



Diseño de guías de onda como biosensores

Waveguide design as biosensors

Barboza-Tello Norma Alicia ¹, Ríos-Osuna Luis Antonio ², Medina-Castro Paúl ¹,
Castillo-Barrón Allen Alexander ¹, Uriarte-Ramírez Irma ¹, Martínez-Plata Daniela
¹, Díaz-Hernández Miguel Alejandro¹

¹Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología, Unidad Valle de las Palmas, Universidad Autónoma de Baja California, Tijuana, Baja California, México.

²Departamento de Óptica, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Ensenada, Baja California, México.

Autor de correspondencia: Luis Antonio Ríos Osuna, Departamento de Óptica, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Ensenada, Baja California, México. E-mail: lríos@cicese.mx. ORCID: 0000-0001-6495-5031.

Recibido: 15 de Septiembre del 2019 **Aceptado:** 30 de Noviembre del 2019 **Publicado:** 1 de Enero 2020

Resumen. – *Hasta ahora se han tenido grandes avances en el área médica que conducen a diagnósticos más exactos. pero la realidad es que aún falta mucho por hacer en cuanto al diagnóstico oportuno y no invasivo. El detectar y caracterizar partículas pequeñas, como los virus en el aire o bacterias en alimentos, es de suma importancia y se ha reportado que de entre las técnicas de diagnóstico y análisis de muestras biológicas existentes, aquellas que se basan en biosensores de guías de onda, presentan ventajas significativas como mayor resolución, detección en tiempo real y son no invasivas. Las características físicas y geométricas de la guía de onda determinarán su utilidad en cada aplicación. En este trabajo se presenta la metodología para el modelado de guías de onda utilizando el software gratuito Metric; se modelaron guías de nitruro de silicio (Si_3N_4) con el fin de estudiar su potencial como biosensores.*

Palabras clave: Biosensores; Guías de onda; Nitruro de Silicio; Metric.

Abstract. – *Currently there are numerous advances in the medical area that lead to more accurate diagnoses. However, there is an opportunity issue in terms of timely and non-invasive diagnosis. Detecting and characterizing small particles such as viruses in the air or bacteria in food is very useful, and it has been reported that among the existing diagnostic and analysis techniques for biological samples, those based on waveguide biosensor have significant advantages, such as higher resolution and real-time detecting. The physical and geometric characteristics of the waveguide will determine its usefulness in each application. This paper presents the methodology for modeling waveguides using the free software called Metric; Silicon nitride (Si_3N_4) waveguides were modeled to study their potential as biosensors.*

Keywords: Waveguides; Biosensors; Silicon nitride; Metric.



1. Introducción

Un biosensor es un transductor que convierte una señal biológica en una señal o dato eléctrico que pueden ser interpretados por un instrumento generalmente electrónico. Existen diferentes tipos de biosensores que se pueden clasificar de acuerdo a la energía de conversión que utilizan, algunos de ellos son electroquímicos, piezoeléctricos u ópticos [1]. Los sensores electroquímicos producen una corriente eléctrica ante la presencia de una reacción química, un ejemplo de éstos son los glucómetros comerciales. Los sensores piezoeléctricos producen una respuesta mecánica que produce una señal eléctrica cuando está presente el agente biológico a detectar, un ejemplo de éstos son los osciladores de cristal; en este tipo de sensores, se hace oscilar a un cristal con una frecuencia de oscilación de referencia y cuando cambia la densidad de masa de la superficie del cristal debido a la presencia del agente a detectar, cambia la frecuencia de oscilación. Por otro lado, los sensores ópticos utilizan diferentes técnicas para la detección, como por ejemplo los fenómenos de refracción o interferencia mediante el uso de guías de onda o fibras ópticas. Debido a sus propiedades, los sistemas basados en guías de onda ofrecen varias ventajas, como flexibilidad, miniaturización, detección en tiempo real y bajo costo en comparación con las técnicas químicas, por lo que prometen ser una excelente opción para aplicaciones en diagnóstico médico [2].

La fabricación de guías de onda ópticas es actualmente un tema de interés científico debido a la gran cantidad de aplicaciones, además de que son relativamente fáciles de fabricar debido a que existen diferentes técnicas ya desarrolladas que permiten

obtener dispositivos innovadores e integrados. Existen diferentes formas de utilizar las guías de onda como biosensores, por ejemplo, Okubo et. al [3], reportaron un acoplador direccional de nitruro de silicio sobre dióxido de silicio (SiO_2) utilizado para crear un biosensor, el cual detecta cambios de índice de refracción y cambios en la intensidad de salida; con este sensor lograron detectar uniones de biotina/estreptavidina con una alta sensibilidad, sin embargo para detectar un cambio de índice, este tipo de biosensores requiere de un bioreceptor (por ejemplo una enzima, una proteína o un analito) que reaccione ante la presencia del agente a detectar. Los biosensores basados en interferómetros de guías de onda, no necesitan biomoléculas y son de particular interés en este trabajo porque son los que ofrecen la más alta resolución y estabilidad. Una forma muy común de obtener interferencia en guías de onda es utilizar un acoplador direccional [4], en este tipo de interferómetros un haz de luz coherente y monocromático se divide en los dos brazos del interferómetro, a través de uno de los brazos viaja un haz de referencia, el segundo interactúa con la muestra a analizar, cualquier cambio de fase en comparación con el haz de referencia sirve para determinar si el agente biológico a detectar está presente o no.

1.1 Guía de onda

Una guía de onda es un dispositivo que funciona bajo el principio de reflexión total interna [5], básicamente sirve para transportar luz a través de distancias largas sin pérdidas considerables de energía y consiste de un sustrato como vidrio o silicio sobre el cual se deposita un material dieléctrico con índice de refracción más grande que el del sustrato. Debido a esta



diferencia de índices la luz, que viaje a través de la guía reflejándose muchas veces

en la frontera de los materiales como se muestra en la Figura 1.

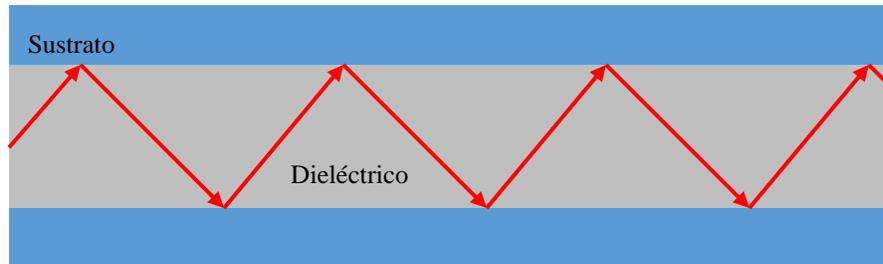


Figura 1. Ejemplo de una guía de onda sencilla: consta de una tira de material dieléctrico (color gris) depositada sobre un sustrato (e.g. vidrio), dentro del material dieléctrico se propaga un haz de luz debido a la diferencia de índice de refracción entre ambos materiales.

La interferometría es una técnica ampliamente utilizada en la detección de diferentes variables como vibraciones y deformaciones en superficies o el tamaño de una estrella en el espacio. Existen diferentes configuraciones de interferómetros las cuales llevan el nombre de quien propuso el dispositivo; uno de los más utilizados es el interferómetro de Mach-Zender [6], básicamente consiste en dividir el haz en dos, utilizando un divisor de haz, de esta manera se tienen dos haces, un haz de muestra y un haz de referencia, cada uno de los haces viaja hacia un espejo que los

refleja hacia otro divisor de haz donde interfieren y siguen su trayectoria cada uno hasta llegar a un detector. Cuando el haz muestra interactúa con una muestra a analizar, sufre un cambio de fase que a su vez se traduce en un cambio en el patrón de interferencia. Una forma de obtener interferencia en óptica integrada es utilizando un acoplador direccional, como el que se muestra en la Figura 2. Básicamente consiste de dos guías paralelas idénticas con sus respectivos brazos de entrada y salida.

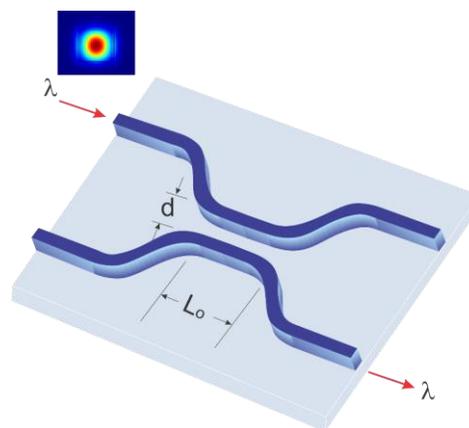


Figura 2. La imagen muestra un acoplador direccional de guía de onda, se construye depositando una película de material dieléctrico (azul oscuro) sobre un sustrato (azul claro) de menor índice de refracción al del dieléctrico, la variable d , representa la separación entre las dos guías y L_0 es la longitud de acoplamiento.



Un acoplador direccional funciona bajo la teoría de modos acoplados, la cual establece que si se colocan dos guías paralelas lo suficientemente cerca (a una distancia d), un haz viajando por una de las guías se

transmitirá hacia la segunda guía, pudiéndose alcanzar una transferencia del 100% de la potencia a cierta longitud, L_o , llamada longitud de acoplamiento. Como se muestra en la Figura 3.

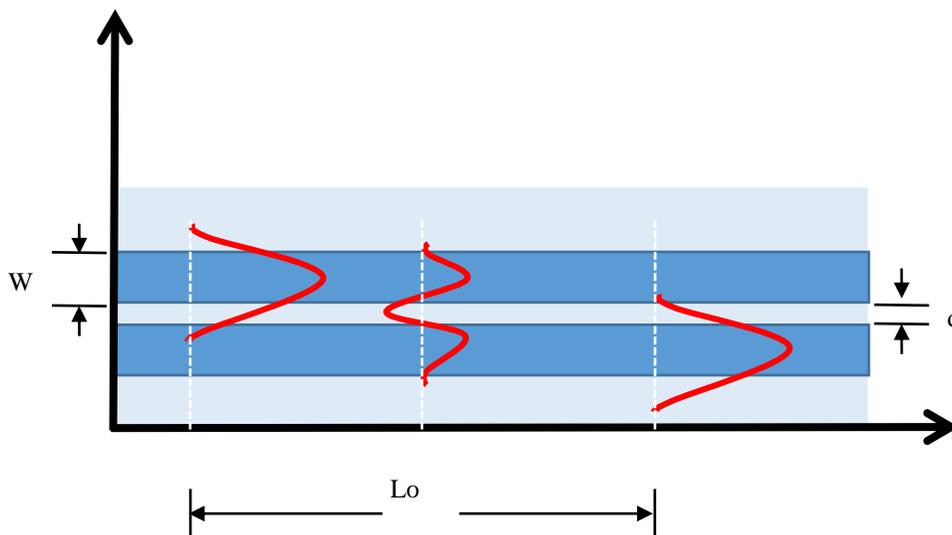


Figura 3. Teoría de modos acoplados, un haz propagándose por una guía, puede transferirse totalmente a una segunda guía, si está se coloca suficientemente cerca de la primera guía.

Si se construye un acoplador que tenga una longitud igual a un múltiplo entero de la longitud de acoplamiento, entonces la luz estaría viajando de una guía a otra a lo largo de su propagación. Esta fuerte dependencia de la potencia de la luz transmitida con la longitud de acoplamiento permite diseñar un dispositivo que transmita un porcentaje de luz deseado. Por ejemplo, en el caso de un interferómetro es ideal que solo se transmita el 50% de la luz para así propagarla en cada uno de los brazos, es decir obtener dos haces idénticos, en fase, longitud de onda y amplitud. Si a la salida se coloca un arreglo de espejos o películas delgadas altamente reflejantes, se obtendría el fenómeno de interferencia.

1.2 Teoría de Modos acoplados

La luz se propaga dentro de una guía en onda en forma de modos transversales, los cuales pueden definirse como la distribución del campo electromagnético en un campo transversal a la dirección de propagación y pueden ser modos TE (Transversal eléctrico) para el cual no existe ninguna componente de campo eléctrico en la dirección de propagación, TM (Transversal magnético), para el cual no existe ninguna componente del campo magnético en la dirección de propagación o modos TEM (Transversal electromagnético). El modo fundamental de una guía es el modo TEM_{00} , y tiene una distribución de energía en forma gaussiana. los subíndices representan el orden radial y



angular del modo y en una guía puede haber tantos modos como lo permitan sus condiciones de frontera. La amplitud del campo óptico es generalmente una superposición de los modos dada por [5]:

$$E(y, z) = \sum_m \hat{a}_m u_m(y) \exp(-j\beta_m z) \quad (1)$$

donde a_m es la amplitud, u_m la distribución transversal y β_m la constante de propagación del modo m . La teoría de modos acoplados asume que los campos permanecen iguales en su distribución espacial conforme se propagan en cada guía. Al estudiar las ecuaciones de modos acoplados puede comprobarse que la potencia óptica en cada una de las guías está dada por [5]:

$$P_1(z) = P_1(0) \cos^2 \zeta z \quad (2)$$

$$P_2(z) = P_2(0) \sin^2 \zeta z$$

donde $\zeta = (\zeta_{12}\zeta_{21})^{1/2}$, es el coeficiente de acoplamiento, ζ_{12} y ζ_{21} son los coeficientes de acoplamiento de las guías 1 y 2 respectivamente y dependen principalmente del índice efectivo del medio de propagación del haz, la distribución espacial del haz y las constantes de propagación. El cálculo analítico de los coeficientes de acoplamiento puede resultar algo complejo debido a que involucra la integral de la distribución espacial de los modos de propagación por lo que usualmente se utilizan programas desarrollados en algún software de análisis matemático como MATLAB [7].

En función de los índices de refracción la potencia de salida en la guía de onda dos está dada por [8]:

$$P_2(L) = P_0 \sin^2 \left(\frac{\pi L \Delta n}{\lambda_0} \right) \quad (3)$$

donde P_0 es la potencia de entrada en la guía 1, L la longitud de la zona de acoplamiento, $\Delta n = n_2 - n_1$, la diferencia de índices de refracción efectivo y λ_0 , es la longitud de onda del haz propagándose en la guía. Despejando para L , se tiene:

$$L = \frac{\lambda_0}{\pi \Delta n} \sin^{-1} \left(\sqrt{\frac{P_2}{P_0}} \right) \quad (4)$$

Utilizando la ecuación 4 se puede calcular la longitud de acoplamiento L , adecuada para obtener una fracción determinada de potencia transmitida. Para el cálculo de los índices de refracción efectivos de las guías y poder calcular Δn existen diferentes softwares gratuitos y comerciales que simulan la propagación de diferentes haces en determinadas estructuras o guías de onda, como por ejemplo *Waveguide Mode Solver* de MATLAB [9], *Lumerical* [10] y *Metric* [11]. En este trabajo se presenta la metodología utilizada y los resultados obtenidos en el diseño de un acoplador direccional con el fin de que sea utilizado en la fabricación de un biosensor basado en interferometría.

2. Diseño del acoplador direccional

Para el desarrollo de este trabajo se han probado los tres programas para el cálculo del índice de refracción efectivo [9 -11] y al comparar los resultados obtenidos entre MATLAB y Lumerical, ambos programas comerciales, se obtuvieron diferencias en la 4^{ta}. cifra significativa por lo cual, cualquiera de los dos programas es excelente para este tipo de cálculos, sin embargo con respecto a Lumerical se trabajó con la versión de prueba debido a que es costoso y con respecto a Mode Solver es algo complicado de utilizar en la definición de la estructura a



utilizar. Por tal motivo se decidió trabajar con Metric, ya que es un programa de acceso libre, su desventaja es que simula las estructuras en 2D por lo que se debe analizar cada estructura dos veces con el fin de obtener el índice efectivo de una estructura 3D, lo que provoca que se tenga un error en la 3ra cifra significativa, sin embargo, para los fines de este trabajo se considera que es un error aceptable.

Metric es un programa escrito en lenguaje C lo que permite adecuarlo a las necesidades particulares de cada experimento, modificando uno de los códigos de ejemplo que proporciona los autores [12] o escribiendo uno propio. Lo primero que se hizo fue realizar un cálculo del comportamiento de las distancias de acoplamiento para diferentes separaciones entre guías (variable d , en la Figura 2). Este cálculo se realizó propagando un haz con

una longitud de onda típica o fácil de obtener con un diodo láser, 808 nm, en una guía de nitruro de silicio (Si_3N_4) sobre dióxido de silicio (SiO_2), de $1\mu\text{m}$ de ancho por 0.4nm de alto, éstas son dimensiones relativamente fáciles de alcanzar en la fabricación según la literatura revisada. Se encontró que la longitud de acoplamiento tiene una dependencia de cuarto orden con respecto a la separación entre las guías (gap), como se muestra en la Figura 4. La gráfica de la izquierda muestra la longitud de acoplamiento para diferentes valores de separación entre guías que van desde 50 nm a 1.3 micras; la gráfica de la derecha es un acercamiento de la gráfica izquierda, puede observarse que la longitud de acoplamiento tiene una fuerte dependencia de la separación de las guías ya que con solo variarla unos cuantos nanómetros, cambia de unas cuantas micras hasta varios milímetros.

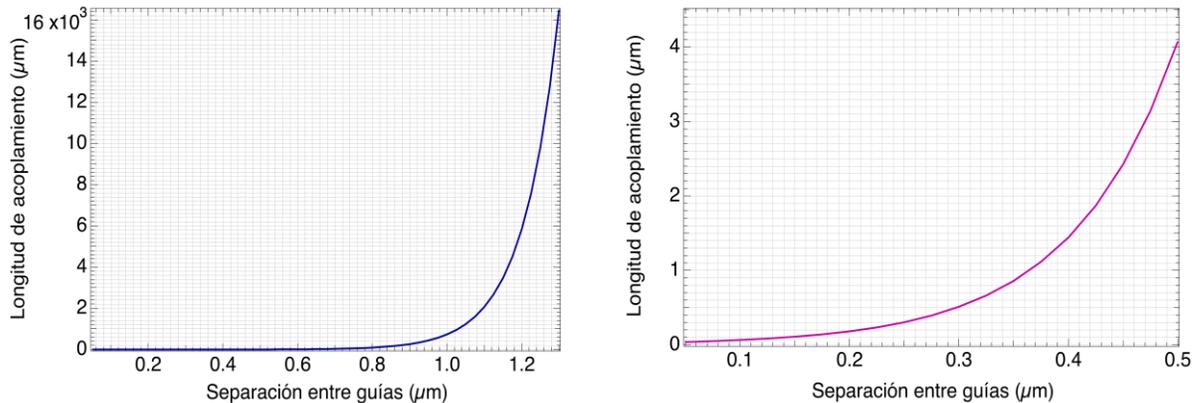


Figura 4. Dependencia de la longitud de acoplamiento con respecto a la separación entre las guías. La figura de la derecha es únicamente un acercamiento de la figura de la izquierda. Se variaron los valores de separación de las guías en un intervalo de 50 nm a $1.3\mu\text{m}$.

Una vez determinados los resultados preliminares se procedió a simular el sistema del acoplador direccional.

3. Resultados

Se simuló la propagación de un haz de luz de 808 nm de longitud de onda, en una guía de nitruro de silicio (Si_3N_4) sobre dióxido de silicio (SiO_2), de $1\mu\text{m}$ de ancho por 0.4 nm



de alto y una separación entre guías de 100 nm. En la Figura 5, se muestra el resultado de esta simulación para dos diferentes separaciones a) 600 nm y b) 800 nm, en esta figura se observa cómo el haz viajando en la guía 1 se pasa a la guía 2 y en un múltiplo

de la longitud de acoplamiento, se vuelve a pasar a la guía 1.

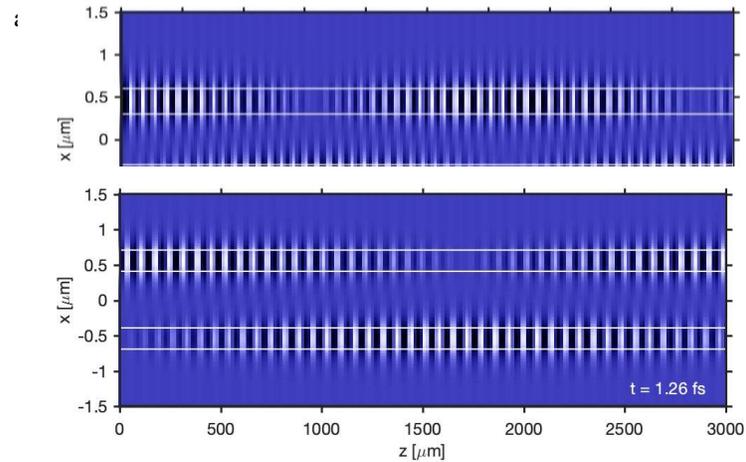


Figura 5. Gráfica de la propagación de haces en una guía 2D, en este caso se consideró el ancho de las guías igual a $1\ \mu\text{m}$, y un alto de $400\ \text{nm}$, en ambas gráficas se observa cómo la luz viaja de una guía a otra, una vez que la distancia de propagación es un múltiplo de la longitud de acoplamiento.

De la Figura 5 se observa que en el caso de una separación entre guías de $600\ \text{nm}$ la longitud de acoplamiento es de $310\ \mu\text{m}$ y en el caso de $800\ \text{nm}$ la longitud de acoplamiento es de $1750\ \mu\text{m}$ para que exista una transferencia del 100% de la potencia. Como se mencionó anteriormente, este software realiza simulaciones en 2 dimensiones, por lo que primero se realizó el cálculo del índice efectivo para el ancho de la guía, que es de $1\ \mu\text{m}$, y con estos valores se realizó la propagación de haces en el sistema de dos guías paralelas idénticas considerando la altura de las guías, igual a $0.4\ \mu\text{m}$. Los valores de separación entre guías se eligieron tomando en cuenta las posibles limitaciones de resolución que podrían tenerse al intentar fabricar estructuras con menor separación. Los valores de longitud de acoplamiento que son

de interés para este trabajo es cuando la potencia óptica se transmite únicamente a la mitad, por lo que se colocó un monitor en el software que permitiera detectar en cuál valor de longitud de propagación se alcanzaba esta fracción y se encontró que en el caso de una separación de $600\ \text{nm}$ la longitud de acoplamiento es de $200\ \mu\text{m}$ y en el caso de una separación de $800\ \text{nm}$ la longitud es de $1200\ \mu\text{m}$.



4. Conclusiones

Se han diseñado dos diferentes acopladores direccionales que podrían servir en la fabricación de un interferómetro de Mach-Zehnder para su utilización como biosensor. Se encontró que la longitud del acoplador depende fuertemente de los índices efectivos del medio de propagación, de la longitud de onda y la separación entre las guías. En el diseño de filtros espaciales o separadores de longitud de onda, el de la longitud de acoplamiento varía en forma de polinomio de 4to orden con respecto al valor de la separación d entre guías. Además, es indispensable conocer con al menos 3 órdenes de magnitud la dispersión del índice de refracción del material con que se van a fabricar las guías de onda, con el fin de obtener valores correctos. Mientras se realizaban las simulaciones, se encontró que la distancia de acoplamiento aumentaba conforme la longitud de onda del haz de propagación disminuía, es decir, se encontró que, para longitudes de onda más cercanas al infrarrojo, la longitud de acoplamiento disminuyó considerablemente.

Referencias

- [1] P. Kozma, F. Kehl, E. Ehrentreich-Förster, C. Stamm & F.F. Bier, "Integrated planar optical waveguide interferometer biosensors: A comparative review". *Biosensors and Bioelectronics*, vol. 58, pp. 287-307, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2014.02.049>.
- [2] J.P. Chambers, B.P. Arunalandam, L.L. Matta, A. Weis, & J.J. Valdes, "Biosensor recognition elements". *Curr Issues Mol Biol.*, vol. 10, pp. 1-12, 2008. https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01362941v1/html_references.
- [3] K. Okubo, K. Uchimayamada, K. Asakawa, & H. Suzuki, "Silicon nitride directional coupler interferometer for surface sensing", *Opt. Engineering*, vol. 66, No. 1, pp. 017101-1-017101-7, 2017. <https://doi.org/10.1117/1.OE.56.1.017101>.
- [4] J. G. Wangüemert-Pérez, A. Hadij-ElHouati, A. Sánchez-Postigo, J. Leuermann, D.-X. Xu, P. Cheben, A. Ortega-Moñux, R. Halir, & I. Molina. Fernández, "Subwavelength structures for silicon photonics biosensing", *Opt. & Laser Tech.*, vol. 109, pp. 437-448, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2018.07.071>.
- [5] B.E.A. Saleh, & M.C. Teich, "Fundamentals of photonics", 3th Edition, New York: John Wiley & Sons, 2001. <https://doi.org/10.1002/0471213748>.
- [6] M. Pu, N. Yao, Ch. Hu, and Z. Zhao "Directional coupler and nonlinear Mach-Zehnder interferometer metal-insulator-metal plasmonic waveguide" *Opt. Express*,



vol. 18, no. 20, pp. 21030-21037, 2010.
<https://doi.org/10.1364/OE.18.021030>.

[7] C. Chen, P. Berini, D. Feng, S. Tanev & P. Tzolov, "Efficient and accurate numerical analysis of multilayer planar optical waveguides in lossy anisotropic media", Opt. Express, vol. 7, pp. 260-272, 2000. <https://doi.org/10.1364/OE.7.000260>.

[9] X. Guan, H. Wu, Y. Shi, L. Wosinsky & D. Dai, "Ultracompact and broadband polarization beam splitter utilizing the evanescent coupling between a hybrid plasmonic waveguide and a silicon nanowire", Opt. Letters, vol. 38, no. 16, pp. 3005-3008, 2013.
<https://doi.org/10.1364/OL.38.003005>.

[10] T. Murphy, (2011). Mathworks (version 1.2.0.0). Disponible en: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/12734-waveguide-mode-solver>.

[11] Lumerical (2019), Disponible en: <https://www.lumerical.com/>

[12] Metric, Mode expansion tools for 2D rectangular integrated optical circuits, (2019). Disponible en: <https://metric.computational-photonics.eu/>

[13] M. Hammer, M. Lohmeyer, R. Stoffer, O.V. Ivanova (2019), Ejemplos de Metric, Disponible en: <https://metric.computational-photonics.eu/examples.html>



Este texto está protegido por una licencia [Creative Commons 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Usted es libre para Compartir—copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato— y Adaptar el documento—remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de:

Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.

[Resumen de licencia](#) - [Texto completo de la licencia](#)