

# Diseño de una nanoantena para aplicaciones en THz

Bracho Arias Ricardo<sup>1</sup>, Alvarez Chavez José Alfredo<sup>2</sup>, Rodríguez Méndez Luis Manuel<sup>1</sup>

1-Instituto Politécnico Nacional, 2-Universidad de Twente  
rbrachoa1800@alumno.ipn.mx

URL ORCID:

**Resumen**— En el presente artículo se presenta el diseño de una nano antena que opere en el rango de frecuencias de los THz específicamente de 300 a 500 GHz en HFSS, utilizando un sustrato de silicio y óxido de silicio, con oro como metal conductor. Se destacan las aplicaciones de esta nanoantena, enfocadas en alcanzar altas tasas de transmisión de datos, y su relevancia en tecnologías de comunicación avanzadas. La nanoantena se presenta como un componente clave para aplicaciones como el MZM y sistemas de comunicación THz, contribuyendo al avance de la tecnología inalámbrica y óptica de alta velocidad.

**Palabras Clave** — Mach Zehnder-MZM, Nano antena, Radio sobre fibra, Transceptores THz.

**Abstract**- This paper presents the design of a nano-antenna operating in the THz frequency range, specifically from 300 to 500 GHz in HFSS, using a silicon and silicon oxide substrate, with gold as the conducting metal. The applications of this nanoantenna, focused on achieving high data transmission rates, and its relevance in advanced communication technologies are highlighted. The nanoantenna is presented as a key component for applications such as MZM and THz communication systems, contributing to the advancement of high-speed wireless and optical technology.

## I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el crecimiento de aplicaciones como el Internet de las cosas (IoT), Inteligencia artificial (IA) y futuras redes 6G demandan mayores velocidades de transmisión, impulsando la investigación de nuevas tecnologías para las telecomunicaciones, en este contexto el espectro de los terahercios (THz) cuyo rango de frecuencias se encuentran entre los (0.1-10 THz) se han posicionado como un área prometedora debido a su gran ancho de banda y potencial para alcanzar velocidades de transmisión sin precedentes [1]. Esta tecnología se encuentra situada entre las microondas y el infrarrojo medio-lejano como se muestra en la Figura 1, ofreciendo ventajas significativas para aplicaciones en imagenología médica, espectroscopía, sensores de seguridad y comunicaciones [2].

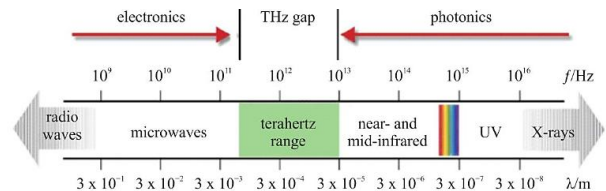


Figura 1.- Ubicación del Rango de Terahercios en el Espectro Electromagnético.

Con base al último punto mencionado, el desarrollo de sistemas de comunicaciones de alta velocidad es un marco emergente y de gran relevancia, la aplicación de las nanoantenas tienen un rol importante en lo que es la conversión de señales THz al dominio óptico, este proceso permite la integración de la transmisión de datos en el dominio THz con los sistemas de comunicaciones ópticos, como se muestra en la Figura 2, esta conversión abre nuevas posibilidades para la transferencia de información y el diseño de sistemas híbridos que combinan la alta velocidad de las infraestructuras ópticas con la ventaja de propagación que ofrece el dominio THz.

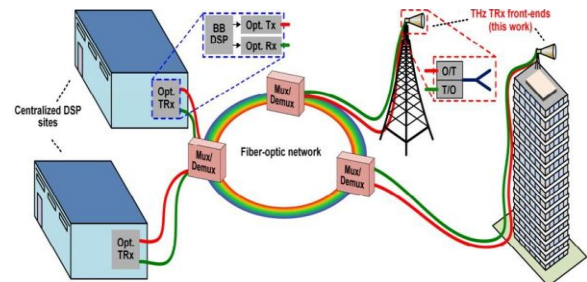


Figura 2.- Visión de una futura arquitectura de red de comunicaciones que combina extremos frontales de transceptores THz analógicos distribuidos geográficamente con sitios de procesamiento de señales digitales (DSP) sobre infraestructuras de fibra óptica [1].

El desarrollo de estos sistemas consta de varias etapas de transición para poder conseguir la transmisión de señales con una alta velocidad de transmisión, esto se consigue mediante la implementación de moduladores electroópticos, como un modulador Mach Zehnder (MZM). Este dispositivo facilita la modulación de fase de una señal óptica en respuesta a una señal de RF en el rango de los THz [1]. Para ello, las nanoantenas no sólo se comportan como receptoras de señales THz, sino que también son capaces de interactuar con la señal óptica mediante un proceso de modulación, facilitando la transferencia de datos.

De la figura 3, las fibras ópticas (azules) contienen tapers, que se proponen realizar en el grupo OS (Optical Science), estas fibras transportan la luz, la cual es modulada por la señal de THz hacia y desde las nanoantenas o regiones activas. Estas fibras ópticas se acoplan a dispositivos en configuraciones de interferencia, como un MMI (Interferómetro Multimodo), para dividir o combinar señales ópticas. Como se puede observar en la parte central de la figura 3a, las fibras ópticas azules están acopladas por un interferómetro MMI y para el caso de la nanoantena se representa por medio de una estructura GSG (amarrillo).

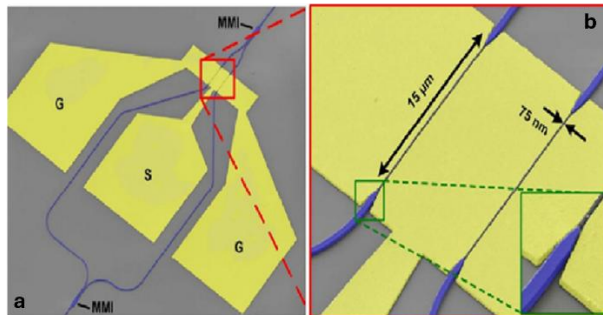


Figura 3.- Imagen de un MZM plasmónico con almohadillas de contacto tierra-síñal-tierra (GSG) (amarillo) y guías de onda fotónicas de silicio integradas (azul) [1].

Es por eso que, con base a lo mencionado anteriormente, se tienen como contenido en la presente investigación un desarrollo de la parte óptica del MZM, abordando su comportamiento y el desarrollo de tapers para su futura implementación en esta nueva generación de moduladores electroópticos, por otro lado, se tiene el desarrollo de la nanoantena en las frecuencias de THz, donde se simulara su comportamiento en distintos softwares para comprobar resultados.

## II. DESARROLLO

En este trabajo se va a desarrollar el modelado de una nanoantena que opere en el rango de 300 a 500 GHz que es un frecuencias en el espectro de los THz, en la cual se mostrado gran énfasis en su desarrollo considerando aplicaciones en comunicaciones 6G y sistemas de radio sobre fibra (RoF) además de simular el comportamiento de las guías de onda que portaran la señal en rangos ópticos con la cual se modulará a señal THz.

### A. Modelado de la nanoantena

Para el modelado de la nanoantena, se seleccionaron materiales estratégicos basados en sus propiedades ópticas, eléctricas y estructurales. El silicio (Si) se emplea como sustrato debido a su alta estabilidad térmica y compatibilidad con procesos de micro fabricación [3]. Sobre este, se integra una capa de óxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ), que actúa como dieléctrico para aislar eléctricamente los componentes y reducir pérdidas por dispersión de portadores [4]. Finalmente, el oro (Au) se utiliza en las estructuras conductoras, aprovechando su baja resistividad y propiedades plasmónicas en el rango óptico [5].

Los parámetros geométricos se ajustan mediante softwares de simulación basados en el método de elementos finitos (FEM), como HFSS (Ansys Electromagnetics Suite) y CST Microwave Studio. En la figura 4 se muestra un esquema de la geometría de la nanoantena, validada mediante estos modelos computacionales.

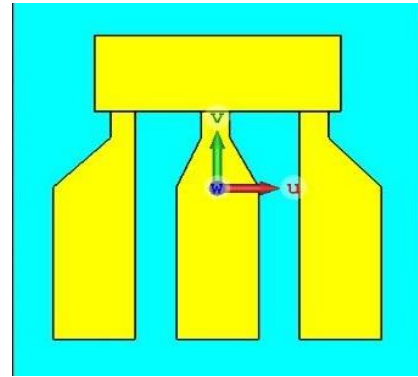


Figura 4.- Diseño de la nanoantena en softwares de simulación.

### B. Caracterización

Para la caracterización se cuenta con un VNA (Analizador Vectorial de Redes) que nos permite medir directamente la señal de transmisión y reflexión de cualquier dispositivo desde 10 MHz, hasta 500 GHz.

El propósito principal por el cual el diseño de la nanoantena muestra una configuración GSG (Ground-Signal-Ground) es que sea compatible con las puntas de prueba (sondas) que se implementaran en la medición en el analizador de redes. implementa para optimizar el acoplamiento electromagnético y la integridad de la señal. Esta configuración consiste en dos electrodos de tierra (*Ground*) que encapsulan un electrodo central de señal (*Signal*), logrando un control preciso de la impedancia y minimizando interferencias parásitas. Además, la disposición simétrica mejora la eficiencia en la transmisión-recepción de ondas en escalas nanométricas

### C. Desarrollo de las guías de onda

Para el desarrollo de las guías de onda (azules) de la figura 3 se utilizaron tapers, los tapers son estructuras diseñadas para realizar una transición suave y gradual entre dos secciones de guías de onda, fibras ópticas o líneas de transmisión con dimensiones o impedancias características diferentes. Su función principal es minimizar reflexiones de señal y maximizar la transferencia de energía al adaptar gradualmente las propiedades electromagnéticas entre regiones discontinuas. Estos fueron realizados en la máquina de plasma del grupo OS, se utilizó la técnica de plasma, que emplea plasma como fuente de calor para adelgazar fibras ópticas.

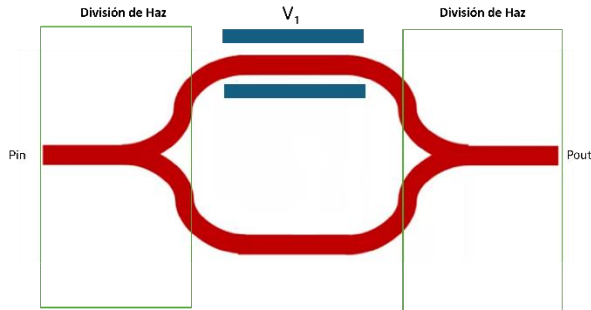


Figura 5.- Diagrama de operación de un MZM.

La simulación de un modulador Mach-Zehnder (MZM) se llevó a cabo en el software COMSOL, el diseño de las simulaciones ese a basado en la estructura del interferómetro Mach-Zehnder (figura 5), explorando diversos aspectos relacionados con materiales, geometrías y parámetros de diseño. Para el diseño de un MZM hay que tener en cuenta dos aspectos cruciales: bajas pérdidas y un reparto de potencia 50/50 a través de los dos brazos de salida. Para cumplir el requisito, estas simulaciones se basaron en los valores de tapers alcanzados posteriormente, tomando como referencia valores de 10 V, longitud de 65 mm y un diámetro de cintura de 180 nm (figura 6).

$$\Delta\phi = \pi \frac{V}{V_{\pi}} \quad (1)$$

Donde el desfase ( $\Delta\phi$ ) inducido en un brazo del MZM es proporcional al voltaje aplicado (V):

Para el caso de que  $\Delta\phi=0$ , la salida es máxima (interferencia constructiva) y si  $\Delta\phi=\pi$ , la salida es mínima (interferencia destructiva), donde  $V_{\pi}$  depende del material y la transmisión que se quiere ve reflejada en los puertos de salida está dada por la siguiente expresión:

$$P_{out} = P_{in} \cdot \cos^2\left(\frac{\pi V}{2V_{\pi}}\right) \quad (2)$$

Donde  $P_{in}$  representa la potencia óptica de entrada y  $P_{out}$  la potencia óptica de salida, es decir la salida depende del desfase ( $\Delta\phi$ ) entre los brazos, siguiendo una relación cuadrática del coseno. El voltaje (V) controla linealmente  $\Delta\phi$  gracias al efecto electroóptico (Pockels), permitiendo modular la intensidad óptica.

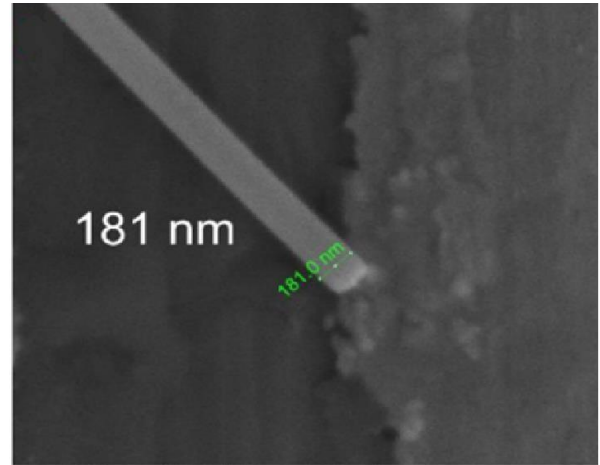


Figura 6.- 12 MNF de unos 180 nm de diámetro de cintura [8].

Para estas simulaciones se realizaron simulaciones basados en silicio (Si) y niobato de litio ( $\text{LiNbO}_3$ ), destacando este último por su alta eficiencia de modulación.

### III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos permitieron comparar diseños basados en silicio (Si) y niobato de litio ( $\text{LiNbO}_3$ ), destacando este último por su alta eficiencia de modulación, donde en la Figura 6 se puede observar que el MZM basado en  $\text{LiNbO}_3$  mostró un rendimiento superior gracias a sus propiedades electroópticas, logrando desplazamientos de fase efectivos con guías de onda más cortas y voltajes aplicados más bajos.

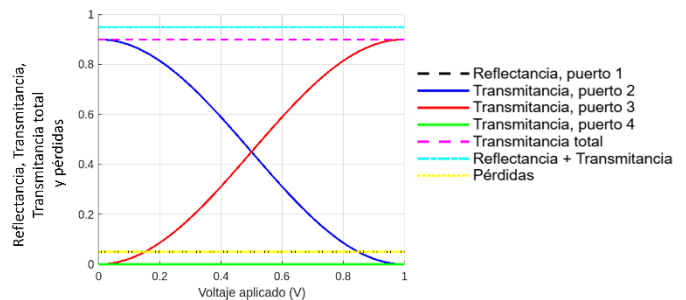


Figura 7.- Reflectancia, Transmisión y Transmisión total y pérdidas de un MZM de niobato de litio ( $\text{LiNbO}_3$ ).

Los resultados de la Figura 7 se interpretan de la siguiente manera:

- Reflectancia (Puerto 1): Al igual que en el caso del silicio, la reflectancia se mantuvo constante e independiente de la tensión aplicada.
- Transmisión (Puertos 2, 3 y 4): Se observó un claro comportamiento de interferencia constructiva y destructiva, con cambios notables en la transmisión en los puertos de salida en función de la tensión aplicada. Los valores máximos y mínimos indicaron una modulación más eficiente.

- Pérdidas y conservación de energía: Las pérdidas fueron insignificantes, cumpliendo con la conservación de energía.

#### CONCLUSIONES

En conclusión, el MZM basado en  $\text{LiNbO}_3$  demostró un rendimiento superior debido a sus propiedades electroópticas, permitiendo un control eficiente de la fase con guías de onda más cortas y voltajes más bajos. Gracias a la selección de materiales óptimos como oro, silicio y óxido de silicio, y a la implementación de una estructura GSG que encapsula el electrodo central, permitieron identificar los elementos necesarios para la simulación de la nanoantena en los rangos de THz, optimizando su desempeño y haciendo el diseño más eficiente y compacto para aplicaciones prácticas.

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Instituto Politécnico Nacional, al Posgrado en Ciencias en Ingeniería de Telecomunicaciones, a Comisión de Operación y Fomento de Actividades Académicas del IPN (COFFA) y a la Grupo OS de la Universidad de Twente por el apoyo brindado en la realización de este proyecto.

#### REFERENCIAS

- [1]. Ummethala, S. et al. (2016) 'THz-to-optical conversion in wireless communications using an ultra-broadband plasmonic modulator', *Nature Photonics*, 13(8), pp. 516–524. DOI: 10.1038/s41566-016-0475-6.
- [2]. Hartmann, R.R. et al. (2018) 'Plasmonic Terahertz Antennas for Enhanced Biosensing Applications', *ACS Photonics*, 5(8), pp. 1234–1242. DOI: 10.1021/acsphotonics.8b00123.
- [3]. Palik, E.D. (1998) *Handbook of Optical Constants of Solids*. Academic Press. DOI: 10.1016/B978-0-12-544415-6.X5000-7.
- [4]. Maier, S.A. (2007) *Plasmonics: Fundamentals and Applications*. Springer. DOI: 10.1007/0-387-37825-1.
- [5]. West, P.R. et al. (2010) 'Searching for Better Plasmonic Materials', *Advanced Optical Materials*, 8(4), pp. 145–152. DOI: 10.1002/adom.201000480.
- [6]. Nagatsuma, T., Ducournau, G. and Renaud, C.C. (2016) 'Advances in terahertz communications accelerated by photonics', *Nature Photonics*, 10(6), pp. 371–379. DOI: 10.1038/nphoton.2016.65.
- [7]. Gómez-Díaz, J.S. et al. (2016) 'Graphene-Based Tunable Terahertz Antennas: From Theory to Applications', *Optics Express*, 24(18), pp. 20786–20801. DOI: 10.1364/OE.24.020786.
- [8]. Zhang, Y. et al. (2021) 'High-efficiency graphene-based THz antennas for wireless communications', *Nature Communications*, 12(1), p. 1234. DOI: 10.1038/s41467-021-21547-z.
- [9]. Zhang, X. et al. (2020) 'High-gain THz antennas using gold-based metamaterials', *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 10(4), pp. 456–464. DOI: 10.1109/TTHZ.2020.2974567.
- [10]. Gupta, M. et al. (2021) 'Broadband THz antennas using porous silicon substrates', *Optics Express*, 29(20), pp. 31234–31249. DOI: 10.1364/OE.435678.
- [11]. Patel, R. et al. (2021) 'Plasmonic THz antennas for high-speed wireless communications', *Nano Letters*, 21(8), pp. 3456–3463. DOI: 10.1021/acs.nanolett.1c00234.
- [12]. Chen, X. et al. (2022) 'Ultra-wideband THz antennas using silicon-based metamaterials', *Advanced Optical Materials*, 10(15), p. 2200123. DOI: 10.1002/adom.202200123.
- [13]. Cascade Microtech (n.d.) *Probe Selection Guide*. [online] Available at: <https://www.cascademicrotech.com/files/Probe-Selection-Guide.pdf> [Accessed 20 Feb. 2025].
- [14]. Siegel, P.H. (2004) 'Terahertz Technology in Biology and Medicine', *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 52(10), pp. 2438–2447. DOI: 10.1109/TMTT.2004.835616.