

Micro y nano fabricación de un foto-interruptor para comunicaciones ópticas

¹Pablo Córdova-Morales, ¹Gustavo Hilario-Pérez, ¹A. David Morales-Vite, ²Lugo-Hernández E., ³Ángel A. Duran-Ledezma,

⁴Narciso Muñoz-Aguirre, ¹Donato Valdez-Pérez, ²Adrián Martínez-Rivas

¹Instituto Politécnico Nacional, SEPI ESIME Zacatenco, Edificio Z 3er Piso, San Pedro Zacatenco, 07738, Ciudad de México, México.

²Universitat Politècnica de Catalunya, Carrer. Esteve Terradas, 7, C.P. 08860, Castelldefels, Barcelona.

³Instituto Politécnico Nacional, SEPI ESIME Ticomán, Av. Ticomán No. 600, San José Ticomán, 07340, Ciudad de México, México.

⁴Instituto Politécnico Nacional, SEPI ESIME Azcapotzalco, Calzada. Azcapotzalco - La Villa, Azcapotzalco, 02519, Ciudad de México, México.

³Instituto Politécnico Nacional, Centro de Investigación en Computación (CIC), CP 07738, Ciudad de México, México

pcordovam1800@alumno.ipn.mx, ghilariop1300@alumno.ipn.mx, amoralesv1704@alumno.ipn.mx, eduardo.lugo@upc.edu, aduranl@ipn.mx, nmunoz@ipn.mx, dvaldez@ipn.mx, amartinezri@ipn.mx

URL ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-1723-0544>

Resumen— Este trabajo detalla el proceso de fabricación de un foto-interruptor basado en Óxido de Grafeno reducido (rGO) el cual funciona como material fotosensible. Nuestro dispositivo está diseñado con una configuración Tierra-Sígnal-Tierra (T-S-T), adaptándose a las puntas de medición las cuales van desde 25, 50 y 100 μm . Posteriormente, el proceso de micro y nano fabricación se llevó a cabo mediante litografía electrónica, la metalización del dispositivo por medio de la evaporación por haz de electrones y la deposición del rGO con la técnica de Langmuir-Blodgett. Las micrografías obtenidas mediante Microscopio Electrónico de Barrido (SEM) se emplearon para verificar la deposición precisa del nanomaterial e inspeccionar los detalles del proceso de fabricación del foto-interruptor.

Palabras Clave — CPW-I, foto-interruptor, litografía electrónica, micro fabricación, Langmuir-Blodgett.

Abstract- This work details the manufacturing process of a photo-interrupter based on reduced Graphene Oxide (rGO), which functions as a photosensitive material. Our device is designed with a Ground-Signal-Ground (G-S-G) configuration, adapting to measurement probes ranging from 25, 50, and 100 μm . Subsequently, the micro- and nanofabrication process was carried out using electron lithography, device metallization through electron beam evaporation, and rGO deposition with the Langmuir-Blodgett technique. Micrographs obtained through Scanning Electron Microscopy (SEM) were used to verify the precise deposition of the nanomaterial and inspect the details of the photo-interrupter fabrication process.

Key words — CPW-I, rGO, photo-interrupter, electron lithography, micro-fabrication, Langmuir-Blodgett.

I. INTRODUCCIÓN

Las guías de onda coplanares (por sus siglas en inglés, CPW) constituyen una clase de línea de transmisión planar empleada en circuitos integrados de microondas (por sus siglas en inglés, MICs) y en circuitos monolíticos de microondas (por sus siglas en inglés, MMICs). Su rasgo característico es su diseño planar, lo que significa que todos los contactos se encuentran ubicados en un mismo plano, dentro de los diferentes modelos de CPW, se tienen las que están interrumpidas en la parte central,

dependiendo de la aplicación, pueden conectar o activar a otros dispositivos, por ejemplo, foto-interruptores [1]. Estos dispositivos consisten en una línea de transmisión (CPW) normalmente interrumpida en la parte central, que es donde se deja expuesto el sustrato (semiconductor) para que incida una excitación óptica. El contacto con la fuente óptica funciona como un interruptor, es decir, activa el paso de una señal eléctrica de un puerto a otro. El primero de estos dispositivos fue creado en 1975 por Auston, el cual consistía en una línea de microcinta interrumpida en la parte central. Esta estructura se construyó sobre un sustrato de silicio (Si) con una elevada resistividad eléctrica ($10^4 \Omega/\text{cm}$) [2].

Diversas investigaciones se han enfocado en la incorporación unificada de guías de ondas controladas mediante fuentes ópticas con circuitos micro electrónicos o de RF empleando GaAs crecido a bajas temperaturas (por sus siglas en inglés, LT-GaAs) como material activo [3]. Sin embargo, acceder a este tipo de fabricación en la academia es complicado debido a los costos. Por lo tanto, en este trabajo se recurre al uso de otros materiales con propiedades similares tales como el Grafeno (G) y algunos de sus derivados, por ejemplo, el Grafeno oxidado (GO) y Grafeno oxidado reducido (rGO). Estos materiales 2D son opciones viables para su uso en foto interruptores (FI) [4].

Este trabajo se encuentra distribuido en cuatro secciones incluyendo la Introducción (I), en la sección II se presenta el principio de funcionamiento del FI, así como una breve explicación de la caracterización mediante el uso de un Analizador de Redes Vectoriales (por sus siglas en inglés, VNA). En la sección III, se muestra el proceso de la micro y nano fabricación del dispositivo. Por último, en la sección IV presentamos las conclusiones y trabajo a futuro de este proyecto.

II. FUNCIONAMIENTO Y CARACTERIZACIÓN. DEL FOTO-INTERRUPTOR.

A. Funcionamiento del Foto-Interruptor

El dispositivo, el cual es activado mediante una fuente óptica, posibilita la transmisión de la señal de microondas a

través de la discontinuidad en la línea central. Cuando esta interrupción es expuesta a una fuente de luz cuya energía del fotón supera la banda prohibida (E_g) del semiconductor en el que está construida la CPW, la estructura adquiere propiedades de un conductor y se activa el interruptor en estado ON (Fig. 1a) y en ausencia de iluminación, la señal es reflejada y cambia al estado OFF (Fig. 1b). En la Fig. 1, podemos apreciar un esquema del principio de funcionamiento del dispositivo [5].

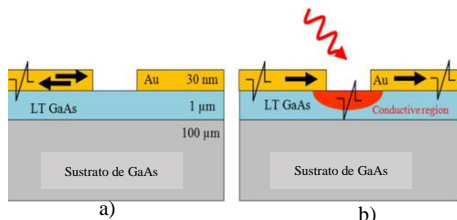


Figura 1.- Estado a) no conducción (OFF) y b) conducción ON [5].

El circuito eléctrico equivalente del foto-interruptor en la zona interrumpida puede representarse como una fotorresistencia equivalente a una foto-conductancia cuando el área del dispositivo se encuentra bajo una excitación óptica (modo conducción). En ausencia de luz, el foto-interruptor se comporta como un capacitor en paralelo con la fotorresistencia donde el aislamiento en microondas es más efectivo a frecuencias bajas (ver Fig. 2)

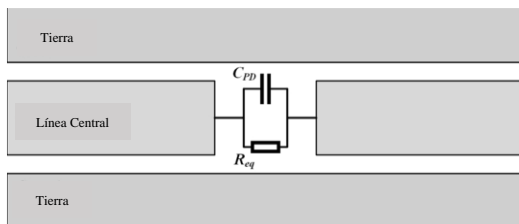


Figura 2.- Circuito equivalente de la CPW interrumpida la cual representa a un foto-interruptor [5].

B. Analizador de Redes Vectoriales (VNA) para la Caracterización en RF.

Para evaluar los parámetros de dispersión (parámetros S) en transmisión y reflexión en frecuencias de ondas milimétricas se utiliza el Analizador de Redes Vectoriales (VNA). Este instrumento en su configuración básica de medición se muestra en la Fig. 3. Para dispositivos que requieren una fuente de iluminación, se agrega una fibra óptica para que incida cierta longitud de onda al dispositivo bajo prueba (por sus siglas en inglés, DUT) [6].

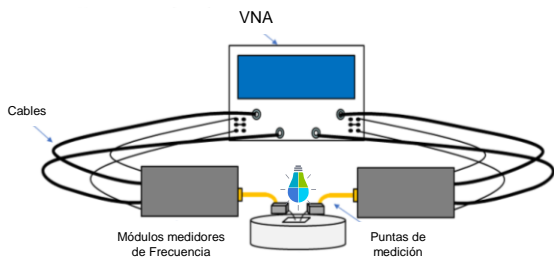


Figura 3.- Arreglo de la estación de pruebas del VNA.

Para este trabajo, se diseñó la CPW interrumpida (CPW-I) acorde a las sondas de medición (Infinity Probe de la marca Cascade Microtech), las cuales tienen una configuración T-S-T. Dependiendo de la apertura entre T y S, se tienen diferentes rangos de frecuencias, como se observa en la Tabla 1. En la Fig. 4 se puede observar un ejemplo de las sondas para una frecuencia de 110 GHz con una apertura entre T y S de 100 μm.

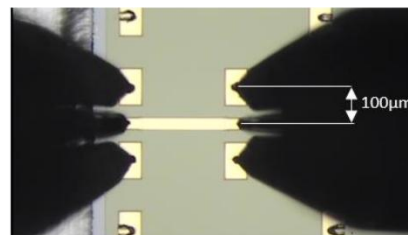


Figura 4.- Sonda de pruebas para 110 GHz con apertura de 100 μm entre Tierra y Señal [6].

Tabla 1.- Apertura de las sondas entre G y S con su rango de frecuencia

Apertura de las sondas (μm)	Frecuencia (GHz)
100	110
50	220
25	500

C. Configuración de los accesos coplanares del foto-interruptor

La mayoría de VNAs utilizan sondas de pruebas que presentan una impedancia característica de 50 Ω [6]. Los accesos del foto-interruptor deben ser compatibles con las medidas de las aperturas de las sondas de prueba. Para diseñar el acoplamiento de los contactos del dispositivo y el cálculo de la impedancia aproximadamente a 50 Ω, se utiliza un programa de modelado electromagnético en el que se toman en cuenta las propiedades eléctricas y el espesor (h) del sustrato, la separación (g) entre tierra y señal además del espesor del metal (t) que conforman los contactos, estos datos se muestran en la Fig. 5.

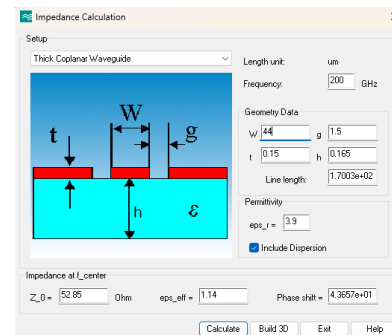


Figura 5.- Calculo para obtener una impedancia característica aproximada de 50 Ω.

III. MICRO Y NANO FABRICACIÓN DEL FOTO-INTERRUPTOR

A. Diseño del Foto-Interruptor

Una vez teniendo acoplado los contactos del dispositivo, se procede al diseño y fabricación del foto-interruptor. Primero, para el diseño utilizamos el programa Raith NanoSuite, el cual permite diseñar estructuras micrométricas para los accesos del dispositivo y nanométricas para los contactos interdigitados (área activa) como se muestra en la Fig. 6.

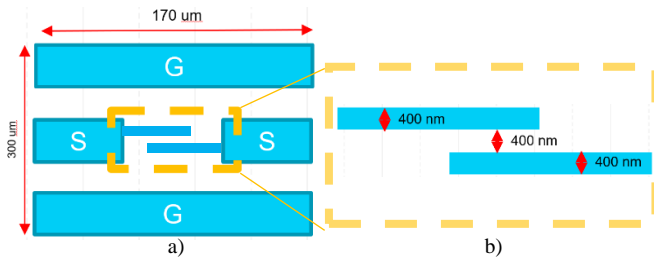


Figura 6.- Diseño del dispositivo con los contactos interdigitados: a) accesos coplanares para las sondas de prueba y b) contactos interdigitados para la zona activa de la CPW-I

Cabe resaltar que el ancho y la separación entre los contactos interdigitados tienen 400 nm y conforman la parte activa del dispositivo, donde posteriormente se depositará el rGO.

B. Fabricación del foto-interruptor

En La Fig. 6 mostramos los pasos necesarios en el proceso de fabricación del dispositivo. Utilizamos técnicas como litografía electrónica en el que por medio de un haz de electrones transfiere los patrones previamente diseñados a una resina electro sensible positiva. Posteriormente, se realiza un ataque químico para devastar el área donde incidió el haz de electrones.

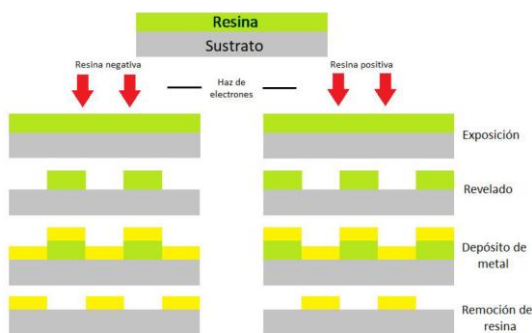


Figura 7.- Proceso de micro y nano fabricación por medio de litografía electrónica.

Una vez abierto los patrones, se depositan los metales Ti y Au 10 y 140 nm, respectivamente mediante la técnica de evaporación por haz de electrones. Por último, se retira la resina para eliminar el exceso del metal mediante lift-off (desprendimiento).

La Fig. 8, muestra el dispositivo (figura 8a) y los contactos interdigitados (figura 8b), los cuales serán conectados por el rGO para permitir el paso de la señal cuando se le incida luz.

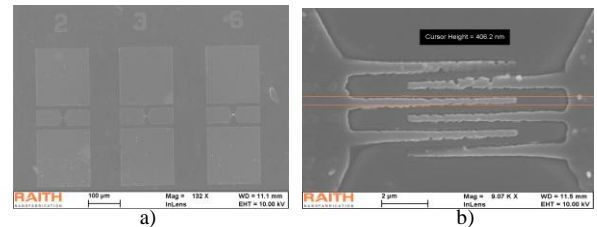


Figura 8.- Micrografías del a) dispositivo CPW-I y b) contactos interdigitados con un ancho y separación de 400 nm, respectivamente.

El siguiente paso es colocar una capa delgada de resina electro sensible y realizar nuevamente litografía electrónica sobre los contactos interdigitados con la finalidad de abrir ventanas para transferir el material activo (rGO) a estas zonas. El resultado de este proceso se puede visualizar en la Fig. 9.

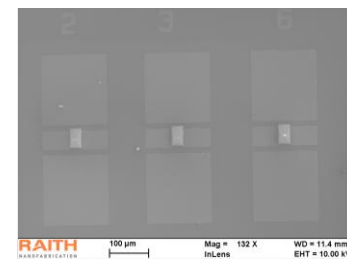


Figura 9.- Ventanas abiertas después de la litografía electrónica para el depósito del rGO.

C. Transferencia del rGO mediante la técnica de Langmuir-Blodgett

La técnica de Langmuir-Blodgett (LB) se utilizó para la transferencia del rGO sobre los contactos interdigitados [7]. Para esta etapa, se colocaron 150 µL a una concentración de 0.1 mg/mL en el canal y con tiempo de relajación del sistema de 30 minutos. Concluido el tiempo de reposo, se extrae el dispositivo del sistema. El resultado de la transferencia del rGO al dispositivo se muestra en la Fig. 10.

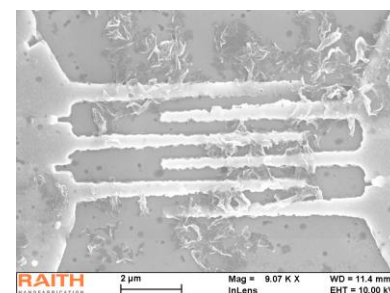


Figura 10.- rGO depositado mediante la técnica de Langmuir-Blodgett a los contactos interdigitados.

IV. CONCLUSIONES

Las micrografías tomadas mediante la técnica SEM muestran los resultados del proceso de fabricación del foto-interruptor resaltando la capacidad que tiene la técnica de litografía electrónica para realizar estructuras con alta resolución, cómo los contactos interdigitados con dimensión de 400 nm además de ubicar regiones dentro de la CPW-I para

realizar una segunda litografía electrónica dentro del dispositivo, como fue el caso para la transferencia del rGO. Por otro lado, la técnica de Langmuir-Blodgett es un método eficaz para transferir nano materiales a sustratos o dispositivos que requieran conectar ciertas áreas. Este método de transferencia no requiere de gases precursores como los necesitados por Deposición Química en fase de Vapor (, por sus siglas en inglés, CVD) u otros equipos que necesiten una gran área dentro de un laboratorio, lo que la hace una técnica eficaz para el depósito de diferentes materiales. La siguiente etapa de este proyecto consiste en realizar la caracterización en RF para conocer el comportamiento del dispositivo en transmisión y reflexión mediante el uso del VNA.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la SEPI ESIME Azcapotzalco y Ticomán, al Centro de Investigación en Computo (CIC), al SECIHTI por las facilidades y apoyo para llevar a cabo esta investigación y, por último, a la Secretaría de Investigación y Posgrado del Instituto Politécnico Nacional por el apoyo brindado mediante los proyectos SIP-20250096 y 20250035.

REFERENCIAS

- [1] D. Jayasankar, "Design and modeling of terahertz Schottky diode harmonic mixers," Chalmers University of Technology, 2019.
- [2] D. H. Auston, "Picosecond optoelectronic switching and gating in silicon," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 26, no. 3, pp. 101–103, 1975.
- [3] A. D. Zebentout, A. K. Aissat, Z. Bensaad, M. Zegaoui, A. Pagies, and D. Decoster, "GaAs metal-semiconductor-metal Schottky microwave optical switches," *Opt. Laser Technol.*, vol. 47, pp. 1–3, 2013.
- [4] J. Wu, H. Lin, D. J. Moss, K. P. Loh, and B. Jia, "Graphene oxide for photonics, electronics and optoelectronics," *Nat. Rev. Chem.*, vol. 7, no. 3, pp. 162–183, 2023.
- [5] I. Engineering, "MICROWAVE INSULATION OPTIMIZATION OF PHOTOSWITCHES CONSISTING OF A COPLANAR LINE INTRODUCING A SINGLE-ELECTRODE," pp. 4635–4641, 2013.
- [6] U. Arz *et al.*, "Best Practice Guide for Planar S-Parameter Measurements using Vector Network Analysers," *EMPIR-14IND02 PlanarCal*, no. November, p. 64, 2018.
- [7] K. Ariga, Y. Yamauchi, T. Mori, and J. P. Hill, "25th Anniversary article: What can be done with the langmuir-blodgett method? Recent developments and its critical role in materials science," *Adv. Mater.*, vol. 25, no. 45, pp. 6477–6512, 2013.