

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

Excitación de ondas electromagnéticas superficiales en nanopelículas depositadas en guías de onda planas

Mariana Lopera Obando

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:
Ingeniera en Telecomunicaciones

Asesores
PhD. Esteban González Valencia
PhD. Erick Reyes Vera

Instituto Tecnológico Metropolitano - ITM
Facultad de Ingenierías
Departamento Electrónica y Telecomunicaciones
Medellín, Colombia
2023

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

RESUMEN

Las aplicaciones de sensado han sido ampliamente estudiadas en las últimas décadas, gracias a la excitación de ondas electromagnéticas superficiales, con configuraciones de fibra óptica y óptica de volumen, donde encontramos los cubreobjetos como una alternativa de guía de onda plana de bajo coste, que al tener una o varias películas delgadas han dado paso a la construcción de sensores de índices de refracción rentables y de fácil acceso.

En este trabajo se estudia el efecto de las películas delgadas depositadas sobre guías de onda planas, utilizando una configuración sencilla y portable para ser utilizada en aplicaciones de sensado. Como guía de onda se propone el uso de un cubreobjetos estándar y se busca generar las condiciones óptimas para generar dos tipos de resonancias. Por un lado, se encuentran las resonancias de modos con pérdidas (LMR por sus siglas en inglés), las cuales sólo pueden ser excitadas cuando la película depositada es un material óxido metálico. Por otro lado, se encuentran las resonancias de polaritones de plasmones superficiales (SPP por sus siglas en inglés), las cuales sólo pueden ser excitadas cuando la película depositada es un material metálico. En ambos casos se estudian las condiciones óptimas para excitar cada tipo de onda para diferentes materiales de la nano-película, además de establecer la sensibilidad de cada configuración propuesta en el rango de detección propio del biosensado.

Para comprobar el desempeño experimental de la configuración propuesta, se utilizaron cubreobjetos estándar depositados con una nano-película de oro, con miras a excitar SPP. Adicionalmente se diseñaron varios montajes con la finalidad de establecer la configuración más apropiada para evidenciar las resonancias experimentales, con el fin de dar paso a la adecuación de un biosensor de bajo coste.

Palabras clave: LMR, SPP, SPR, sensibilidad, guía de onda, índice de refracción, coeficiente de extinción.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

RECONOCIMIENTOS

A mi familia que siempre ha estado apoyándome en cada paso de mi formación académica. Además, agradezco principalmente a mis asesores Erick Reyes Vera y Esteban González Valencia, quienes fueron los que me acompañaron en este proceso y con su experiencia, paciencia y conocimiento se logró hacer este trabajo.

También quiero agradecer a todos mis compañeros del semillero de investigación, mis compañeros de pregrado y amigos y a la institución por educarme y aprender con su excelencia académica y brindarme los espacios y recursos para realizar este trabajo.

Finalmente, es dedicado especialmente a mis padres Isabel Cristina Obando y Rubén Darío Lopera, quienes siempre me han apoyado y brindado su cariño a lo largo de la carrera y siempre hicieron su más grande esfuerzo para brindarme una formación profesional.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

ACRÓNIMOS

LMR: Resonancia de modo con pérdidas

SPP: Polaritón de plasmón de superficie

SPR: Resonancia de plasmón superficial

n: Índice de refracción (Parte real)

k: Coeficiente de extinción (parte imaginaria de n)

SRI: Índice de refracción del medio externo

TM: Transversal magnético

TE: Transversal eléctrico

LPFG: Redes de difracción de periodo largo

FBG: Redes de Bragg

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	6
2. MARCO TEÓRICO	11
3. METODOLOGÍA	17
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	29
5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO	54
REFERENCIAS	56

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

1. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, los sensores ópticos han tenido grandes avances gracias a las nuevas técnicas de deposición de películas delgadas. Dentro de los desarrollos más importantes logrados en 1982 se tiene el primer sensor de resonancia de polaritón de plasmón superficial (SPP por sus siglas en inglés), las cuales son ondas que se excitan en una inter. Este tipo de sensores comúnmente se basan en la configuración Kretschmann-Raether, que consiste en el acoplamiento de luz a través de prismas ópticos depositados con una película delgada (Fuentes et al., 2019a; Gómez Cardona et al., 2018; Paul et al., 2021a), ya que para que un SPP pueda ser excitado en la interfaz metal-dieléctrico, la luz debe de incidir sobre la superficie e interactuar con la película depositada, donde a ciertos ángulos tendrá una resonancia con polarización transversal magnética (TM). También el material del nanorecubrimiento debe cumplir con que la parte real de la permitividad sea negativa y de mayor magnitud que su propia parte imaginaria y la del material circundante (Fuentes et al., 2019a; Gómez Cardona et al., 2018; Mahfuz et al., 2019; Zhang et al., 2011). Hace una década fue publicado el trabajo experimental que logró descubrir los LMR, partiendo a la realización de artículos que demuestran la utilidad de este fenómeno al aplicarlo en el área de sensado (Pascual, 2022). Por otro lado, también pueden generarse resonancias de modo con pérdidas (LMR) que consta de otro tipo de ondas que pueden ser excitadas de la misma manera que en la configuración SPP, contando con la ventaja de que pueden producirse resonancias para ambos casos de luz polarizada, transversal magnética (TM) y transversal eléctrica (TE) (Fuentes et al., 2020). Sin embargo, para que esto pueda lograrse la parte real de la permitividad debe de ser positiva y de mayor magnitud que su propia parte imaginaria y la del material circundante (Del Villar et al., 2017). Este fenómeno puede darse cuando se depositan materiales oxido metálicos, donde puede adecuarse la posición de la resonancia y el rango de longitud de onda, ajustando el espesor de la nano-película. Para lograr el diseño de estos sensores se ha venido trabajando con las fibras ópticas en forma de D, que al tener una sección transversal asimétrica permiten depositar películas delgadas y separar

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

la posición espectral de las resonancias TM y TE (Fuentes et al., 2019a). Sin embargo, trabajar con fibras ópticas es costoso y más complejo de implementar, por lo que últimamente se han propuesto distintas alternativas más económicas y portables para el desarrollo de sensores, como la utilización de guías de onda plana, usando cubreobjetos y portaobjetos como guía de onda (Fuentes et al., 2019b)(Fuentes, 2022)

Por otro lado, los sensores basados en la técnica SPP tienen una gran relevancia en el campo de la biomedicina, ya que al utilizar metales comunes tales como el oro, no requieren de algún tipo de reactivo adicional para realizar la medición óptica, funcionando como refractómetros de alta sensibilidad (Arregui et al., 2014a). También, derivada de esta técnica sale el estudio de los sensores basados en LMR, donde pueden utilizarse gran variedad de materiales, incluso más económicos, con la condición de que no tengan tantas pérdidas ópticas (Fuentes et al., 2019b). La caracterización de los materiales escogidos para la deposición de las películas delgadas en cada una de las técnicas utilizadas, fueron estudiados y probados en el dispositivo desarrollado y se escogieron de forma tal, que cumplieran con las propiedades ópticas requeridas para la generación de SPP y LMR, que fueron seleccionadas especialmente por la simplicidad de la configuración y su fácil adaptabilidad a longitudes de onda cortas que corresponden a la luz visible y donde es más económica la implementación.

Debido a las características de los sensores basados en SPP y LMR, han sido ampliamente empleados en la detección de cambios en variables físicas y químicas como temperatura, presión e índice de refracción. Entre ellas, la medición del índice de refracción ha sido una de las aplicaciones más comunes debido a la alta sensibilidad de estos sensores para detectar pequeñas variaciones, como se ha demostrado en investigaciones previas (Bohorquez et al., 2021; Domínguez et al., 2022; Fuentes et al., 2022; Gómez-Cardona et al., 2020; Gómez-Cardona et al., 2018; Paul et al., 2021).

Un ejemplo reciente es el trabajo presentado por Benitez y colaboradores, en el que se desarrolló una plataforma de biosensores ópticos basados en resonancia de modo perdido

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

(LMR) utilizando guías de onda planas en lugar de fibras ópticas (Fuentes et al., 2022). En este trabajo, se recubrió la superficie del sensor con una película delgada de dióxido de titanio (TiO₂) y se inmovilizaron los anticuerpos IgG mediante enlace covalente. La plataforma se evaluó mediante la detección de anti-IgG en soluciones de amortiguador de fosfato salino (PBS) de 5 a 20 µg/mL. Los resultados mostraron que el sistema propuesto fue capaz de detectar la unión de IgG/anti-IgG, y se construyó una curva de calibración a partir de los datos experimentales obtenidos en tres repeticiones del ensayo.

En el 2022, Fuentes y colaboradores presentaron una plataforma de sensores multiparamétricos basada en resonancias de modo perdido, en la que se deposita una película delgada de espesor variable para generar múltiples resonancias independientes en la misma guía de onda (Dominguez et al., 2022). Los resultados experimentales se corroboraron con un análisis teórico, y como prueba de concepto, se fabricaron y probaron dos refractómetros en la misma guía de onda utilizando células de PDMS. Esta plataforma ofrece un gran potencial para la generación de múltiples LMR en el mismo espectro en una plataforma de detección multiparamétrica, lo que la convierte en una opción atractiva para el desarrollo de sondas de biosensores multi-analito.

De manera similar, los plasmones han sido empleados en la medición del índice de refracción, ya sea mediante la excitación de estas ondas superficiales en fibras ópticas microestructuradas o en fibras ópticas convencionales (Paul et al., 2021b; Qi et al., 2020; Rusyakina et al., 2023). Además, en el pasado se ha investigado el uso de diferentes materiales conductores como oro, plata e incluso grafeno con el fin de mejorar la sensibilidad de estos sensores ópticos, lo que demuestra que tanto la guía de onda como los materiales utilizados desempeñan un papel fundamental en el diseño de estos dispositivos.

En este trabajo plantea la deposición de películas delgadas sobre guías de onda planas, utilizando un cubreobjetos como guía de onda y las configuraciones de resonancia de modo con pérdida (LMR) y resonancia de plasmón de superficie (SPP). Para lograr el desarrollo de

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

los LMR se depositan diferentes materiales oxido metálicos como nano-películas, como lo son el óxido de indio (In_2O_3), óxido de indio y estaño (ITO), oxido de cobre (CuO), silicio (Si) y oxido de estaño (SnO_2). Para probar su funcionamiento se escogen diversos índices de refracción externos (SRI) y de acuerdo con esto se determina su sensibilidad con el desplazamiento en función de la longitud de onda, tanto para el modo de polarización TM y TE. De manera similar se estudia la configuración SPP, con la diferencia que solo aparecerá el modo de polarización TM y se depositan materiales metálicos como nano-recubrimiento para la excitación de las ondas electromagnéticas superficiales, estos corresponden a oro (Au) y cobre (Cu). Finalmente, se propone un montaje experimental empleando el método SPP, donde previamente se deposita oro como película delgada sobre un cubreobjetos.

El trabajo de grado propuesto se divide en cuatro capítulos los cuales se listan y se describen a continuación.

En la sección de marco teórico se presenta una explicación de lo que representan los índices de refracción y coeficientes de extinción, así como la descripción teórica de las configuraciones que se van a adaptar en este trabajo como lo son los LMR y SPP, y finalmente se describen los modos de propagación TM y TE. En la metodología se muestran las propiedades de los materiales utilizados como película delgada, así como el montaje empleado para la excitación de ondas electromagnéticas. En la parte de resultados se realiza un análisis de las sensibilidades con cada configuración y cada material depositado. Finalmente, se presentan las conclusiones y los trabajos a futuro que se pueden dar con esta investigación.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

Objetivo general

- Desarrollar un sensor de índice de refracción basado en excitación de ondas electromagnéticas superficiales en guías de ondas planas.

Objetivos específicos

- Diseñar configuraciones en guías de ondas planares para excitar distintas ondas electromagnéticas superficiales.
- Fabricar una estructura para la detección de índice de refracción basado en excitación de ondas electromagnéticas.
- Caracterizar la respuesta del sensor de índice de refracción diseñado.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

2. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se abordan los aspectos fundamentales de las guías de ondas y se describen los tipos de configuración de sensado más utilizados en la rama de la óptica, enfocándose principalmente en las resonancias de modo con pérdidas (LMR, por sus siglas en inglés) y en los polaritones de plasmón de superficie (SPP, por sus siglas en inglés), también llamados resonancia de plasmones superficiales (SPR, por sus siglas en inglés).

2.1 Guías de Onda

Las guías de onda son dispositivos que operan según el principio de reflexión total interna. Esto significa que cuando un haz de luz incide sobre una superficie, una parte se refleja y la otra se refracta. Sin embargo, bajo ciertas condiciones específicas, toda la luz se refleja y no hay refracción (González Valencia, 2019). Estas guías de onda son empleadas como medio para permitir que la luz viaje a través de ellas sin pérdidas de energía significativas. En la figura 1(a) se muestra un ejemplo de una guía de onda, que consiste en tener un sustrato y sobre este se deposita un material dieléctrico que cuente con un índice de refracción más grande. Estas diferencias de índices de refracción entre el sustrato y el dieléctrico hacen que la luz pueda viajar a través de la guía reflejándose muchas veces (Barboza-Tello et al., 2020). Por otro lado, están las fibras ópticas, las cuales son ampliamente empleadas actualmente en diversos campos de ingeniería y física (Del Villar et al., 2023; Galvis-Arroyave et al., 2020; Gomez-Cardona, Espinal Zapata, et al., 2020; Gomez-Cardona et al., 2018; N. Gómez-Cardona et al., 2021; N. D. Gómez-Cardona, Reyes-Vera, Torres, et al., 2018; Habib et al., 2020; Montoya-Cardona et al., 2020; Muñoz-Hernández et al., 2019; Munoz-Hernandez et al., 2020; Reyes-Vera et al., 2010, 2011, 2013, 2014, 2016, 2017; Reyes-Vera, Jimenez-Durango, et al., 2018; Reyes-Vera, Usuga-Restrepo, et al., 2018; Reyes-Vera & Torres, 2016; Torres et al., 2014; Valencia-Garzón et al., 2022; Vera et al., 2018). En la figura 1(b), una fibra óptica básica que consta de dos capas principales; un núcleo con un

índice de refracción n_1 , quien lleva y guía la luz a través de este y el revestimiento con índice de refracción n_2 , donde el índice de refracción del núcleo va a ser ligeramente mayor al del revestimiento $n_1 > n_2$ esto para que pueda cumplirse el principio de reflexión total interna (Sanchis & J.B. Ejea, 2008). Finalmente, se cuenta con una tercera capa adicional llamada acrilato, que proporciona protección física adicional a la fibra óptica para prevenir daños en su estructura ya que le proporciona mayor resistencia mecánica.

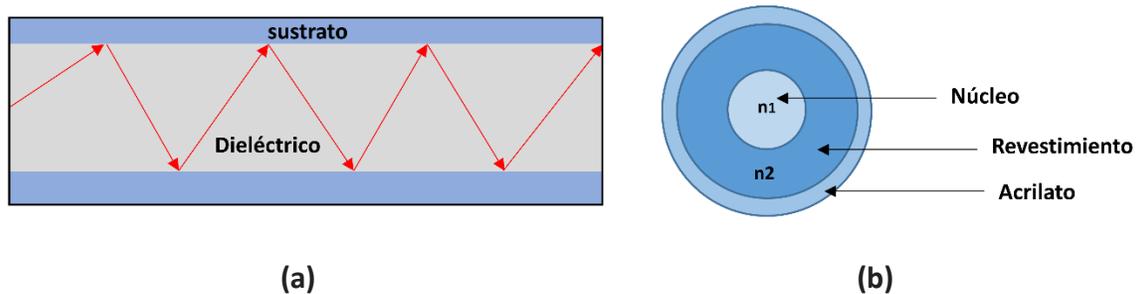


Figura 1. (a) Ejemplo de una guía de onda donde se propaga el haz de luz dentro del material dieléctrico (Barboza-Tello et al., 2020) (b) representación de una fibra óptica básica.

2.2 Sensores basados en guías de ondas

2.2.1 Redes de Bragg (FBG)

Los sensores basados en las redes de Bragg (FBG por sus siglas en inglés), se basan en realizar perturbaciones periódicas del índice de refracción a lo largo de una fibra monomodo creada a través de la exposición del núcleo a una fuerte perturbación producida por ondas de luz que interfieren entre ellas produciendo patrones de interferencias ópticas, esto también implica que la luz pueda propagarse en direcciones opuestas (Fuentes, 2022; Imas et al., 2021). Estas perturbaciones generan resonancias en el espectro óptico por el acoplamiento de la luz presentado al intercambiarse en el modo del núcleo con otros modos de propagación guiados por el núcleo (Imas et al., 2021). Las FBG han sido ampliamente usadas el campo de los sensores, ya que la posición espectral de su resonancia depende de

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

los cambios en tensión y temperatura (Gonzalez-Valencia & Torres, 2022a), sin embargo, no son sensibles ante cambios de índices de refracción del medio externo (SRI). De esta manera sólo aquellos modos del núcleo de la fibra que no son alterados por el medio externo pueden acoplarse (Imas et al., 2021).

2.2.2 Redes de difracción de periodo largo (LPFG)

Las redes de difracción de periodo largo (LPFG por sus siglas en inglés), también consiste en variar o perturbar de forma periódica el índice de refracción del núcleo de una fibra óptica, aquí hay entre el modo del núcleo y el revestimiento existe un acoplamiento propagándose la luz hacia una misma dirección (Fuentes, 2022). Los sensores basados en LPFG, se basan en el acoplamiento de la luz que se transmite por el modo confinado en el núcleo de una fibra monomodo y los guiados en paralelo por el recubrimiento de la fibra óptica, produciendo resonancias en el espectro de transmisión (Fuentes, 2022). Las LPFG además de hacer mediciones de tensión y temperatura, también son sensibles al índice de refracción del medio circundante (SRI), donde al cambiar el índice de refracción del medio circundante (SRI) se produce una perturbación en los modos de la capa externa de la fibra o recubrimiento ocasionando cambios en el espectro de transmisión en función de la longitud de onda (Fuentes, 2022; Villar et al., 2022).

2.2.3 Resonancias de plasmones superficiales (SPR)

La excitación óptica de los SPR fue demostrada inicialmente por los estudios de T. Turbadar, quien demostró que al depositar una capa de aluminio en uno de los lados de un prisma la luz que se refleja en esta interfaz experimenta una disminución en su intensidad en ángulos que están por encima del crítico y llegando a desaparecer para ciertos ángulos (González Valencia, 2019). Luego Otto introdujo un método llamado la reflexión total atenuada para acoplar plasmones de superficie la cual modificó Kretschmann y Raether. Con estas bases y

fundamentos, se fueron perfeccionando estas técnicas hasta establecer un sistema para excitar ondas de SPP (González Valencia, 2019). Por otro lado, la configuración de Kretschmann-Raether puede verse representada en la figura 2 donde se deposita una nanopelícula de metal sobre un prisma óptico y al introducir un haz de luz con diversos ángulos de incidencia se produce la activación de un SPP en la interfaz metal-dieléctrico en un ángulo determinado, en consecuencia, se muestra una resonancia o pérdida en la salida la cual puede visualizarse en el espectro óptico (Fuentes et al., 2019b; Miyazaki et al., 2017). Finalmente, para obtener resonancias SPR se debe cumplir con la condición de que su película delgada tenga la parte real de la permitividad negativa y de mayor magnitud que su propia parte imaginaria (Arregui et al., 2014b; Fuentes et al., 2019b).

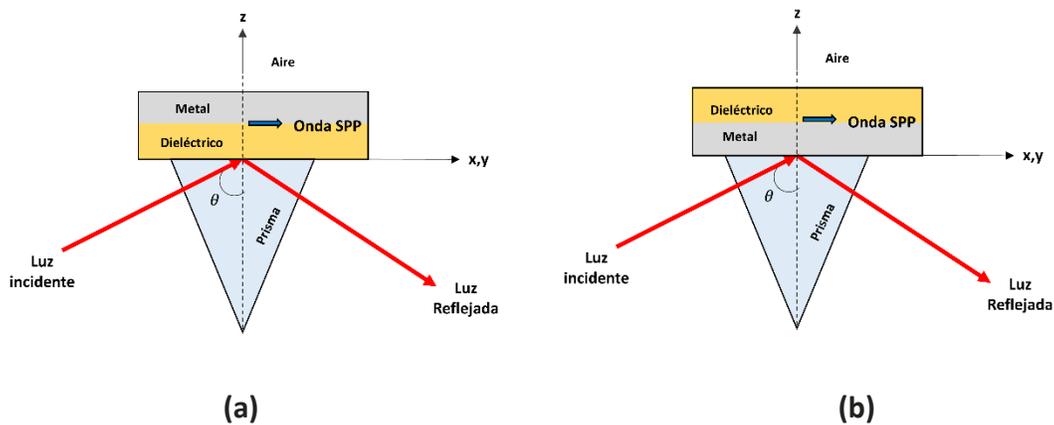


Figura 2. Propuestas de configuración basadas en prismas ópticos para excitar SPP según (a) Turbadar-Otto y (b) Turbadar-Kretschmann-Raether.

2.2.4 Resonancias de modos con pérdidas (LMR)

La generación de resonancias de modos con pérdidas (LMR) se basa en el mismo fundamento que los SPR con la configuración de Kretschmann-Raether, sin embargo, las propiedades de la película delgada deben ser diferentes para excitar este fenómeno, ya que deben cumplir con la característica de que la parte real de la permitividad del nano-

recubrimiento sea positiva y de mayor magnitud que su propia parte imaginaria (Arregui et al., 2014b; Fuentes et al., 2019b), para eso existen diversos materiales dieléctricos que cumplen con esta condición, como por ejemplo los polímeros y oxido metálicos. En la figura 3 puede verse una representación de una guía de onda recubierta de una película delgada con los espectros de entrada y salida.



Figura 3. Esquema de una guía de onda recubierta con una película delgada que cumple las condiciones para la generación de LMR con los espectros de transmisión de entrada y salida.

Otra diferencia importante con relación a los SPR o SPP es que las ondas superficiales de los LMR soportan ambas polarizaciones TM y TE, esto se logra utilizando especialmente con una fibra óptica en forma de D que, con ayuda de un polarizador lineal, permite separar y controlar las polarizaciones TM y TE respectivamente, en la figura 4 puede verse una representación de este tipo, donde se tiene una fibra óptica en forma de D con una nanopelícula y se está monitoreando la luz a través de un analizador de espectro óptico (Del Villar et al., 2017). Finalmente, para lograr excitar sólo los modos TE, la polarización debe ser horizontal, es decir, el campo eléctrico E será transversal al plano de incidencia TE. Caso contrario ocurre cuando la polarización es vertical, ya que el campo magnético H es transversal al plano de incidencia TM y se excitarán sólo los modos TM (ver figura 5) (Fuentes, 2022).

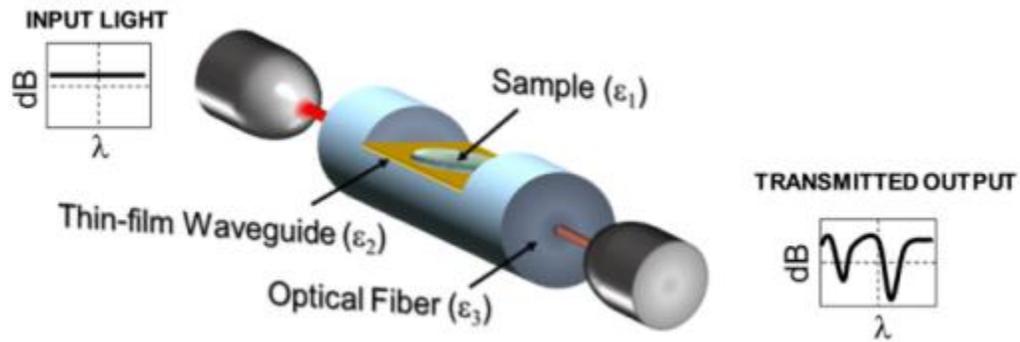


Figura 4. Fibra óptica en forma de D con una nano-película y espectros de transmisión de entrada y salida (Del Villar et al., 2017).

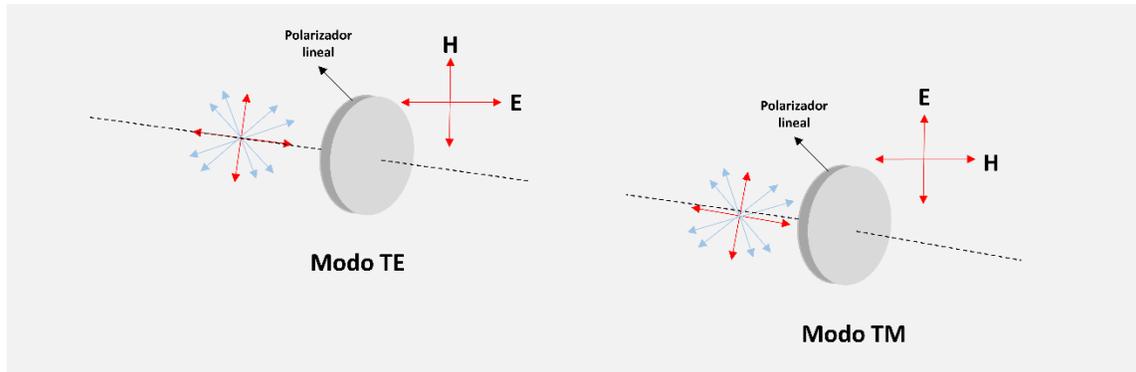


Figura 5. Esquema de la polarización de la luz para de la excitación de resonancias LMR.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

3. METODOLOGÍA

3.1 Simulación LMR y SPP

Para realizar el análisis de la estructura se utilizó el software FIMMWAVE y el módulo integrado FIMMPROP con el que es posible estudiar la propagación de la luz, en conjunto con la sección RWG (Rectangular Waveguide) que permite la construcción de guías de ondas planos, y se empleó el método de diferencias finitas (FDM, por sus siglas en inglés) para el ajuste de la entrada del haz de luz. Como guía de ondas se escogió un cubreobjetos de vidrio sodocálcico, cuyas dimensiones para la generación de LMR y SPP son $a = 22 \text{ mm}$ y $b = 0.5 \text{ mm}$ (ver figura 6), también se utilizó como referencia un sustrato de polimetacrilato de metilo (PMMA) que cuenta con un índice de refracción menor al del vidrio ($n=1.496$ a 500nm), garantizando que se oriente la luz a través de la guía de onda.

Para que la estructura soporte los LMRs, se debe depositar una película delgada de un medio dieléctrico con pérdidas, por lo que se estudiaron los casos correspondientes a óxido de indio (In_2O_3), óxido de indio estaño (ITO), óxido de cobre (CuO), óxido de estaño (SnO_2) y silicio (Si). Como se muestra en la figura 6, el sistema se iluminará lateralmente con luz linealmente polarizada y se analizará el espectro de la luz transmitida a través del cubreobjetos.

De forma similar se emplea la misma estructura para generar para los SPPs, sobre la cual ahora se depositan materiales metálicos para excitar este fenómeno. Los materiales elegidos corresponden al oro (Au) y cobre (Cu).

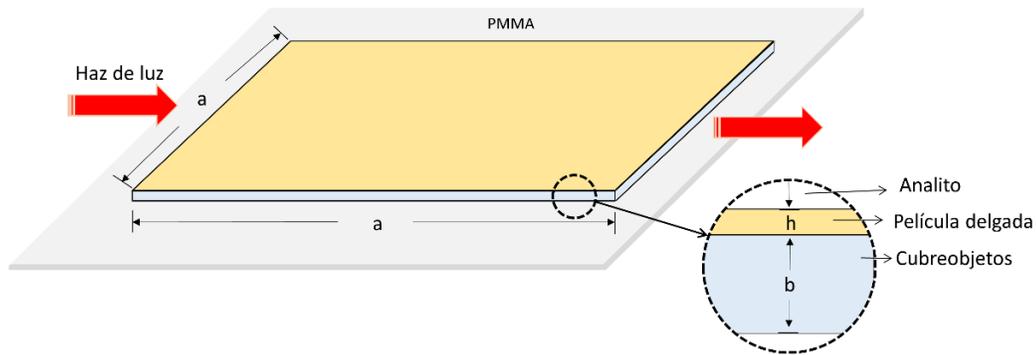


Figura 6. Esquema del montaje diseñado para la generación de resonancias SPP y LMR depositando una película delgada sobre un Cubreobjetos.

3.2 Montaje LMR y SPP

Para realizar el montaje del diseño del dispositivo, tal como se muestra en la figura 7, se utiliza un cubreobjetos previamente depositado con una película delgada en una máquina de pulverización catódica (sputtering), también se utiliza una fuente de luz blanca, un polarizador lineal que permite seleccionar el modo de polarización TM o TE según sea el caso. Finalmente, la luz que sale del cubreobjetos se lleva a un analizador de espectros ópticos donde se podrán analizar los resultados obtenidos y confirmar que se encuentre dentro de los rangos de longitudes de onda establecidos.

Para este trabajo en particular, se analizará la configuración para excitar SPP en el montaje experimental, para lo cual se utilizará un blanco de oro en la máquina de sputtering para la deposición de la película delgada y no es requerido el polarizador lineal ya que sólo se trabajan los modos TM en esta configuración.

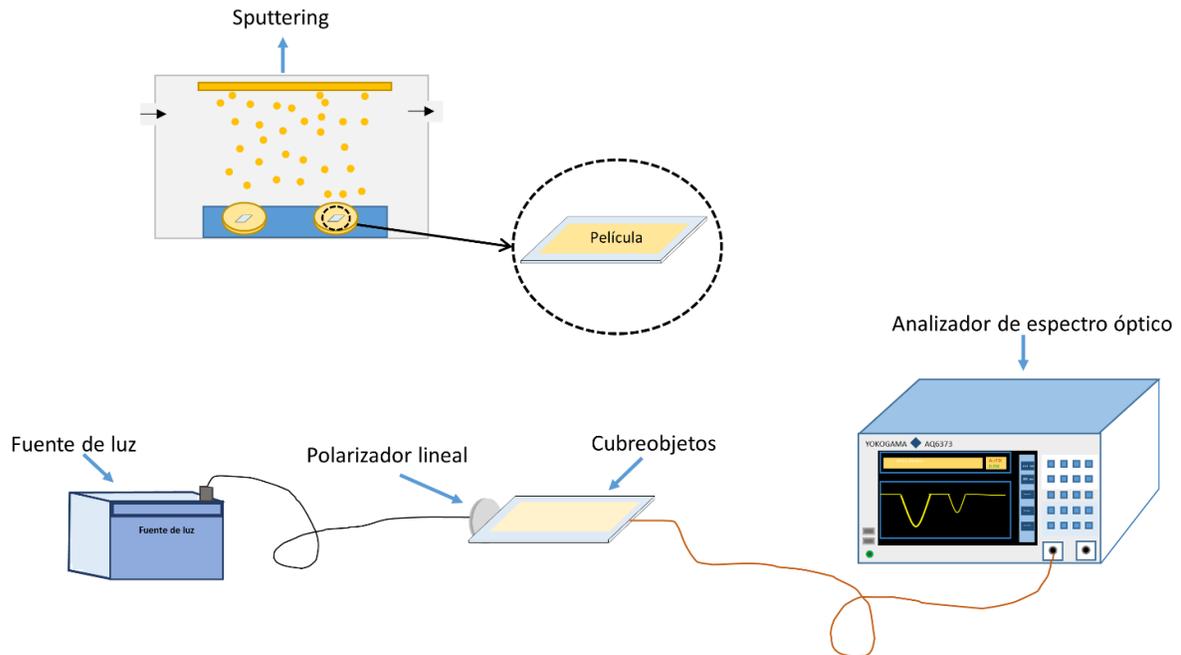


Figura 7. Configuración del montaje experimental para la excitación de ondas electromagnéticas superficiales y la generación de LMR y SPP.

3.3 Caracterización de las propiedades de los materiales dieléctricos para la generación de LMR

Para garantizar la excitación de las ondas electromagnéticas y conseguir excitar las resonancias LMR, se estudiaron las propiedades ópticas de cada material utilizado, las cuales corresponden al índice de refracción (n-parte real) y coeficiente de extinción (k-parte imaginaria) dentro de las longitudes de onda establecidas en el rango de 400 nm a 1000 nm.

Como primer material a estudiar en el ámbito del sensado con películas delgadas, se escogió el óxido de indio, In_2O_3 (Fuentes et al., 2019a; Medenbach et al., 2013). Este compuesto es uno de los más investigados debido a sus propiedades ópticas y eléctricas únicas, como su amplio rango de su índice de refracción, que oscilan entre 1.90 y 2.11. Esta característica lo

hace especialmente interesante para aplicaciones de sensado que requieran una alta sensibilidad y selectividad, como la detección de gases y la monitorización de la calidad del aire.

Además, como se puede observar en la figura 8, La parte real del índice de refracción del In_2O_3 es mayor a su parte imaginaria, pero esta también es relativamente alta (del orden 10⁻²), lo que indica una alta capacidad de absorción y dispersión de la luz, indispensable para la excitación de LMR. Es importante destacar que, a medida para longitudes de onda más largas, ambas partes del índice de refracción disminuyen exponencialmente. Esto hace que el In_2O_3 sea un material óptimo para depositar como película delgada ya que es un material oxido metálico con propiedades ópticas adecuadas que permiten una alta sensibilidad en el área de sensado.

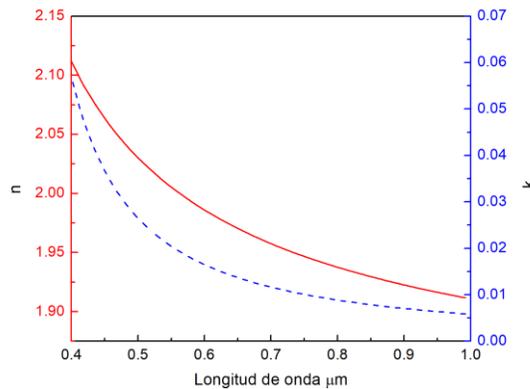


Figura 8. Propiedades ópticas de índice de refracción (n) y coeficiente de extinción (k) para una película delgada de In_2O_3 en el rango de longitud de onda entre 400nm a 1000nm(Fuentes et al., 2019a; Medenbach et al., 2013).

Otro de los materiales analizados es el ITO el cual, al igual que el In_2O_3 , la parte real de su índice de refracción varía entre 1.92 y 2.13, dependiendo de la longitud de onda (ver figura 9). Además, como se muestra en la figura 7, su índice de refracción (n) es mayor a su parte imaginaria o coeficiente de extinción (k). Otro aspecto a destacar es que no tiene un

comportamiento lineal y su parte imaginaria tiende a aumentar conforme aumenta la longitud de onda, sin embargo, dadas las características para los rangos de interés en este estudio, es un material que puede utilizarse como nano-película para la generación de LMR.

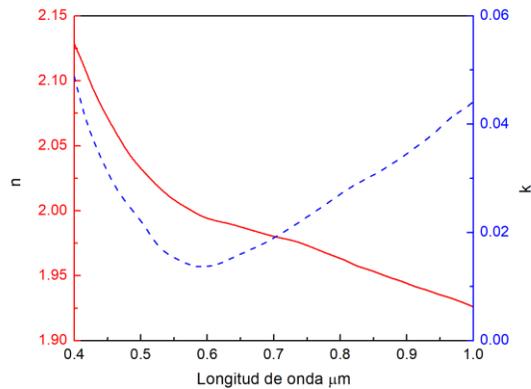


Figura 9. Propiedades ópticas de índice de refracción (n) y coeficiente de extinción (k) para una película delgada de ITO en el rango de longitud de onda entre 400nm a 1000nm (Fuentes, 2022)

Otro material estudiado fue el óxido de cobre (CuO) mostrado en la figura 10, también conocido como óxido cúprico (Gonzalez-Valencia et al., 2021). Este material se caracteriza por tener un alto índice de refracción (parte real), que se sitúa en un rango entre 2.15-2.35, y su coeficiente de extinción relativamente alto (parte imaginaria), que alcanza un valor de 0.35 en una longitud de onda de 500 nm, lo convierten en uno de los materiales más prometedores para aplicaciones ópticas asociadas a sensado de variables. Además de sus propiedades ópticas, el CuO también cuenta con propiedades semiconductoras que lo hacen útil en la fabricación de dispositivos optoelectrónicos (Rashad et al., 2013).

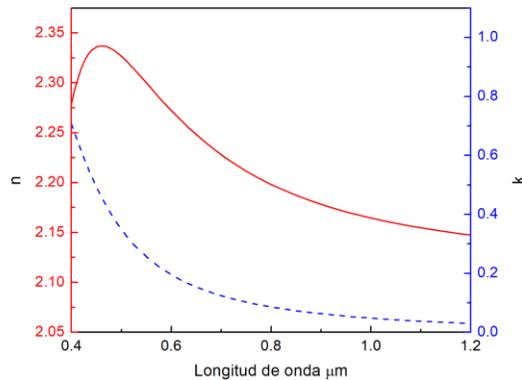


Figura 10. Propiedades ópticas de índice de refracción (n) y coeficiente de extinción (k) para una película delgada de CuO en el rango de longitud de onda entre 400nm a 1200nm (Gonzalez-Valencia et al., 2021)

El siguiente material analizado, fue el óxido de estaño (Gonzalez-Valencia et al., 2021), el cual se caracteriza por tener un índice de refracción, que se encuentra en un rango cercano a 1.90-2.05, tal como se muestra en la figura 11 este material ha sido ampliamente usado en aplicaciones ópticas donde se requiere una alta transmisión de luz y una baja reflexión.

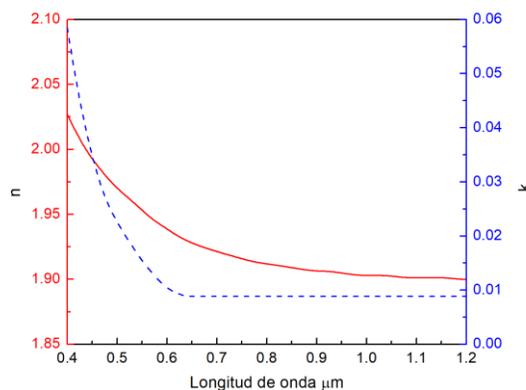


Figura 11. Propiedades ópticas de índice de refracción (n) y coeficiente de extinción (k) para una película delgada de SnO₂ en el rango de longitud de onda entre 400nm a 1200nm (Gonzalez-Valencia et al., 2021).

Finalmente se escogió el Silicio, cuyas propiedades son mostradas en la figura 12 (Schinke et al., 2015), detallan que es un material cuyo índice de refracción es el más alto entre los materiales escogidos para la generación de LMR, además de tener mínimas pérdidas, teniendo repercusiones en el funcionamiento del dispositivo, estas se detallan en el capítulo 4 de este escrito.

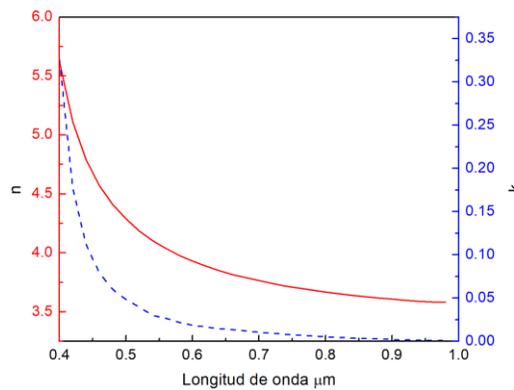


Figura 12. Propiedades ópticas de índice de refracción (n) y coeficiente de extinción (k) para una película delgada de Silicio en el rango de longitud de onda entre 400 nm a 1000 nm (Schinke et al., 2015).

3.4 Caracterización de los materiales metálicos para la generación de SPP

En el caso de las resonancias SPP, se deben depositar materiales metálicos sobre los guías de ondas. Así como para los LMR, las propiedades de los materiales metálicos, que se deben caracterizar corresponden al índice de refracción y coeficiente de extinción.

Al caracterizar el oro (Au), se puede notar que la parte real de índice de refracción es menor a su parte imaginaria como se muestra en la figura 13, donde el índice de refracción llega a tener valores aproximados entre 0.2-1.4, mientras que su parte imaginaria esta entre 1.5-

5.8 aproximadamente (Rakic', et al., 1998). También, este metal es uno de los más comunes encontrarlo en el entorno, permitiendo que sea de fácil acceso en comparación con otros materiales, las películas delgadas de oro se usan en una amplia cantidad de aplicaciones, como en la obtención de imágenes en microscopios electrónicos de barrido (SEM).

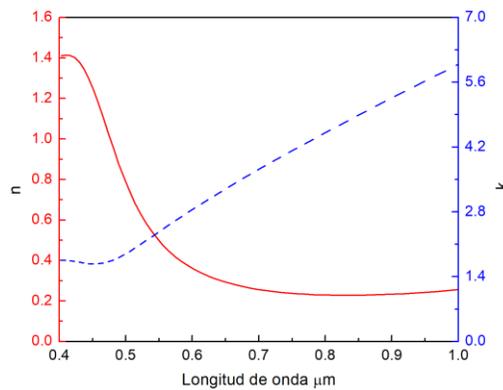


Figura 13. Propiedades ópticas de índice de refracción (n) y coeficiente de extinción (k) para una película delgada de Oro (Au) en el rango de longitud de onda entre 400nm a 1000nm (Rakic', et al., 1998).

Finalmente, se eligió el cobre (Cu), cuyas propiedades ópticas se muestran en la figura 14, como otra alternativa para la deposición de la película delgada. El cobre tiene características muy similares a las del oro, tendiendo índices de refracción muy similares entre 0.2-1.4, y su parte imaginaria aproximada entre 2.25-6.3 (Rakic', et al., 1998).

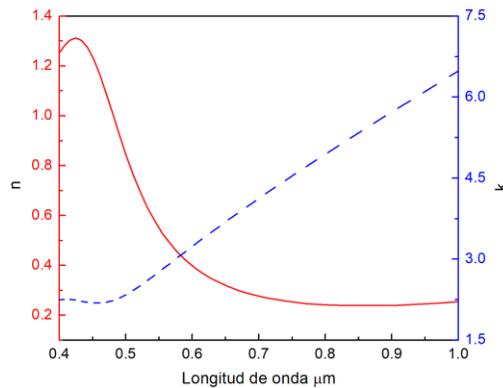


Figura 14. Propiedades ópticas de índice de refracción (n) y coeficiente de extinción (k) para una película delgada de Oro (Au) en el rango de longitud de onda entre 400nm a 1000nm (Rakic', et al., 1998).

Con las propiedades del oro y cobre mostradas anteriormente, puede notarse una gran diferencia con los materiales para la generación de LMR, principalmente porque los valores de índice de refracción para la generación de SPP son bastante pequeños a comparación de los materiales para LMR que cuenta valores bastante altos, incluso llegando hasta los 4.28 RIU en 500nm en el caso del silicio. Por otro lado, la parte imaginaria de los materiales para SPP soy muy altas incluso teniendo rangos que llegan hasta un valor de 6.3 para cierta longitud de onda.

3.5 Proceso de simulación

Para la construcción de la figura plana fue necesario crear 4 secciones, en la figura 15 pueden notarse la estructura realizada en Fimmwave con los índices de refracción arrojados en alrededor de 500 nm, donde siguiendo la secuencia de abajo hacia arriba, consta de un sustrato, el vidrio (guía de onda) una película delgada en este caso la que se muestra corresponde al SnO₂ y finalmente la muestra externa (SRI).

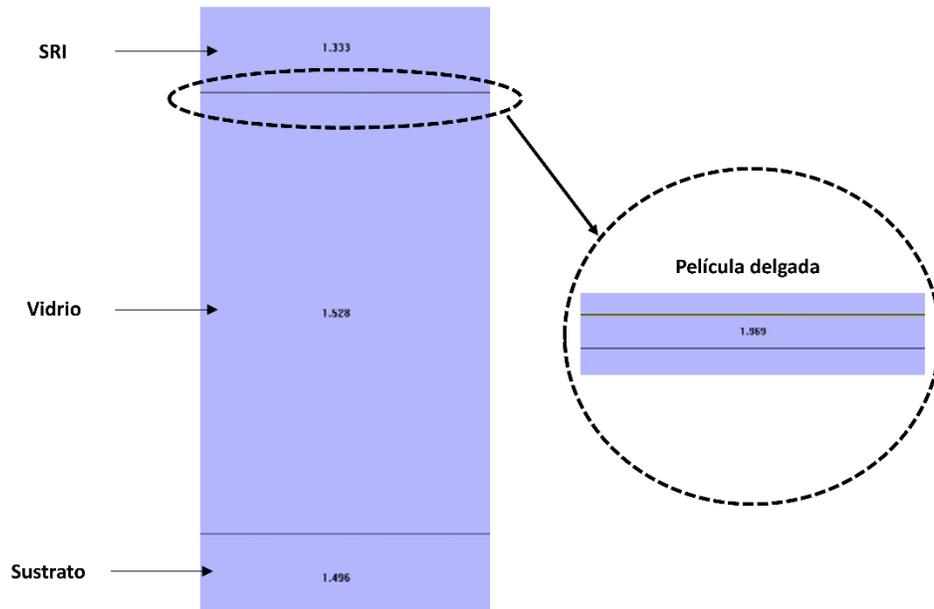


Figura 15. Estructura del dispositivo en el software de simulación Fimmwave.

Finalmente, se realiza el análisis con 30 modos para describir y observar la propagación de la luz a través de la guía de onda plana, así como el confinamiento en la película delgada, en este caso en la figura 16 pueden verse los 30 modos analizados para una longitud de onda de 500 nm con la configuración LMR, la polarización TM y una película depositada de SnO₂, este mismo proceso de simulación se dio para la configuración SPP.

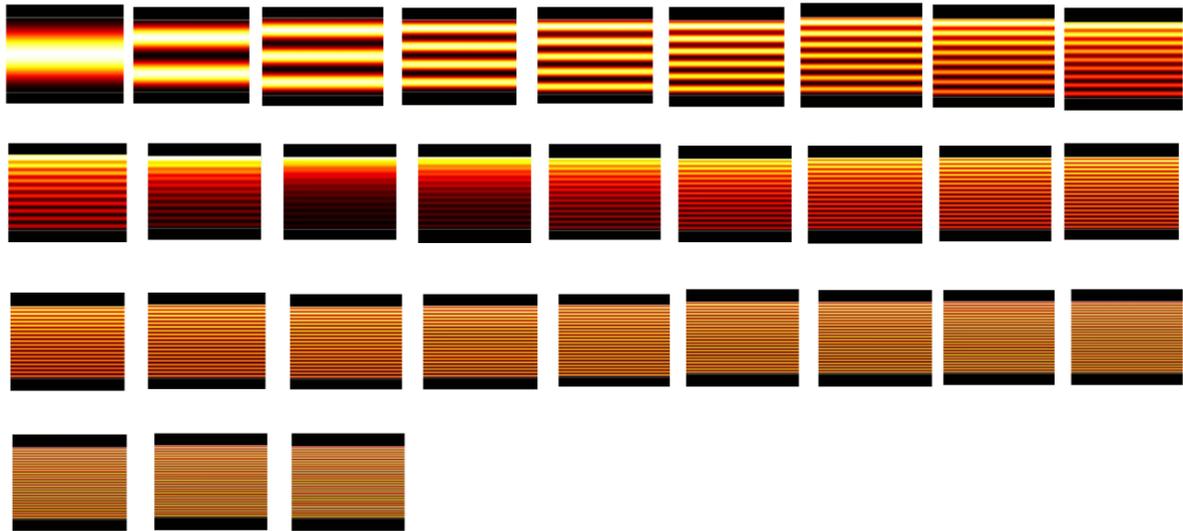


Figura 16. Modos alcanzados con una película de SnO₂ en 500nm con la configuración LMR y el modo de polarización TM

3.6 Validación de la metodología

Para comprobar la veracidad de la configuración se toma como referencia el artículo (Fuentes et al., 2019a) en el cual se estudia el In₂O₃ como película delgada para el desarrollo de un sensor de índice de refracción con la configuración LMR sobre una guía de onda plana. Se toman los datos especificados respecto al espesor de la película delgada de 74 nm para una resonancia cercana a 500 nm, sin embargo, no se especifican los valores de índice de refracción utilizados. Finalmente la simulación arroja una resonancia cerca de 647nm para un SRI=1.333. La sensibilidad que se obtuvo fue de alrededor de 815 nm/RIU al someternos a diferentes índices de refracción del medio externo (SRI), que corresponden a los valores de 1.333, 1.341, 1.357, 1.372 para el modo TM. En la figura 17 pueden verse las resonancias obtenidas para el modo TM con unas ligeras variaciones en la resonancia con respecto al original, esto debido a que pueden variar los resultados de acuerdo con los valores de índices de refracción que se utilizaron como referencia en la película delgada de In₂O₃. Sin

embargo, las resonancias se encuentran dentro de los rangos de longitudes de onda estudiados y la sensibilidad obtenida fue en alrededor de 1400 nm/RIU. Este valor de sensibilidad es claramente más alto que el del artículo de referencia debido a que a longitudes de onda más largas habrá sensibilidades mayores. Finalmente, se comprueba la veracidad de los resultados obtenidos en este trabajo y del dispositivo presentado, dando lugar la realización de estudios y configuraciones que conlleven a detección de sustancias biológicas.

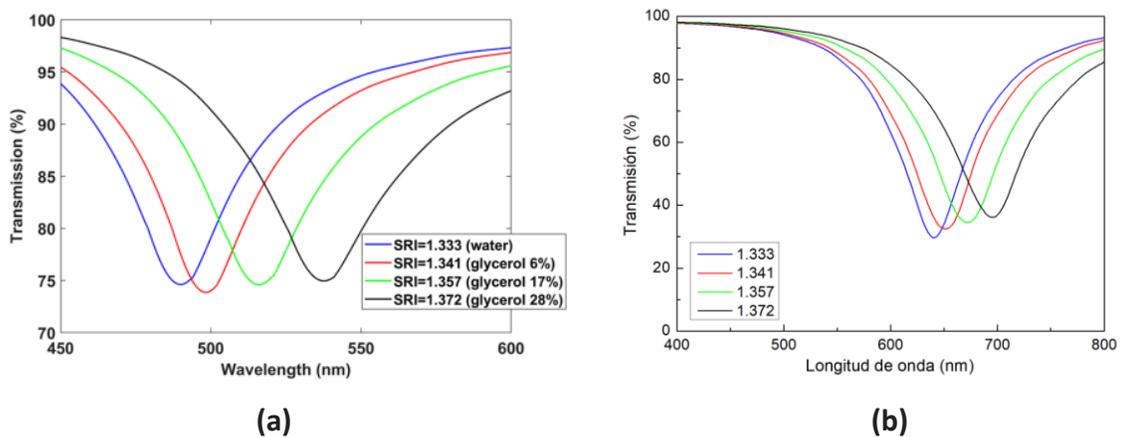


Figura 17. Respuesta espectral del guía de onda plano recubierto con 74nm de In_2O_3 en función del índice de refracción externo (SRI) para el modo de polarización TM. (a) Espectro reportado en la referencia (Fuentes et al., 2019a) y (b) espectro calculado siguiendo la metodología propuesta.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Resonancias LMR

Como bien se sabe, una de las características principales de las resonancias LMR, es que se tendrán estas pueden excitarse tanto para la polarización transversal magnética (TM) como para la polarización transversal eléctrica (TE). En este caso, se escoge un rango espectral entre 400-1000 nm, que son longitudes de onda correspondientes a la luz visible y el infrarrojo cercano, ya que es el rango de longitudes de onda en donde es más común lograr excitar las resonancias SPP.

El espesor de la película delgada se ajustó de forma tal que, cuando la muestra a analizar sea un medio acuoso con índice de refracción externo (SRI) de 1.333, la resonancia con polarización TM siempre se excite a 500 nm. En la tabla 1 se muestran las propiedades de cada material a 500 nm, donde se nota que entre mayor sea la parte real del índice de refracción de la película, su espesor tendrá que ser más delgado. Por tanto, se obtuvo que las películas que deben depositarse deben tener espesores entre los 20.09 nm hasta los 75.8 nm, en función del material elegido.

Tabla 1. Propiedades de los materiales dieléctricos analizados para la película depositada a 500nm.

Material	Índice de refracción		Espesor (nm)
	<i>n</i>	<i>k</i>	
Si	4.28	0.04	20.09
CuO	2.32	0.35	35.15
ITO	2.03	0.02	54.7
In2O3	2.02	0.02	54.8
SnO2	1.96	0.02	59.2

La figura 18(a) muestra el espectro de transmisión obtenido con el sensor propuesto para el caso del modo TM excitado en una película de In_2O_3 con espesor de 54.8 nm. Allí, se logra evidenciar que, para este caso, la resonancia se presenta a una longitud de onda igual a 500 nm, mientras que para el modo TE, la resonancia se da a 774 nm; este modo puede apreciarse en la figura 18(b). Esto se debe a que las resonancias con polarización TE siempre se obtienen a longitudes de onda mayores (Gonzalez-Valencia et al., 2019). El In_2O_3 tiene propiedades ópticas apropiadas para generar LMR dentro de los rangos de longitudes de onda seleccionados, permitiendo tener unos picos de resonancia con una profundidad de 72% y 74% en los modos TM y TE, respectivamente.

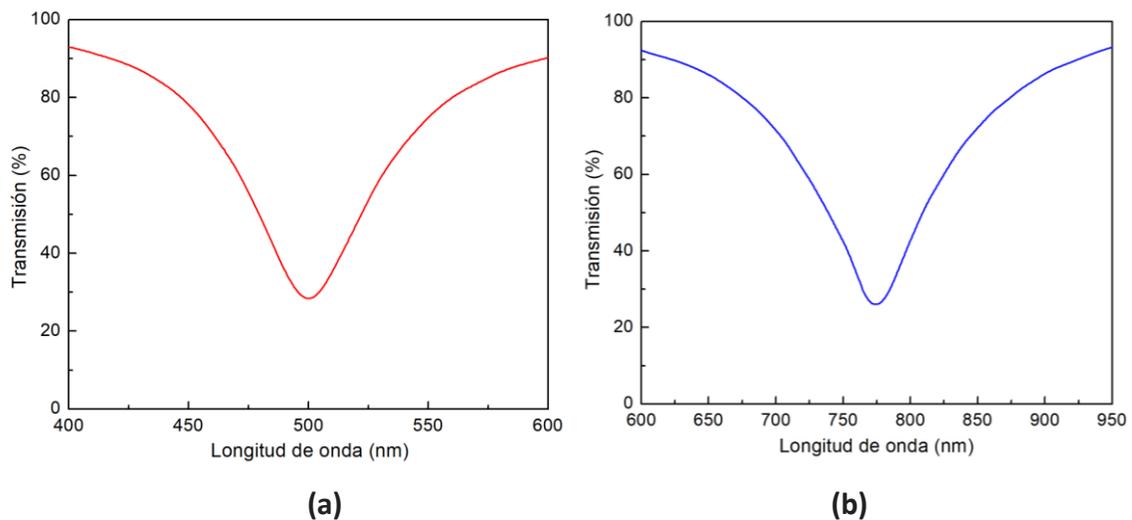


Figura 18. Espectro de transmisión de las resonancias LMR en una guía de onda plana con una película de 54.8 nm de In_2O_3 , para las polarizaciones (a) TM y (b) TE.

El siguiente material estudiado fue el ITO, es cual es uno de los materiales más estudiados para la generación de LMR, ya que por las características ópticas con las que cuenta este material ha tenido importantes aplicaciones en el área de sensado. En la figura 19(a) y figura 19(b) se muestran los espectros obtenidos, donde se observa que se obtuvo como resultado una resonancia centrada en 500 nm y profundidad de 70.5% para el modo TM, mientras

que para el modo TE, la resonancia se obtiene a una longitud de onda de 813nm con 81% de pérdidas.

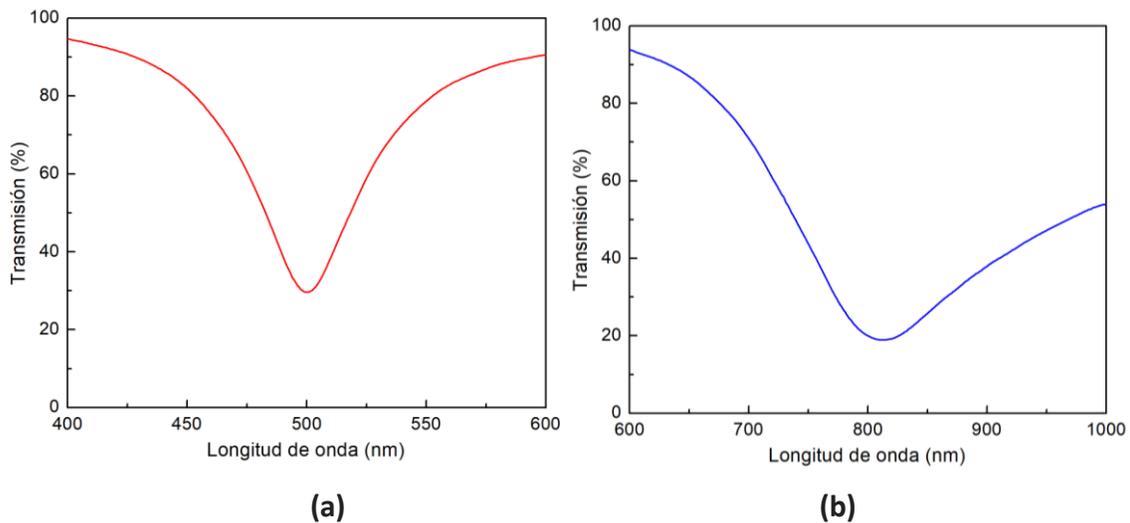


Figura 19. Espectro de transmisión de las resonancias LMR en una guía de onda plana con una película de 54.7 nm de ITO, para las polarizaciones. (a) TM y (b) TE.

En el caso del CuO, puede verse en la figura 20(a) que si se tiene una película de 35.2 nm de espesor, se obtiene una resonancia en 500 nm correspondiente al modo TM, la cual tiene una profundidad en transmisión de 39%, mientras que en el caso del modo TE mostrado en la figura 20(b), la resonancia se obtiene en 855nm con una profundidad de 75%. La resonancia TE queda bastante alejada de la resonancia TM, por lo que se aumentó el rango de longitud de onda hasta 1200 nm. Con esto, puede notarse que en este último modo mencionado la curva de transmisión está más definida por encontrarse en longitudes de onda más largas y donde el coeficiente de extinción (k) de este material se hace cada vez más pequeño.

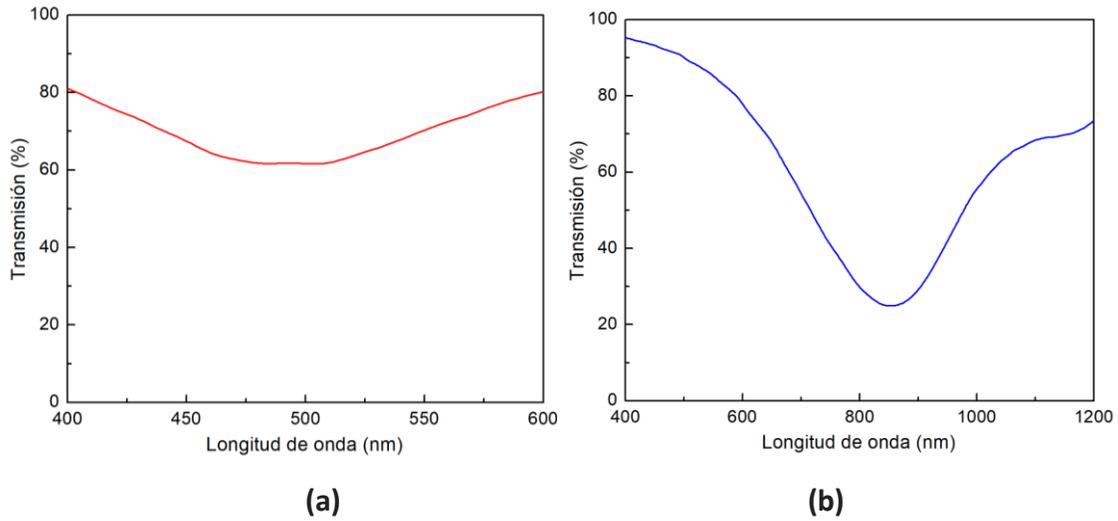


Figura 20. Espectro de transmisión de las resonancias LMR en una guía de onda plana con una película de 35.2 nm de CuO, para las polarizaciones. (a) TM y (b) TE.

La configuración que presentó el mejor comportamiento fue el guía de onda con la película delgada de SnO₂. En la figura 21(a) se puede observar que si se deposita una película de 59.2nm de SnO₂, se obtiene la resonancia del modo TM a 500 nm, con una profundidad del 71%. En contraste, el modo TE, que se muestra en la figura 21(b), tiene una resonancia a una longitud de onda de 782 nm y un pico de pérdidas del 82%.

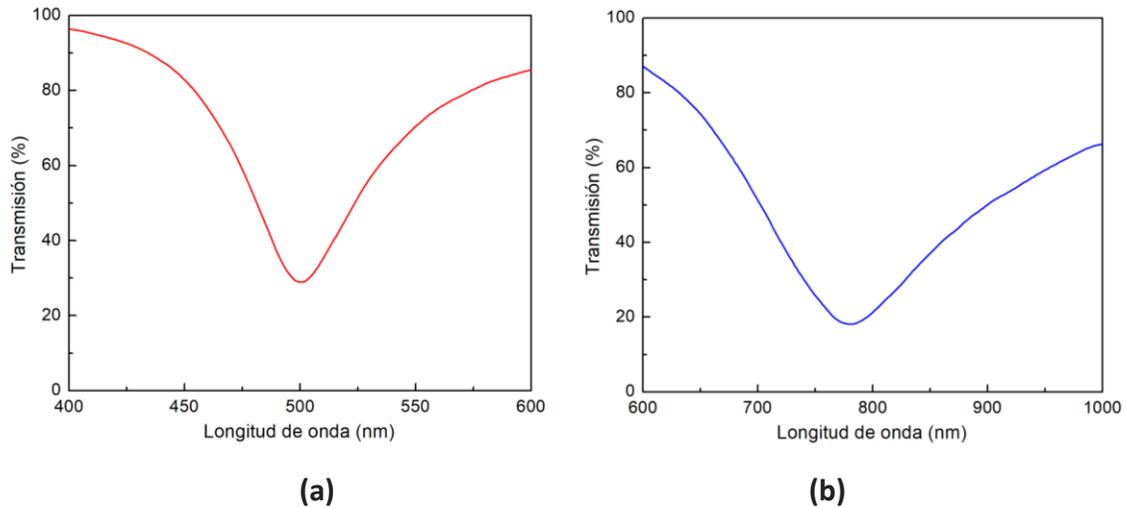


Figura 21. Espectro de transmisión de las resonancias LMR en una guía de onda plana con una película de 59.2nm de SnO₂, para las polarizaciones. (a) TM y (b) TE.

Por último, se estudió el caso en que la película delgada corresponde a Si. En este caso se obtuvo que para que la resonancia TM se obtenga a 500 nm, el espesor de la película debe ser de 20.1 nm. El espectro de transmisión obtenido se muestra en la figura 22, donde se observa que el pico de resonancias tiene una profundidad del 52.5%. En este caso se observó que la resonancia con polarización TE se desplaza hacia el infrarrojo, a una longitud de onda cercana a los 3 μm , donde ya no son válidas las ecuaciones de Sellmeier usadas para calcular el índice de refracción (Schinke et al., 2015). Por tanto, este análisis fue omitido.

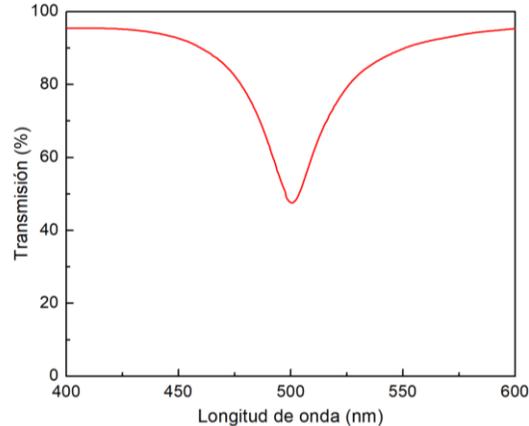


Figura 22. Espectro de transmisión de las resonancias LMR en una guía de onda plana con una película de 20.1 nm de Si, para la polarización TM.

Con los resultados anteriores, se logra evidenciar que para los modos TE, los picos de resonancia van a excitarse a longitudes de onda más largas, lo que permite que se acople más la luz en la película delgada (debido al mayor campo evanescente a estas longitudes de onda (Gonzalez-Valencia et al., 2019), haciendo que tenga mayores pérdidas. También, debido a las propiedades ópticas de cada material, en especial el índice de refracción, se puede determinar la separación de las resonancias entre los modos TM y TE (Gonzalez-Valencia et al., 2021).

4.2 Sensor basado en generación de LMR sobre una guía de onda plana

Para evaluar el rendimiento de esta estructura como sensor, se analizaron las curvas de transmisión midiendo los cambios en la longitud de onda en respuesta a variaciones en el índice de refracción externo, cercanas al valor del agua. Se seleccionaron rangos de 1.330 a 1.380 RIU, ya que la mayoría de las sustancias biológicas presentes en la naturaleza tienen un índice de refracción dentro de este rango, lo que permitirá establecer el desempeño del

sensor propuesto cuando este es empleado en la caracterización y detección de cambios en dichas sustancias.

La respuesta espectral con una película de In_2O_3 , mostrado en la figura 23(a) para el modo TM, muestra resonancias que se dan con los SRI mínimo y máximo correspondientes a 1.330 y 1.380 RIU, a una longitud de onda de 498 nm y 550 nm, respectivamente. En la figura 23(b), se puede ver la respuesta obtenida en el modo TE, donde las resonancias se encuentran en longitudes de onda de 771.5 nm y 846.5 nm para los SRI de 1.330 y 1.380 RIU. Con esto, se puede establecer que, con la deposición de este material como película delgada, los espectros en ambos modos son fáciles de medir ya puede distinguirse fácilmente el desplazamiento de sus resonancias con cada muestra externa depositada.

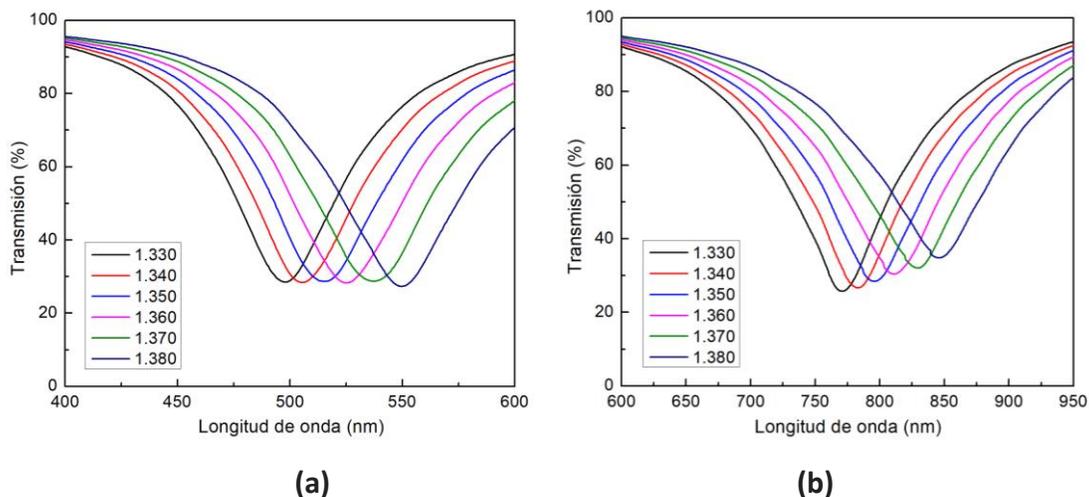


Figura 23. Respuesta espectral del guía de onda plano recubierto de In_2O_3 en función del índice de refracción externo (SRI) para los modos de polarización (a) TM y (b) TE.

Para medir la sensibilidad con la película delgada de In_2O_3 , se hace una representación del cambio de la longitud de acuerdo con el índice de refracción externo depositado. En la figura 24, se ve este desplazamiento para ambos modos y claramente se encuentra una

sensibilidad mayor para el modo TE con 1533 nm/RIU con respecto al modo TM, ya que este último presenta una sensibilidad de solo 1033 nm/RIU.

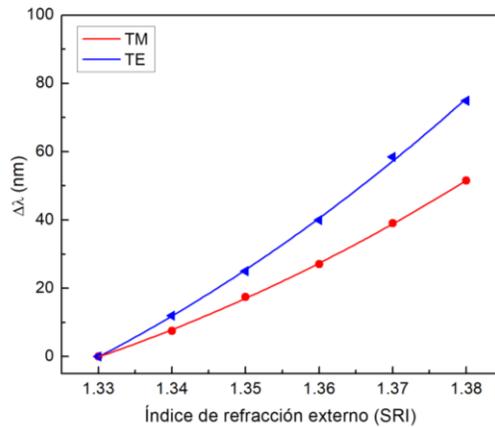


Figura 24. Desplazamiento de la longitud de onda de resonancia en función del índice de refracción externo (SRI) para un guía de onda plano recubierto de In_2O_3 .

Se sabe que el In_2O_3 es un material con propiedades ópticas relevantes para la detección de sustancias biológicas. Sin embargo, existe otro material con propiedades ópticas similares llamado ITO, el cual ha sido evaluado en este estudio. Los resultados indican que, al igual que el In_2O_3 , el ITO presenta una resonancia en el modo TM en torno a los 499 y 551 nm para muestras con SRI de 1.330 y 1.380 RIU, como se puede apreciar en la figura 25(a). Por otro lado, se observó que las resonancias para el modo TE del ITO se desplazan hacia longitudes de onda más largas, presentando resonancias entre 810 nm y 887 nm, tal como se muestra en la figura 25(b). Además, se encontró que la parte imaginaria del ITO empieza a aumentar en una longitud de onda determinada, lo que conlleva a una curva de resonancia más ancha.

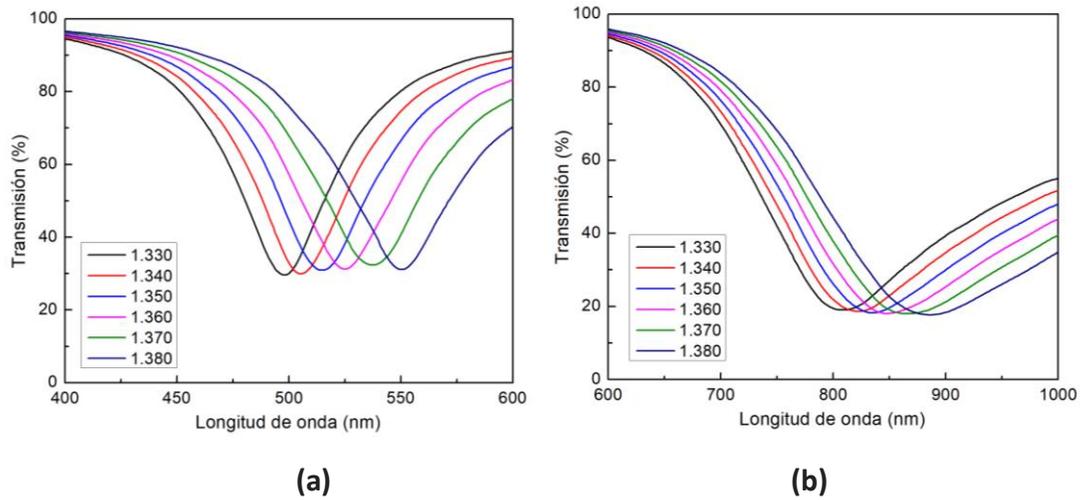


Figura 25. Respuesta espectral del guía de onda plano recubierto de ITO en función del índice de retracción externo (SRI) para los modos de polarización (a) TM y (b) TE.

Basado en los corrimientos obtenidos, se calculó las sensibilidades para los modos TE y TM, cuando la película es de ITO. Los resultados obtenidos muestran sensibilidades iguales a 1046 nm/RIU y 1520 nm/RIU para los modos TM y TE, respectivamente. En la figura 26, se representa este desplazamiento, donde se muestran resultados muy similares a los del In₂O₃.

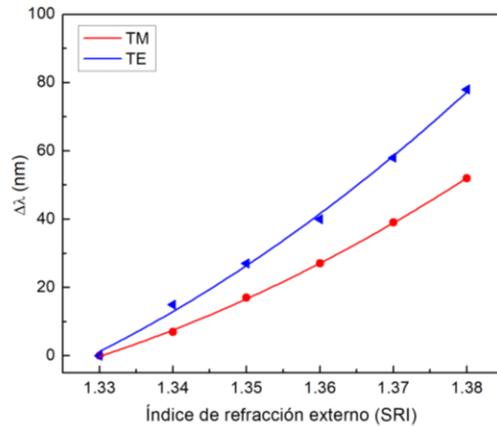


Figura 26. Desplazamiento de la longitud de onda de resonancia en función del índice de refracción externo (SRI) para un guía de onda plano recubierto de ITO.

En cuanto al comportamiento del CuO, se observa en la figura 27(a) que para el modo TM las curvas de resonancia son más amplias, lo que hace que sea más difícil detectar cada uno de los mínimos en las curvas de transmisión resultantes a partir de las muestras externas. Esto se debe a que su parte imaginaria, o coeficiente de extinción, es bastante alto. Por otro lado, en la figura 27(b) se muestra el comportamiento del modo TE, donde las propiedades ópticas de este material indican que a medida que la longitud de onda se hace más grande, su parte imaginaria disminuye, lo que permite que las curvas sean más definidas en este modo. Además, la separación entre las resonancias de los modos TM y TE es amplia debido al alto índice de refracción, lo que implica que para obtener una detección precisa en el rango de 1.330 a 1.380 RIU, se necesita un rango de longitud de onda más amplio. En este caso, las resonancias mínimas y máximas fueron de 495 nm y 528 nm para el modo TM, y de 850 nm y 930 nm para el modo TE.

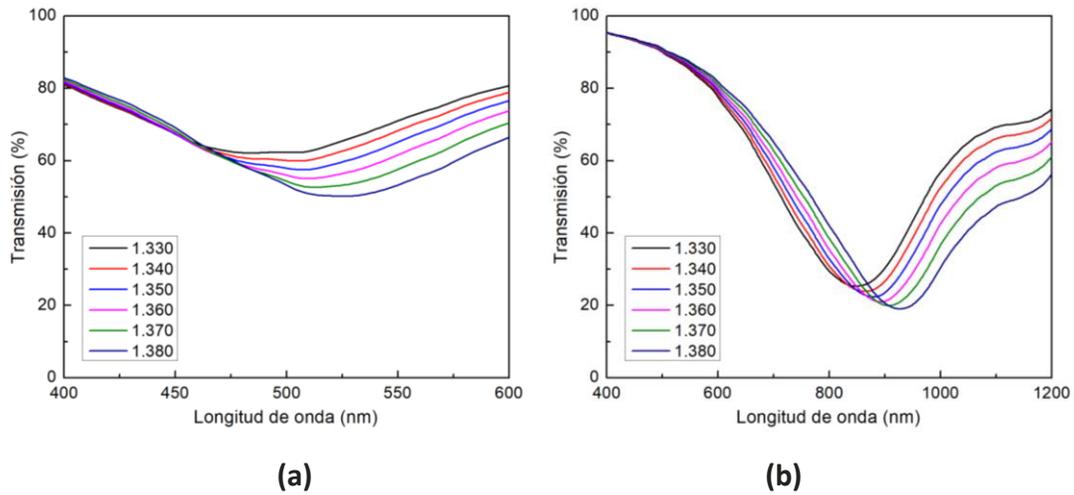


Figura 27. Respuesta espectral del guía de onda plano recubierto de CuO en función del índice de retracción externo (SRI) para los modos de polarización (a) TM y (b) TE.

De esta manera, el cambio de la longitud de onda de resonancia que se da con la deposición de una película de CuO es muy notorio, como se muestra en la figura 28. Donde el modo TE tuvo un incremento en la sensibilidad de 869 nm/RIU con respecto al modo TM, dando como resultado una sensibilidad para los modos TM y TE de 668 nm/RIU y 1537 nm/RIU, respectivamente.

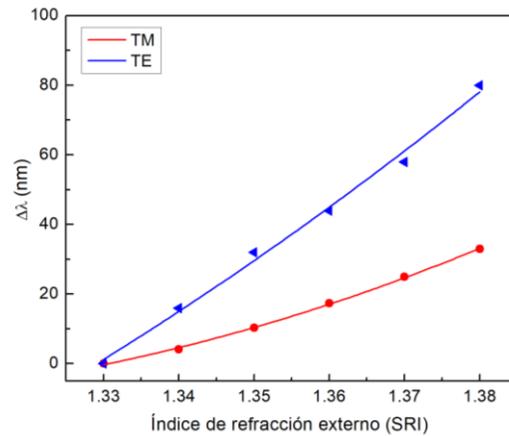


Figura 28. Desplazamiento de la longitud de onda de resonancia en función del índice de refracción externo (SRI) para un guía de onda plano recubierto de CuO.

La figura 29 muestra la respuesta espectral del SnO₂ dentro del rango de longitud de onda seleccionado para el análisis del sensor. En el modo TM, se pueden observar resonancias entre 500 nm y 554 nm, mientras que en el modo TE, las resonancias se encuentran entre 778 nm y 868 nm. Es importante destacar que el SnO₂ tiene el índice de refracción más bajo de los materiales estudiados, lo que se traduce en un menor desplazamiento entre las resonancias, en comparación con los demás materiales.

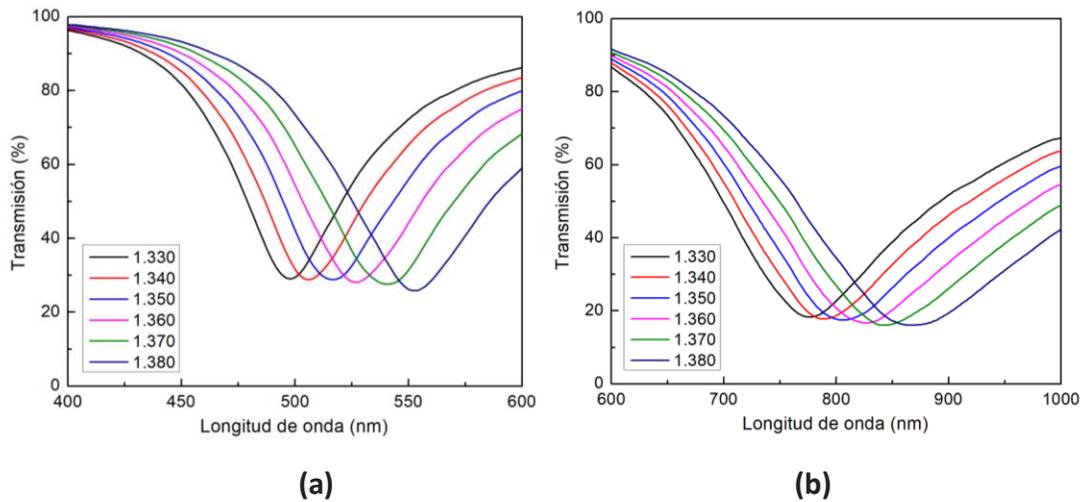


Figura 29. Respuesta espectral del guía de onda plano recubierto de SnO₂ en función del índice de retracción externo (SRI) para los modos de polarización (a) TM y (b) TE.

Por otro lado, la película de SnO₂ mostró cambios en la longitud de onda mucho más grandes que los demás materiales depositados, tal como se muestra en la figura 30, teniendo la mayor sensibilidad tanto para el modo TM con 1091 nm /RIU y 1811 nm/RIU para el modo TE. Esto se debe a que cuando la película tiene un índice de refracción menor, los modos excitados tienen mayor campo evanescente y por tanto mayor sensibilidad (M. Lopera-Obando et al., 2022).

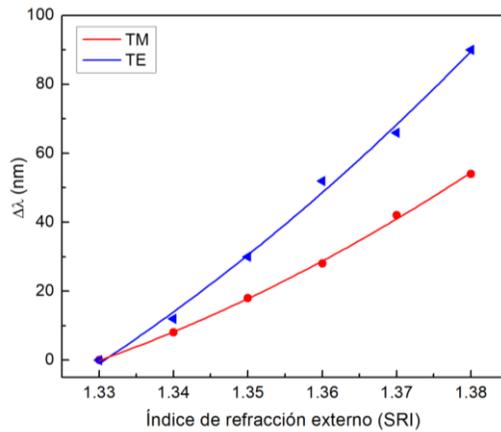


Figura 30. Desplazamiento de la longitud de onda de resonancia en función del índice de refracción externo (SRI) para un guía de onda plano recubierto de SnO₂.

Por último, el silicio es el material con el índice de refracción más alto entre los estudiados, sin embargo, como se mencionó previamente, solo fue posible estudiar la resonancia TM, debido a que la resonancia TE se encuentra fuera del rango espectral de estudio. En la figura 31 puede verse la respuesta espectral del modo TM, dando como resultado resonancias entre 499.5nm a 533nm.

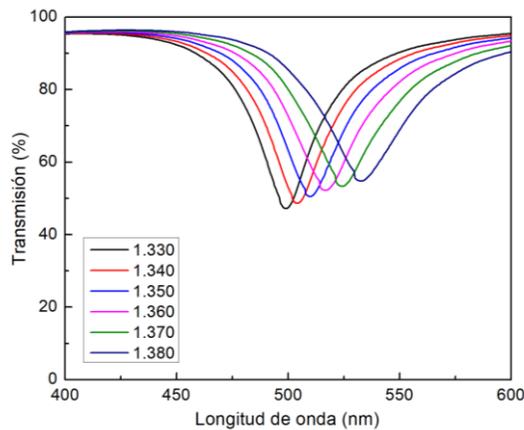


Figura 31. Respuesta espectral del guía de onda plano recubierto de Si en función del índice de refracción externo (SRI) para el modo de polarización TM.

La sensibilidad con la deposición de una película de silicio fue una de las más bajas (como puede verse en la figura 32 con 669 nm/RIU). Esto sucede porque se tiene un índice de refracción demasiado alto, quedando la luz del LMR altamente confinada en la película, lo que causa que el modo de propagación se poco afectado por los cambios del SRI (M. Lopera-Obando et al., 2022).

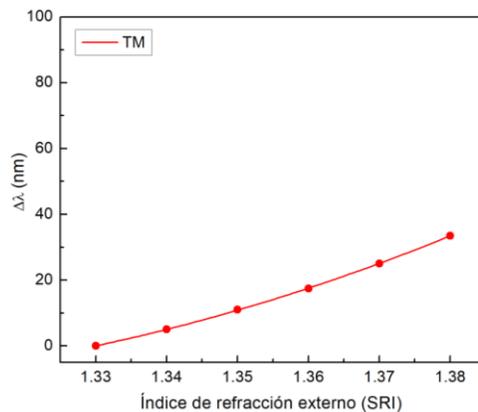


Figura 32. Desplazamiento de la longitud de onda de resonancia en función del índice de refracción externo (SRI) para un guía de onda plano recubierto de Si.

En la tabla 2 pueden verse los resultados de sensibilidad arrojados para cada material en cada uno de los modos. Las sensibilidades van a ser mayores en el modo TE, debido a que la longitud de onda es más grande y por lo tanto hay mayor campo evanescente en contacto con el medio externo, como consecuencia cualquier variación del medio externo afectará en mayor medida la respuesta del modo TE que del modo TM, recordando que este último se da a longitudes de onda más bajas (Gonzalez-Valencia et al., 2021; Gonzalez-Valencia et al., 2020; Gonzalez-Valencia & Torres, 2022)

Tabla 2. Sensibilidad obtenida para las resonancias LMR-TM y LMR-TE con cada material depositado.

Material	Sensibilidad (nm/RIU)	
	<i>LMR-TM</i>	<i>LMR-TE</i>
SnO ₂	1091	1811
ITO	1046	1520
In ₂ O ₃	1033	1513
Si	669	-
CuO	668	1537

En conclusión, al estudiar distintos materiales como película delgada, se puede evaluar la respuesta del dispositivo con cada uno de ellos, para así, lograr una optimización del dispositivo y determinar los materiales más acertados para el área de biosensado.

Por otra parte, todos los materiales escogidos, son viables y han sido utilizados como base para realizar sensores de índices de refracción, donde con una correcta adecuación, se puede aplicar al área de sensores biológicos ya que tienen las propiedades requeridas para la generación de LMR. Los materiales que mostraron ser más efectivos fueron el SnO₂, ITO y In₂O₃, donde las propiedades de n y k son óptimas para tener curvas de resonancia fáciles de detectar y además de presentar sensibilidades altas. Por otro lado, el Si y el CuO, siguen siendo una alternativa para depositarse como película delgada y aportar al funcionamiento de un sensor LMR, sin embargo, se debe tener en cuenta que su sensibilidad es mucho más baja.

4.3 Sensor basado en generación de SPP sobre una guía de onda plana

Una de las características principales de las resonancias SPP es que solo se generan para el modo transversal magnético (TM) y se analizan en el rango de 350-700nm, donde al igual que la configuración LMR corresponden a longitudes de onda cortas donde es más viable y económico hacer dichas mediciones en comparación con los equipos requeridos para los análisis en longitudes de onda más largas.

Por otro lado, la película delgada se ajustó de forma tal que cuando la muestra a analizar correspondiera a un medio acuoso con SRI=1.330, la resonancia se excitara cerca de una longitud de onda de 500 nm. En la tabla 3 se muestran las propiedades del oro (Au) y cobre (Cu) en esta longitud de onda, donde a igual que en el caso de los LMR, el espesor de la película delgada es directamente proporcional al índice de refracción, tal como lo es el caso del Au que cuenta con un espesor de 26 nm con $n=0.78$ RIU, para mientras que para el Cu fue de 34 nm con $n=0.84$ RIU.

Tabla 3. Propiedades de los materiales analizados en la configuración SPP para la película depositada a 500 nm.

Material	Índice de refracción		Espesor (nm)
	<i>n</i>	<i>k</i>	
Au	0.78	1.89	26
Cu	0.84	2.33	34

En la figura 33(a) puede verse el espectro obtenido con una película depositada de 26 nm de oro (Au), donde se da una resonancia en cerca de 500 nm, en este caso la estimación de la profundidad de la resonancia fue de solo 20.6%. Por otro lado, la resonancia mostrada en la figura 33(b) corresponde a la película de cobre (Cu), donde se observa una resonancia en 500 nm, teniendo una profundidad aproximada de 21.9%. Estos valores presentados son mucho menores que los reportados para las resonancias LMR, implicando que la luz que

incide por la guía de onda (cubreobjetos) no se acople tan fácilmente en la película delgada y como consecuencia los espectros de transmisión sean más complejos de visualizar.

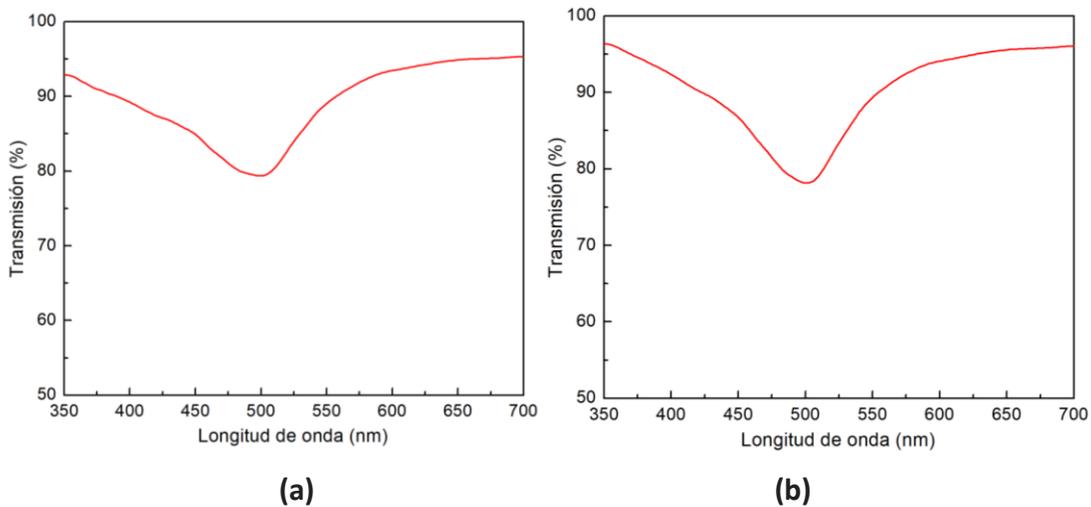


Figura 33. Espectro de transmisión de las resonancias SPPs en una guía de onda plana con una película de (a) 26nm de Au y (b) 34nm de Cu.

4.4 Sensor SPP sobre una guía de onda plana

Para medir el rendimiento del sensor SPP, al igual que en los LMR se toman rangos de índices de refracción externos correspondientes a 1.330-1.380 RIU. La figura 34 muestra la respuesta espectral del oro (Au) y del cobre (Cu), donde ambos casos muestran que ante valores de índices de refracción externos (SRI) más grandes se va a tener mayor profundidad en las resonancias y mayor cambio en la longitud de onda, aumentando la sensibilidad del dispositivo. Asimismo, las resonancias mostradas para el primer y último valor de SRI (1.330 y 1.380) pueden verse en la figura 34(a) para el caso del oro (Au) donde las resonancias se dieron en aproximadamente 497nm con pérdidas de 79.4% y en 553nm con pérdidas de respectivamente. Finalmente, la figura 34(b) muestra que para el cobre se dieron resonancias aproximadas en 500nm con pérdidas cercanas a 22% y en 553nm con pérdidas de 44% aproximadamente para los SRI de 1.330 y 1.380 respectivamente.

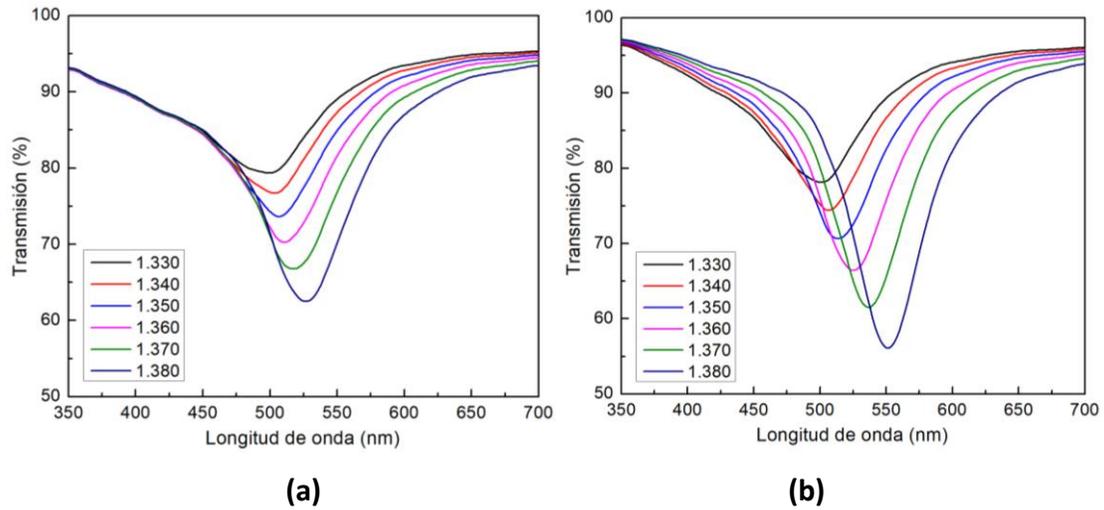


Figura 34. Respuesta espectral del guía de onda plano recubierto de (a) oro y (b) Cobre en función del índice de retracción del medio externo (SRI).

Por otro lado, para medir los valores de sensibilidad se analiza el desplazamiento de la longitud de onda con respecto a los valores de SRI mencionados anteriormente. En la figura 35 puede verse la comparación de este desplazamiento entre el oro y el cobre, donde se identifica mayores cambios en el caso del cobre, mostrando una sensibilidad de 1034 nm/RIU y el oro muestra un desplazamiento menor con una sensibilidad de 503 nm/RIU.

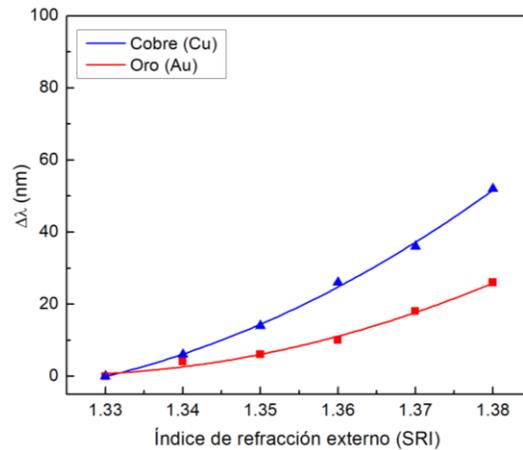


Figura 35. Comparación del desplazamiento de la longitud de onda de resonancia en función del índice de refracción del medio externo (SRI) entre el oro (Au) y el cobre (Cu)

En la tabla 4 pueden verse los valores de sensibilidad obtenidos para ambas películas depositadas, donde el cobre (Cu) muestra más sensibilidad que el oro (Au). Sin embargo, el oro es uno de los materiales más usados para las áreas de sensado y en este caso aplicado a sensores con plasmones superficiales, debido a que es más resistente a la corrosión, siendo más duradero en las superficies depositadas en comparación con el cobre.

Tabla 4. Sensibilidad obtenida para las resonancias LMR-TM y LMR-TE con cada material depositado.

Material	Sensibilidad (nm/RIU)
	<i>LMR-TM</i>
Au	503
Cu	1034

En conclusión, la deposición de películas delgadas con la configuración SPP, si bien las resonancias no son tan profundas con valores de SRI pequeños, sigue siendo viable y visible en el espectro óptico, haciéndola una alternativa para el desarrollo de biosensores,

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

teniendo el oro como la más fuerte opción de película delgada por ser un material común y más resistencia a la corrosión.

4.5 Montaje experimental para la generación de SPP en un guía de onda plano

Para el montaje experimental se proponen dos tipos de montajes los cuales se describirán más adelante. También fue necesario contar con un sistema de pulverización catódica (sputering Q300T D) mostrada en la figura 36, utilizada para hacer la deposición de la película delgada de oro sobre un cubreobjetos de 22 mm de ancho, 22 mm de largo y un espesor de 0.5mm. Asimismo, se usó un microscopio electrónico de barrido (SEM por sus siglas en inglés) mostrado en la figura 37, que fue utilizado para medir es espesor de la película delgada depositada sobre el cubreobjetos.



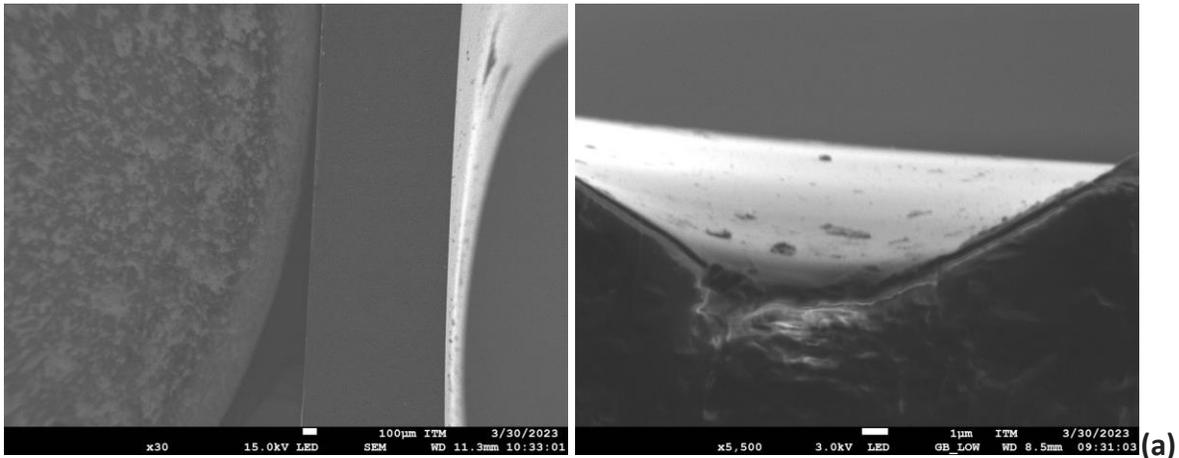
Figura 36. Máquina de pulverización catódica (sputering Q300T D).

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020



Figura 37. Microscopio electrónico de barrido (SEM).

Para realizar la medición de la película delgada, se utilizaron y adecuaron portaobjetos, los cuales tienen dimensiones más grandes que un cubreobjetos haciéndolo más sencillo de manipular. Posteriormente se realiza una deposición de 60 segundos en la máquina de sputtering. Finalmente, una vez ingresadas las muestras al SEM puede notarse en la figura 38(a) la sección transversal del portaobjetos y en la figura 38(b) se muestra un acercamiento a la película de oro depositada, donde al medirlo dio como resultado un espesor de 38nm con un margen de error del 10%. Este proceso fue necesario realizarlo para caracterizar el tiempo de deposición en el sputtering y de esta manera tener una aproximación al espesor que se desea buscar.



(b)

Figura 38. Imágenes tomadas del SEM de los portaobjetos depositados con oro (Au) donde se muestra (a) la sección transversal del portaobjetos y (b) el acercamiento a la película delgada.

Por otro lado, se proponen dos tipos de montaje experimental, donde el primero mostrado en la figura 39 se compone de una estructura simple elaborada en una impresora 3D makerbot replicator 2, este cuenta con un lugar para ubicar el cubreobjetos, así como un lugar para los conectores de la fibra óptica y el de la fuente de luz.

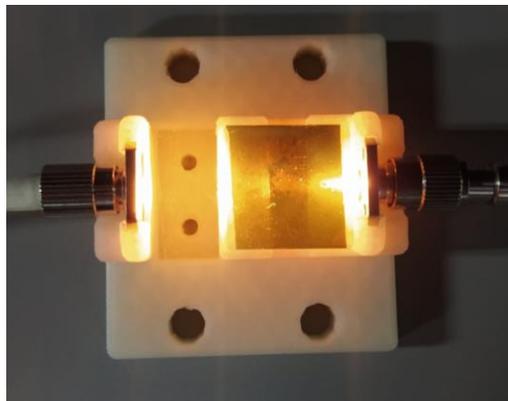


Figura 39. Montaje experimental propuesto con basado en una estructura impresa en 3D.

A pesar de las precauciones tomadas al momento de realizar el montaje anterior no se observaron pérdidas atribuidas a resonancias las SPP, por ende, se propuso un montaje con un banco óptico THORLABS MAX361D/M, dos colimadores PAF-X-2-A y una pieza en 3D para ubicar el cubreobjetos. Este montaje si bien es más complejo, permite modificar los ejes y poder guiar la luz a través de la guía de onda de una manera más precisa en la figura 40 se puede ver el montaje sugerido.

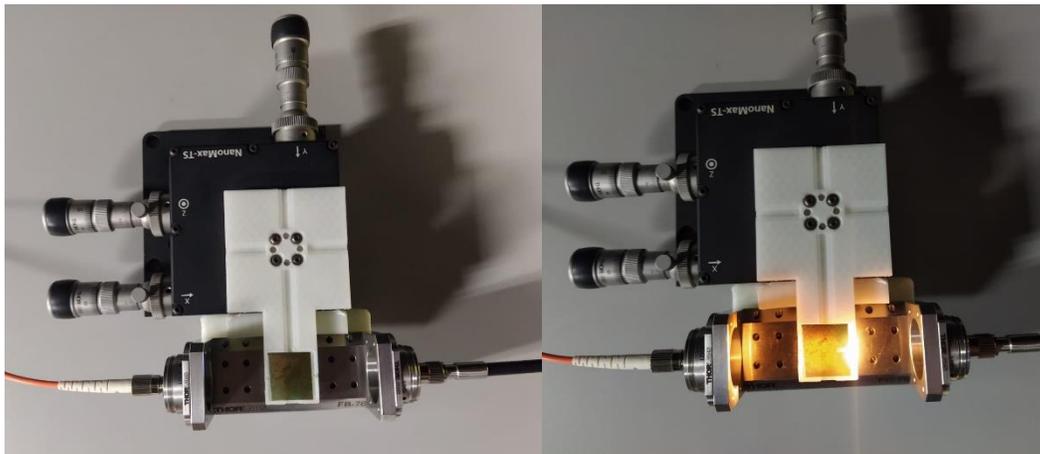


Figura 40. Montaje experimental propuesto con basado en un banco óptico.

Finalmente, se está optimizando el sistema hasta visualizar resonancias en el espectro óptico, inicialmente trabajando con el banco óptico hasta ajustarlo adecuadamente, y una vez se logren tener resonancias en el espectro de transmisión, poder ajustar la impresión 3D de una sola pieza para hacer este montaje más sencillo para su uso.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO

En este trabajo se desarrolló un diseño de un sensor de índices de refracción sobre guías de onda planas utilizando dos tipos de configuraciones, como lo son las resonancias de modo con pérdidas (LMR) y las resonancias de plasmones de superficie (SPR). Se caracterizaron diferentes materiales que pudieran ser utilizados como película delgada y analizar su comportamiento ofreciendo alternativas que permitan la optimización y creación del sensor. Para el caso de los LMR se obtuvieron sensibilidades hasta de 1091 nm/RIU para el modo TM y de 1811 nm/RIU para el modo TM con la película de SnO₂, esto demuestra que cuando se depositan películas con índice de refracción muy alto siempre disminuye la sensibilidad mientras que, entre los materiales analizados, se pudo ver que entre más cercano sea el índice de refracción de la película delgada al del vidrio (la guía de onda) se va a tener mayor sensibilidad. Otro aspecto importante que se comprobó con los resultados fue que, los modos TE se excitan en longitudes de onda más largas, lo que ayuda a conseguir mayores sensibilidades, tal como se mostró con las respuestas espectrales con cada película depositada. Sin embargo, en muchos casos estas resonancias se movían hasta longitudes de onda que no podían ser detectadas con los equipos disponibles.

Por otro lado, con la configuración SPR se obtuvieron resonancias de 503 nm/RIU con la película de oro y de 1034 nm/RIU con la película de cobre. También se evidenció que las resonancias serán más profundas al tener índices de refracción externos (SRI) más grandes por lo que pueden darse estudios a futuro que impliquen mediciones en transmisión y no sólo en longitud de onda.

Con estos resultados, se puede evidenciar la viabilidad de realizar un sensor óptico de bajo coste, ya que, en comparación de una fibra óptica, trabajar con cubreobjetos se hace más económico, requiriendo de equipos menos complejos que permiten hacerlo aún más rentable y pudiéndolo adecuar hasta lograr un sensor que permita medir sustancias biológicas.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

Finalmente, se realiza un primer acercamiento experimental con dos tipos de montajes diferentes, donde el primero sólo requiere una pieza de impresión 3D en la que irá ubicado el cubreobjetos, los conectores para la fibra óptica y el cable de la fuente de luz. El otro montaje consiste en adecuar un banco óptico con colimadores y que sea posible alinear o ajustar el haz de luz a diferentes ejes. Además, se realizan pruebas depositando películas delgadas de oro sobre un cubreobjetos en la máquina de sputering con varios tiempos de deposición entre 10-120 segundos, donde con un tiempo de deposición de 60 segundos se puede dar una película de 38nm de espesor con un margen de error del 10%. Si bien aún no se han mostrado resonancias en el espectro, se ha logrado un acercamiento que deja paso a que se sigan haciendo este tipo de estudios, así como ajustar y adecuar los montajes hasta que se generen resonancias en el espectro.

Dado lo anterior, se abren puertas a que se sigan buscando la generación de resonancias en transmisión, ya que una vez logrado esto se busca optimizar el sensor y adecuar para que llegue a medir sustancias biológicas, que en la actualidad son muy llamativas para las áreas de sensado y para el mercado de hoy en día y con este sensor de bajo coste se hará mucho más atractivo.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

REFERENCIAS

- Arregui, F. J., Del Villar, I., Corres, J. M., Goicoechea, J., Zamarreño, C. R., Elosua, C., Hernaez, M., Rivero, P. J., Socorro, A. B., Urrutia, A., Sanchez, P., Zubiate, P., Lopez, D., De Acha, N., & Matias, I. R. (2014a). Fiber-optic lossy mode resonance sensors. *Procedia Engineering*, *87*, 3–8. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.11.253>
- Arregui, F. J., Del Villar, I., Corres, J. M., Goicoechea, J., Zamarreño, C. R., Elosua, C., Hernaez, M., Rivero, P. J., Socorro, A. B., Urrutia, A., Sanchez, P., Zubiate, P., Lopez, D., De Acha, N., & Matias, I. R. (2014b). Fiber-optic lossy mode resonance sensors. *Procedia Engineering*, *87*, 3–8. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.11.253>
- Barboza-Tello, N. A., Ríos-Osuna, L. A., Medina-Castro, P., Castillo-Barrón, A. A., Uriarte-Ramírez, I., Martínez-Plata, D., & Díaz-Hernández, M. A. (2020). Diseño de guías de onda como biosensores. *REVISTA DE CIENCIAS TECNOLÓGICAS*, *3*(1), 35–43. <https://doi.org/10.37636/recit.v3i13543>
- Bohorquez, D., Del Villar, I., Corres, J. M., & Matias, I. R. (2021). Wavelength and intensity based lossy mode resonance breathing sensor. *Optics and Laser Technology*, *140*(March), 107063. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2021.107063>
- Del Villar, I., Montoya-Cardona, J., Imas, J. J., Reyes-Vera, E., Zamarreño, C. R., Matias, I. R., & Cruz, J. L. (2023). Tunable Sensitivity in Long Period Fiber Gratings During Mode Transition With Low Refractive Index Intermediate Layer. *Journal of Lightwave Technology*, *41*(13), 4219–4229. <https://doi.org/10.1109/JLT.2022.3226800>
- Del Villar, I., Zubiate, P., Zamarreño, C. R., Arregui, F. J., & Matias, I. R. (2017). Optimization in nanocoated D-shaped optical fiber sensors. *Optics Express*, *25*(10), 10743. <https://doi.org/10.1364/OE.25.010743>
- Dominguez, I., Corres, J. M., Fuentes, O., Villar, I. del, & Matias, I. R. (2022). Multichannel Refractometer Based on Lossy Mode Resonances. *IEEE Sensors Journal*, *22*(4), 3181–3187. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2022.3142050>
- Fuentes, O. (2022). *Desarrollo de sensores basados en guía de onda plana y fibra óptica* [Universidad Pública de Navarra]. <https://doi.org/10.48035/Tesis/2454/42134>
- Fuentes, O., Del Villar, I., Corres, J. M., & Matias, I. R. (2019a). Lossy mode resonance sensors based on lateral light incidence in nanocoated planar waveguides. *Scientific Reports*, *9*(1), 8882. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-45285-x>
- Fuentes, O., Del Villar, I., Corres, J. M., & Matias, I. R. (2019b). Lossy mode resonance sensors based on lateral light incidence in nanocoated planar waveguides. *Scientific Reports*, *9*(1), 8882. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-45285-x>
- Fuentes, O., Del Villar, I., Dominguez, I., Corres, J. M., & Matías, I. R. (2022). Simultaneous Generation of Surface Plasmon and Lossy Mode Resonances in the Same Planar Platform. *Sensors*, *22*(4), 1–11. <https://doi.org/10.3390/s22041505>
- Fuentes, O., Goicoechea, J., Corres, J. M., Villar, I. Del, Ozcariz, A., & Matias, I. R. (2020). Generation of lossy mode resonances with different nanocoatings deposited on coverslips. *Optics Express*, *28*(1), 288. <https://doi.org/10.1364/oe.28.000288>
- Galvis-Arroyave, J. L., Villegas-Aristizabal, J., Montoya-Cardona, J., Montoya-Villada, S., & Reyes-Vera, E. (2020). Experimental characterization of a tuneable all-fiber mode converter device for mode-division multiplexing systems. *Journal of Physics: Conference Series*, *1547*, 012004. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1547/1/012004>
- Gómez Cardona, N. D., Reyes Vera, E., & Torres, P. (2018). Multi-plasmon resonances in microstructured optical fibers: Extending the detection range of SPR sensors and a multi-analyte sensing technique. *IEEE Sensors Journal*, *18*(18), 7492–7498. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2018.2861709>
- Gómez-Cardona, N. D., Reyes-Vera, E., & Torres, P. I. (2018). Multi-Plasmon Resonances in Microstructured Optical Fibers: Extending the Detection Range of SPR Sensors and a Multi-Analyte Sensing Technique. *IEEE Sensors Journal*, *18*(18), 7492–7498. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2018.2861709>

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

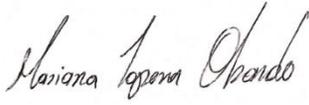
- Gómez-Cardona, N. D., Reyes-Vera, E., Torres, P., Reyes-Vera, E., & Torres, P. (2018). Multi-analyte refractive index sensor based on hybrid long range plasmon modes in H-shaped optical fiber. *Latin America Optics and Photonics Conference*, Tu5B.4. <https://doi.org/10.1364/LAOP.2018.Tu5B.4>
- Gomez-Cardona, N., Espinal Zapata, S., Montoya-Cardona, J., & Reyes-Vera, E. (2020). Low-loss and flat dispersion umbrella-shaped and porous-core photonic crystal fiber for terahertz applications. *Journal of Physics: Conference Series*, 1547, 012006. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1547/1/012006>
- Gómez-Cardona, N., Jiménez-Durango, C., Usuga-Restrepo, J., Torres, P., & Reyes-Vera, E. (2021). Thermo-optically tunable polarization beam splitter based on selectively gold-filled dual-core photonic crystal fiber with integrated electrodes. *Optical and Quantum Electronics*, 53(2). <https://doi.org/10.1007/s11082-020-02718-6>
- Gomez-Cardona, N., Reyes-Vera, E., Jimenez-Durango, C., Usuga-Restrepo, J., & Torres, P. (2018). Novel Wide-Bandwidth Polarization Filter Based on H-Shaped Micro-Structured Optical Fiber with Gold Nano-strip. *2018 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA)*, 538–541. <https://doi.org/10.1109/ICEAA.2018.8520471>
- Gomez-Cardona, N., Reyes-Vera, E., & Torres, P. (2020). High sensitivity refractive index sensor based on the excitation of long-range surface plasmon polaritons in H-shaped optical fiber. *Sensors (Switzerland)*, 20(7). <https://doi.org/10.3390/s20072111>
- González Valencia, E. (2019). *BLOCH SURFACE WAVES IN PHOTONIC CRYSTAL FIBERS*. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/78866>
- Gonzalez-Valencia, E., Del Villar, I., & Torres, P. (2020). Bloch waves at the surface of a single-layer coating D-shaped photonic crystal fiber. *Optics Letters*, 45(9), 2547. <https://doi.org/10.1364/OL.391508>
- Gonzalez-Valencia, E., Herrera, R. A., & Torres, P. (2019). Bloch surface wave resonance in photonic crystal fibers: towards ultra-wide range refractive index sensors. *Optics Express*, 27(6), 8236. <https://doi.org/10.1364/oe.27.008236>
- Gonzalez-Valencia, E., & Torres, P. (2022a). Fiber optics - A new route to surface wave sensors with ultra-wide refractive index sensing range and ultra-high figure of merit. *Optica Pura y Aplicada*, 55(1). <https://doi.org/10.7149/OPA.55.1.51074>
- Gonzalez-Valencia, E., & Torres, P. (2022b). Fiber optics - A new route to surface wave sensors with ultra-wide refractive index sensing range and ultra-high figure of merit. *Optica Pura y Aplicada*, 55(1). <https://doi.org/10.7149/OPA.55.1.51074>
- Gonzalez-Valencia, E., Villar, I. Del, & Torres, P. (2021). Novel Bloch wave excitation platform based on few-layer photonic crystal deposited on D-shaped optical fiber. *Scientific Reports*, 11(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-90504-z>
- Habib, Md. A., Reyes-Vera, E., Villegas-Aristizabal, J., & Anower, Md. S. (2020). Numerical Modeling of a Rectangular Hollow-Core Waveguide for the Detection of Fuel Adulteration in Terahertz Region. *Fibers*, 8(10), 63. <https://doi.org/10.3390/fib8100063>
- Imas, J. J., Zamarreño, C. R., Villar, I. Del, & Matías, I. R. (2021). Optimization of fiber bragg gratings inscribed in thin films deposited on d-shaped optical fibers. *Sensors*, 21(12). <https://doi.org/10.3390/s21124056>
- M. Lopera-Obando, J. Soto Perdomo, & E. Gonzalez-Valencia. (2022). Diseño y análisis de un sistema de detección para sustancias biológicas, basado en excitación de LMR en guías de ondas planas. In *XXIII Simposio Chileno de Física*.
- Mahfuz, M. Al, Sakib, M. N., Hasan Hasib, M. H., Bosu, A., & Roniuzzaman, M. (2019). Design and Analysis of Dual-Core D-Shape Photonic Crystal Fiber Biosensor. *1st International Conference on Advances in Science, Engineering and Robotics Technology 2019, ICASERT 2019*, 1–4. <https://doi.org/10.1109/ICASERT.2019.8934563>
- Medenbach, O., Siritanon, T., Subramanian, M. A., Shannon, R. D., Fischer, R. X., & Rossman, G. R. (2013). Refractive index and optical dispersion of In₂O₃, InBO₃ and gahnite. *Materials Research Bulletin*, 48(6), 2240–2243. <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2013.02.057>
- Miyazaki, C. M., Shimizu, F. M., & Ferreira, M. (2017). *6 - Surface Plasmon Resonance (SPR) for Sensors and Biosensors*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-49778-7/00006-0>
- Montoya-Cardona, J., Gomez-Cardona, N., Gonzalez-Valencia, E., Torres, P., & Reyes-Vera, E. (2020). Tuneable liquid crystal asymmetric dual-core photonic crystal fiber mode converter. *Journal of Physics: Conference Series*, 1547, 012008. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1547/1/012008>

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

- Muñoz-Hernández, T., Reyes-Vera, E., & Torres, P. (2019). Tunable Whispering Gallery Mode Photonic Device Based on Microstructured Optical Fiber with Internal Electrodes. *Scientific Reports*, 9(1), 12083. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-48598-z>
- Munoz-Hernandez, T., Reyes-Vera, E., & Torres, P. (2020). Temperature sensor based on whispering gallery modes of metal-filled side-hole photonic crystal fiber resonators. *IEEE Sensors Journal*, XX(XX), 1–1. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.2987175>
- Pascual, I. V. (2022). *Contribución al desarrollo de sensores de gases basados en resonancias ópticas* (Issue November) [Universidad Pública de Navarra]. <https://doi.org/10.48035/Tesis/2454/44392>
- Paul, A. K., Mollah, M. A., Hassan, M. Z., Gomez-Cardona, N., & Reyes-Vera, E. (2021a). Graphene-coated highly sensitive photonic crystal Fiber surface Plasmon resonance sensor for aqueous solution: Design and numerical analysis. *Photonics*, 8(5). <https://doi.org/10.3390/photonics8050155>
- Paul, A. K., Mollah, M. A., Hassan, M. Z., Gomez-Cardona, N., & Reyes-Vera, E. (2021b). Graphene-coated highly sensitive photonic crystal Fiber surface Plasmon resonance sensor for aqueous solution: Design and numerical analysis. *Photonics*, 8(5). <https://doi.org/10.3390/photonics8050155>
- Qi, M., Zhang, N. M. Y., Li, K., Tjin, S. C., & Wei, L. (2020). Hybrid plasmonic fiber-optic sensors. *Sensors (Switzerland)*, 20(11), 1–27. <https://doi.org/10.3390/s20113266>
- Rakic', A. D., Rakic', R., Djuriš, A. B., Elazar, J. M., & Majewski, M. L. (1998). *Optical properties of metallic films for vertical-cavity optoelectronic devices*.
- Rashad, M. M., Rayan, D. A., & Ramadan, A. A. (2013). Optical and magnetic properties of CuO/CuFe2O4 nanocomposites. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 24(8), 2742–2749. <https://doi.org/10.1007/s10854-013-1164-8>
- Reyes-Vera, E., Chesini, G., Cordeiro, C. M. B., & Torres, P. (2013). Large temperature sensitivity of birefringent side-hole photonic crystal fiber filled with indium. *Optics InfoBase Conference Papers*.
- Reyes-Vera, E., Cordeiro, C. M. B., & Torres, P. (2017). Highly sensitive temperature sensor using a Sagnac loop interferometer based on a side-hole photonic crystal fiber filled with metal. *Applied Optics*, 56(2), 156. <https://www.osapublishing.org/abstract.cfm?URI=ao-56-2-156>
- Reyes-Vera, E., Dominguez-Gomez, D. M., Causado-Buelvas, J. D., Torres, P., Moreno, Y., Londoño, C., & Molina, A. (2011). Three-fiber optical probe for studying fluidized gas-solid beds in bubbling regime | Sonda de tres fibras ópticas para el estudio de lechos gas-sólido fluidizados en régimen burbujeante. *DYNA (Colombia)*, 78(166), 55–59.
- Reyes-Vera, E., Gómez-Cardona, N., & Torres, P. (2014). Label-free biosensor based on a dual-core transversally chirped microstructured optical fiber. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 9157. <https://doi.org/10.1117/12.2059611>
- Reyes-Vera, E., Gonzalez-Valencia, E., & Torres, P. (2010). Transverse stress response of FBGs in large-mode-area microstructured Panda-type fibers. In J. Hernández-Cordero, I. Torres-Gómez, & A. Méndez (Eds.), *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering* (Vol. 7839, p. 78391G). <https://doi.org/10.1117/12.867093>
- Reyes-Vera, E., Jimenez-Durango, C., Varon, M., & Torres, P. (2018). Fourier Scheme for the Fiber Loop Mirror Temperature Sensor Based on Indium-filled Side-hole Photonic Crystal Fiber. *2018 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA)*, 199–201. <https://doi.org/10.1109/ICEAA.2018.8520400>
- Reyes-Vera, E., & Torres, P. (2016). Influence of filler metal on birefringent optical properties of photonic crystal fiber with integrated electrodes. *Journal of Optics*, 18(8), 085804. <https://doi.org/10.1088/2040-8978/18/8/085804>
- Reyes-Vera, E., Úsuga, J., Gómez-Cardona, N., & Varón, M. (2016). Mode selective coupler based in a dual-core photonic crystal fiber with non-identical cores for spatial mode conversion. *Optics InfoBase Conference Papers, April 2018*, 1–4. <https://doi.org/10.1364/LAOP.2016.LTu3C.1>
- Reyes-Vera, E., Usuga-Restrepo, J., Jimenez-Durango, C., Montoya-Cardona, J., & Gomez-Cardona, N. (2018). Design of Low-loss and Highly Birefringent Porous-Core Photonic Crystal Fiber and Its Application to Terahertz Polarization Beam Splitter. *IEEE Photonics Journal*, 10(4), 1–13. <https://doi.org/10.1109/JPHOT.2018.2860251>
- Rusyakina, O., Geernaert, T., Loyez, M., Lobry, M., Chah, K., Mergo, P., Thienpont, H., Caucheteur, C., Berghmans, F., & Baghdasaryan, T. (2023). Cascaded Bragg gratings in photonic crystal fiber for

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

- plasmonic cladding mode-based biosensing of HER2 protein. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 382(February). <https://doi.org/10.1016/j.snb.2023.133561>
- Sanchis, E., & J.B. Ejea. (2008). Propagación de la luz en guías de onda. *Universidad de Valencia*, 1–65.
- Schinke, C., Christian Peest, P., Schmidt, J., Brendel, R., Bothe, K., Vogt, M. R., Kröger, I., Winter, S., Schirmacher, A., Lim, S., Nguyen, H. T., & Macdonald, D. (2015). Uncertainty analysis for the coefficient of band-to-band absorption of crystalline silicon. *AIP Advances*, 5(6). <https://doi.org/10.1063/1.4923379>
- Torres, P., Reyes-Vera, E., Díez, A., & Andrés, M. V. (2014). Two-core transversally chirped microstructured optical fiber refractive index sensor. *Optics Letters*, 39(6), 1593. <https://doi.org/10.1364/OL.39.001593>
- Valencia-Garzón, S., Reyes-Vera, E., Galvis-Arroyave, J., Montoya, J. P., & Gomez-Cardona, N. (2022). Metrological Characterization of a CO2 Laser-Based System for Inscribing Long-Period Gratings in Optical Fibers. *Instruments*, 6(4), 79. <https://doi.org/10.3390/instruments6040079>
- Vera, E. R., Restrepo, J. Ú., Varon, M., & Torres, P. (2018). Dual-Core Transversally Chirped Microstructured Optical Fiber for Mode-Converter Device and Sensing Application. In F. Xu & C. Mou (Eds.), *Selected Topics on Optical Fiber Technologies and Applications*. InTech. <https://doi.org/10.5772/intechopen.70989>
- Villar, I. Del, Montoya-Cardona, J., Imas, J. J., Reyes-Vera, E., Zamarreno, C. R., Matias, I. R., & Cruz, J. L. (2022). Tunable sensitivity in long period fiber gratings during mode transition with low refractive index intermediate layer. *Journal of Lightwave Technology*, 1–10. <https://doi.org/10.1109/JLT.2022.3226800>
- Zhang, Y., Zhou, C., Xia, L., Yu, X., & Liu, D. (2011). Wagon wheel fiber based multichannel plasmonic sensor. *Optics Express*, 19(23), 22863. <https://doi.org/10.1364/OE.19.022863>

FIRMA ESTUDIANTES 

FIRMA ASESORES **ESTEBAN GONZALEZ**



FECHA ENTREGA: 26/04/2023