiento del haz óptico rápido y preciso, sin necesidad de utilizar circuitos MEMS

(*MicroElectroMechanical Systems*), que limitan la velocidad de escaneo de las antenas. La integración en chips fotónicos de sistemas LIDAR (*Light Detection And Ranging*) basados en OPAs posee una infinidad de aplicaciones, entre las que destaca el escaneo del entorno de vehículos autónomos (*automotive LIDAR*) [1]. Los requisitos fundamentales de un sistema LIDAR integrado son: i) ancho de haz muy estrecho (0.1° - 0.2°) para obtener una alta resolución en el escaneo, ii) capacidad de escanear con un mismo OPA un gran número de ángulos, iii) bajo consumo de potencia y iv) bajo coste de producción [2]. Gracias a los avances en la fotónica del silicio de los últimos años, los sistemas LIDAR pueden integrarse en chips para conseguir sistemas compactos que cumplan todos estos requisitos.

1.1.- Integración de OPAs en la plataforma silicon-on-insulator

La plataforma *silicon-on-insulator* (SOI) lidera el diseño de circuitos fotónicos integrados, utilizados en una gran variedad de aplicaciones como las comunicaciones ópticas [3-5], el biosensado [6,7], la física cuántica [8,9] y, por supuesto, la implementación de OPAs integrados [10-13]. Esta plataforma se caracteriza por un alto contraste de índice ($\Delta n \sim 2$) entre la capa de guiado (silicio, $n_{Si} \sim 3.45$) y el dióxido de silicio que la rodea ($n_{SiO_2} \sim 1.45$). El elevado contraste de índice proporciona un mayor confinamiento de los modos, reducidos radios de curvatura ($R \sim 5 \mu m$) y, por tanto, una mayor capacidad de integración de dispositivos en chips fotónicos. Además, la plataforma SOI permite la fabricación en masa de chips a un bajo coste unitario en centros compatibles con los procesos de fabricación CMOS.

Las antenas ópticas de gran longitud (del orden de milímetros) son necesarias para conseguir difractar haces ópticos con un ancho angular muy pequeño (del orden de 0.1°). Para conseguir esto, los elementos difractivos que componen las antenas deben ser muy débiles. Hasta ahora, la mayoría de los diseños de OPAs integrados en SOI se han basado en una geometría típica denominada *sidewall modulated waveguide grating*, en la que se introduce una pequeña perturbación periódica en las paredes laterales de la guía que constituye

la antena. Sin embargo, con este tipo de antenas es complicado conseguir un control preciso de la fuerza de radiación, que debe ser muy baja, sin utilizar perturbaciones muy pequeñas (por debajo de 10 nm) [2,13], lo que complica la fabricación de estas geometrías en fábricas convencionales. En este trabajo se propone nuestra nueva topología de antena óptica integrada [14], que permite controlar la fuerza de radiación de manera precisa, aliviando significativamente la dimensión mínima requerida para su implementación (*Minimum Feature Size*, $MFS > 80 \text{ nm}$), siendo por tanto compatible con las técnicas de fabricación en masa basadas en Deep-UV (DUV) [15].

2.- Diseño de antena óptica integrada de haz estrecho en fotónica del silicio

La topología de la antena óptica propuesta se observa en la Fig. 1. Está compuesta por:

1. Un núcleo periódico sub-longitud de onda (*SubWavelength Grating*, SWG) que implementa un metamaterial con un índice equivalente optimizado para controlar el grado de confinamiento del campo [16].

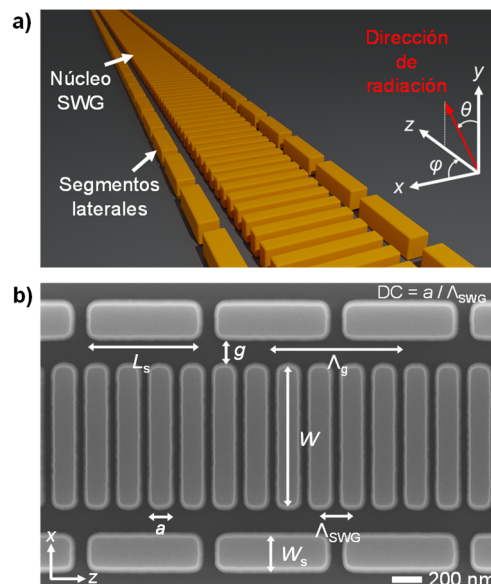


Fig. 1. a) Esquemático 3D de la geometría de la antena con núcleo SWG en SOI. No se ha representado la cubierta superior de SiO_2 para mayor claridad. b) Imagen SEM de la antena fabricada.

2. Segmentos radiativos laterales, separados una cierta distancia (g) del núcleo SWG, y que forman un *grating* de difracción de período $\Lambda_g = 4\Lambda_{\text{SWG}}$.

Esta geometría ofrece dos ventajas fundamentales. La primera está relacionada con el uso de la guía SWG, lo que proporciona un mayor control en el grado de confinamiento del modo que se propaga por ella. Mediante el diseño apropiado de esta guía (controlando su grosor y el ciclo de trabajo del SWG), se puede deslocalizar el modo y conseguir una mayor interacción con los segmentos radiativos laterales, manteniendo una separación entre el núcleo SWG y los segmentos laterales que no limite el MFS fabricable. La segunda ventaja reside en que, con esta geometría, se logra un control preciso de la fuerza de radiación mediante el ajuste fino de la separación de los segmentos laterales (g), lo que permite implementar de forma precisa fuerzas de radiación muy bajas (del orden de $\alpha < 1 \text{ mm}^{-1}$) y que la antena pueda alcanzar varios milímetros de longitud.

En la Fig. 1(a) se representa el sistema de coordenadas esféricas con el que se caracterizará el campo radiado por la antena. El ángulo θ será controlado mediante la longitud de onda de la luz con la que se alimenta la antena, tal y como indica la ecuación del *grating*:

$$n_c \sin(\theta) = n_{\text{eff}} - \frac{\lambda}{\Lambda_g} \quad (1)$$

donde n_c es el índice efectivo del medio donde radia la antena ($n_c = 1$, en nuestro caso), θ es el ángulo de difracción del *grating*, n_{eff} es el índice efectivo del modo Floquet-Bloch, λ es la longitud de onda ($\lambda_0 \sim 1.55 \text{ }\mu\text{m}$) y Λ_g es el período del *grating*. El ancho de haz en esta dirección vertical ($\Delta\theta$) dependerá de la longitud de antena. En la dirección azimutal (φ), el haz será divergente con un ancho muy extenso. El máximo del lóbulo principal se encontrará a $\varphi = 90^\circ$ en el caso de una única antena. La antena será diseñada para la plataforma SOI con una altura de la capa de silicio $H = 220 \text{ nm}$, un BOX (*Bottom OXide*) de $2 \text{ }\mu\text{m}$ y una cubierta o *cladding* superior de SiO_2 con un grosor también de $2 \text{ }\mu\text{m}$. La polarización escogida para este diseño es TM (*Out-of-*

Plane), ya que el modo se encuentra más expandido y por tanto le afectarán menos los errores de coherencia de fase provocados por las no idealidades del proceso de fabricación.

2.1.- Diseño del núcleo SWG

El objetivo que tiene la guía SWG es conseguir propagar un modo con polarización TM con un índice efectivo bajo, pero que debe ser suficiente para que las pérdidas por *leakage* al substrato inferior de silicio sean despreciables. Se ha comprobado por simulación que un índice efectivo de $n_{\text{eff}} \approx 1.6$ es suficiente para que no se produzca una pérdida de potencia importante en una estructura de longitud de varios milímetros. Este índice efectivo se consigue para una guía SWG con un ancho $W = 900 \text{ nm}$, un ciclo de trabajo $\text{DC}_{\text{SWG}} = 0.6$ y un período $\Lambda_{\text{SWG}} = 208 \text{ nm}$. El índice efectivo del modo que viaja por la guía SWG no se verá afectado en gran medida al añadir los segmentos laterales, ya que la interacción entre núcleo y segmentos de difracción debe ser muy débil.

2.2.- Optimización de la estructura

Una vez que la guía SWG está diseñada, hay que estudiar la interacción del modo que se propaga por esta con los segmentos radiativos laterales, mediante la optimización de la distancia (g) a la que estos se colocan y su tamaño (W_s y L_s). El primer paso en el diseño de los segmentos laterales es elegir el período en el que estarán agrupados a lo largo del eje longitudinal (z). Los segmentos laterales son colocados con un período de $\Lambda_g = 832 \text{ nm}$, permitiendo que el ángulo de radiación sea $\theta = -15.5^\circ$ a la longitud de onda central de trabajo $\lambda_0 = 1.55 \text{ }\mu\text{m}$. Debido a que los segmentos laterales tienen un período constante a lo largo de toda la antena, el patrón de emisión del campo cercano presentará un decaimiento exponencial a lo largo de la dirección de propagación (z). El campo lejano puede calcularse a través de la integral de Fraunhofer del campo cercano, que no es más que la transformada de Fourier bidimensional de este. Conocida la función de campo lejano emitida por un *grating* constante, si la antena es suficientemente larga podemos estimar el ancho de haz a 3dB en campo lejano con la siguiente expresión [17]:

$$\Delta\theta_{3\text{dB}}(\text{rad}) \approx \frac{2\alpha}{k_0 \cos(\theta)} \quad (2)$$

donde α es la fuerza de radiación, k_0 es el número de onda en el vacío y θ es el ángulo de radiación. Para el diseño de la longitud de la antena se ha impuesto que el haz difractado tenga un ancho a 3dB en torno a $\Delta\theta_{3\text{dB}} = 0.02^\circ$. Para conseguirlo sin que varíe demasiado el ancho de haz cuando se realice un escaneo alrededor de la longitud de onda central, se impone que el rango de fuerzas de radiación en que debe estar diseñada la antena vaya desde 0.6 mm^{-1} a 0.7 mm^{-1} . Una vez se ha limitado la zona de diseño entre dos fuerzas de radiación concretas, el siguiente paso es encontrar la geometría adecuada para la colocación de los segmentos laterales. Para ello, se realiza un barrido simulando varias geometrías, donde se varían los valores de separación (g) y anchura de los segmentos (W_s). En este barrido, se ha mantenido fija una longitud de segmento $L_s = 700 \text{ nm}$ para garantizar que haya suficiente espacio entre los sucesivos segmentos radiativos. En la Fig. 2 se muestran los resultados de las simulaciones del barrido, donde se han calculado tanto la fuerza de radiación como la direccionalidad de la antena para cada geometría. En la Fig. 2(a) se observa cómo los parámetros del barrido (g y W_s) permiten un control eficiente de la fuerza de radiación, pudiendo ajustarla a un gran rango de valores diferentes. En la Fig. 2(b) se muestra que la direccionalidad de la antena es superior a 0.5 para un gran rango de valores de g y W_s , lo que indica que las reflexiones en el interfaz inferior BOX-sustrato se están sumando de forma constructiva con la radiación saliente de la antena. Para un gap $g = 180 \text{ nm}$ y un ancho de segmento $W_s = 190 \text{ nm}$, la fuerza de radiación de la antena es $\alpha = 0.63 \text{ mm}^{-1}$, y se consigue una direccionalidad $D \approx 0.6$. Para este diseño, la longitud necesaria para radiar el 99% de la potencia introducida en la antena es $L = 3.65 \text{ mm}$, mientras que el ángulo de radiación a la longitud de onda central es $\theta \approx -15.70^\circ$.

3.- Resultados numéricos

Los resultados que se presentan a continuación son obtenidos mediante análisis Floquet-Bloch basado en simulación 3D FDTD con condiciones de contorno periódicas. En la Fig.

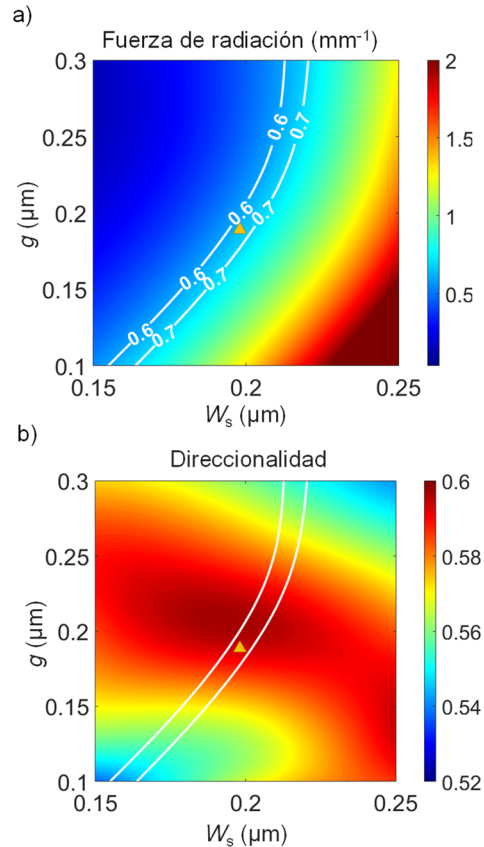


Fig. 2. Análisis Floquet de diferentes geometrías. a) Fuerza de radiación de los segmentos laterales en (mm^{-1}). b) Direccionalidad de la antena. Las líneas blancas delimitan el espacio de diseño para conseguir una fuerza de radiación que implique un ancho de haz muy estrecho.

3(a) se representa el corte en la dirección vertical (θ). Si analizamos este corte del haz, se observa que tiene un ancho a 3dB $\Delta\theta_{3\text{dB}} = 0.025^\circ$, uno de los más estrechos conseguidos en una antena óptica integrada para la plataforma SOI [18]. En la Fig. 3(b) se representa el corte del haz en la dirección transversal (φ). Al tratarse del campo lejano difractado por una sola antena, la forma de este corte viene dada por el propio diagrama de radiación de la antena. Debido a que en la dirección transversal la antena radia aproximadamente un haz gaussiano, en la región de campo lejano tendremos un perfil gaussiano con un gran ancho de haz a 3dB $\Delta\varphi_{3\text{dB}} = 60^\circ$. Aun así, esta información es bastante útil, ya que el diagrama de radiación de una sola antena nos informa del máximo ángulo que podrá apuntar en la dirección transversal el OPA-1D que se forme con la agrupación de estas antenas. En la Fig. 3(c) se ha representado el corte en la dirección

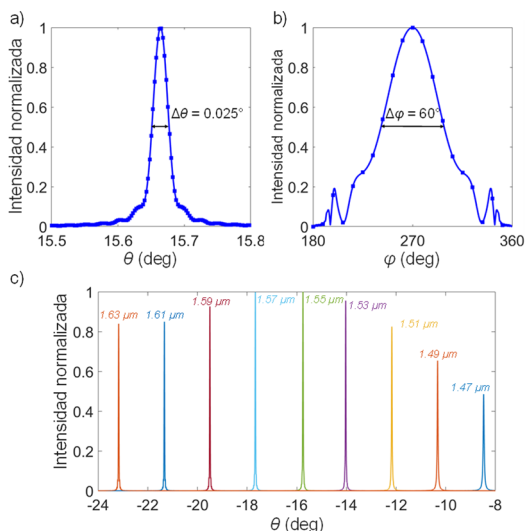


Fig. 3. Intensidad óptica normalizada del haz difractado por la antena en campo lejano, representando sus cortes en las direcciones a) vertical (θ) transversal (φ). c) Escaneo del haz en campo lejano mediante la variación de la longitud de onda.

vertical (θ) de la intensidad óptica en campo lejano, para diferentes longitudes de onda. Los parámetros característicos de la antena, tales como la fuerza de radiación y la direccionalidad, cambian con la longitud de onda. En la Fig. 4(a) se puede observar cómo a medida que la longitud de onda crece, la fuerza de radiación disminuye. A longitudes de onda altas la potencia radiada hacia arriba cae debido a que la fuerza de radiación es menor, por lo que una parte significativa de la potencia llega al final de la antena sin ser radiada. A longitudes de onda bajas la potencia radiada hacia arriba también disminuye, aunque en este caso este efecto se debe a que, a esas longitudes de onda, las reflexiones BOX-substrato ya no se suman en fase. En la Fig. 4(b) se muestra el cambio en la dirección de radiación θ con la longitud de onda. Se observa un comportamiento lineal y una velocidad de escaneo $\partial\theta/\partial\lambda = -0.092^\circ/\text{nm}$.

4.- Conclusión

Una de las ventajas principales de este diseño es que permite la implementación de antenas ópticas integradas de gran longitud en la plataforma de alto contraste SOI. En concreto, se ha demostrado que la fuerza de radiación de la antena puede ser controlada de forma eficiente colocando unos segmentos radiativos laterales

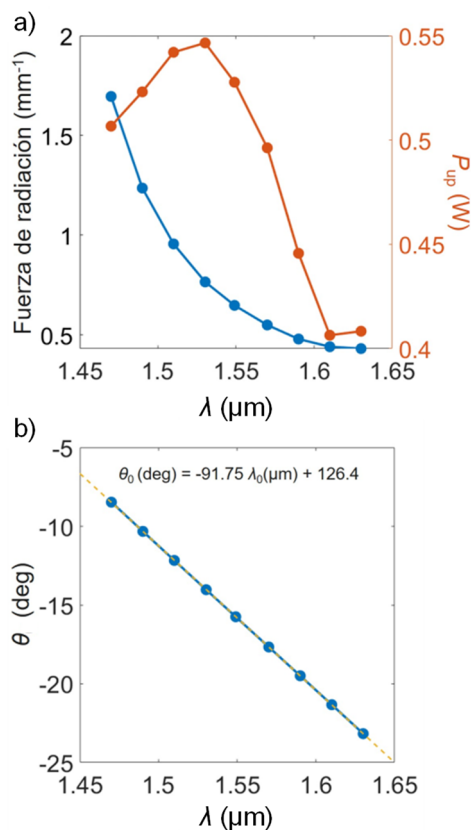


Fig. 4. a) Fuerza de radiación y potencia radiada hacia arriba en función de la longitud de onda. b) Variación del ángulo de radiación con la longitud de onda.

que interactúan con el campo evanescente del modo que se propaga por un núcleo metamaterial SWG. Esto ha permitido diseñar una antena de longitud $L = 3.65$ mm con un MFS compatible con las técnicas de fabricación DUV, lo que potencialmente permitiría su fabricación en masa. La directividad de la antena a la longitud de onda central se sitúa en el 60%, mientras que el ancho de haz difractado en campo lejano se sitúa en torno a $\Delta\theta_{3\text{dB}} = 0.025^\circ$, uno de los más estrechos reportados en esta tecnología hasta la fecha. Actualmente se está trabajando en la caracterización experimental de las antenas fabricadas.

Agradecimientos: Este trabajo ha sido financiado por NRC National Program Office Ideation Program–New Beginning Fund; Ministerio de Economía y Competitividad FEDER (TEC2016-80718-R); Ministerio de Universidades (FPU16/03401, FPU17/00638); Junta de Andalucía (P18-RT-1453, P18-RT-793); FEDER Andalucía (UMA18-FEDERJA-219); Ministerio de Ciencia e Innovación

(PID2019-106747RB-I00); Universidad de Málaga.

Referencias

- [1] M. Al-Amri, M. el-Gomati, and M. Suhail Zubairy, “*Optics in our time*” (Springer Nature, 2016).
- [2] T. Kim, P. Bhargava, C.V. Poulton, J. Notaros, A. Yaacobi, E. Timurdogan, C. Baiocco, N. Fahrenkopf, S. Kruger, T. Ngai, Y. Timalcina, M.R. Watts, and V. Stojanovic, “*A Single-Chip Optical Phased Array in a Wafer-Scale Silicon Photonics / CMOS 3D-Integration Platform*” (IEEE Journal of solid-state circuits, 2019).
- [3] R. Halir, G. Roelkens, A. Ortega-Moñux, and J. G. Wangüemert-Pérez, “*High performance 90° hybrid based on a silicon-on-insulator multimode interference coupler*” (Optics Letters, 2011).
- [4] J. D. Sarmiento-Merenguel, R. Halir, X. Le Roux, C. Alonso-Ramos, L. Vivien, P. Cheben, E. Durán-Valdeiglesias, I. Molina-Fernández, D. Marris-Morini, D.-X. Xu, J. H. Schmid, S. Janz, and A. Ortega-Moñux, “*Demonstration of integrated polarization control with a 40 dB range in extinction ratio*” (Optica, 2015).
- [5] W. Jiang, T. Li, J. Miao, and L. Ma, “*Silicon TM-mode multiplexer based on bridged subwavelength grating*”, (Optics Communications, 2020).
- [6] M.C. Estevez, M. Alvarez, and L.M. Lechuga, “*Integrated optical devices for lab-on-a-chip biosensing applications*” (Laser & Photonics Reviews, 2012).
- [7] D. Rodrigo, O. Limaj, D. Janner, D. Etezadi, F. Javier García De Abajo, V. Pruneri, and H. Altug, “*Mid-infrared plasmonic biosensing with graphene*” (Science, 2015).
- [8] A. Politi, J.C.F. Matthews, M.G. Thompson, and J. L. O’Brien, “*Integrated quantum photonics*” (IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics, 2009).
- [9] J. He, B.A. Bell, A. Casas-Bedoya, Y. Zhang, A.S. Clark, C. Xiong, and B.J. Eggleton, “*Ultra-compact quantum splitter of degenerate photon pairs*” (Optica, 2015).
- [10] K.V. Acoleyen, W. Bogaerts, J. Jágerská, N. Le-Thomas, R. Houdré, and R. Baets, “*Off-chip beam steering with a one-dimensional optical phased array on silicon-on-insulator*” (Optics Letters, 2009).
- [11] C.V. Poulton, A. Yaacobi, D.B. Cole, M. J. Byrd, M. Raval, D. Vermeulen, and M.R. Watts, “*Coherent solid-state LIDAR with silicon photonic optical phased arrays*” (Optics letters, 2017).
- [12] D.N. Hutchison, J. Sun, J.K. Doylend, R. Kumar, J. Heck, W. Kim, and H. Rong, “*High-resolution aliasing-free optical beam steering*” (Optica, 2016).
- [13] S.A. Miller, Y.C. Chang, C.T. Phare, M.C. Shin, M. Zadka, S.P. Roberts, and M. Lipson, “*Large-scale optical phased array using a low-power multi-pass silicon photonic platform*” (Optica, 2020).
- [14] P. Ginel-Moreno, D. Pereira-Martín, A. Hadij-ElHouati, W.N. Ye, D. Melati, D.X. Xu, ... and P. Cheben, “*Highly efficient optical antenna with small beam divergence in silicon waveguides*” (Optics Letters, 2020).
- [15] E. Luan, V. Donzella, K. Cheung, and L. Chrostowski, “*Advances in silicon photonics sensors using sub-wavelength gratings*” (OECC/PSC, 2019).
- [16] P. Cheben, R. Halir, J.H. Schmid, H.A. Atwater, and D.R. Smith, “*Subwavelength integrated photonics*” (Nature, 2018).
- [17] W. Fuscaldò, D.R. Jackson, and A. Galli, “*Beamwidth properties of endfire 1-D leaky-wave antennas*” (IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017).
- [18] X. Sun, L. Zhang, Q. Zhang, and W. Zhang, “*Si photonics for practical LiDAR solutions*” (Applied Sciences, 2019).

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).

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