

Estructuras sub-longitud de onda para el diseño de dispositivos en guía dieléctrica

Alejandro Ortega-Moñux⁽¹⁾, Gonzalo Wangüemert-Pérez⁽¹⁾, Robert Halir⁽¹⁾, Pavel Cheben⁽²⁾, Rafael Godoy-Rubio⁽¹⁾, Jose de-Oliva-Rubio⁽¹⁾, Pedro Reyes-Iglesias⁽¹⁾, Alejandro Sánchez-Postigo⁽¹⁾, Jose Manuel Luque-González⁽¹⁾, Jose Darío Sarmiento-Merenguel⁽¹⁾, J. Soler-Penadés⁽³⁾, M. Nedeljkovic⁽³⁾, G.Z. Mashanovich⁽³⁾, and Íñigo Molina-Fernández⁽¹⁾

aom@ic.uma.es, imf@ic.uma.es

⁽¹⁾ Dpto. de Ingeniería de Comunicaciones, ETSI Telecomunicación, Universidad de Málaga, 29010 Málaga

⁽²⁾ National Research Council Canada, 1200 Montreal Road, Bldg. M50, Ottawa K1A 0R6, Canada

⁽³⁾ Optoelectronics Research Centre, Faculty of Physical and Applied Sciences, Univ. of Southampton, UK

Abstract- Sub-wavelength structures are enabling the design of devices based in dielectric waveguides with unprecedented performance in both the near-infrared and mid-infrared wavelength regions. These devices include fiber-to-chip grating couplers with sub-decibel efficiency, waveguide couplers with bandwidths of several hundred nanometers, and low loss suspended waveguides. Here we will report our progress in the electromagnetic modelling and simulation of sub-wavelength structures, providing at the same time an intuitive vision of their fundamental optical properties. Furthermore, we will address design strategies for several integrated optical devices based on these structures, and present the latest experimental results for structures operating both at near and mid-infrared wavelengths.

I. INTRODUCCIÓN

Las estructuras sub-longitud de onda son disposiciones de materiales con un periodo lo suficientemente pequeño como para que no se produzcan efectos difractivos, de manera que se comportan como meta-materiales cuyas propiedades (índice de refracción, dispersión y anisotropía) vienen determinadas por su geometría. Tales estructuras ya fueron utilizadas por Hertz para estudiar la polarización de ondas radio mediante rejillas metálicas [1], y fueron descritas analíticamente por Rytov en los años 60 del siglo pasado [2]. Por otro lado, el reciente desarrollo de técnicas litográficas de alta resolución, asociada a los procesos de fabricación CMOS, permite la realización de guías dieléctricas en silicio, lo que ha dado lugar al campo de la fotónica del silicio [3]. La aplicación de estructuras sub-longitud de onda en este ámbito presenta multitud de retos y oportunidades tanto para aplicaciones de comunicaciones como de sensado, en los que está avanzado una creciente comunidad internacional, incluyendo nuestro grupo [4].

En esta comunicación exponemos, de manera somera, los principios electromagnéticos en los que se basa el diseño y simulación de dispositivos con meta-materiales sub-longitud de onda ópticos (sección II), y examinamos algunas de sus aplicaciones más recientes, incluyendo acopladores en guía de banda ultra-ancha, y guías suspendidas para el infrarrojo medio (sección III).

II. ESTRUCTURAS SUB-LONGITUD DE ONDA

La Fig. 1(a) muestra una estructura sub-longitud de onda canónica, compuesta por tres materiales con índices de

refracción n_1 , n_2 y n_3 , con valores típicos $n_1=3.48$ (Silicio), $n_2=1.45$ ó 1 (Óxido de Silicio ó Aire) y $n_3=1.45$. Denotamos el periodo de la estructura por Λ , y definimos su ciclo de trabajo como a/Λ . Las Fig. 1(b)-(d) ilustran el comportamiento de la estructura para diferentes periodos. Cuando el vector de onda, k , cumple la condición de Bragg, es decir $k=\pi/\Lambda$, se produce reflexión como se muestra en la Fig. 1(c). Para periodo mayores la estructura radia la energía [Fig. 1(d)]. Sin embargo, cuando $k<\pi/\Lambda$ la estructura se encuentra en régimen sub-longitud de onda (SWG, Subwavelength Waveguide Grating) y se comporta como un meta-material homogéneo [Fig. 1(b)].

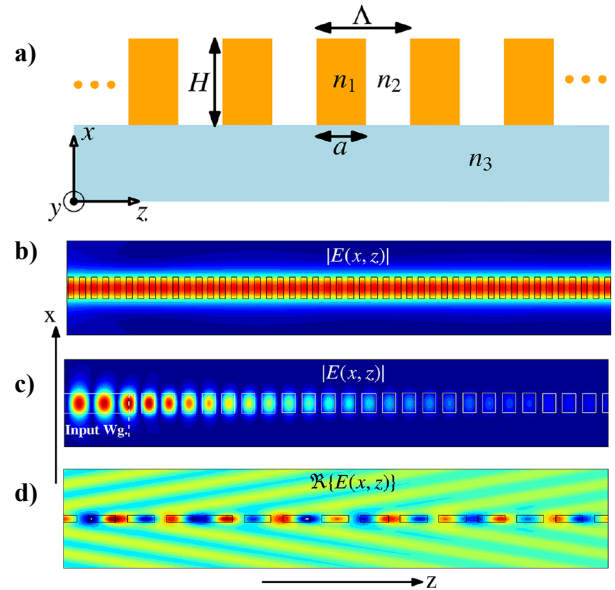


Fig. 1. a) Estructura sub-longitud canónica. Propagación de una onda a frecuencias ópticas a través de la estructura cuando: b) el periodo de la estructura es inferior a media longitud de onda ($\Lambda < \lambda/k$), c) el periodo es similar a media longitud de onda produciendo reflexión de Bragg, d) el periodo es superior a media longitud de onda resultando en radiación. En todos los casos se asume $n_2=n_3$.

En la zona SWG cabe distinguir a su vez dos sub-zonas, la zona *deep-SWG* ($\lambda \gg \Lambda$), en el que la estructura se comporta como una guía convencional con un núcleo homogéneo equivalente cuyo índice de refracción se puede controlar (“*index engineering*”), sin más que variar la proporción de los materiales n_1 (Silicio) y n_2 (cubierta) que componen el periodo. En esta zona, la curva de dispersión es

aproximadamente lineal y los índices de refracción del meta-material equivalente se pueden obtener mediante las expresiones de primer orden de Rytov [2]:

$$n_{\parallel}^2 = n_1^2 \frac{a}{\Lambda} + n_2^2 \left(1 - \frac{a}{\Lambda}\right); \quad n_{\perp}^{-2} = n_1^{-2} \frac{a}{\Lambda} + n_2^{-2} \left(1 - \frac{a}{\Lambda}\right), \quad (1)$$

según la polarización de la onda sea paralela (n_{\parallel}) o perpendicular (n_{\perp}) al interfaz entre los medios n_1 y n_2 . Dichas expresiones revelan, por un lado, la elevada anisotropía del meta-material, y por otro, cómo puede ajustarse su índice de refracción equivalente mediante el ciclo de trabajo.

La segunda sub-zona SWG, o *shallow-SWG*, se produce a medida que crece el tamaño del periodo y nos acercamos a la condición de Bragg. En esta región la propagación de la luz sigue siendo sin pérdidas, pero su curva de dispersión se aleja claramente de una línea recta, tanto más cuanto más cerca estemos del Bragg, y la estructura se puede modelar como una guía de onda con un núcleo homogéneo equivalente con una acusada y ajustable dispersión cromática. Con ingeniería (“*dispersion engineering*”), esta propiedad puede ser usada para compensar la dispersión geométrica del dispositivo a diseñar y lograr comportamientos de banda ultra-ancha.

La caracterización exacta de guía periódicas sub-longitud de onda, así como de los dispositivos que hacen uso de las mismas, requiere realizar un análisis electromagnético en términos de modos Bloch-Floquet, que se puede realizar mediante herramientas numéricas como FEXEN [5].

III. APLICACIONES

La posibilidad de controlar el índice de refracción del meta-material y su dependencia con la longitud de onda ha dado lugar multitud de aplicaciones en óptica integrada, incluyendo acopladores chip-a-fibra de alta eficiencia o elevado ancho de banda, híbridos de 90° extraordinariamente compactos, sensores de muy alta sensibilidad y demultiplexores de longitud de onda [4][6].

A. Desarrollo de una nueva plataforma de Silicio Suspendido para el infrarrojo medio

Una de sus aplicaciones más recientes y quizás de mayor potencial se encuentra en la realización de guías de onda para el infrarrojo medio [7]. El infrarrojo medio, comprendido entre longitudes de onda de 2 μ m a 20 μ m, es de gran interés para aplicaciones de sensado, ya que muchas sustancias de interés (como el dióxido de carbono o el metano) presentan espectros de absorción muy específicos (“huellas dactilares”) en esta banda. La extensión de las guías dieléctricas de silicio convencionales a estas longitudes de onda presenta varios retos [7]. La mayor limitación proviene de la capa de dióxido de silicio, también denominada BOX (“Bottom OXide”), sobre la que descansan las guías de silicio ya que ésta absorbe luz con longitudes de onda superiores a 4 μ m. Para poder aprovechar la ventana de transparencia del silicio en su totalidad ($\lambda < 8\mu$ m) [8], es necesario eliminar el dióxido de silicio de debajo de la zona de guiado mediante un grabado con ácido fluorhídrico. Para ello, se ha diseñado una novedosa estructura de guiado sub-longitud de onda, como la mostrada en la Fig. 2(a). Como se puede observar en dicha figura, la novedad reside en que al núcleo de silicio se le han añadido unas barras o tiras periódicas de sujeción lateral, las cuales, cuidadosamente diseñadas para trabajar en zona SWG,

realizan tres funcionalidades distintas: i) permiten el paso del ácido fluorhídrico (HF) a través de los huecos entre tiras para eliminar el SiO₂ del BOX, ii) permiten mantener suspendido el núcleo de Silicio, una vez que el SiO₂ ha sido eliminado, y iii) producen el contraste de índice de refracción necesario entre núcleo y cubierta para mantener las condiciones de guiado. El diseño de la estructura es una de sus mayores dificultades, pues las dimensiones geométricas que mejor satisfacen cada una de las funcionalidades exigidas son contrapuestas entre sí, lo que obliga a llegar un compromiso entre ellas. Por ejemplo, si se desea dotar a la estructura de una mayor robustez mecánica, las tiras o barras deberán ser estrechas ($W_{clad} \downarrow$) y gruesas ($l_{Si} \gg l_{Hole}$). Sin embargo, esta elección es perjudicial tanto desde el punto de vista de fabricación como de confinamiento óptico. Con respecto a lo primero, es necesario que los huecos tengan un tamaño mínimo de 450 nm ($l_{Hole} \gg l_{Si}$) para permitir el paso del ácido hacia el BOX en el fase de eliminación del mismo. Con respecto a lo segundo, para evitar pérdidas de potencia óptica a través de las propias tiras de sujeción, es necesario que el campo no alcance el silicio lateral que no ha sido suspendido (“*lateral leakage losses*”), para lo cual es necesario tiras anchas ($W_{clad} \uparrow$), lo cual parece obvio, pero también finas ($l_{Hole} \gg l_{Si}$), para aumentar el contraste entre el núcleo de silicio y el medio material equivalente que sintetizan las tiras, con el consiguiente mayor confinamiento de los campos.

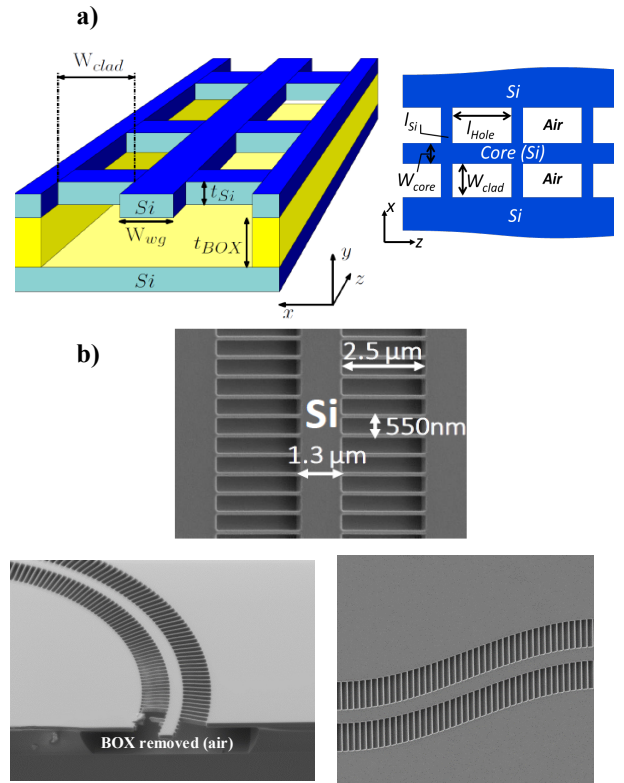


Fig. 2. a) Geometría esquemática de una guía suspendida mediante una estructura sub-longitud de onda en sus laterales. b) Imágenes de microscopio electrónico mostrando la estructura fabricada, capaz de operar a una longitud de onda de $\sim 3.8\mu$ m. Dimensiones del diseño realizado: $t_{Si}=500$ nm; $t_{BOX}=3$ μ m; $W_{core}=1.3$ μ m; $W_{clad}=2.5$ μ m; $\Lambda=550$ nm; $l_{Si}=100$ nm; $l_{Hole}=450$ nm.

Para demostrar la viabilidad de la nueva plataforma de guiado para el infrarrojo medio, se han diseñado, fabricado y caracterizado un amplio conjunto componentes y dispositivos

pasivos básicos: guías de interconexión, curvas, dispositivos de interferencia multimodal 3dB-90° (MMI) e interferómetros de Mach-Zehnder. Los diseños fueron realizados todos a la longitud de onda central de 3.8 μm , por compatibilidad con el “set-up” de medida disponible. En futuros diseños se piensa extender el concepto a longitudes de ondas mayores y cubrir la ventana total de transparencia del silicio (4-8 μm).

Comenzando por las guías de interconexión, decir que, en relación al primer diseño presentado en [7], se consiguió un nuevo diseño que mejoraba notablemente las pérdidas de propagación, sólo 0.82 dB/cm, valor que es actualmente de los más bajos que se han alcanzado en la banda del infrarrojo medio. También se incrementó considerablemente su robustez mecánica, al disminuir el número de guíasondas que se fracturaban. En la Fig. 2(b) se muestra la imagen SEM de la guíaonda fabricada y en el pie de figura se resumen sus dimensiones. En cuanto a las curvas, los resultados también fueron muy satisfactorios, con pérdidas de sólo 0.014 dB/curva para curvas de 90° y 15,7 μm de radio, y de 0.01 dB/curva para curvas de tipo “S” (véase la Fig. 2(b)).

El diseño y simulación del MMI preveían un comportamiento casi perfecto en la banda 3700-3900 nm, con pérdidas de exceso, desbalanceo y errores de fase que debían estar por debajo de 0.4 dB, 0.15 dB y 2°, respectivamente, en todo el rango de longitudes de onda. En la Fig. 3(a) se muestran sus dimensiones nominales y la propagación del campo en la sección multimodal. Sin embargo, las medidas arrojaron un comportamiento peor de lo esperado, incrementándose las pérdidas de inserción hasta 1.6 dB y el desbalanceo hasta 0.5 dB, tal y como se puede observar en la Fig. 3(b). La explicación a dicha desviación creemos que se debe a que el mayor ancho de los MMI nos obligó a incrementar los tiempos de exposición al ácido fluorhídrico, para garantizar la eliminación de todo el BOX subyacente. Ello provocó que una pequeña capa de silicio en ancho y en grosor pudiera ser también eliminado. Para confirmar esta hipótesis, repetimos las simulaciones introduciendo una reducción de 80 nm en las dimensiones nominales, tanto en ancho como en grosor. Como se puede observar en la Fig. 3(b), existe mucha sintonía entre las medidas y las simulaciones. En futuros diseños, este efecto podrá ser tenido en cuenta en el proceso de fabricación, sobredimensionando los diseños adecuadamente, y pudiendo obtenerse por tanto un resultado más parecido al nominalmente esperado.

B. Dispositivo de Interferencia Multimodal de gran ancho de banda.

Otra aplicación destacable de los meta-materiales sub-longitud de onda reside en lo que denominamos “ingeniería de la dispersión”, que trata de aprovechar las características dispersivas de éstos para obtener dispositivos de gran ancho de banda. Consideremos para ello el acoplador de interferencia multimodal (MMI) mostrado esquemáticamente en la Fig. 4(a). En este tipo de dispositivos, el modo fundamental de la guía de acceso (E_{in}) excita varios modos (Φ_i) de la zona multimodo central, que, al tener diferentes constantes de propagación, interfieren de manera constructiva y destructiva conforme se propagan [9]. Dicha interferencia da lugar a imágenes múltiples (replicas) de la excitación, las cuales se pueden acoplar a las guías de salida, fijando adecuadamente la longitud L_{MMI} como se muestra para el caso de 2 imágenes en la Fig. 4(a) y como se mostró

también en la Fig. 3.a para el caso del MMI en la plataforma de silicio suspendido. El dispositivo de 4 puertos resultante se comporta como un híbrido 2x2 a 3 dB y 90°.

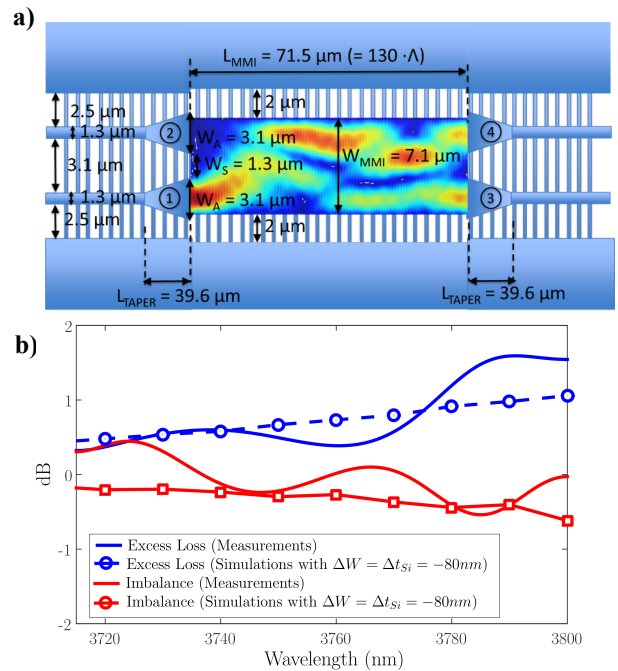


Fig. 3. a) Vista esquemática y dimensiones nominales del MMI 2x2 3dB-90° diseñado para la plataforma de silicio suspendido. b) Comparación entre las medidas obtenidas y la simulación del dispositivo con una reducción en ancho y grosor de 80 nm.

La distancia a la que se forman las imágenes es directamente proporcional la longitud de batido de los primeros modos de la zona multimodo:

$$L_{\pi} = \frac{\pi}{\beta_0 - \beta_1}, \quad (2)$$

donde β_0 y β_1 son las constantes de propagación de los dos primeros modos (Φ_0 y Φ_1). La Fig. 4(b) muestra la dependencia de la longitud de onda de la longitud de batido de un MMI convencional, de ancho $W_{MMI}=3.3\mu\text{m}$, para la plataforma silicon-on-insulator, con un grosor de la capa de silicio de 220nm, e índices de refracción en el núcleo y la cubierta de 3.45 y 1.44, respectivamente. Se observa que la longitud de batido varía considerablemente en el rango de longitudes de onda considerado, de manera que también variará la distancia a la que se forman las imágenes. Dado que la longitud física del dispositivo (L_{MMI}) es fija, sólo será posible tener el dispositivo sintonizado en una banda estrecha, fuera de la cual se producirá un deterioro de sus prestaciones.

Al segmentar la zona multimodo mediante una estructura sub-longitud de onda, como se muestra en la imagen de microscopía electrónica de la Fig. 5(a), se dispone de dos nuevos grados de libertad para diseñar la dispersión de las constantes de propagación: el ciclo de trabajo y el periodo (Λ). Hemos observado, mediante simulación, que las longitudes de acoplo mínimas se consiguen para ciclos de trabajo entorno al 50%, mientras que el periodo de la estructura ofrece cierto control sobre la dependencia con la longitud de onda de la misma. La Fig. 4(b) muestra la dependencia de la longitud de onda para una estructura optimizada con un ciclo de trabajo del 50% y un periodo de $\Lambda=190\text{nm}$. Puede observarse que la longitud de acoplo no

sólo ha disminuido aproximadamente en un factor 3, sino que además se ha vuelto casi independiente de la longitud de onda. De hecho, realizando simulaciones 3D con el método de diferencias finitas en el dominio del tiempo (FDTD), se comprueba que el dispositivo exhibe, en la banda de 1250nm a 1750nm pérdidas de exceso por debajo de 1dB, desbalanceo inferior a 0.5dB y un error de fase inferior a 5°, prestaciones que son inalcanzables con MMIs convencionales.

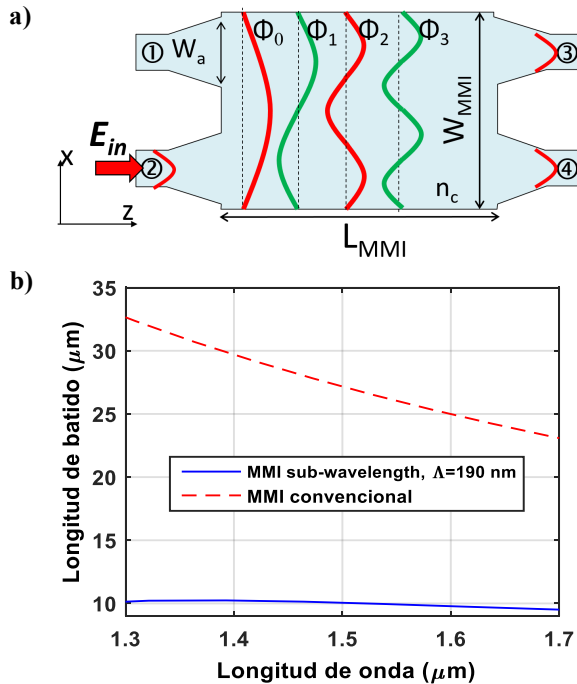


Fig. 4. a) Vista esquemática de un MMI 2x2 convencional. b) Simulación 3D de la longitud de batido de un MMI convencional y un MMI sub-longitud de onda del mismo ancho en función de la longitud de onda.

El dispositivo se ha fabricado, en un sustrato de silicio de 220nm de grosor, empleando litografía e-beam y grabado RIE (reactive ion etching). El dispositivo fabricado se muestra en la Fig.5 (a) antes de la deposición de una capa de dióxido de silicio mediante PECVD (plasma enhanced chemical vapor deposition). Los primeros resultados de medida se muestran en la Fig. 5(b), donde se observa un comportamiento casi ideal del dispositivo en un ancho de banda de unos 300nm entorno a 1550nm, con pérdidas de exceso y desbalanceo inferiores a 1dB y un error de fase acotado a 5°. Esto supone una mejora de aproximadamente un factor tres respecto a dispositivos de interferencia multimodal convencionales, por lo puede resultar de gran utilidad en el ámbito de las comunicaciones ópticas [9] [10].

IV. CONCLUSIONES

Las estructuras sub-longitud de onda ofrecen la posibilidad de diseñar localmente el índice de refracción y la dispersión a frecuencias ópticas. Mediante un modelado adecuado dichas estructuras pueden emplearse para diseñar y realizar dispositivos ópticos integrados rompedores, como las guías de silicio suspendidas para la banda del infrarrojo medio o los acopladores de banda ultra ancha presentados aquí. Esperamos que en la medida en la que estas estructuras puedan modelarse y fabricarse con más precisión, continuará

extendiéndose su uso a nuevos dispositivos y bandas de longitud de onda.

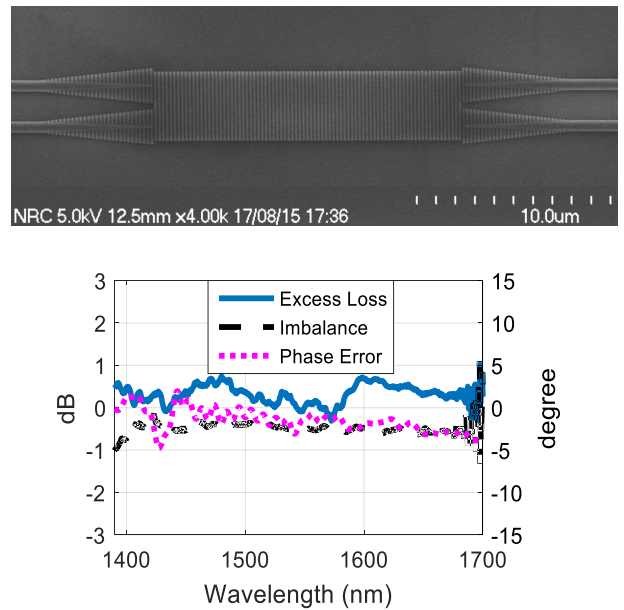


Fig. 5. a) Imagen de microscopio electrónico de un acoplador de interferencia multimodal basado en meta-materiales que funciona como un híbrido de 90° de gran ancho de banda. b) Medidas de pérdidas de exceso, desbalanceo y error de fase del dispositivo.

AGRADECIMIENTOS

Ministerio de Economía y Competitividad, "Programa Estatal de Investigación, Desarrollo e Innovación Orientada a los Retos de la Sociedad (cofinanciado FEDER)", Proyecto TEC2013-46917-C2-1-R; Universidad de Málaga - Campus de Excelencia Internacional Andalucía Tech.

REFERENCIAS

- [1] H. Hertz, "Ueber Strahlen elektrischer Kraft," *Wiedemanns Ann.*, vol. 36, pp. 769, 1888.
- [2] S. M. Rytov, "The electromagnetic properties of finely layered medium," *Sov. Phys. JETP*, vol. 2, pp. 466 – 475, 1956.
- [3] "Silicon Photonics," *Nat. Photonics*, vol. 4, pp. 491 – 578, 2010. <http://www.nature.com/nphoton/focus/siliconphotonics/index.html>
- [4] R. Halir, P. J. Bock, P. Cheben, A. Ortega-Moñux, C. Alonso-Ramos, J. H. Schmid, J. Lapointe, D.-X. Xu, J. G. Wangüemert-Pérez, Í. Molina-Fernández et al., "Waveguide sub-wavelength structures: a review of principles and applications," *Laser Photonics Rev.*, vol 9, pp. 25 – 49, 2015.
- [5] L. Zavargo-Peche, A. Ortega-Moñux, J. Wangüemert-Pérez, and I. Molina-Fernández, "Fourier based combined techniques to design novel sub-wavelength optical integrated devices," *Prog. Electromagn. Res.*, vol 123, pp. 447 – 465, 2012.
- [6] J. G. Wangüemert-Pérez, P. Cheben, A. Ortega-Moñux, C. Alonso-Ramos, D. Pérez-Galacho, R. Halir, I. Molina-Fernández, D. Xu, and J. Schmid, "Evanescent field waveguide sensing with subwavelength grating structures in silicon-on-insulator," *Opt. Lett.* 39, pp. 4442-4445, 2014.
- [7] J. Soler Penadés, C. Alonso-Ramos, A. Z. Khokhar, M. Nedeljkovic, L. A. Boodhoo, A. Ortega-Moñux, I. Molina-Fernández, P. Cheben, and G. Z. Mashanovich, "Suspended SOI waveguide with sub-wavelength grating cladding for mid-infrared," *Opt. Lett.*, vol 39, pp. 5661 – 5664, 2014.
- [8] R. Soref, "Mid-infrared photonics in silicon and germanium," *Nat. Photonics*, vol. 4, pp. 495 – 497, 2010.
- [9] L. B. Soldano, and E. Pennings, "Optical multi-mode interference devices based on self-imaging: principles and applications," *J. Lightwave Technol.*, vol. 13, pp. 615 – 627, 1995.
- [10] I. Molina-Fernández, "Coherent receivers for demanding applications," *Invited Talk en Optical Fiber Communication Conference (OFC)*, (2016).