



CENTRO DE INVESTIGACIONES
EN ÓPTICA, A.C.

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA PLATAFORMA PARA EL ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE LA RESONANCIA DE PLASMÓN SUPERFICIAL EN FIBRA ÓPTICA



Maestría en Optomecatrónica

***Alumno(a):* Ing. Monserrat del Carmen Alonso Murias**

***Asesor:* Dr. David Monzón Hernández**

Febrero 2019

León, Gto.

“Grandes descubrimientos y mejoras implican invariablemente la cooperación de muchas mentes”.

- Alexander Graham Bell

RESUMEN

La Refractometría es una técnica relativamente reciente aunque el índice de refracción es un parámetro fundamental de la materia que ha estado estrechamente ligado a la Óptica desde sus orígenes. De entre las técnicas refractométricas modernas la resonancia de plasmón superficial (SPR, por sus siglas en inglés), tanto en sus versiones de bulto (rejilla o prisma) como en la de guía de onda (plana o cilíndrica) es una de las más utilizadas por su alta sensibilidad. En este trabajo se propone y se demuestra una metodología experimental para fabricar dispositivos de fibra óptica, de manera simple y repetible, en los que se produce la SPR. Para el análisis experimental de la respuesta de estos dispositivos se desarrollaron plataformas que cumple con los requisitos de ser compacta, reconfigurable y de fácil manejo. Una de estas plataformas es una celda microfluídica diseñada y fabricada en el CIO, en la que se introduce la fibra óptica en un canal de 500 μm de diámetro, y con la que fue posible hacer mediciones del índice de refracción en volúmenes pequeños de hasta 100 μL y con una sensibilidad de 1000 nm/Unidad de Índice de Refracción (RIU por sus siglas en inglés). Se demuestra además que esta técnica permite medir independiente o simultáneamente el índice de refracción, la temperatura o el nivel de una muestra líquida utilizando una punta de fibra óptica.

CONTENIDO

RESUMEN	I
NOMENCLATURA	IV
LISTA DE FIGURAS	VII
OBJETIVOS	IX
JUSTIFICACIÓN	X
CAPÍTULO 1. REFRACTOMETRÍA: DE LA INGENIERÍA ÓPTICA A LA BIO-INGENIERÍA	1
1.1. Índice de refracción un parámetro fundamental de materia y sus implicaciones.	1
1.2. Refractómetros comerciales.....	4
1.2.1. Refractómetro de Abbe.....	5
1.2.2. Refractómetro de mano.....	6
1.2.3. Refractómetro automático-digital.	6
1.2.4. Refractómetro de proceso	6
1.3. Importancia de la medición del índice de refracción	7
1.4. Técnicas refractométricas modernas.....	9
1.4.1. Interferometría	9
1.4.2. Elipsometría.....	10
1.4.3. Refractómetros de fibra óptica.....	10
CAPITULO 2. LA INGENIERÍA DE LA RESONANCIA DE PLASMON SUPERFICIAL .11	
2.1. El fenómeno de la resonancia de plasmón superficial	11
2.2. La estructura de un sistema de resonancia de plasmón superficial	19
2.3. Sistemas SPR comerciales.....	22
2.4. Micro-acopladores de fibra óptica	25
2.4.1. Fibras ópticas con núcleo expuesto: remoción total del revestimiento.....	28
2.4.2. Fibras ópticas pulidas en D: remoción parcial del revestimiento	28
2.4.3. Fibra óptica adelgazada o <i>taper</i>	29
CAPÍTULO 3. REFRACTÓMETRO DE FIBRA ÓPTICA BASADO EN LA RESONANCIA DE PLASMON SUPERFICIAL	32
3.1. La estructura de fibra óptica MM-SM-MM.....	32
3.2. Modelo teórico utilizado en la simulación de la SPR en la estructura MM-SM-MM.....	35
3.2.1. Sistema multicapa (N-capas).....	35

3.2.2.	Modelo teórico de la SPR en fibra óptica	39
3.3.	Discusión de los resultados numéricos	42
3.4.	Fabricación de los dispositivos de fibra óptica	47
3.5.	Caracterización de los dispositivos de fibra óptica fabricados	54
3.5.1.	Medición de índice de refracción mediante SPR en fibra óptica	55
3.5.2.	Medición de índice de refracción en un sistema de microfluído	63
3.5.3.	Medición de temperatura usando el dispositivo SPR de fibra óptica	67
3.6.	Conclusiones.....	70
CAPÍTULO 4. EL LABORATORIO EN FIBRA ÓPTICA HECHO EN EL CIO		72
4.1.	Dispositivos SPR de fibra óptica interrogados en reflexión	72
4.2.	Fabricación de las puntas de fibra óptica	72
4.3.	Caracterización de los dispositivos	74
4.4.	Detección simultanea del índice de refracción, la temperatura y el nivel de un líquido con una punta de fibra óptica.	76
4.5.	Aplicaciones	82
4.6.	Conclusiones.....	83
CONCLUSIONES.....		85
REFERENCIA.....		89
ANEXO A.....		98
ANEXO B.....		100
AGRADECIMIENTOS.....		101

NOMENCLATURA

Símbolo	Término
α	Absorción
Al	Aluminio
r_p	amplitud del coeficiente de reflexión
$\Delta\lambda_{0.5}$	Ancho total del espectro SPR
θ_c	Ángulo crítico
θ_i	Ángulo de incidencia
θ_{SPR}	Ángulo de resonancia
θ_r	Ángulo reflejado
θ_t	Ángulo refractado o transmitido
Δn	Cambio del índice de refracción
Cu	Cobre
p	Coefficiente de extinción
R_p	Coefficiente de reflexión
$a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3$	Coefficientes de Sellmeier
σ	Conductividad eléctrica
k_{sp}	Constante de propagación de la onda del plasmón superficial
k_{ew}	Constante de propagación de la onda evanescente
k_W	Constante de propagación de una onda de luz
ϵ_s	Constante dieléctrica del medio externo
ϵ_m	Constante dieléctrica del metal
$\Delta\lambda_{SPR}$	Desplazamiento de la longitud de onda
ω	Frecuencia de la luz
$^{\circ}Brix$	Grados Brix
n	Índice de refracción
n_s	Índice de refracción del dieléctrico o medio externo
n_m	Índice de refracción del metal

n_1	Índice de refracción del núcleo de una FO
n_p	Índice de refracción del prisma
n_2	Índice de refracción del revestimiento de una FO
λ_c	Longitud de colisión
λ	Longitud de onda
λ_{SPR}	Longitud de onda de resonancia
λ_p	Longitud de plasma
λ_{PDMS}	Longitud de onda de la sección con PDMS
λ_D	Longitud de onda de la sección descubierta
N_{ref}	Número de reflexiones
Au	Oro
n_r	Parte real del índice de refracción complejo
μ_0	Permeabilidad en el vacío
μ_r	Permeabilidad relativa
ϵ_0	Permitividad en el vacío
ϵ_r	Permitividad relativa
Ag	Plata
P_{trans}	Potencia transmitida normalizada
δ_p	Profundidad de penetración
$T_{\lambda_{SPR}}$	Transmisión de la potencia mínima
c	Velocidad de la luz en el vacío
v	Velocidad de la luz en un medio
FWHM	Ancho a media altura
TOC	Coefficiente Termo-óptico
z_d	Desplazamiento
dx	Desplazamiento de la montura
$D_{núcleo}$	Diámetro del núcleo
$D_{revestimiento}$	Diámetro del revestimiento
DCO	Diferencia de camino óptico
EM	Electromagnético

<i>d</i>	Espesor de la película delgada
FO	Fibra óptica
RI	Índice de refracción
λ_D	Longitud de onda de resonancia del canal SPR 1
λ_{PDMS}	Longitud de onda de resonancia del canal SPR 2
L_{SM}	Longitud de sección SM
SM	Monomodo
MM	Multimodo
NL	Nivel
N_f	Número de franjas
SPW	Onda de plasmón superficial
SP	Plasmón superficial
t_{NL}	Potencia de transmisión de λ_D
ATR	Reflexión total atenuada
<i>L</i>	Región de detección de un taper
FBG	Rejilla de Bragg de fibra óptica
SNR	Relación señal a ruido
SPR	Resonancia de plasmón superficial
z_1	Sección de transición de un taper
z_2	Sección de transición de un taper
S	Sensibilidad
T	Temperatura
TIR	Total Internal Reflection
TM	Transversal magnética

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. 1. Rayo de luz incide sobre una interfaz entre dos medios de diferente n , parte de su energía se reflejada y otra parte se refractada.

Figura 1.2. a) Cuando el ángulo de incidencia es igual al ángulo crítico el ángulo transmitido es 90° , b) En el ángulo de incidencia mayor al ángulo crítico a luz se refleja totalmente (TIR).

Figura 1. 3. Interferómetro de Michelson para la medición de índice de refracción.

Figura 2. 1 Plasmón superficial. a) Propagación del SPW en una interfaz metal-dieléctrico. b) Su campo E , decae exponencialmente en ambos medios desde la interfaz.

Figura 2. 2 Configuración Kretschmann-Raether en prisma.

Figura 2. 3. Estructura general de un sistema de resonancia de plasmón superficial.

Figura 2. 4 Sistema SPR. a) Esquema de un sistema SPR en interrogación angular, b) Gráfica de la resonancia de plasmón superficial obtenida en una medición de interrogación angular.

Figura 2. 5 Propagación de la luz en una fibra óptica y el fenómeno de reflexión total interna.

Figura 2. 6 Configuración Kretschmann-Raether con acoplador de fibra óptica con núcleo expuesto.

Figura 2. 7 Configuración Kretschmann-Raether con acoplador de fibra óptica púliba en D .

Figura 2. 8 Configuración Kretschmann-Raether con acoplador de fibra óptica adelgazada.

Figura 3. 1. Estructura MM-SM-MM de fibra óptica

Figura 3. 2. Acoplamiento de la luz en la estructura MM-SM-MM.

Figura 3. 3. Representación de un sensor SPR en fibra óptica basado en una estructura MM-SM-MM.

Figura 3. 4. Esquemático de una estructura de N capas, de diferentes espesores y diferentes materiales ópticos.

Figura 3. 5. Espectros SPR de transmisión numérico en una estructura MM-SM-MM fibra óptica para tres espesores de película delgada de oro diferente en una sección SM de 10 mm.

Figura 3. 6. Espectros SPR de transmisión numérico en una estructura MM-SM-MM fibra óptica para tres longitudes SM diferentes con una película delgada con espesor de 30 nm.

Figura 3. 7. Desplazamiento de la longitud de onda variando el espesor de la película delgada Au en tres sección SM diferentes a un RI de 1.3324.

Figura 3. 8. Cambio en la potencia de transmisión de la longitud de onda de resonancia, para diferentes espesores de una película delgada de Au para tres secciones SM distintos a un RI de 1.3324.

Figura 3. 9. Ancho espectral o FWHM del espectro SPR transmitido, para diferentes espesores de una película delgada de Au en tres secciones L_{SM} diferentes (5mm, 10 mm, 15 mm).

Figura 3. 10. Preparación de la fibra óptica para su empalme, a) remover las cubiertas protectoras, b) Corte de la sección transversal.

Figura 3. 11. Empalme de las sección MM-SM

Figura 3. 12. Corte de la sección SM a la longitud L_{SM}

Figura 3. 13 Estructura MM-SM-MM. a) empalme SM-MM, b) Dispositivo de campo evanescente de fibra óptica basado en una estructura heteronúcleo.

Figura 3. 14. Montura de almacenamiento para 35 dispositivos heteronúcleo de fibra óptica.

Figura 3. 15. Pieza sujetadora de montura de almacenamiento de fibra óptica para evaporación térmica al vacío (100x 230 mm).

Figura 3.16. Campana de evaporación al vacío.

Figura 3.17. Refractómetro de fibra óptica en SPR.

Figura 3.18. Sistema de interrogación espectral de un dispositivo SPR de fibra óptica en transmisión.

Figura 3.19. Espectros SPR de transmisión numérico para diferentes RI, de un dispositivo SPR de fibra SM450 y L_{SM} de 10 mm con una película delgada de Au con espesor de 30 nm.

Figura 3.20. Curvas de caracterización numérico de un dispositivo SPR de fibra SM450 y L_{SM} de 10 mm con una película delgada de Au con espesor de 30 nm.

Figura 3. 21. Montura (7.5x6x1 mm) con celda de prueba (diámetro 5 mm) para el análisis experimental de un dispositivo de fibra óptica a índice de refracción con sujetadores.

Figura 3.22. Espectros SPR de transmisión experimental para diferentes RI, de un dispositivo SPR de fibra SM450 y L_{SM} de 10 mm con una película delgada de Cr-Au con espesor de 3 nm y 30 nm, respectivamente. a) FO-SM SM450, b) FO-SM SMF28.

Figura 3.23. Curva de caracterización experimental del desplazamiento de la longitud de onda de resonancia de un dispositivo SPR de fibra SM450 y L_{SM} de 10 mm con una película delgada de Cr-Au con espesor de 3 nm y 30 nm, respectivamente, a) FO-SM SM450, b) FO-SM SMF28.

Figura 3. 24. Curva de caracterización experimental del ancho espectral de un dispositivo SPR de fibra SM450 y L_{SM} de 10 mm con una película delgada de Cr-Au con espesor de 3 nm y 30 nm, respectivamente, a) FO-SM SM450, b) FO-SM SMF28.

Figura 3.25. Curvas de caracterización experimental de un dispositivo SPR de fibra SM450 y L_{SM} de 10 mm con una película delgada de Cr-Au con espesor de 3 nm y 30 nm, respectivamente. La curva roja es construida mediante el análisis de un algoritmo desarrollado en el laboratorio de SOM, en la curva azul se utiliza una función predeterminado de un programa comercial.

Figura 3.26. Celda de microfluído para la caracterización del dispositivo de FO. a) Representación isométrica de la celda de microfluído. b) Montura con sujetadores de FO. c) Alineación y sujeción del dispositivo de FO en la celda de microfluído. d) Inyección de muestras líquidas en el puerto de entrada.

Figura 3.27. Espectros SPR de transmisión experimental para diferentes RI con referencia a 1.3324 (\neq aire), de un dispositivo SPR de fibra SM450 y L_{SM} de 10 mm con una película delgada de Cr-Au con espesor de 3 nm y 30 nm, respectivamente.

Figura 3. 28. Curvas de caracterización experimental de máximos, mínimos, cruce, de un dispositivo SPR de fibra SM450 y L_{SM} de 10 mm con una película delgada de Cr-Au con espesor de 3 nm y 30 nm, respectivamente.

Figura 3.29. Sistema de interrogación espectral de un dispositivo SPR de fibra óptica en transmisión para la medición de temperatura.

Figura 3. 30. a) Espectros SPR de transmisión numérico para diferentes T, de un dispositivo SPR de fibra SM450 y L_{SM} de 10 mm con una película delgada de Au con espesor de 30 nm. b) Curva característico numérico.

Figura 3. 31. a) Espectros SPR de transmisión experimentales para diferentes T, de un dispositivo SPR de fibra SM450 y L_{SM} de 10 mm con una película delgada de Au con espesor de 30 nm, b) Suavizado de los espectros SPR transmitidos, c) Curva característico experimental.

Figura 4. 1 Dispositivo MM-SM-MM en punta

Figura 4. 2. Dispositivo SPR en punta de fibra óptica.

Figura 4. 3. Sistema de interrogación espectral de un dispositivo SPR de fibra óptica en reflexión.

Figura 4. 4. a) Espectros SPR de transmisión experimental para diferentes RI, de un dispositivo SPR en punta de fibra SM450 y L_{SM} de 10 mm con una película delgada de Cr-Au con espesor de 3 nm y 30 nm, respectivamente, b) Curva característica experimental.

Figura 4. 5. Dispositivo SPR en punta de FO recubierta con PDMS en una extensión de la L_{SM}

Figura 4. 6 Simulación de los espectros con dos canales SPR para la detección multiparamétrica en una punta SPR de FO-SM450 de L_{SM} de 10 mm, cubierta en una L_{PDMS} de 2 mm con PDMS y L_{RI} de 8 mm. a) Detección del RI, con T y NL fijo, b) Detección del NL, para T y RI fijo, c) Detección de temperatura para T y NL fijo.

Figura 4. 7. Espectros con dos canales SPR experimentales para la detección multiparamétrica en una punta SPR de FO-SM450 de L_{SM} de 10 mm, cubierta en una L_{PDMS} de 2 mm con PDMS y L_{RI} de 8 mm. a) Detección del RI, con T y NL fijo, b) Detección del NL, para T y RI fijo, c) Detección de temperatura para T y NL fijo.

Figura 4. 8. Curvas de caracterización experimental para la medición multiparamétrica de un dispositivo SPR en punta de fibra SMF28 y L_{SM} de 10 mm con una película delgada de Cr-Au con espesor de 3 nm y 30 nm, respectivamente. a) Detección del NL, para T y RI fijo, b) Detección de temperatura para T y NL fijo.

OBJETIVOS

- Entender los fundamentos de la Resonancia de Plasmón Superficial (SPR) en fibras ópticas.
- Construir un panorama lo más completo posible del estado del arte de la técnica de SPR en fibras ópticas y de las aplicaciones de la técnica SPR.
- Desarrollar una metodología para optimizar el proceso de fabricación de dispositivos de fibra óptica con campo evanescente expuesto.
- Desarrollar una metodología para optimizar el proceso de recubrimiento metálico de la fibra óptica mediante la evaporación térmica.
- Diseñar y construir una fuente de luz de amplio espectro en la región visible para el análisis de SPR.
- Diseñar y fabricar las estructuras mecánicas que permitan la sujeción de la fibra óptica y la correcta circulación del analito en las que se pueda caracterizar la respuesta plasmónica de los dispositivos de fibra óptica fabricados.
- Desarrollar un programa para la adquisición, análisis y exhibición del espectro de transmisión de la fibra óptica y la determinación de los parámetros característicos de la respuesta plasmónica.
- Presentar de los resultados en un congreso nacional y/o internacional.

JUSTIFICACIÓN

La refractometría es el nombre genérico con el que se hace referencia a una serie de instrumentos y técnicas ópticas que se han desarrollado para medir el índice de refracción de muestras líquidas, sólidas o gaseosa. Medir el índice de refracción, que es una propiedad fundamental de la materia, es importante porque nos permite evaluar la pureza de una muestra o conocer las concentraciones químicas de los constituyentes importantes en una solución; además, cuando se mide el índice de refracción de una muestra se puede, por comparación con los valores conocidos de las sustancias, identificar y/o confirmar su identidad. El primer instrumento óptico de bulto diseñado para la medición del índice de refracción, que aún se sigue usando es conocido como refractómetro de Abbe, se basa en la medición del ángulo, asociado al fenómeno de reflexión total interna, entre el haz de prueba que incide en la frontera entre un prisma y la muestra bajo análisis y la normal a la interfase. En un refractómetro de Abbe la medición es visual, el usuario al observar a través del visor deberá ajustar manualmente la posición de las perillas para que en el campo de visión la mitad sea brillante y la otra parte oscura.

La posición que ocupa la frontera entre estas dos franjas en la escala graduada que aparece en el visor corresponde con el valor del índice de refracción de la muestra. Estos refractómetros permiten medir el índice de refracción de una muestra líquida o sólida en un rango amplio de valores; sin embargo, en aplicaciones químicas y biológicas en los que se requiere medir cambios en el índice de refracción del orden de 1×10^{-5} o menores; realizar mediciones *in-situ* de manera continua y en tiempo real; o en aquellas en donde el volumen disponible de las muestras a analizar es limitado (algunos μl); los refractómetros convencionales no son los más apropiados. Para estas aplicaciones las fibras ópticas en conjunto con la técnica de resonancia de plasmón superficial representan una de las mejores alternativas, al interactuar una onda evanescente con el metal noble depositado sobre la fibra óptica y con el medio externo permite alcanzar una alta sensibilidad en la detección de los cambios de índice de refracción del medio adyacente. En este trabajo se propone la fabricación de refractómetros de fibra óptica basados en la resonancia de plasmón superficial de forma fácil y repetible. En contraste al refractómetro convencional, estos dispositivos de fibra óptica tienen ventajas en la miniaturización de su diseño, que proporciona una fácil

incorporación en procesos en los que se requiere el análisis del índice de refracción de un líquido.

CAPÍTULO 1. REFRACTOMETRÍA: DE LA INGENIERÍA ÓPTICA A LA BIO-INGENIERÍA

1.1. Índice de refracción un parámetro fundamental de materia y sus implicaciones.

El índice de refracción (RI: refractive index) es una propiedad óptica que poseen los materiales y que determina una parte importante de la interacción entre la radiación electromagnética (EM) y la materia. El RI es una cantidad adimensional, real para un material transparente y complejo si existe absorción. En función del RI, los materiales se pueden clasificar en isotrópicos o anisotrópicos; las sustancias líquidas, gaseosas y algunos sólidos no cristalinos (amorfos) son isotrópicos ya que poseen un solo RI en su estructura. Caso contrario a los anisotrópicos, como los cristales que mantienen más de un RI en su estructura. Cuando la luz se propaga a través de un material, se asume que la distancia recorrida por el frente de onda es uniforme. Es erróneo considerar que la luz viajara siempre a la misma velocidad, ya que la velocidad de la luz depende de las propiedades del material a través del cual se desplaza [1]. El cambio de la velocidad de propagación de la luz, se debe principalmente al RI del material, por ende el índice de refracción (n) se define como la relación de la velocidad de la luz en el vacío (c) y la velocidad de la luz en un medio (v) [2].

$$n = \frac{c}{v} = \frac{\epsilon_r \mu_r}{\epsilon_0 \mu_0} - i \frac{\mu_0 \sigma}{\omega \epsilon_0} = n_r - ip; \quad c = 3 \times 10^8 \text{ m/s} \quad \text{Ec. 1.1.}$$

donde ϵ_0, μ_0 corresponden a la permitividad y permeabilidad del espacio libre, respectivamente; ϵ_r, μ_r son la permitividad y permeabilidad relativa, respectivamente; σ es la conductividad eléctrica y ω la frecuencia de la luz. En la Ec. 1.1 el índice de refracción es complejo, donde n_r es la parte real de n (en un dieléctrico ideal solo existe parte real) y p es la parte imaginaria, que representa el coeficiente de extinción (magnitud relacionada con la absorción de luz, α , cuando interactúa con la materia). La velocidad máxima que la luz alcanza se da en el vacío. Se considera que el valor del índice de refracción en el vacío es de

1 y el índice de refracción del aire a 20 °C con presión atmosférica es 1.0003, la diferencia entre estos dos valores es tan mínima que usualmente se desprecia. Por lo cual se asume que la velocidad de la luz en el aire y el vacío, es el mismo.

En la Figura 1.1 se ilustra un evento que pasa de manera cotidiana en la naturaleza, un haz de luz con una longitud de onda (λ) que se propaga en un medio al encontrar una interfaz creada por dos medios con diferente índice de refracción, esta diferencia de RI y el ángulo que el haz hace con la normal a la superficie, llamado ángulo de incidencia (θ_i), determinan el comportamiento del haz. Al llegar a la interfaz una parte de la luz se refleja bajo las condiciones descritas en la ley de reflexión, el rayo reflejado está situado en el plano de incidencia y forma con la normal un ángulo (θ_r) igual al ángulo de incidencia, es decir $\theta_r = \theta_i$. Mientras que la parte restante de la luz incidente se trasmite al segundo medio, el haz transmitido, también llamado refractado, forma un ángulo (θ_t) con la normal de la frontera en el punto de incidencia, cambiando la dirección de propagación. Este cambio de dirección, depende de θ_i con θ_t y las propiedades de dos medios, puede ser definida como:

$$\frac{\text{sen}\theta_t}{\text{sen}\theta_i} = \frac{n_2}{n_1} \quad \text{Ec. 1.2.}$$

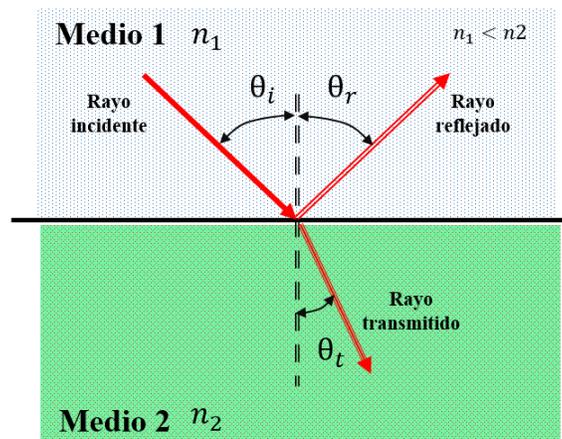


Figura 1. 1. Rayo de luz incide sobre una interfaz entre dos medios de diferente n , parte de su energía se reflejada y otra parte se refracta.

Cuando la luz viaja, a través de una interface, de un medio con índice de refracción mayor a uno con menor, puede ocurrir el fenómeno denominado reflexión total interna (TIR: Total Internal Reflection). De acuerdo a la Ec. 1.2 existe un ángulo de incidencia al que el ángulo

refractado $\theta_t = 90^\circ$, es decir la luz es refractada a lo largo de la frontera entre los dos medios, el valor del ángulo de incidencia θ_i al que ocurre se conoce como ángulo crítico θ_c , como se muestra en la Figura 1.2 a), y para $\theta_i > \theta_c$, la energía de la luz incidente es totalmente reflejada, tal como se observa en la Figura 1.2 b).

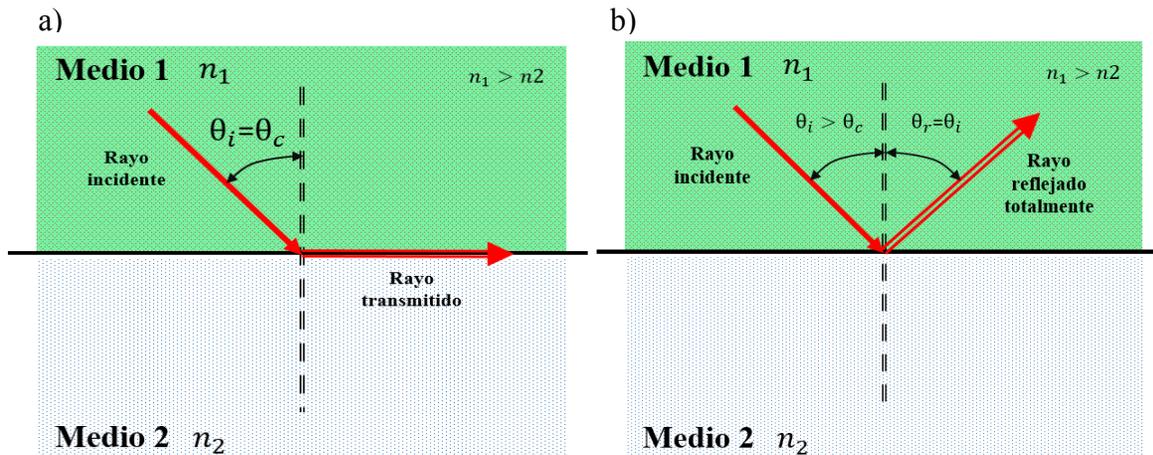


Figura 1.2. a) Cuando el ángulo de incidencia es igual al ángulo crítico el ángulo transmitido es 90° , b) En el ángulo de incidencia mayor al ángulo crítico a luz se refleja totalmente (TIR).

Las comunicaciones por fibra óptica (FO), una de las aplicaciones donde se aprovecha el fenómeno de TIR, la información se codifica en un haz de luz que se propaga a través del núcleo de la FO. El confinamiento de la luz debido a la TIR en la frontera formada entre el núcleo y el revestimiento se logra porque el núcleo tiene un RI mayor que el revestimiento [3]. La TIR y el ángulo crítico se utilizan en instrumentos ópticos, conocidos como refractómetros, que permiten medir el RI de un material analizando la luz refractada en la frontera de un substrato de vidrio y el material bajo estudio.

En la medición del índice de refracción es necesario tomar en cuenta dos agentes externos al material, estos son: temperatura y longitud de onda de la luz utilizada. La temperatura influye en la densidad de la sustancia que a su vez determina el valor del RI [4]. Por otro lado, la dependencia del RI con la longitud de onda de la luz solo se puede tratar tomando en cuenta la estructura atómica de la materia, una discusión formal puede encontrarse en [5]. Los valores de índice de refracción generalmente la medición estándar del RI se realiza en la línea del sodio D ($\lambda = 589 \text{ nm}$) a 20°C y los valores se reportan en formato de tres o cuatro décimas dependiendo de la resolución del refractómetro.

1.2. Refractómetros comerciales

La refractometría, medición de índice de refracción, tiene ventajas sobre otros tipos de técnicas, cuando se desea hacer el análisis simple de una sustancia en algunos procesos de producción, puesto que los refractómetros son diseños simples, la medición es fácil y rápida, con un análisis simple y confiable, además se requiere de reducidas cantidades de muestras para la medición. En la industria de alimentos y bebidas, química, farmacéutica, aceite, petroquímica, automotriz y metalmecánica, los refractómetros juegan un papel importante garantizando la calidad en los procesos de producción [6]. Los refractómetros se emplean en una variedad de aplicaciones, los más comunes son la determinación de la pureza o concentración de una sustancia en términos de índice de refracción y la medición de los niveles de azúcar en una solución mediante los grados Brix ($^{\circ}$ Brix). La escala $^{\circ}$ Brix indica la cantidad de gramos de sacarosa disuelta en una porción de agua.

Puesto que los refractómetros se han posicionado como instrumentos importantes en los laboratorios e industrias, proveedores líderes de instrumentos analíticos han respondido ofreciendo un gran número de modelos que cumplan con los requisitos específicos en cada una de las aplicaciones. En el mercado competitivo se encuentran empresas como, RUDOLPH RESEARCH ANALYTICAL, quien provee distintos modelos de refractómetros de mesa, automáticos-digitales que cumplen con los estándares en áreas como la farmacéutica, industria alimenticia, laboratorios químicos, biotécnicas y de bioingeniería [7]; por su parte Bellingham+Satnley suministra refractómetros de mano proporcionando la facilidad y rapidez en la medición [8], KRÜSS con renombre internacional proporciona los refractómetros tipo Abbe en dos presentaciones, analógicos y digitales, ideales en el ámbito académico como en la industria [9]. Los refractómetros comerciales tipo: Abbe, de mano, automático-digital y de proceso, la técnica de medición del índice de refracción se basa en la medición del ángulo crítico.

En la medición del índice de refracción se requiere precisión en las medidas, pero existen ciertos factores que pueden alterar el valor original. Por ejemplo, la limpieza en la superficie donde es puesta la muestra, de ser el caso pueden permanecer manchas o burbujas de aire que alteren la medición; así como la temperatura que modifica la densidad de la muestra y en consecuencia se presenta una inexactitud en el valor final. Los fabricantes han

compensado dichas variabilidades a través de algoritmos inteligentes que detectan estas irregularidades en la superficie y han implementado sistemas electrónicos de enfriamiento o calentamiento de la muestra.

1.2.1. Refractómetro de Abbe

El refractómetro de Abbe, es el primer refractómetro que se ofreció comercialmente y su principio de operación ha sido la base propicia para el diseño de nuevos refractómetros. Ideales cuando se requiere un rango amplio de mediciones de RI de muestras sólidas, semisólidas, poliméricas y líquidas, en los laboratorios donde el rendimiento de la muestra es relativamente baja. Estos instrumentos constan de un espejo que dirige la luz a una montura metálica central móvil con dos prismas (prisma de iluminación y prisma de refracción). Se observa la luz a través de un ocular sobre una escala graduada, que permite fijar la posición relativa respecto a los prismas. La pieza central se puede abrir por medio de una bisagra que permite separar los dos prismas y colocar entre ellos la muestra que se desea medir.

El funcionamiento del refractómetro se basa en el estudio del ángulo crítico que se produce en la reflexión total del haz de prueba cuando incide en la frontera entre un prisma y la muestra. El valor de este ángulo depende del índice de refracción de la muestra y del índice de refracción conocido del prisma. En el ocular se aprecia una zona iluminada y otra oscura, el operador debe maniobrar una manija que permite centrar la línea que divide a las dos zonas, esta manija va incorporado a la escala graduada y de donde la lectura del índice de refracción es tomada.

El refractómetro de Abbe tiene una precisión de índice de refracción de 10^{-4} y 10^{-5} , el rango del índice de refracción es amplio dependiendo del modelo, para bajos índices de refracción de 1.3-1.75 y para altos índices de refracción de 1.4-1.85. Dado que la temperatura afecta la medición del RI de una sustancia, los refractómetros de Abbe poseen conexiones para incluir un baño de agua que proporciona el control de la temperatura del prisma [9].

1.2.2. Refractómetro de mano.

Estos refractómetros son prácticos por su diseño portable, permitiendo realizar mediciones de índice de refracción en campo, generalmente son configurado y calibrados para realizar la medida en la escala °Brix. La precisión en la medición de índice de refracción está entre 10^{-3} y 10^{-4} , el rango de trabajo es muy estrecho dado a sus aplicaciones particulares. El operador observa en un ocular y la lectura es tomada en una escala sobre la que se superpone el límite de luz-oscuridad causado por la refracción o la reflexión del haz de incidencia dependiendo de la región en la que se ubique el ángulo de incidencia a cada lado del ángulo crítico [8].

1.2.3. Refractómetro automático-digital.

La operación de los refractómetros automáticos es simple, basta con colocar una muestra en el prisma, cerrar la tapa y leer la respuesta. En estos dispositivos no existe líneas de sombras que coincidan, ni ocular donde se requiera del ajuste por parte del operador [10], caso contrario a los refractómetros Abbe y de mano. Los diferentes modelos de este tipo de refractómetros se fabrican de acuerdo a la aplicación particular de los laboratorios que lo solicitan.

1.2.4. Refractómetro de proceso

Estos instrumentos están conectados a procesos por lo que tienen la capacidad de realizar mediciones en línea, proveen de datos en tiempo real para el control de procesos, ideales en la medición de índice de refracción continua de un fluido. A diferencia de otros refractómetros, este tipo de refractómetro emplea un dispositivo de carga acoplada (CCD: Charge-Coupled Device) ensamblado a una caja de control para la medición del ángulo crítico resultante. A través de ellos se garantiza la mayor fiabilidad en los procesos, con instalaciones de tuberías, tanques de mezclas, recipientes de almacenamiento o calderas de reacción [11].

1.3. Importancia de la medición del índice de refracción

El índice de refracción es una característica inherente de la materia que se encuentra estrechamente relacionada con las propiedades físicas y químicas y que influye en la interacción de la luz con la materia, por esto no es extraño que la refractometría sea útil y necesaria en áreas como salud, energía, agricultura, alimentos, ya que son utilizados en varios procesos de industrias prioritarias como: farmacéutica, las procesadoras de alimentos y bebidas, la seguridad ambiental en agricultura, recursos energéticos así como en la bioingeniería, esto solo por mencionar algunas.

La refractometría a diferencia de la espectroscopia, utilizada para identificar sustancias y que se basa en la absorción de la luz, es útil cuando se conoce el material que se analiza por lo que se usa principalmente en:

- Identificar o confirmar la identidad de una muestra al comparar su índice de refracción con valores conocidos.
- Evaluar la pureza de una muestra.
- Comprobar el cumplimiento de calidad en estándares nacionales y/o internacionales de un producto.
- Medición indirecta de la concentración de un soluto en una solución, mediante la comparación del índice de refracción de la solución en una curva característica.

En la industria el índice de refracción es una cuantificación básica que permite la detección de concentraciones de materiales sólidos diluidos en líquidos. En la industria de bebidas, el control de calidad de las bebidas alcohólicas que contienen etanol es de gran importancia, ya que difieren en cuanto a su sabor, olor y apariencia. Además, de contener agua y etanol las bebidas alcohólicas pueden tener otros componentes aditivos y/o contaminantes, tales como el metanol que influyen en la calidad e incluso pueden ser dañinos para la salud porque es una sustancia potencialmente carcinógeno. La contaminación de bebidas con metanol es común y por eso se ha buscado desarrollar técnicas simples y rápidas para detectarlo. Una de ellas consiste en realizar una estimación del índice de refracción en base a diferentes concentraciones de metanol en alcohol etílico [10], esta prueba es simple y se puede implementar fácilmente como control de calidad en el proceso de producción.

La salinidad del agua, parámetro importante en campos como la seguridad ambiental, es utilizado como indicador de la calidad del agua, que tiene efecto directo en distintos procesos de producción industrial y en procesos agrícolas, es también un indicador en el monitoreo ambiental marino [12], se puede medir mediante técnicas refractométricas lo que ha contribuido al interés en la investigación y desarrollo de métodos nuevos para el análisis de este indicador [13]. La contaminación del agua de consumo humano es uno de los problemas ambientales más preocupantes en la actualidad, ya que influye en la salud humana a nivel mundial. Uno de los contaminantes inorgánicos más comunes es el flúor, en [14] se demuestra que es posible su detección a través de la medición del índice de refracción, para esto en este trabajo se utilizaron soluciones acuosas con diferentes concentraciones de flúor para hacer una caracterización que podría ser utilizada como curva de calibración.

En la agricultura, los enólogos dependen de las mediciones de la densidad para supervisar la fermentación del mosto de uva que da como resultado el vino, no obstante se ha demostrado que el índice de refracción es una opción válida para fines de supervisión lo que simplifica y abarata el análisis en los primeros estadios del proceso. En [15] se utiliza la dependencia en temperatura del índice de refracción del mosto durante el proceso de fermentación de la uva como un proceso de monitoreo en la producción de vinos.

En el desarrollo de recursos renovables, el biodiesel ha sido una de las alternativas más viables en la materia. Este producto es derivado de la reacción de transesterificación de aceites vegetales y/o animales combinadas con alcohol (metano o etanol), sin embargo cuando el proceso de transesterificación es inadecuado el producto final puede causar graves problemas operativos. Se ha demostrado que el sondeo en la calidad del biodiesel se puede efectuar mediante la medición del IR y se puede implementar como un método para el control del proceso [16].

La medición del índice de refracción toma un papel importante en el análisis médico, en [17] se reporta una estrategia para la estimación del índice de refracción de la hemoglobina, tomando en cuenta que el cambio en el RI depende fuertemente de la fisiología de las células biológicas así como de la temperatura. Se puede considerar al IR como un marcador biológico no invasivo para la detección de posibles enfermedades.

1.4. Técnicas refractométricas modernas

1.4.1. Interferometría

La interferencia ocurre cuando dos haces mutuamente coherentes provenientes de una misma fuente puntual se superponen después de viajar por caminos ópticos diferentes [18]. En la Figura 1.4 se aprecia la configuración de un interferómetro tipo Michelson, donde el haz de un láser incide sobre un divisor de haz, siendo una parte dirigida a la superficie de prueba y el resto a la superficie de referencia, el detector es el encargado de obtener el resultado de la interferencia de los dos haces al recombinarse. En el plano del detector se podrán observar el patrón de interferencia, que en este caso consiste de franjas periódicas espacialmente cuya intensidad está modulada. Generalmente, esta técnica se utiliza para medir cambios mínimos en el camino óptico entre los dos haces que interfieren y la manera en que se hace es mediante el conteo de franjas de interferencias.

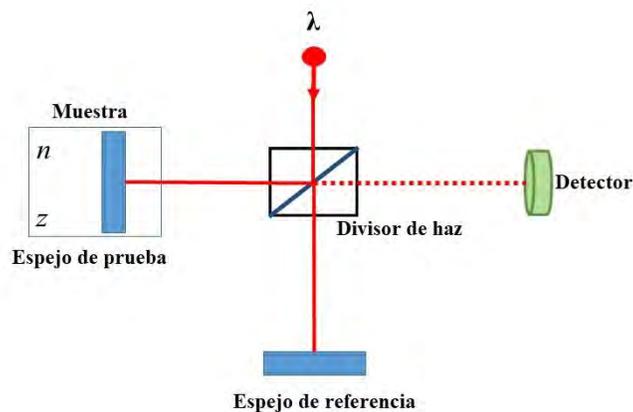


Figura 1. 3. Interferómetro de Michelson para la medición de índice de refracción.

Se coloca una muestra, que tiene un índice de refracción n y espesor z , en uno de las trayectorias (brazos) del interferómetro de tal manera que la luz incida normal a la superficie entonces el espejo localizado en el plano se ajusta hasta obtener franjas circulares con un único punto oscuro central, la diferencia del camino óptico entre los haces puede variarse al cambiar el ángulo de incidencia sobre la muestra. Conociendo la longitud de recorrido en el interior de la placa, el índice de refracción se puede expresar por el número de franjas N_f que cambian en el patrón de interferencia al varía el ángulo de incidencia entre 0 y θ , como [19]:

$$n = \frac{(2z - N_f)(1 - \cos\theta) + \frac{N_f^2 \lambda^2}{4t}}{2z(1 - \cos\theta) - N_f \lambda} \quad \text{Ec. 1.3.}$$

donde λ es la longitud de onda del láser. En esta técnica la exactitud se encuentra limitado principalmente por la precisión del grosor de la muestra y por el flujo de aire en el ambiente, además es requisito que las vibraciones se reduzcan al mínimo.

1.4.2. Elipsometría

Cuando una onda EM interacciona con un medio su estado de polarización se puede ver modificado, estos cambios se analizan mediante la técnica conocida como elipsometría. Es un método óptico de análisis experimental, basado en la medición de los cambio en el estado de polarización de la luz [20] entre la onda incidente y reflejada desde la superficie de prueba. La elipsometría es una técnica altamente precisa de caracterización de superficies e interfaces y permite obtener información sobre su espesor e índice de refracción [21].

1.4.3. Refractómetros de fibra óptica

En una fibra óptica, debido al confinamiento de la luz en su núcleo, la propagación de la luz es insensible a los cambios de índice de refracción que ocurren en el medio que rodea el revestimiento. Sin embargo, si se modifica la fibra óptica la luz que es guiada por el núcleo puede verse afectada por el medio circundante (muestras líquidas) al exponer el campo evanescente en una sección de la fibra óptica [22] o por medio de la reflexión de Fresnel [23] [24] en la punta de la fibra óptica. Bajo estas condiciones la señal óptica que proviene de una fuente de luz se modulará de acuerdo al cambio en el RI del medio que circunda la fibra óptica y se registrará la señal transmitida o reflejada en el fotodetector de un instrumento de medición. Los cambios en al menos uno de los parámetros de la luz (amplitud, longitud de onda, fase), debidos al cambio de índice de refracción en el medio externo, se pueden medir y son ajustados para generar una curva de calibración característica para cada dispositivo. Diversos refractómetros de fibra óptica se han propuesto y métodos como cubrir de metal la fibra óptica[25], rejillas de Bragg (FBG: Fibre Bragg Grating) [26] o adelgazamiento de la fibra óptica [27].

CAPITULO 2. LA INGENIERÍA DE LA RESONANCIA DE PLASMON SUPERFICIAL

2.1. El fenómeno de la resonancia de plasmón superficial

Los metales nobles, tales como Oro (Au), Plata (Ag), Cobre (Cu) y Aluminio (Al) exhiben propiedades electro-ópticas muy particulares, presentan constantes dieléctricas complejas ($\epsilon_m = \epsilon'_m + i\epsilon''_m$) con valores reales negativos en el rango del visible e infrarrojo cercano del espectro electromagnético [28]. Esta característica propia de los metales nobles, es una condición necesaria para la existencia de los plasmones superficiales (SP), descrita por primera vez como la anomalía de Wood en la reflectividad espectral de un haz de luz polarizada que incide sobre una rejilla metálica [29].

El plasmón superficial u onda de plasmón superficial (SPW), son oscilaciones colectivas de densidad de carga presentes en una interfaz entre dos medios, metal y dieléctrico, cuyas constantes dieléctricas poseen parte real de signo contrario. La excitación del SP puede lograrse a través de electrones o fotones [30]. En el caso de este último, los electrones libres oscilan en respuesta al campo electromagnético del fotón incidente de la misma frecuencia. Las ondas SP se propagan sobre la interfaz acompañadas de un campo eléctrico (E) perpendicular a la interfaz metal-dieléctrico y un campo magnético (H) paralelo a dicha interfaz, Figura 2.1 a); por consiguiente el plasmón superficial mantiene una polarización transversal magnética (TM o polarización p) y responderán colectivamente solamente a ondas electromagnéticas con misma característica. Dada la fuerte unión del plasmón superficial a la superficie del metal, el máximo del campo E asociado se encuentra en la interfaz metal-dieléctrico y decae exponencialmente en ambos medios, tal como se muestra en Figura 2.1 b). La profundidad de penetración (δ_p) es la distancia a la cual la amplitud del campo eléctrico decae a un valor de $1/e$ en ambos medios; se encuentra en el orden de ~ 10 nm en el metal y 150-400 nm en el dieléctrico, pero el valor de profundidad depende de la longitud de onda de la EM de excitación [31].

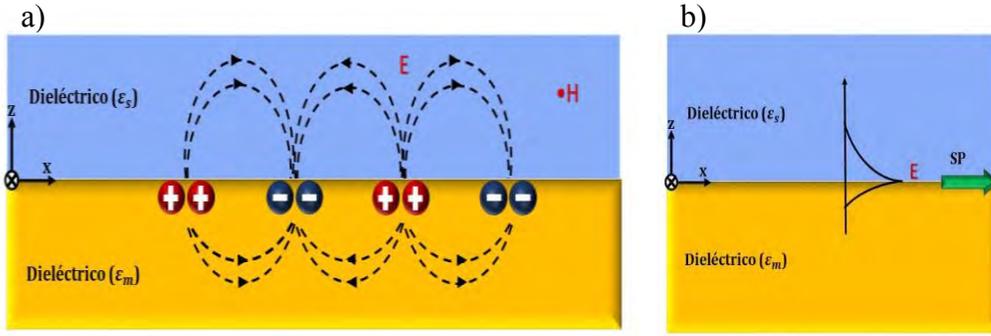


Figura 2. 1 Plasmon superficial. a) Propagación del SPW en una interfaz metal-dieléctrico. b) Su campo E , decae exponencialmente en ambos medios desde la interfaz.

Una manera de abordar la teoría de SPW es mediante el análisis de la luz que se propaga en una guía de onda plana formada por un metal y un dieléctrico, como la que se muestra en la Fig. 2.1 (a) y (b).¹ Se parte de las ecuaciones de Maxwell [32]:

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho_{ext} \quad \text{Ec. 2.1.}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad \text{Ec. 2.2.}$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad \text{Ec. 2.3.}$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}_{ext} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad \text{Ec. 2.4.}$$

Estas ecuaciones relacionados cuatro campos macroscópicas \mathbf{D} (desplazamiento dieléctrico), \mathbf{E} (campo eléctrico), \mathbf{H} (campo magnético), y \mathbf{B} (inducción magnética) con ρ_{ext} cargas externar y densidad de corriente \mathbf{J}_{ext} . En la ausencia de cargas externas y densidad de corriente, las Ec. 2.3 y 2.4 pueden ser combinadas para obtener:

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} = -\mu_0 \frac{\partial^2 \mathbf{D}}{\partial t^2} \quad \text{Ec. 2.5.}$$

¹ Este desarrollo se incluye por recomendación de los revisores, una descripción más detallada y completa se encuentra en [32] y [36].

Sabiendo que $\mathbf{D}=\varepsilon\mathbf{E}$ y usando las identidades $\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} \equiv \nabla(\nabla \cdot \mathbf{E}) - \nabla^2 \mathbf{E}$ en donde $\nabla \cdot (\varepsilon\mathbf{E}) \equiv \mathbf{E} \cdot \nabla\varepsilon + \varepsilon\nabla \cdot \mathbf{E}$, y en ausencia de un estímulo externo $\nabla \cdot \mathbf{D} = \mathbf{0}$, la ecuación puede ser reescrita como:

$$\nabla^2 \mathbf{E} = -\frac{\varepsilon}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} \quad \text{Ec. 2.6.}$$

Si asumimos que el campo eléctrico solución de la Ec. 2.6 tiene una dependencia armónica en el tiempo de la forma $\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{E}(\mathbf{r})e^{-i\omega t}$, se obtiene:

$$\nabla^2 \mathbf{E} + k_0^2 \varepsilon \mathbf{E} = 0 \quad \text{Ec. 2.7.}$$

donde $k_0 = \frac{\omega}{c}$ es el vector de la onda de propagación en el vacío, y esta ecuación es conocida como ecuación Helmholtz. Las ondas confinadas se propagan a lo largo de la dirección x del sistema de coordenadas mostrado en la Fig. 2.1 (a) y (b), y no muestran variación espacial en el plano perpendicular en y , por lo que $\varepsilon = \varepsilon(z)$ en donde el plano $z=0$ coincide con la interfaz, por lo que el campo eléctrico ahora puede describirse como $\mathbf{E}(x, y, z) = \mathbf{E}(z)e^{-i\beta x}$. El parámetro complejo $\beta = k_x$ es la constante de propagación de la onda guiada y corresponde a la componente del vector de onda en la dirección de propagación. El campo eléctrico puede sustituirse en la Ec. 2.7 y se obtiene una forma de ecuación de onda:

$$\frac{\partial^2 \mathbf{E}(z)}{\partial z^2} + (k_0^2 \varepsilon - \beta^2) \mathbf{E} = 0 \quad \text{Ec. 2.8.}$$

y en función de \mathbf{H}

$$\frac{\partial^2 \mathbf{H}(z)}{\partial z^2} + (k_0^2 \varepsilon - \beta^2) \mathbf{H} = 0$$

Sin embargo, se necesita obtener las expresiones para las diferentes componentes de \mathbf{E} y \mathbf{H} , considerando la dependencia armónica en el tiempo ($\frac{d}{dt} = -i\omega$) se puede llegar al siguiente conjunto de ecuaciones a partir de la Ec. 2.3 considerando que $\mathbf{B}=\mu_0\mathbf{H}$:

$$\frac{\partial \mathbf{E}_z}{\partial y} - \frac{\partial \mathbf{E}_y}{\partial z} = i\omega\mu_0 \mathbf{H}_x \quad \text{Ec. 2.9.}$$

$$\frac{\partial \mathbf{E}_x}{\partial z} - \frac{\partial \mathbf{E}_z}{\partial x} = i\omega\mu_0 \mathbf{H}_y \quad \text{Ec. 2.10.}$$

$$\frac{\partial \mathbf{E}_y}{\partial x} - \frac{\partial \mathbf{E}_x}{\partial y} = i\omega\mu_0 \mathbf{H}_z \quad \text{Ec. 2.11.}$$

$$\frac{\partial \mathbf{H}_z}{\partial y} - \frac{\partial \mathbf{H}_y}{\partial z} = -i\omega\varepsilon_0 \varepsilon \mathbf{E}_x \quad \text{Ec. 2.12.}$$

$$\frac{\partial \mathbf{H}_x}{\partial z} - \frac{\partial \mathbf{H}_z}{\partial x} = -i\omega\varepsilon_0 \varepsilon \mathbf{E}_y \quad \text{Ec. 2.13.}$$

$$\frac{\partial \mathbf{H}_y}{\partial x} - \frac{\partial \mathbf{H}_x}{\partial y} = -i\omega\varepsilon_0 \varepsilon \mathbf{H}_z \quad \text{Ec. 2.14.}$$

Para la propagación en la dirección x ($\frac{\partial}{\partial x} = i\beta$) y homogéneamente en la dirección y ($\frac{\partial}{\partial y} = 0$), el sistema de ecuaciones se simplifica a:

$$\frac{\partial \mathbf{E}_y}{\partial z} = -i\omega\mu_0 \mathbf{H}_x \quad \text{Ec. 2.15.}$$

$$\frac{\partial \mathbf{E}_x}{\partial z} - i\beta \mathbf{E}_z = i\omega\mu_0 \mathbf{H}_y \quad \text{Ec. 2.16.}$$

$$i\beta \mathbf{E}_y = i\omega\mu_0 \mathbf{H}_z \quad \text{Ec. 2.17.}$$

$$\frac{\partial \mathbf{H}_y}{\partial z} = i\omega\varepsilon_0 \varepsilon \mathbf{E}_x \quad \text{Ec. 2.18.}$$

$$\frac{\partial \mathbf{H}_x}{\partial z} - i\beta \mathbf{H}_z = -i\omega\varepsilon_0 \varepsilon \mathbf{E}_y \quad \text{Ec. 2.19.}$$

$$i\beta \mathbf{H}_y = -i\omega\varepsilon_0 \varepsilon \mathbf{H}_z \quad \text{Ec. 2.20.}$$

Este sistema permite obtener dos conjuntos de soluciones consistente con diferentes propiedades de polarización de las ondas de propagación. El primer conjunto de tres ecuaciones son para los modos TM (*polarización p*), donde las componentes \mathbf{E}_x , \mathbf{E}_z y \mathbf{H}_y son distintos de cero; mientras que el segundo conjunto son los modos transversal eléctrico o TE (*polarización s*), cuyas componentes \mathbf{H}_x , \mathbf{H}_z y \mathbf{E}_y son distintos de cero. El sistema de ecuaciones anterior se reduce para los modos TM como:

$$\mathbf{E}_x = -i \frac{1}{\omega\varepsilon_0 \varepsilon} \frac{\partial \mathbf{H}_y}{\partial z} \quad \text{Ec. 2.21.}$$

$$\mathbf{E}_z = \frac{\beta}{\omega \varepsilon_0 \varepsilon} \mathbf{H}_y \quad \text{Ec. 2.22.}$$

Esto lleva a la ecuación de onda para los modos TM, sustituyendo la Ec. 2.21 y 2.22 en 2.8b:

$$\frac{\partial^2 \mathbf{H}_y}{\partial z^2} + (k_0^2 \varepsilon - \beta^2) \mathbf{H}_y = 0 \quad \text{Ec. 2.23.}$$

Para los modos TE las ecuaciones se reducen a:

$$\mathbf{H}_x = i \frac{1}{\omega \mu_0} \frac{\partial \mathbf{E}_y}{\partial z} \quad \text{Ec. 2.24.}$$

$$\mathbf{H}_z = \frac{\beta}{\omega \varepsilon_0 \varepsilon} \mathbf{E}_y \quad \text{Ec. 2.25.}$$

y la ecuación de onda para los modos TE, sustituyendo Ec. 2.24 and 2.25 en 2.8a, resulta en:

$$\frac{\partial^2 \mathbf{E}_y}{\partial z^2} + (k_0^2 \varepsilon - \beta^2) \mathbf{E}_y = 0 \quad \text{Ec. 2.26.}$$

Ahora para el SPW, en una geometría plana con única interfaz entre un medio dieléctrico no absorbente ($z > 0$) con una constante dieléctrica real positiva (ε_s) y un medio conductor adyacente ($z < 0$) constante dieléctrica $\varepsilon_m(\omega)$, se busca la solución de la onda de propagación confinada en la interfaz, con un campo evanescente decayendo perpendicularmente en dirección z . Con las ecuaciones Ec. 2.21-2.23 se busca las soluciones en TM en ambos medios, para $z > 0$:

$$\mathbf{H}_y(z) = A_2 e^{i\beta x} e^{-k_2 z} \quad \text{Ec. 2.27.}$$

$$\mathbf{E}_x(z) = iA_2 \frac{1}{\omega \varepsilon_0 \varepsilon_s} k_2 e^{i\beta x} e^{-k_2 z} \quad \text{Ec. 2.28.}$$

$$\mathbf{E}_z(z) = -A_2 \frac{\beta}{\omega \varepsilon_0 \varepsilon_s} e^{i\beta x} e^{-k_2 z} \quad \text{Ec. 2.29.}$$

Para $z < 0$:

$$\mathbf{H}_y(z) = A_1 e^{i\beta x} e^{k_1 z} \quad \text{Ec. 2.30.}$$

$$\mathbf{E}_x(z) = -iA_1 \frac{1}{\omega \varepsilon_0 \varepsilon_m} k_1 e^{i\beta x} e^{k_1 z} \quad \text{Ec. 2.31.}$$

$$\mathbf{E}_z(z) = -A_1 \frac{\beta}{\omega \varepsilon_0 \varepsilon_m} e^{i\beta x} e^{k_1 z} \quad \text{Ec. 2.32.}$$

$k_i \equiv (i = 1,2)$ es la componente del vector perpendicular a la interfaz en ambos medios. De la continuidad de \mathbf{H}_y y $\varepsilon_i \mathbf{E}_z$ en la interfaz se requiere que $A_1 = A_2$ y

$$\frac{k_2}{k_1} = -\frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_m} \quad \text{Ec. 2.33.}$$

La expresión para \mathbf{H}_y debe de cumplir con la ecuación de la onda de Ec. 2.23.,

$$k_1^2 = \beta^2 - k_0^2 \varepsilon_m \quad \text{Ec. 2.34.}$$

$$k_2^2 = \beta^2 - k_0^2 \varepsilon_s \quad \text{Ec. 2.35.}$$

Combinando Ec. 2.34-2.35 y Ec. 2.33 se puede obtener la constante de propagación de la onda del plasmón superficial sobre la interfaz metal-dieléctrico [32] como:

$$\beta = k_{SP} = Re \left\{ \frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{\varepsilon_m \varepsilon_s}{\varepsilon_m + \varepsilon_s}} \right\} \quad \text{Ec. 2.36.}$$

donde $\varepsilon_m = \varepsilon'_m + \varepsilon''_m$ es la constante dieléctrica del metal, c es la velocidad de la luz en el vacío y ε_s es la constante dieléctrica del medio externo, esta descripción es válida si la parte real ε'_m es negativa y su magnitud es más grande que la parte imaginaria ε''_m y del medio externo ε_s . Ahora con las ecuaciones Ec. 3.24 -3.26 se busca las soluciones en TE en ambos medios, para $z > 0$:

$$\mathbf{E}_y(z) = A_2 e^{i\beta x} e^{-k_2 z} \quad \text{Ec. 2.37.}$$

$$\mathbf{H}_x(z) = -iA_2 \frac{1}{\omega \mu_0} k_2 e^{i\beta x} e^{-k_2 z} \quad \text{Ec. 2.38.}$$

$$\mathbf{H}_z(z) = A_2 \frac{\beta}{\omega \mu_0} e^{i\beta x} e^{-k_2 z} \quad \text{Ec. 2.39.}$$

Para $z < 0$:

$$\mathbf{E}_y(z) = A_1 e^{i\beta x} e^{k_1 z} \quad \text{Ec. 2.40.}$$

$$\mathbf{H}_x(z) = iA_1 \frac{1}{\omega \mu_0} k_1 e^{i\beta x} e^{k_1 z} \quad \text{Ec. 2.41.}$$

$$\mathbf{H}_z(z) = A_1 \frac{\beta}{\omega \mu_0} e^{i\beta x} e^{k_1 z} \quad \text{Ec. 2.42.}$$

La continuidad de \mathbf{E}_y y \mathbf{H}_x en la interfaz entre ambos medios lleva para los modos TE a la condición:

$$A_1(k_1 + k_2) = 0 \quad \text{Ec. 2.43.}$$

debido al confinamiento en la superficie requiere que $\text{Re}[k_1] > 0$ y $\text{Re}[k_2] > 0$, y esta condición se cumple solamente si $A_1 = 0$, así que $A_2 = A_1 = 0$. Por lo tanto, no hay existencia de modos superficiales para la polarización TE y los SPW existen para la polarización TM.

La constante de propagación de una onda de luz que se propaga en un medio dieléctrico (ϵ) a una frecuencia ω , se expresa como:

$$k_w = \frac{\omega}{c} \sqrt{\epsilon} \quad \text{Ec. 2.44.}$$

ya que $k_w < k_{sp}$, el plasmón superficial no puede ser excitado por la incidencia de luz directa sobre la superficie de metal. Para su excitación el vector de onda del haz incidente debe ser aumentado, al punto donde alcance un vector de onda igual al del plasmón superficial. Además dado a la naturaleza del plasmón superficial solamente responderán a campos electromagnéticos con polarización-p.

Para obtener un vector de onda igual al del plasmón superficial, se recurre al fenómeno de reflexión total interna discutido previamente. Cuando un haz de luz se propaga de un medio con índice de refracción alto a otro medio de menor índice de refracción; en condiciones de TIR el haz es reflejado. Sin embargo, una fracción de la energía del haz se filtra al medio adyacente y es propagada sobre el metal en forma de onda evanescente [33]. La constante de propagación de la onda evanescente exhibida en la interfaz donde ocurre la reflexión total interna, se expresa como:

$$k_{ew} = \frac{\omega}{c} \sqrt{\epsilon_i} \sin\theta \quad \text{Ec. 2.45.}$$

La onda evanescente posee las mismas características de la onda del plasmón superficial, permitiendo el acoplamiento entre ambas ondas. Cuanto mayor sea la constante dieléctrica del medio o el ángulo de incidencia del haz, la constante de propagación de la onda evanescente aumentará [34]. Existe un ángulo particular de incidencia (θ_{SPR}) llamado ángulo de resonancia; donde la constante de propagación de la onda evanescente alcanza a igualarse

con la de la onda del plasmón superficial, consiguiendo la condición de resonancia de plasmón superficial (SPR) y el acoplamiento de ambas ondas, descrita por:

$$k_{SP} = Re \left\{ \frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{\varepsilon_m \varepsilon_s}{\varepsilon_m + \varepsilon_s}} \right\} = \frac{\omega}{c} \sqrt{\varepsilon_i} \sin \theta_{SPR} \quad \text{Ec. 2.46}$$

donde $\varepsilon_m = n_m^2$ es el índice de refracción del metal y $\varepsilon_s = n_s^2$ es el índice de refracción del dieléctrico adyacente al metal ($n_s < n_i$).

Existen diversas técnicas para la excitación del plasmón superficial que incluyen el uso de elementos ópticos, como prismas, rejillas de difracción y guías de onda, que cambia el momento del vector de onda de la luz que se propaga desde el vacío para lograr su acoplamiento al plasmón superficial. La técnica más recurrida en la resonancia del plasmón superficial es el acoplamiento por prisma mediante el método de la reflexión total atenuada (ATR: Attenuated Total Reflection) bajo la configuración de Kretschmann-Raether [35], el cual es una adecuación de la primera configuración propuesta para la excitación del plasmón superficial planteada por Otto.

En la Figura 2.2 se muestra la configuración Kretschmann-Raether, la base de un prisma triangular con alto índice de refracción es cubierta por una película delgada de metal noble con un espesor ($10\text{nm} < d < 100\text{nm}$) y un medio dieléctrico adyacente a este último. Existen diversos métodos basados en la deposición física de vapor que permiten el recubrimiento con películas delgadas de metal con precisión nanométrica, tales como evaporación a alto vacío o sputtering catódico [36]. Una onda electromagnética con polarización-p al incidir en la interfaz prisma-metal genera una onda evanescente que penetra la película metálica para acoplarse al plasmón superficial en el ángulo de resonancia, logrando satisfacer la condición de resonancia del plasmón superficial expresada en Ecuación 2.4 [37].

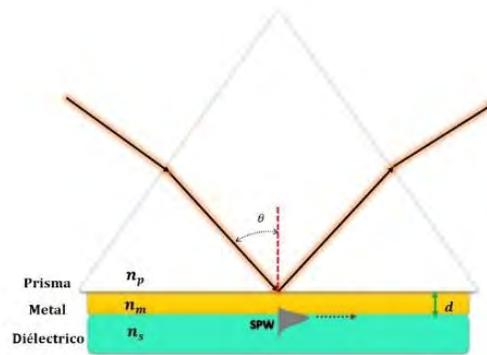


Figura 2. 2 Configuración Kretschmann-Raether en prisma.

2.2. La estructura de un sistema de resonancia de plasmón superficial

El fenómeno de la resonancia del plasmón superficial es altamente sensible a los cambios que ocurren en la interfaz del metal, especialmente al índice de refracción [38]. Esta propiedad ha sido especialmente útil en el desarrollo de plataformas refractométricas para la detección de reacciones biológicas, que inducen cambios de índice de refracción en la frontera del metal y que alteran las condiciones de la excitación del plasmón superficial [39]. En el esquema de la Figura 2.3 se representa en un diagrama de bloques la estructura de un sistema de resonancia de plasmón superficial, que consta de: fuente de luz (láser o fuente de luz de amplio espectro), elementos ópticos de bulto (polarizador, lentes, atenuadores), acoplador SPR (prisma, rejilla de difracción o fibra óptica), detector (fotodiodo o espectrómetro), y una unidad de procesamiento de la señal. La selección de cada uno de los elementos del sistema depende del método de interrogación que se vaya a utilizar que puede ser: angular, en intensidad o espectral [35].



Figura 2. 3. Estructura general de un sistema de resonancia de plasmón superficial.

En la Fig. 2.4 a) se muestra el sistema de resonancia de plasmón superficial con interrogación angular en el que se usa un prisma como acoplador, una fuente de luz monocromática con polarización p y un fotodetector. El ángulo de incidencia del haz de luz respecto de la normal a la interfaz prisma-metal varía y la intensidad del haz reflejado se registra con el fotodetector. La condición de resonancia ocurre al ángulo θ_{SPR} , donde se da la máxima transferencia de energía de la onda evanescente al plasmón que se manifiesta en una caída en la intensidad del haz reflejado [40]. En la gráfica de la Figura 2.4. b) se representa la respuesta del sistema descrito, en el que se muestra el comportamiento de la intensidad reflejada en un intervalo de ángulos de incidencia. Un cambio de índice de refracción del dieléctrico adyacente a la superficie de metal, de un valor n a $n+\Delta n$, producirá un desplazamiento de θ_{SPR} .

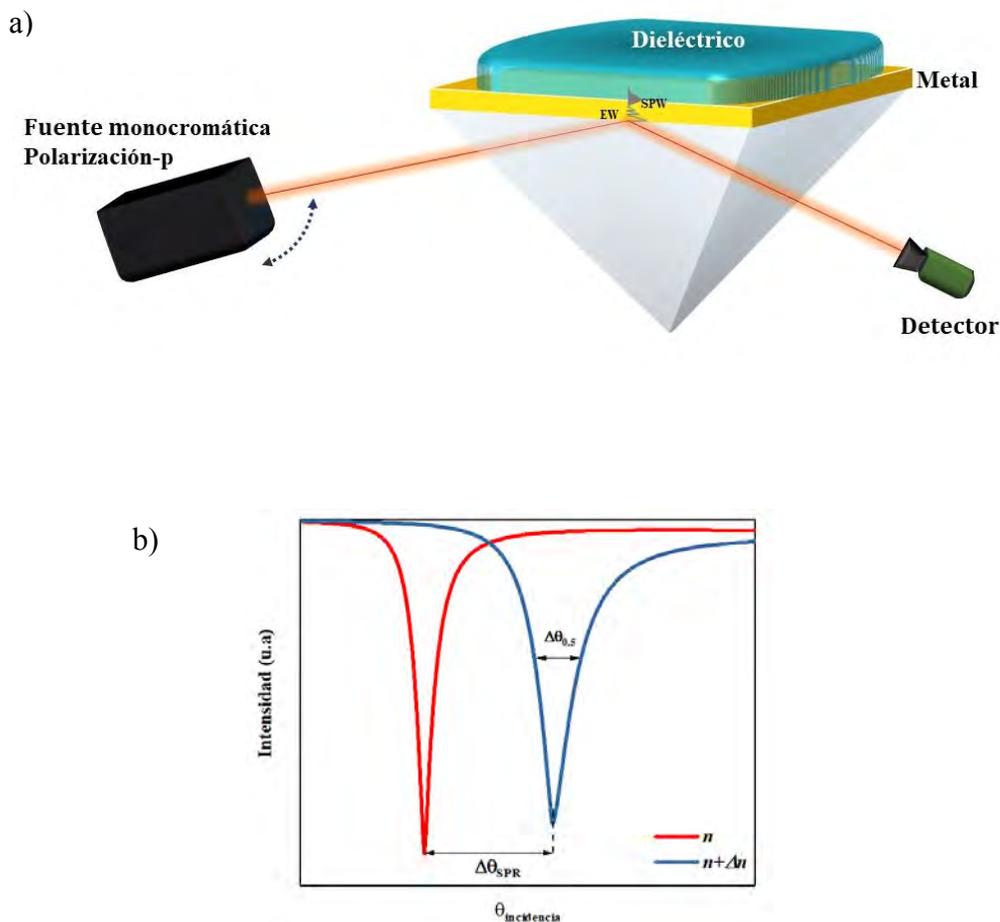


Figura 2. 4 Sistema SPR. a) Esquema de un sistema SPR en interrogación angular, b) Gráfica de la resonancia de plasmón superficial obtenida en una medición de interrogación angular.

El desempeño de un sistema SPR se evalúa en términos de sensibilidad (S), relación señal a ruido (SNR: Signal to Noise Ratio) y el rango de operación; cuyos valores dependen en gran medida del metal empleado para cubrir el acoplador. La profundidad de la caída de intensidad del espectro SPR es crucial para la resolución del sistema, que se incrementa cuando la razón de $\left(\frac{\epsilon_m'}{\epsilon_m''}\right)$ aumenta [41], de acuerdo a esto la plata (Ag) presenta un espectro SPR más estrecho comparado con los obtenidos con oro (Au). De entre los metales que pueden ser utilizados en un sistema SPR, tanto la Ag como el cobre (Cu) presentan inestabilidad química y tienden a oxidarse cuando son expuesto al aire y más aún en agua, limitando así su uso para fines refractométricos. Por lo tanto, dado su alta estabilidad química, es el Au el metal que más se usa en los sistemas SPR comerciales y de investigación. Para obtener valores máximos en el desempeño del sistema, es importante identificar los valores apropiados en el espesor del recubrimiento de metal y en algunos casos particulares como cuando se usa fibra óptica la longitud de la sección de detección del sensor SPR.

La sensibilidad de los sistemas de resonancia de plasmón superficial se define como la razón del cambio en la salida del sistema, $\Delta\theta_{SPR}$, respecto al cambio del índice de refracción del medio circundante, Δn , [40]:

$$S = \frac{\Delta\theta_{SPR}}{\Delta n} \quad \text{Ec. 2.47}$$

La SNR o la resolución se evalúan respecto al ancho del espectro SPR. El ancho total ($\Delta\theta_{0.5}$) es tomada a media altura (FWHM: Full Width at Half Maximum) entre el máximo y el mínimo del espectro SPR; es decir, al 50 % de señal total transmitida o reflejada y se define como:

$$SNR = \frac{\Delta\theta_{SPR}}{\Delta\theta_{0.5}} \quad \text{Ec. 2.48}$$

En el caso del método de interrogación espectral se emplea una fuente policromática con el ángulo de incidencia fijo y como detector se usa un espectrómetro [42]; caso contrario al método anterior (interrogación angular) en donde la condición de resonancia de plasmón superficial está codificado en una longitud de onda de resonancia (λ_{SPR}) característica fija.

Este método es frecuentemente implementado cuando se utilizan fibras ópticas como acopladores y que será descrito en el siguiente Capítulo 3. De acuerdo a lo que se expresa en la referencia [43], los sistemas en interrogación espectral en prisma alcanzan una resolución de 2×10^{-5} RIU (@ $\lambda = 630$ nm) menor que en interrogación angular con resolución de 5×10^{-7} RIU. Sin embargo, la resolución depende en gran medida de la precisión con la que es monitoreado el sistema; por ende el ruido de los componentes electrónicos y ópticos presentes dentro del sistema limita esta característica.

2.3. Sistemas SPR comerciales

Los sistemas SPR comerciales están diseñados, en su mayoría, siguiendo la configuración Kretschmann acoplados por prisma, llegando a ser el instrumento de laboratorio ideal para el análisis de interacciones moleculares [44][45]; porque ofrece gran robustez con un alto rendimiento y sensibilidad. El primer sistema SPR comercial fue un biosensor lanzado en 1990 por Biacore International AB [46] que ha logrado posicionarse como la empresa líder de sistemas comerciales de SPR. De acuerdo a la definición de biosensor: “dispositivos analíticos comprendidos de un elemento biológico (enzimas, anticuerpos, células receptoras, organelos) y un transductor fisicoquímico” [47]; los sistemas SPR de biosensado comerciales se caracterizan por incorporar en su estructura una interfaz biológica funcionalizada sobre la superficie de metal con receptores superficiales que permita la unión de moléculas [48]. Además, algunos sistemas SPR tienen integrados sistemas de microfluído, cuyos canales dirigen el fluido de la muestra hasta la superficie de detección del acoplador SPR [49].

El desarrollo de sistemas SPR de laboratorio implica grandes retos para los fabricantes, ya que se busca reducir la manipulación del sistema por parte del usuario ofreciendo sistemas automatizados que permitan al usuario programar el control instrumental desde los parámetros ópticos, hasta los tiempos en el sistema de inyección y bombeo de las muestras líquidas en las celdas de flujo [50]. Uno de los grandes factores que afectan los sistemas de medición es la temperatura aún más cuando se trata de medir el índice de refracción; como en el caso de los sensores SPR [51], es por ello que se incorporan sistemas con una respuesta rápida capaces de controlar las variaciones de temperatura presentes en el proceso de análisis. Por otra parte, existe gran interés en la implementación de algoritmos para el tratamiento de

datos que contribuyan a mejorar los programas de análisis de datos del sistema SPR para poder obtener rápidamente la interpretación de los resultados. Hasta ahora un instrumento de laboratorio SPR en el mercado brinda una resolución de 2×10^{-7} RIU [52].

Las ventajas de los biosensores SPR comerciales es la detección en tiempo real, sin etiqueta, y la alta sensibilidad que se alcanza gracias al diseño de su interfaz. Un biosensor de resonancia de plasmón superficial es capaz de medir la unión entre moléculas de analitos objetivos y moléculas receptores inmovilizados sobre la película delgada de metal. Durante la unión receptor-analito, el cambio en la caída en el espectro de reflexión es monitoreada en el tiempo, así la información cinética de la interacción entre moléculas es posible.

No obstante estos adelantos, existe gran interés en el desarrollo de instrumentos SPR de bajo costo, compactos y portables [53]; en algunas aplicaciones no se va más allá del análisis de la interacción molecular en un ambiente de laboratorio pues se requieren de sistemas capaces de ejecutar un rápido análisis. Existen aplicaciones específicas donde es requerido llevar al sitio de análisis el instrumento, sobre todo en aplicaciones industriales. Algunas compañías han desarrollado sistemas portables SPR con componentes electrónicos y ópticos integrados en una sola estructura, operando con baterías durante períodos largos de trabajo e interfaz gráfica de usuario. En contraste a los SPR de laboratorio estos dispositivos son poco robustos y con una sensibilidad menor, limitándose a la detección de pequeñas moléculas; aun así los sistemas portables SPR han reportado una resolución de 1×10^{-6} RIU [54].

Adicionalmente, existen compañías que brindan sistemas SPR basados en microscopia, estos sistemas incorporan cámaras con dispositivos de carga acoplada (CCD) como elemento detector del sistema [47]; proporcionan una caracterización de alto rendimiento en las interacciones moleculares, información cinética y de especificidad. Estos sistemas poseen una similitud con los SPR de laboratorio, sin embargo son adecuados para la detección de múltiples analitos simultáneamente con una metodología de procesamiento de la señal diferente y reflejando una sensibilidad menor.

En la Tabla 2.1 se presenta una recopilación de los sistemas SPR que existen en el mercado con su respectivo fabricante y características principales, se encuentran clasificados de acuerdo a la modalidad en su diseño.

Instrumento SPR	Empresa	Características clave
Laboratorio		
Biacore	GE Life Sciences	Una gama amplia de instrumentos SPR para diferentes aplicaciones de ciencias de la vida. https://www.biacore.com/lifesciences/index.html
BL-SPR 1000	Biosensing instruments	Alta resolución angular. http://biosensingusa.com/
SR7500 DC	Reichert	Sensibilidad en la detección de pequeñas moléculas. https://www.reichertspr.com/products/surface-plasmon-resonance-systems/reichert-2spr/
SensiQ	Nomadic Inc.	Modulo para el control de temperatura (Peltier) Sofisticados métodos de inyección de muestras líquidas. https://www.fortebio.com/spr-biosensors.html
SPR Navi	Bionavis	Estudios SPR multi-paramétricos. http://www.bionavis.com/en/life-science/products/
SPR lab	KMAC	Alta sensibilidad. Amplio rango dinámico. http://www.kmac.com/eng/ds3_1_1.html
Multiskop	Optrel GBR	Sistemas con módulos simples combinando diferentes arreglos ópticos. http://www.optrel.de/
SPR 100	Thermo	Configuración en longitud de onda, acopado a información espectroscópica FTIR-IR Thermo. https://www.thermofisher.com/antibody/product/SPR-Antibody-clone-OT12C6-Monoclonal/CF501963
Portable		
SPREETA	Texas instruments	Dispositivos de bajo costo y compactos. Dimensiones de 1.5 cm x 0.7 cm x 3 cm. http://www.ic72.net.cn/pdf_file/t/2035.pdf
SPR micro	KMAC	Con interfaz de usuario fácil de emplear. http://www.kmac.com/eng/products.php?cid=sprmicro
SPIRIT	Seattle Sensor Systems	Análisis múltiples con portables multicanales. Peso ligero. http://www.seattlesensors.com/
Biosuplar 6	Analytical μ -systems	Configuración flexible, adaptable con otras técnicas. http://www.biosuplar.com/
Imagen		
FlexChip	Biacore	Basado en rejilla.

		Perfilado simultaneo hasta 400 iteraciones de proteínas. https://www.biacore.com/lifesciences/index.html
SPR imager II	GWC technologies	Escaneo en longitud de onda. Control manual del ángulo de incidencia. http://sprimager.com/gwclmaging.htm
IBIS-MX96	IBIS technologies	Uso del detector de flujo multicanal, ángulo de escaneo de alta sensibilidad. https://www.ibis-spr.nl/product/ibis-mx96/
Plasmon Imager	Graddinity	Escaneo en longitud de onda, identificación de fármaco utilizando un enfoque basado en fragmentos.
SPRi	KMAC	Ajuste manual del ángulo de incidencia. http://www.kmac.com/eng/products.php?cid=spr

Nota Fuente: Adaptado de [55]

Tabla 2. 1 Instrumentos SPR comerciales con características claves.

2.4. Micro-acopladores de fibra óptica

En la teoría de rayos, la propagación de la luz en una fibra óptica multimodo se puede describir mediante al fenómeno de TIR dentro del núcleo (n_1). La luz, acoplada en el núcleo de la fibra óptica, incide en la interfaz núcleo-revestimiento y en cada reflexión una fracción de su energía penetra en el revestimiento (n_2), como onda evanescente [56]. La profundidad del campo evanescente es menor a 100 nm por lo que los modos de revestimiento de la fibra óptica se ven afectados débilmente; por otra parte los modos del núcleo no son afectados. Si la onda evanescente es expuesta, de tal forma que sea capaz de interactuar con un medio externo distinto al revestimiento, la onda evanescente puede ser absorbida o esparcida por el medio externo y como resultado la amplitud de la onda de propagación sufrirá atenuación. Si se prescinde del revestimiento de la fibra óptica la condición de la TIR se cumplirá en una interfaz núcleo-medio externo, como se muestra en la Figura. 2.5.



Figura 2. 5 Propagación de la luz en una fibra óptica y el fenómeno de reflexión total interna.

Bajo este principio se ha logrado desarrollar sensores refractométricos de fibra óptica por campo evanescente [57], capaces de detectar cambios del índice de refracción en el medio externo. No obstante, estos sensores presentan sensibilidades bajas que limitan su uso en aplicaciones en las que se requiere alta sensibilidad como en la detección química y/o biológica. En la sección anterior se discutió que el fenómeno de la resonancia de plasmón superficial es una técnica refractométrica altamente sensible [58] con la que es incluso posible sensor gases [59], que si logra integrarse en una fibra óptica bajo la configuración Kretschmann-Raether ofrece la posibilidad de mejorar la sensibilidad los sensores de índice de refracción de fibra óptica. Como se describió en la sección anterior en un sistema de SPR se requiere de un acoplador con el que sea posible igualar el vector de onda de la luz y del plasmón. En 1993 Jorgenson and Yee demostraron que era posible construir un sensor basado en la SPR usando una fibra óptica multimodo con núcleo expuesto sobre la que se depositó una película delgada de oro[60]. A partir de ese primer intento exitoso se han propuesto un número importante de sensores de fibra óptica [61], [62] que explotan el fenómeno SPR para medir índice de refracción, temperatura, la presencia de ciertos gases o compuestos orgánicos volátiles, concentraciones de ciertos solutos en soluciones, contaminantes en agua, por mencionar algunos. En estos esquemas se han utilizado fibras ópticas multimodo[63], monomodo[64], de cristal fotónico [65][66], o rejillas de Bragg inclinadas [67]. En todos estos esquemas es imprescindible que haya campo evanescente expuesto, es decir que el confinamiento de luz se dé entre el núcleo o el revestimiento de la fibra óptica y el medio externo. Ya que esto no ocurre de manera natural en una fibra óptica, porque la luz está confinada en el núcleo gracias a la presencia del revestimiento. Para lograr que el campo

evanescente se extienda fuera de la frontera de la fibra óptica y penetre dentro del medio externo se han propuesto diferentes estrategias, procedimientos para modificar la estructura de la fibra óptica y en consecuencia la propagación de la luz. Entre los más comunes se puede mencionar el ataque químico para remover el revestimiento y dejar el núcleo de la fibra óptica expuesto, pulir la fibra óptica para remover parcialmente el revestimiento, el adelgazamiento de la fibra óptica, el uso de dispositivos en los que la luz que se propaga por el núcleo se acopla al revestimiento, fibras microestructuradas en donde el campo evanescente se extiende dentro de los agujeros del revestimiento. Aunque los sensores de SPR que usan fibras ópticas multimodo presentan ciertas desventajas como la inestabilidad en la respuesta del sensor debido a las variaciones en la polarización de la luz y a la conversión de modos debido a doblamientos o defectos en la fibra óptica, estos esquemas son altamente utilizados. En la configuración Kretschmann-Raether de la Figura. 2.2, el prisma es sustituido por micro-acopladores de fibra óptica [68]. La diferencia más evidente en la migración del tipo de acoplador son las dimensiones logrando con ello una miniaturización en los sistemas SPR. Los sensores de índice de refracción de fibra óptica basados en el fenómeno SPR proporcionan una técnica de medición bastante sensible [69]. No obstante, la geometría del acoplador de fibra óptica es un parámetro que influye en la mejora de la sensibilidad como parte fundamental en la excitación del plasmón superficial, pues se encarga de proveer la profundidad de penetración del campo evanescente que es acoplada.

Los micro-acopladores son dispositivos que surgen a partir de una modificación en la geometría de la fibra óptica en una sección de unos cuantos milímetros, sus dimensiones como su nombre lo expresa se encuentran en la escala micrométrica ($<100 \mu\text{m}$). Dichos dispositivos permiten exponer el campo evanescente para lograr una mayor profundidad de penetración, estableciendo así un acoplamiento (interacción) de la luz al medio externo (película delgada de metal) adyacente a la sección de fibra óptica modificada.

A continuación se detalla la estructura y características de algunos micro-acopladores de fibra óptica aplicados en el desarrollo de sensores basados en SPR.

2.4.1. Fibras ópticas con núcleo expuesto: remoción total del revestimiento

A diferencia del diseño de Kretschmann en prisma, la superficie de detección en una fibra óptica no es una superficie plana sino curva; donde el revestimiento es removido hasta dejar el núcleo expuesto al medio externo, como se observa en la Figura 2.6. El proceso de remoción de una sección revestimiento es a través de ataque químico, la sección a remover se sumerge en ácido fluorhídrico en una concentración de 16.3 % aproximadamente por 30 minutos [70]. El diámetro de este micro-acoplador se establece de acuerdo al tipo de fibra óptica, en una fibra multimodo su valor es de aproximadamente 62.5 μm (diámetro del núcleo).

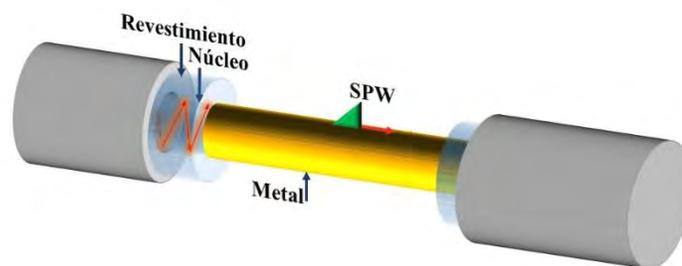


Figura 2. 6 Representación de un sensor SPR con acoplador de fibra óptica con núcleo expuesto.

Diferentes rayos, asociados a los modos de propagación, se reflejan en la frontera fibra óptica y la superficie de la película metálica; cuando la condición de resonancia se cumple a la longitud de onda correspondiente la intensidad del haz reflejado disminuye, como consecuencia del acoplamiento de la energía del campo evanescente al plasmón superficial. Estos micro-acopladores de SPR presentan una sensibilidad de 2780 nm/RIU [71] en la medición de cambios de RI a través de la interrogación espectral.

2.4.2. Fibras ópticas pulidas en D: remoción parcial del revestimiento

Para la fabricación de un micro-acoplador en forma-D generalmente se utiliza fibra óptica monomodo. El revestimiento es parcialmente removido en un lado de la fibra óptica mediante el proceso de pulido hasta una distancia cercana al núcleo, permitiendo exponer el campo evanescente de los modos guiados al medio externo [72]. Una película delgada de metal se

deposita sobre la sección plana de la fibra óptica [73], en la Figura 2.7 se ilustra dicho dispositivo.

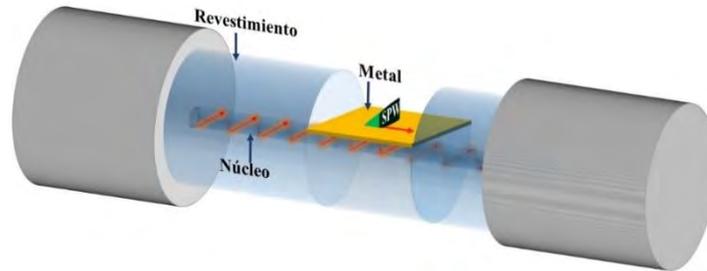


Figura 2.7 Representación de un sensor SPR con acoplador de fibra óptica pulida en D.

Al igual que en el micro-acoplador anterior parte de la energía de la luz que se propaga en el núcleo de la fibra óptica se acopla al plasmón, en la sección de fibra óptica pulida y decorada con la película de oro. El desarrollo de dispositivos de SPR con este micro-acoplador ha reportado una sensibilidad de 3,200 nm/RIU en la medición de cambios de índice de refracción, [74]. Este dispositivo es altamente sensible a la polarización de la luz.

2.4.3. Fibra óptica adelgazada o taper

Un taper en fibra óptica involucra reducir el diámetro de la fibra óptica en una sección que puede ir desde 1mm hasta 50 mm, manteniendo la proporción entre el diámetro del núcleo y el del revestimiento, bajo un proceso de calentamiento de la sección deseada con una fuente de calor lo más puntual posible mientras se tira de los extremos de la fibra óptica. Las fuentes de calor pueden ser una flama de un quemador de gas, láser de CO₂ enfocado o un arco eléctrico formado por dos electrodos.

Una estructura de taper bicónica como la que se muestra en la Figura 2.8, consta de dos secciones cónicas idénticas y una región central de diámetro uniforme (cintura). En la primera transición (z_0) la reducción gradual del diámetro de la fibra óptica cambia las condiciones de TIR para los diferentes rayos. Esto provocará que algunos de ellos dejen de propagarse por el núcleo y viajen por el revestimiento, y en la región de diámetro uniforme de (L) la TIR generará campo evanescente en la frontera con el medio externo. Finalmente, la transición (z_1) la luz se reacopla al núcleo de la fibra óptica y los rayos con sus ángulos

iniciales se propagan hacia la salida de la fibra óptica [75]. En la región central uniforme, una película delgada de metal noble es depositada sobre la superficie consiguiendo así la configuración Kretschmann para el acoplamiento de la onda evanescente con el plasmón superficial.

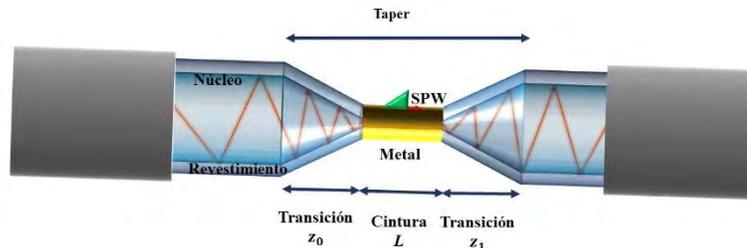


Figura 2. 8 Representación de un sensor SPR con acoplador de fibra óptica adelgazada.

La geometría cónica ha mostrado aumentar la intensidad del campo evanescente en la región adelgazada, pues la interfaz núcleo-revestimiento se redefine; es decir, el revestimiento pasa a ser núcleo y por lo tanto el medio externo es el revestimiento, permitiendo que el campo evanescente interactúe con el medio externo. Utilizando la teoría de rayos, el número de reflexiones incrementa debido a la disminución del ancho de la cintura [76], lo que conlleva a exhibir una mayor potencia del campo evanescente. El desarrollo de SPR en taper ha alcanzado en la medición de RI una sensibilidad de 11,800 nm/RIU [77].

Los refractómetros de fibra óptica descritos en este capítulo son ejemplos exitosos de sensores altamente sensibles, que además han sido utilizados para desarrollar sensores químicos y biológicos. La metodología desarrollada para fabricar estos microacopladores ha sido también un logro técnico y de ingeniería que ha dado como resultados la creación de empresas que se dedicaron a perfeccionarlos. Sin embargo, estos dispositivos tienen el inconveniente de que son frágiles, debido a la modificación de la estructura, lo que complica la manipulación y demanda el uso de monturas y herramientas especiales. Existen otro tipo de dispositivos basados en la interacción del campo evanescente que no implican la reducción del diámetro original de la fibra óptica, como las rejillas de periodo largo o las estructuras compuestas por fibras multimodo y monomodo alternadas, por mencionar algunas, que aunque tienen una menor sensibilidad son más robustos y fáciles de manejar. En la Tabla 2.2 se muestran las sensibilidades de algunos dispositivos de campo evanescente con SPR en la medición de índice de refracción.

Configuración del dispositivo con campo evanescente expuesto para la SPR.	Sensibilidad (nm/RIU)	Intervalo de medición RI	Ref.
Núcleo expuesto	2000-6666.67*	1.333-1.404	[60]
Pulido en D	1523.5 *	1.320-1.340	[78]
Taper	4300 *	1.3252-1.3905	[77]
Heteronúcleo	1183.22-5756.74*	1.333-1.398	[79]

Tabla 2. 2. Sensibilidades de diferentes configuraciones de FO con campo evanescente en SPR. *Ajuste de un polinomio de segundo orden *Ajuste lineal

CAPÍTULO 3. REFRACTÓMETRO DE FIBRA ÓPTICA BASADO EN LA RESONANCIA DE PLASMON SUPERFICIAL

3.1. La estructura de fibra óptica MM-SM-MM

La estructura multimodo-monomodo-multimodo (MM-SM-MM) de fibra óptica también conocida como estructura heteronúcleo, es un dispositivo de fibra óptica con campo evanescente expuesto como se muestra en la Figura 3.1. El dispositivo consta de una sección de fibra monomodo (SM) entre dos secciones de fibra multimodo (MM) que se fabrican utilizando solamente una cortadora y una empalmadora de fusión comerciales [80].

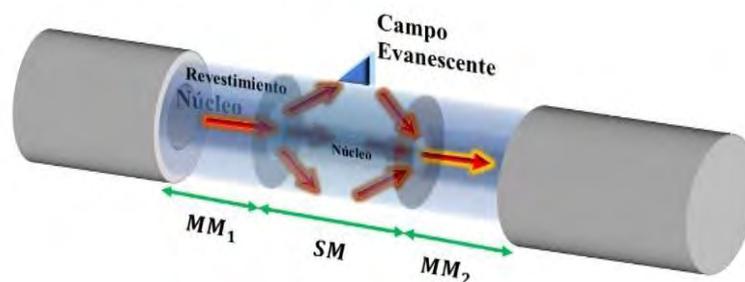


Figura 3. 1. Estructura MM-SM-MM de fibra óptica

El principal objetivo de este desajuste es la propagación de la luz en el revestimiento de la sección SM y la generación de campo evanescente expuesto. Su principio de funcionamiento se puede explicar como: i) la luz se propaga a través de la sección MM₁, ii) debido a la diferencia en los diámetros del núcleo de la fibra MM₁ y SM que observa la luz en la frontera; pasando de un diámetro de núcleo mayor a uno menor (en la Tabla 3.3. se presentan los diámetros de núcleo de cada fibra óptica utilizada en este trabajo), una parte de la potencia se acopla a los modos de revestimiento de la fibra SM mientras que otra porción se guía en el núcleo como modos del núcleo, iii) finalmente en el punto de empalme SM-MM₂ los modos de revestimiento y núcleo de la SM son acoplados a los modos del núcleo de la fibra MM₂ [81]. La reflexión total interna de los modos de revestimiento se encuentra determinado por la condición de frontera en la diferencia entre el índice de refracción ($n_{\text{revestimiento}}$) del

revestimiento y del medio externo (n_{medio}), los modos del revestimiento para mantenerse confinados se requiere se cumpla que $n_{\text{medio}} < n_{\text{revestimiento}}$. Debido a esto la sección SM se desempeña como una región de detección donde el campo evanescente es expuesto e interacciona con el medio externo, en caso de que $n_{\text{medio}} \approx n_{\text{revestimiento}}$ o $n_{\text{medio}} > n_{\text{revestimiento}}$ los modos de revestimiento no cumplen la condición de reflexión total interna y se transmitirán al medio externo sin poder acoplarse nuevamente a la estructura de fibra óptica. Esta estructura de fibra óptica es ideal para el desarrollo de sensores de RI, tal como lo demuestran en [82] [83].

Al cubrir el revestimiento de la sección SM de la estructura heteronúcleo con una película delgada de metal (Au, Ag, Cr, o Al) de espesor d se genera la condición para la resonancia de plasmón superficial sobre fibra óptica, como una analogía de la configuración Kretschmann-Raether en prisma (ver Figura 3.3). Sin embargo, en una fibra óptica es prácticamente imposible controlar el ángulo de incidencia de la luz en la frontera revestimiento-medio externo, por lo que la interrogación angular no es viable. Por otro lado, la señal de salida de la estructura MM-SM-MM está compuesta por la energía de cada uno de los modos que se propagan por la fibra óptica por lo que la medición de intensidad tampoco nos provee información sobre la resonancia. De esta consideración se determina que el método de interrogación espectral es el más adecuado para monitorear la respuesta del sensor SPR. En este caso se utiliza una fuente de luz de amplio espectro y un analizador de espectros ópticos. La luz acoplada en la fibra óptica multimodo se distribuye en un número de modos del núcleo, que se pueden calcular de acuerdo a la relación:

$$\text{No. de modos} \approx \frac{V^2}{2}, \quad V = \frac{2\pi a \sqrt{n_1^2 - n_2^2}}{\lambda} \quad \text{Ec. 3.1.}$$

En donde a es el radio del núcleo de la fibra multimodo. Al pasar a la sección SM estos modos se acoplarán tanto a modos del núcleo como del revestimiento, en nuestro caso estos últimos se analizarán como rayos que tienen un ángulo de incidencia mayor al ángulo crítico respecto a la normal en la interfaz revestimiento-metal, como se observa en la Figura 3.2. En cada una de las reflexiones de los rayos, en la frontera revestimiento fibra SM y medio externo, la presencia del campo evanescente puede dar lugar a una respuesta plasmónica.

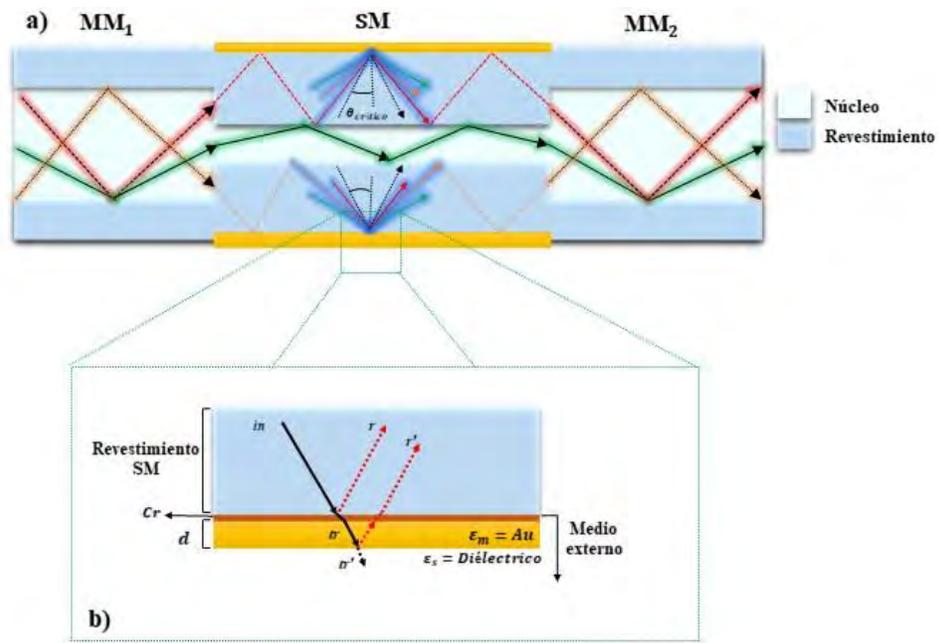


Figura 3. 2. Acoplamiento de la luz en la estructura MM-SM-MM.

En la Figura 3.2. b), se observa como un haz incide (in) en la interfaz revestimiento-medio externo y una porción de su energía es transmitida (tr) y otra reflejada (r); esto ocurre en cada reflexión del haz transmitido. La luz reflejada por la interfase hacia el revestimiento será la que se registre como la potencia transmitida en el extremo de la FO MM_2 con un espectrómetro. A una determinada longitud de onda, conocida también como longitud de onda de resonancia (λ_{SPR}), se observará una pérdida en la potencia transmitida como resultado de la condición de resonancia de plasmón superficial que dependerá del medio externo adyacente a la sección SM . Esta hipótesis permite suponer que es posible utilizar esta estructura robusta para el desarrollo de refractómetros de fibra óptica basados en SPR [84]. Su funcionamiento como sensor ha sido demostrado en diversas áreas, como la medición de concentraciones de sacarosa, importante en la industria de alimentos y bebidas [85], el monitoreo del agua en el subsuelo usada para la agricultura [86] y la detección de concentraciones de hidrógeno en seguridad ambiental [87].

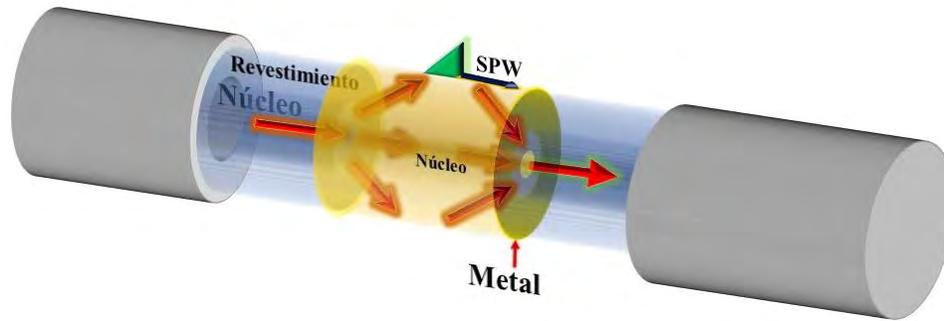


Figura 3. 3. Representación de un sensor SPR en fibra óptica basado en una estructura MM-SM-MM.

Contrario a los micro-acopladores de fibra óptica discutidos en la sección 2.4; la estructura MM-SM-MM de fibra óptica es más robusta, fácil de fabricar y con una mayor reproducibilidad. Esta estructura heteronúcleo no requiere la remoción del revestimiento o reducir su diámetro para exhibir el campo evanescente al medio externo. En los micro-acopladores en los que se reduce el diámetro de la fibra óptica la resistencia mecánica de la estructura se debilita, además los procesos de fabricación son más complicados y se dificulta la manipulación de las fibras por su escala micrométrica, por lo tanto su reproducibilidad se vuelve relativamente complicada.

3.2. Modelo teórico utilizado en la simulación de la SPR en la estructura MM-SM-MM

3.2.1. Sistema multicapa (N-capas)

Para analizar el comportamiento de la luz que se propaga en el revestimiento de la fibra SM en la estructura heteronúcleo que se usará en este trabajo, mostrada en la Figura 3.3, se utilizará el método de matriz de transferencia para una estructura de N-capas (Figura 3.2 b). Cuando un haz de luz que viaja a través de una estructura formada por N-capas de medios arbitrarios, perpendiculares al eje z del sistema coordinado mostrado en la Fig. 3.4, con constante dieléctrica (ϵ_N) o índice de refracción (n_N), espesor (d_N) y permeabilidad (μ_N); una porción del haz incidente en cada una de las interfaces de la estructura será reflejado (Figura 3.4).

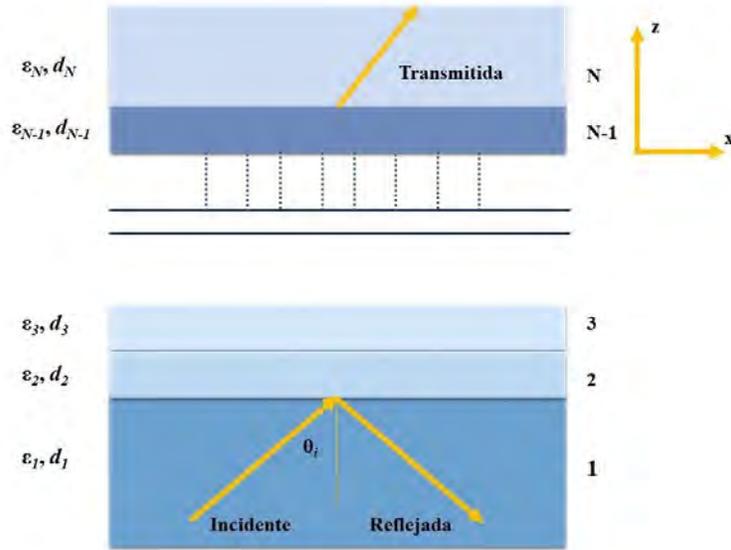


Figura 3. 4. Esquemático de una estructura de N capas, de diferentes espesores y diferentes materiales ópticos.

En el análisis de la reflectancia de una película delgada (espesor d) entre dos sustratos (medios dieléctricos) [88] se considera que la onda incide, en la interfaz **1** (entre revestimiento y metal), a un ángulo θ_{i1} . La componente del vector de campo eléctrico (**E**) como magnético (**H**) paralelos a las interfaces son continuos en la interfaz, es decir:

$$E_1 = E_{i1} + E_{r1} = E_{t1} + E'_{r2} \quad \text{Ec. 3.2.}$$

donde E_{i1} , E_{r1} , E_{t1} son las amplitudes del campo eléctrico de la onda incidente, reflectada y transmitida en **1**, respectivamente; E'_{r2} es la amplitud del campo eléctrico de la onda reflejada de la interfaz **2** (entre metal-medio dieléctrico) que incide en la interfaz **1**. Para la condición del campo H en la interfaz **1** se tiene que:

$$H_1 = \sqrt{\frac{\epsilon_1}{\mu_1}}(E_{i1} - E_{r1})n_1 \cos\theta_{i1} = \sqrt{\frac{\epsilon_1}{\mu_1}}(E_{t1} - E'_{r2})n_2 \cos\theta_{i2} \quad \text{Ec. 3.3.}$$

siendo θ_{i1} , θ_{i2} los ángulos de incidencia de los haces en el la interfaz **1** y **2**, respectivamente. Donde E y H están relacionadas por el vector de propagación κ como:

$$H_1 = \sqrt{\frac{\epsilon_1}{\mu_1}}n_1 \kappa E_1 \quad \text{Ec. 3.4.}$$

Para la segunda interfaz (**2**) la condición de continuidad en la interfaz se expresa como:

$$E_2 = E_{i2} + E_{r2} = E_{t2} \quad \text{Ec. 3.5.}$$

$$H_2 = \sqrt{\frac{\varepsilon_1}{\mu_1}} (E_{t2} - E'_{r2}) n_2 \cos \theta_{i2} = \sqrt{\frac{\varepsilon_1}{\mu_1}} E_{t2} n_3 \cos \theta_{t2} \quad \text{Ec. 3.6.}$$

donde E_{i2} , E_{r2} , E_{t2} son las amplitudes del campo eléctrico de la onda incidente, reflectada y transmitida en **2**, respectivamente, y θ_{t2} es el ángulo de refracción en la interfaz **2**.

Cuando una onda cruza una película de espesor d_2 ocurrirá un cambio en la fase expresándose como:

$$\beta_2 = \frac{2\pi d_2}{\lambda} (\varepsilon_2 - n_1^2 \cos^2 \theta_1)^{1/2} \quad \text{Ec. 3.7.}$$

La ecuación del campo en la interfaz **2** puede expresarse como:

$$E_{i2} = E_{t1} e^{-i\beta_2} \quad \text{Ec. 3.8.}$$

$$E_{r2} = E'_{r2} e^{i\beta_2} \quad \text{Ec. 3.9.}$$

Por lo tanto, la Ec. 3.5 y 3.6 se puede reescribir como:

$$E_2 = E_{t1} e^{-i\beta_2} + E'_{r2} e^{i\beta_2} \quad \text{Ec. 3.10.}$$

$$H_2 = \sqrt{\frac{\varepsilon_1}{\mu_1}} (E_{t1} e^{-i\beta_2} - E'_{r2} e^{i\beta_2}) n_2 \cos \theta_{i2} \quad \text{Ec. 3.11.}$$

Resolviendo para E_{t1} y E'_{r2} de Ec. 3.10 y 3.11 y sustituyendo en Ec. 3.2 y 3.3 estos valores se obtiene que:

$$E_1 = E_2 \cos \beta_2 - H_2 (i \sin \beta_2) / q_2 \quad \text{Ec. 3.12.}$$

$$H_1 = E_2 q_2 (-i \sin \beta_2) + H_2 (\cos \beta_2) \quad \text{Ec. 3.13.}$$

$$q_2 = \frac{(\varepsilon_2 - n_1^2 \sin^2 \theta_{i1})^{1/2}}{\varepsilon_2}$$

Y la Ec. 3.12 y 3.14 pueden escribirse juntas en notación matricial como:

$$\begin{bmatrix} E_1 \\ H_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\beta_k & \frac{-i\sin\beta_k}{q_k} \\ -iq_k\sin\beta_k & \cos\beta_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_2 \\ H_2 \end{bmatrix}$$

Ec. 3.14.

$$m = \begin{bmatrix} \cos\beta_k & \frac{-i\sin\beta_k}{q_k} \\ -iq_k\sin\beta_k & \cos\beta_k \end{bmatrix}$$

Los campo tangenciales en la primera frontera, $z = z_1 = 0$, se encuentra relacionados con los presentes en la última frontera, $z = z_{N-1}$, como:

$$\begin{bmatrix} E_1 \\ H_1 \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} E_{N-1} \\ H_{N-1} \end{bmatrix}$$

Ec. 3.15.

donde, E_1 es la componente del campo E y H_1 la componente del campo H en la primera capa; mientras que E_{N-1} y H_{N-1} son para la capa N. Para el caso general de una estructura de N capas, la matriz característica es el producto de las matrices individuales tomadas en un orden correcto [89]:

$$M = \prod_{k=2}^{N-1} m_k = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix}$$

Ec. 3.16.

$$q_k = \sqrt{\frac{\mu_k}{\epsilon_k}} \cos\theta_k = \frac{\sqrt{(\epsilon_k - n_1^2 \sin^2 \theta_1)}}{\epsilon_k}$$

$$\beta_k = \frac{2\pi}{\lambda} n_k \cos\theta_k (z_k - z_{k-1}) = \frac{2\pi d_k}{\lambda} \sqrt{(\epsilon_k - n_1^2 \sin^2 \theta_1)}$$

La interacción de la luz a través de las N-capas con polarizada-p; implica que la amplitud del coeficiente de reflexión de la luz incidente este dada como:

$$r_p = \frac{(M_{11} + M_{12}q_N)q_1 - (M_{21} + M_{22}q_N)}{(M_{11} + M_{12}q_N)q_1 + (M_{21} + M_{22}q_N)}$$

Ec. 3.17.

donde el coeficiente de reflexión (reflectancia) de esta dado por:

$$R_p = |r_p|^2$$

Ec. 3.18.

3.2.2. Modelo teórico de la SPR en fibra óptica

El análisis numérico a partir del modelo teórico de la SPR en fibra óptica (FO), permite elegir los parámetros de diseño para la fabricación de los dispositivos SPR de fibra óptica, tales como el espesor de la película delgada de metal, la longitud de la sección SM (L_{SM}) o el intervalo de índices de refracción de operación del cual se puede disponer. La sección SM de la estructura MM-SM-MM, es un sistema que comprende 3 capas (Figura 3.2 b)) con sus respectivas constantes dieléctricas y la reflectancia (R_p) en esta estructura puede obtenida del modelo de N-capas de la sección anterior. A continuación, son descritos los diferentes medios del sistema:

Capa 1: sustrato de transmisión óptica con un índice de refracción n_1 , en este caso el revestimiento de la fibra SM. El índice de refracción varía con la longitud de onda de acuerdo a la relación de dispersión Sellmeier [90] como:

$$n_1(\lambda) = \sqrt{1 + \frac{a_1\lambda^2}{\lambda^2 - b_1^2} + \frac{a_2\lambda^2}{\lambda^2 - b_2^2} + \frac{a_3\lambda^2}{\lambda^2 - b_3^2}} \quad \text{Ec. 3.19.}$$

λ es la longitud de onda en μm y los coeficientes de Sellmeier a_1, a_2, a_3, b_1, b_2 y b_3 (ver Tabla 3.1).

Coficiente de Sellmeier	SiO ₂ dopado con Flúor
a_1	0.6968
a_2	0.06840
a_3	0.4079
b_1	0.1162
b_2	0.8975
b_3	9.896

Tabla 3. 1. Coficiente de Sellmeier

Capa 2: una película delgada metálica con constante dieléctrica compleja y con espesor d_N menor a la longitud de onda de la luz incidente. La constante dieléctrica de un metal puede ser calculado, de acuerdo al modelo de Drude como:

$$\varepsilon_m(\lambda) = \varepsilon'_m + \varepsilon''_m = 1 - \frac{\lambda^2 \lambda_c}{\lambda_p^2 (\lambda_c + i\lambda)} \quad \text{Ec. 3.20.}$$

λ_c y λ_p son la longitud de colisión y la longitud de plasma, respectivamente; en la Tabla 3.2 se presentan los valores de las longitudes de onda para diversos metales [91].

Coefficientes (μm)	Oro (Au)	Plata (Ag)	Cobre (Cu)	Aluminio (Al)
λ_p	0.16829	0.14541	0.13617	0.10657
λ_c	8.9342	1.7614	4.0852	2.4511

Tabla 3. 2. Coeficientes de longitudes de onda del plasma y colisión @680 nm.

Capa 3: es el medio externo con una conste dieléctrica ε_s (n_s^2) y espesor d_N infinito, parte fundamental para el cumplimiento de la condición de resonancia de plasmón superficial expresada en Ec. 2.4.

Finalmente, en la simulación solamente los rayos meridionales son considerados en la excitación del plasmón superficial y la potencia transmitida normalizada esta expresada en forma general como:

$$P_{trans} = \frac{\int_{\theta_{cr}}^{\pi/2} R_p^{N_{ref}(\theta)} [n_1^2 \sin\theta \cos\theta / (1 - n_1^2 \cos^2\theta)^2] d\theta}{\int_{\theta_{cr}}^{\pi/2} [n_1^2 \sin\theta \cos\theta / (1 - n_1^2 \cos^2\theta)^2] d\theta}; \quad \text{Ec. 3.21.}$$

$$N_{ref}(\theta) = \frac{L_{SM}}{D_{revestimiento} \tan\theta} \quad \theta_{cr} = \sin^{-1}\left(\frac{n_{cl}}{n_c}\right)$$

El ángulo θ respecto a la normal de la interfaz revestimiento-metal, ejerce influencia sobre $N_{ref}(\theta)$ que es el número total de reflexiones en la sección SM, cuyo valor depende de la longitud de la sección SM (L_{SM}) y del diámetro del revestimiento ($D_{revestimiento}$). A partir

de este modelo teórico se puede realizar la simulación del SPR de fibra óptica en la estructura MM-SM-MM; los parámetros de las fibras ópticas seleccionadas se muestran en la Tabla 3.3.

Parámetros de la fibra óptica	SM		MM
	SMF-28 Corning®	SM450 Thorlabs [92]	MMF Corning®
$D_{\text{núcleo}} (\mu\text{m})$	8.2	4.1	62.5
$D_{\text{revestimiento}} (\mu\text{m})$	125	125	125
n_c	1.449	1.46501	1.4492
n_{cl}	1.443	1.46159	1.4474
θ_c	84.700	86.084	87.140

Tabla 3. 3. Parámetros de la fibra óptica.

El modelo teórico que se emplea en este estudio fue originalmente propuesto para la SPR en una fibra multimodo sin revestimiento [89]. La película delgada de oro se deposita sobre el exterior del núcleo de la fibra MM en donde ocurre la interacción con el medio externo. En el caso de la estructura MM-SM-MM, el revestimiento de la sección SM permite la propagación de varios modos, si se recubre con una película delgada de metal el campo evanescente de cada modo contribuye a la excitación del plasmón, bajo este punto de vista podemos considerar que en nuestra aproximación el revestimiento de la SM va a tener el mismo papel que el núcleo de una fibra multimodo sin revestimiento recubierta con una película de metal, esta consideración proporciona una buena aproximación del comportamiento del SPR que nos ayudará en el diseño del dispositivo de fibra óptica. Con el modelo descrito en la sección 3.2.1 se hizo un programa con el que se realizaron varias simulaciones con las que se obtuvieron los espectros SPR en el intervalo de 480-1100 nm, para tres L_{SM} diferentes (5 mm, 10 mm, 15 mm) y cuatro espesores de películas delgadas basadas en Au (20 nm, 30 nm, 40 nm, 50 nm) con un RI del medio externo de 1.3324.

3.3. Discusión de los resultados numéricos

A partir del análisis numérico del modelo teórico, se obtuvieron las curvas teóricas de la Figura 3.5 y 3.6 en las que se observa el espectro de transmisión característico del SPR en fibra óptica MM-SM-MM para tres espesores de película delgada de oro y tres longitudes de la SM (L_{SM}), respectivamente. Se observan variaciones en los parámetros del espectro de transmisión como la longitud de onda, el ancho y la profundidad de la depresión, producidas al modificar los parámetros en el diseño del dispositivo SPR de fibra óptica.

Cuando el espesor de la película delgada aumenta, como se observa en las gráficas de la Figura 3.5 la longitud de onda de resonancia (λ_{SPR}) se desplaza a longitudes largas (*red-shift*) para un RI fijo. Esto nos dice que el espesor de la película delgada nos permite elegir la longitud de onda de resonancia. En la Figura 3.7 se muestra el desplazamiento $\Delta\lambda_{SPR}$ antes mencionado, esto se hace por simplicidad, sobre tres sección L_{SM} distintas se aumenta el espesor de la película de Au y en cada gráfica se toma el desplazamiento de λ_{SPR} , respecto de la longitud de onda de resonancia de la película de 20 nm. Por el contrario, si el espesor de la película delgada Au se mantiene fijo y L_{SM} se aumenta, la longitud de onda de resonancia se mantiene constante variando en la potencia transmitida. Como se observa en la Figura 3.6 para un espesor de 30 nm de Au y para tres L_{SM} diferentes. Esto ocurre también para otros espesores de la película delgada de Au y con diferentes longitudes de L_{SM} .

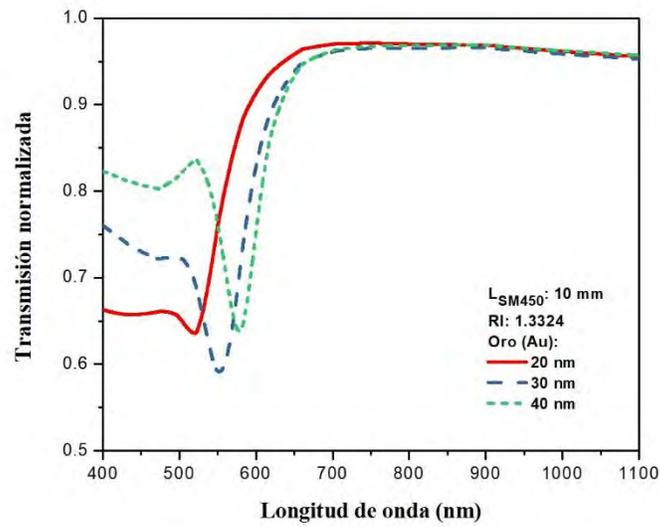


Figura 3. 5. Espectros SPR de transmisión numérico en una estructura MM-SM-MM fibra óptica para tres espesores de película delgada de oro diferente en una sección SM de 10 mm.

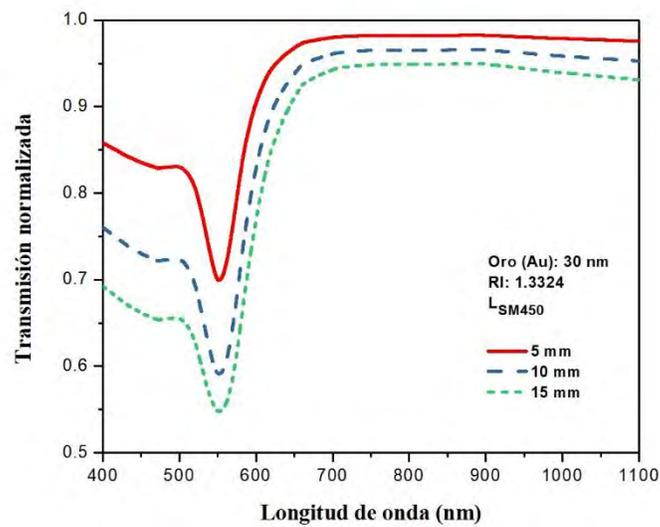


Figura 3. 6. Espectros SPR de transmisión numérico en una estructura MM-SM-MM fibra óptica para tres longitudes SM diferentes con una película delgada con espesor de 30 nm.

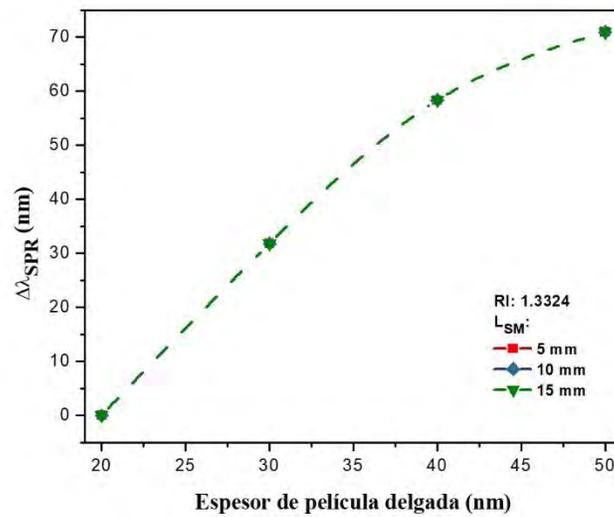


Figura 3. 7. Desplazamiento de la longitud de onda variando el espesor de la película delgada Au en tres sección SM diferentes a un RI de 1.3324.

De acuerdo al gráfico analizado de la Figura 3.6, con un espesor de la película delgada igual a 30 nm y para tres valores de la sección L_{SM} observamos un cambio en la potencia del mínimo. Esto mismo ocurre con otros espesores de la película delgada, como se muestra en la gráfica (Figura 3.8). Esto puede atribuirse a que al aumentar la longitud de la zona sensible L_{SM} se aumenta el número de reflexiones, afectando la potencia transmitida en la salida de la fibra óptica como se observar en la Ec. 3.21.

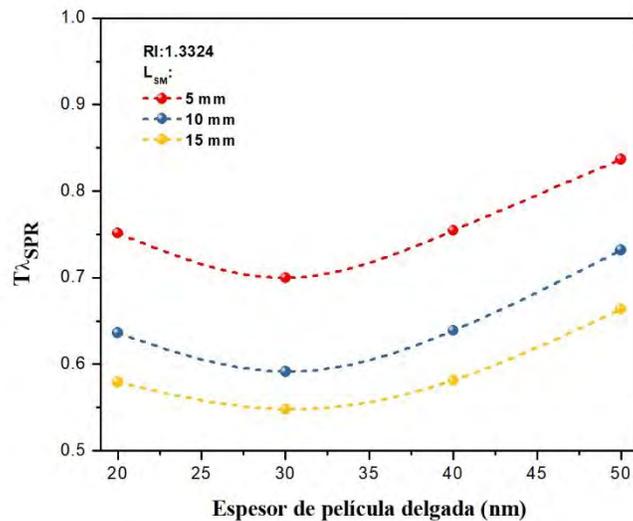


Figura 3. 8. Cambio en la potencia de transmisión de la longitud de onda de resonancia, para diferentes espesores de una película delgada de Au para tres secciones SM distintos a un RI de 1.3324.

Uno de los factores que influyen en la precisión de las mediciones de RI en los dispositivos SPR de fibra óptica es la forma de la depresión del espectro SPR transmitido, este parámetro está estrechamente relacionado con el ancho del espectro. Es deseable, para aumentar la precisión en la medida y la resolución, tener una depresión lo más delgada posible; es decir un ancho pequeño. La profundidad (altura) con el que decae el espectro SPR transmitido se puede medir desde el valor inicial de la potencia (longitudes de onda corta) hasta la potencia mínima (longitud de onda de resonancia). Con esta altura, determinada en potencia transmitida, se aprovecha el parámetro FWHM (FWHM: Full Width High Maximum) con el que es posible describir el ancho de una curva. Este parámetro se obtiene de la diferencia (distancia) entre dos longitudes de onda donde la curva SPR alcanza la mitad del valor de su altura. En la gráfica de la Figura 3.9 se observan los cambios en el ancho espectral ($\lambda_{0.5}$) de los espectros transmitidos, cuando se varían los espesores y la sección L_{SM} .

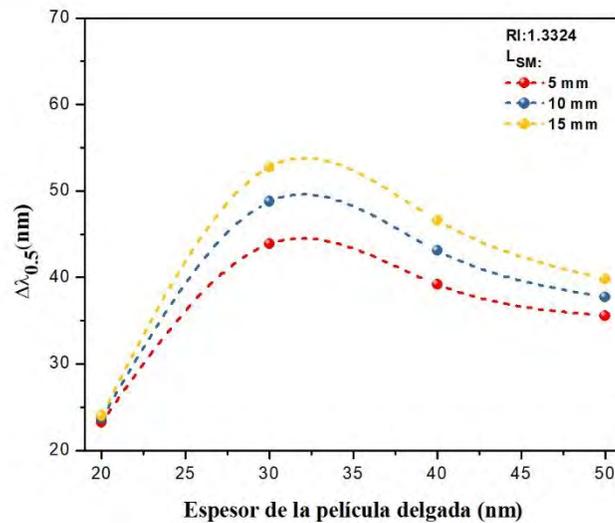


Figura 3. 9. Ancho espectral o FWHM del espectro SPR en sensores con L_{SM} de 5 mm, 10 mm y 15 mm para diferentes espesores de la película delgada de Au

De las gráficas anteriores, se puede observar que la selección de una película delgada de 20 nm de espesor da lugar a espectros de resonancia con anchos espectrales más estrechos para las diferentes secciones L_{SM} , ideal en la precisión de detección en los dispositivos SPR; sin embargo la profundidad del mínimo a través de la potencia transmitida se ve reducida también.

Por otra parte, la elección de un espesor de la película delgada de 50 nm proporciona características similares a las presentadas para un espesor de 20 nm; no obstante la longitud de onda de resonancia que exhibe se encuentra a longitudes de ondas largas, lo que podría ser un inconveniente en el momento de la interrogación del dispositivo SPR, al considerar en el sistema equipos con rangos de operación en el infrarrojo cercano. Por lo tanto, al escoger una película delgada con un espesor de 30 nm se obtiene la longitud de onda de resonancia en el espectro visible facilitando el uso de equipos para el sistema de interrogación para este rango de operación, además la profundidad del mínimo en el espectro de transmisión es mayor aunque el ancho espectral es mayor también en comparación a los demás espesores, no obstante es una elección óptima en el diseño de los dispositivos SPR de fibra óptica para las tres longitudes de la sección SM (5 mm, 10 mm, 15 mm).

3.4. Fabricación de los dispositivos de fibra óptica

Uno de los objetivos en los procesos de fabricación de dispositivos de fibra óptica es garantizar la repetitividad, que sea un proceso simple o de preferencia automático y si es posible de bajo costo. Se presenta una metodología para la fabricación de los dispositivos de fibra óptica basados en la resonancia de plasmón superficial, la que se ha dividido en dos etapas. La primera es una metodología para la fabricación de dispositivos de fibra óptica con campo evanescente expuesto, que tiene la estructura MM-SM-MM propuesto por primera vez por Iga et al [83] con el nombre de heteronúcleo:

1.) Preparación de las fibras multimodo y monomodo. Se utilizaron tramos de FO-MM con una longitud mayor a 60 cm para asegurar que se tuviera suficiente fibra considerando que se realizarían futuros empalmes en sus extremos, si se elige más corta es posible que después se tenga que añadir otro tramo. En este trabajo se utilizó una fibra óptica que tiene dos cubiertas, cubierta 1 es la más exterior con un diámetro de 900 μm (blanca) y la cubierta 2, transparente que tiene 250 μm de diámetro adherida a la superficie del vidrio de la fibra óptica. Se remueven ambas cubiertas protectoras de los extremos de la FO asegurándose que la cubierta 2 deje una sección expuesta de revestimiento ~ 2 cm (Fig. 3.10 a)). Al remover la cubierta 2 en la FO quedan residuos de las cubiertas adheridos al vidrio, por lo tanto es necesario limpiar la sección, en este trabajo se usaron hisopos comerciales de algodón colocados en las puntas de pinzas de precisión de acero inoxidable preferentemente. Se impregnan muy bien de acetona hasta que a simple vista es posible ver el líquido en los hisopos. Después se coloca la fibra entre los hisopos y se presiona, se desplazan los hisopos varias veces por la superficie de la fibra óptica desde donde comienza el polímero hasta la punta. Se recomienda rotar la fibra 90 grados respecto de la posición donde se pasaron los hisopos y volver a limpiar varias veces para asegurar que toda la superficie de la fibra óptica ha sido limpiada. Es recomendable reemplazar los hisopos después de limpiar las dos fibras que se van a unir. Posteriormente, se procede al corte transversal de la FO para asegurar que el extremo de la FO tenga una superficie plana; para ello se utiliza una cortadora de fibra óptica comercial, en este trabajo se utilizó una cortadora de la marca SUMITOMO ELECTRIC

FC-6S. La FO se posiciona en la cortadora asegurándose que el borde de la cubierta 2 esté posicionada en la marca $dx=0$, que generalmente está a un 1 cm de la cuchilla de la cortadora, como se aprecia en la Figura 3.10.b).

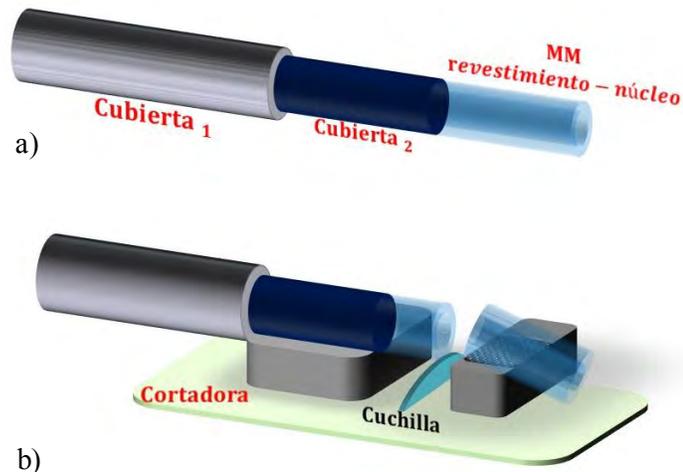


Figura 3. 10. Preparación de la fibra óptica para su empalme, a) remover las cubiertas protectoras, b) Corte de la sección transversal.

Para la fibra SM se repite el mismo proceso que se describió para la MM. Sin embargo, la sección removida de las cubiertas están determinada por el diseño del dispositivo de fibra óptica; es decir, en este trabajo se propone que la longitud SM pelada al menos 1 cm mayor de la L_{SMF} deseada considerando lo que se perderá en futuros cortes en los extremos.

- 2.) **Empalme MM-SM.** Una vez realizado el corte transversal de cada FO se colocan en la empalmadora de fusión, en este trabajo se utilizó Single Fusion Splicer TYPE-Q101-VS de la marca Sumitomo en donde se unirán por calentamiento. El diámetro del revestimiento de ambas FO es de $125 \mu\text{m}$ lo que permiten que sean fusionadas sin problemas con el programa para un empalme MM-MM, que la empalmadora tiene definido en la memoria interna, ya que esta empalmadora realiza la alineación de los motores que posicionan las fibras ópticas haciendo el ajuste de la posición respecto al revestimiento de las fibras ópticas, como se muestra en la Figura 3.11.

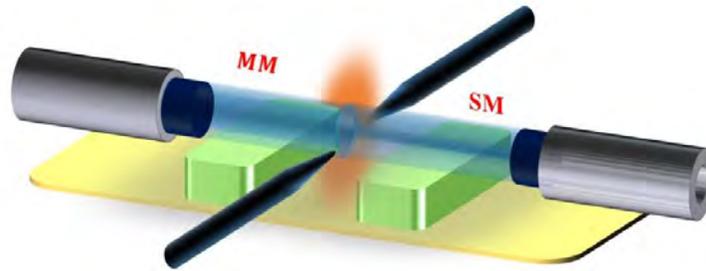


Figura 3. 11. Empalme de las sección MM-SM

3.) Corte de la sección SM. Una vez que las FO SM y MM están unidas, se coloca nuevamente la fibra óptica en la cortadora asegurándose que la cubierta 2 de la FO MM coincida con la posición $dx=0$ de la cortadora, entonces el empalme MM-SM estará posicionado sobre la cuchilla. En una montura de desplazamiento (Thorlabs) se fija la FO-MM y se desplaza un dx igual al valor L_{SM} (5 mm, 10 mm, 15 mm) del diseño del dispositivo, ver Figura 3.12.

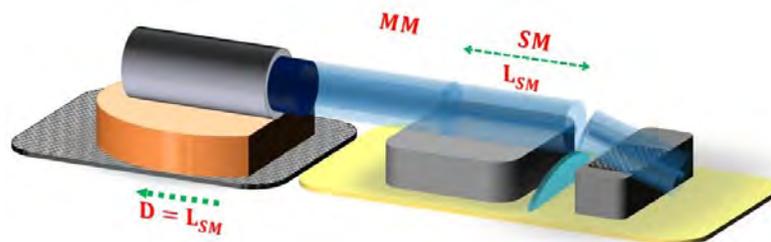


Figura 3. 12. Corte de la sección SM a la longitud L_{SM}

4.) Empalme SM-MM. Nuevamente una sección MM es preparada como el paso 1, para ser empalmada con el otro extremo de la sección MM-SM (Figura 3.13.a), previamente cortada. Una vez empalmada la última sección se tiene un dispositivo MM-SM-MM con campo evanescente expuesto, como se muestra en la Figura 3.13 b).

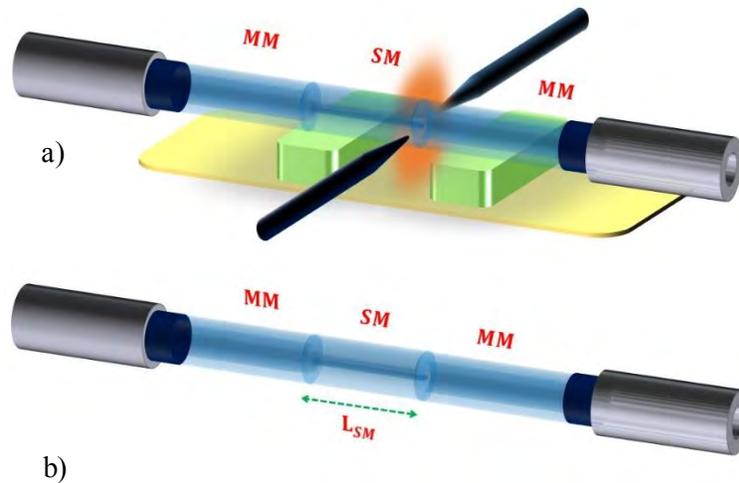


Figura 3. 13 Estructura MM-SM-MM. a) empalme SM-MM, b) Dispositivo de campo evanescente de fibra óptica basado en una estructura heteronúcleo.

Hasta ahora se ha abordado solamente la metodología para la fabricación de dispositivos heteronúcleo de campo evanescente. Se procede a la segunda etapa de la fabricación de los dispositivos SPR de FO, este consta de una metodología para el recubrimiento metalizado de los dispositivos de campo evanescente en FO mediante la deposición de películas delgadas de Cr y Au, para generar las condiciones físicas necesarias en el desarrollo de dispositivos SPR. La deposición de Cr se hizo con un cañón de electrones y el oro por evaporación térmica, en una campana al vacío para aislar el proceso del medio externo y procurando la estabilidad-pureza de los materiales.

5.) Preparación de los dispositivos FO de campo evanescente para su recubrimiento de

Cr y Au. Cada dispositivo de MM-SM-MM fabricados es sometido a la limpieza de su superficie con acetona y alcohol isopropílico, son solventes que se evaporan fácilmente y ayudan a remover residuos de la superficie; sin embargo, es importante asegurarse de no dejar la acetona en contacto con la FO por lapsos grandes de tiempo ya que es un agente agresivo que puede afectar el recubrimiento hecho de polímero. Los dispositivos se colocan y sujetan bien estirados sobre una estructura robusta, que permita el almacenamiento de ellas durante y después del proceso de recubrimiento. Se diseñó y fabricó en el CIO una montura de aluminio, como se muestra en la Figura 3.14. Esta montura facilita el almacenamiento seguro de los dispositivos de FO, además proporciona un ajuste para variar el tamaño de la ventana sobre la que se depositara el oro para que

sea igual o mayor a L_{SM} , esta abertura es primordial en el recubrimiento de los dispositivos de campo evanescente. Esta montura tiene espacio para colocar hasta 35 dispositivos de fibra óptica, espaciados 3 mm.

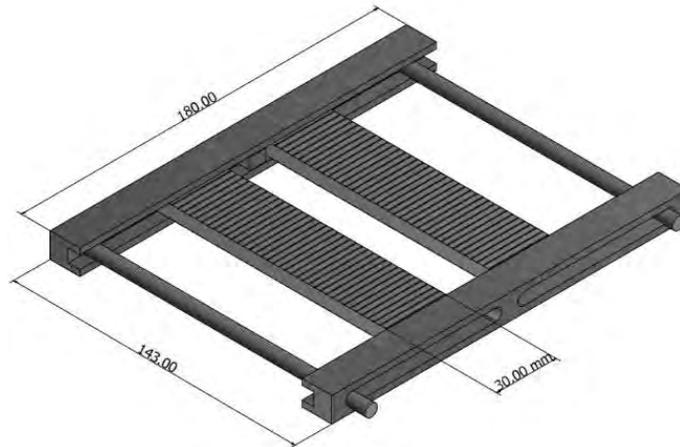


Figura 3. 14. Montura de almacenamiento para 35 dispositivos heteronúcleo de fibra óptica.

6.) Posicionamiento de la montura dentro de la campana de vacío. Es importante recalcar que el objetivo en la fabricación de los dispositivos de fibra óptica es alcanzar una repetitividad; por lo que se procura mantener las mismas condiciones de recubrimiento en todos los dispositivos. Se propone colocar la montura centrada, al mismo nivel y con una determinada altura respecto a las fuentes donde se colocan los materiales a depositar. En la Figura 3.15., se muestra el diseño de la pieza de sujeción que asegura que la montura mostrada en la Figura 3.14. tendrá siempre la misma posición dentro de la campana de evaporación. Esta pieza ofrece la posibilidad de realizar varios ajustes, si fuera necesario para el mejor posicionamiento de la montura de sujeción de las FO que asegura las mejores condiciones en el proceso de recubrimiento de las FO. En este trabajo se colocó la montura a una altura de 27.5 cm respecto a la parte inferior de la campana.

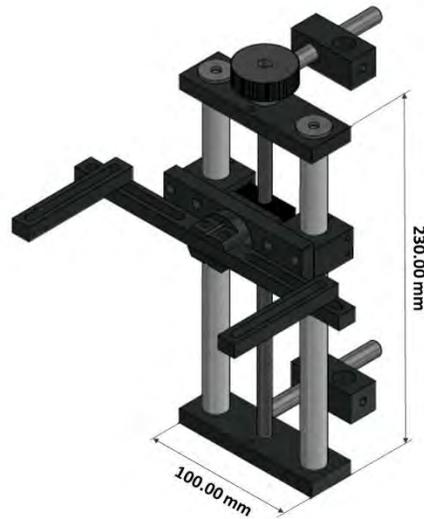


Figura 3. 15. Pieza sujetadora de montura de almacenamiento de fibra óptica para evaporación térmica al vacío (100x 230 mm).

7.) **Primera deposición de las películas delgadas de Cr y Au.** La deposición de los recubrimientos en la FO se basan en el método de PVD (PVD: Physical Vapor Deposition), en este caso de Cr y Au, en vacío. El equipo para hacer la deposición de películas delgadas de la marca Balzer, como se aprecia en la Figura 3.16., está constituido principalmente de una cubierta protectora o *campana* que asegura el sellado de una cámara en donde se encuentran un cañón de ionización, sensores de espesores (superior e inferior), soportes (fuentes) para la colocación de los materiales a evaporar (pellets de Cr y Au), cañón de electrones, obturador y la montura de los dispositivos de FO.

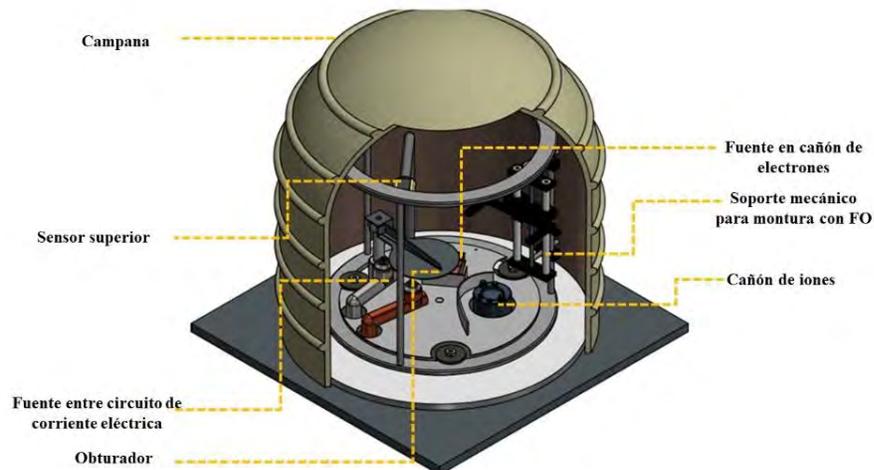


Figura 3.16. Campana de evaporación al vacío.

Una vez colocada las monturas con las FO dentro de la campana, el sensor de espesor superior es situado de manera centrada en la región de la ventana, permitiendo el monitoreo del espesor en el depósito del material sobre la FO en la sección SM. Se procede a cerrar la cámara de vacío y se enciende el compresor hasta alcanzar un valor de 2×10^{-1} mbar, consecuente a este valor se da paso a la difusora para alcanzar un alto vacío de $\sim 2 \times 10^{-5}$ mbar. A pesar de tener un alto vacío dentro de la cámara el factor humedad se encuentra presente en el lugar, trayendo consigo consecuencias en la adhesión de los materiales sobre los sustratos de FO, como medida el cañón de iones es puesto en marcha para remover toda partícula presente en el sustrato y dentro de la cámara.

La campana se encuentra adaptada para la deposición de dos materiales en un mismo proceso, a través de dos métodos de evaporación basados en el calentamiento del material hasta alcanzar la fase de vapor para luego ser condensada al incidir sobre el sustrato de fibra óptica. El primer método es por medio de un haz de electrones cuyo calentamiento se basa en el bombardeo de electrones con alta energía sobre el material a depositar; bajo este método una película delgada de Cr de 3 nm se deposita a una tasa de evaporación de 0.1 \AA/s sobre la FO. La película de Cr es utilizada para mejorar la poca adherencia del Oro y vidrio.

Posterior al depósito de Cr en uno de los lados de la FO, el obturador es puesto sobre el cañón de electrones para evitar la combinación con otro material en la consecutiva deposición. Se procede a la deposición de 30 nm de Au a una razón de evaporación de $4.7\text{-}5.4 \text{ \AA/s}$ mediante el método de calentamiento por resistividad, en este método el material se coloca en un depósito metálico (bote o caja) en donde se funde, y posteriormente se evapora, por el paso de una corriente eléctrica. Para el control de los espesores de las películas delgadas depositadas de cada material, el sensor de espesor dentro de la cámara permite medir dicho parámetro. Al término de las deposiciones se sugiere dejar dentro por un tiempo en la cámara al vacío la montura con las FO para garantizar la estabilidad en las moléculas de los materiales antes de exponerlas al medio externo.

8.) Segunda deposición de las películas delgadas de Cr y Au. Debido a la geometría cilíndrica de la FO, la primera deposición solo forma el recubrimiento en un lado de la FO. Por lo tanto, la cámara es abierta después de la primera deposición de Cr y Au y la montura de FO es rotado a 180° para una segunda deposición de los materiales, alcanzando así un recubrimiento cuasi-homogéneo. Esto se puede hacer fácilmente ya que la pieza que sujeta las monturas tiene un mecanismo adaptado que facilita rotar la montura. Para este trabajo, por el diseño del soporte, se requirió de abrir la campana; sin embargo, este diseño puede evolucionar de tal manera que el mecanismo de rotación pueda ser controlado por el usuario desde afuera; así se evitaría levantar la campana. Nuevamente la cámara al vacío es cerrada y el mismo proceso ejecutado en el paso 7 es realizado en la segunda deposición.

9.) Refractómetro de fibra óptica en SPR. Con las fibras ópticas MM-SM-MM metalizadas se tiene campo evanescente interactuando con el oro y se tienen las condiciones para la medición de índice de refracción en fibra óptica aumentando la sensibilidad (Figura 3.17.), a través de la técnica de la resonancia de plasmón superficial.

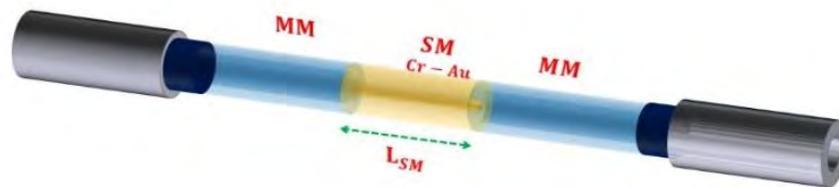


Figura 3.17. Refractómetro de fibra óptica en SPR.

3.5. Caracterización de los dispositivos de fibra óptica fabricados

La caracterización de los dispositivos SPR de fibra óptica se realiza mediante el método de interrogación espectral en transmisión. Para este método se implementa el sistema de interrogación que se muestra en la Figura 3.18, conformado por: una fuente de luz blanca modelo AQ4305 YOKOGAWA, dispositivo de FO a caracterizar y analizador de espectros ópticos (OSA: Optical Spectrum Analyser) modelo AQ-6315A ANDO.

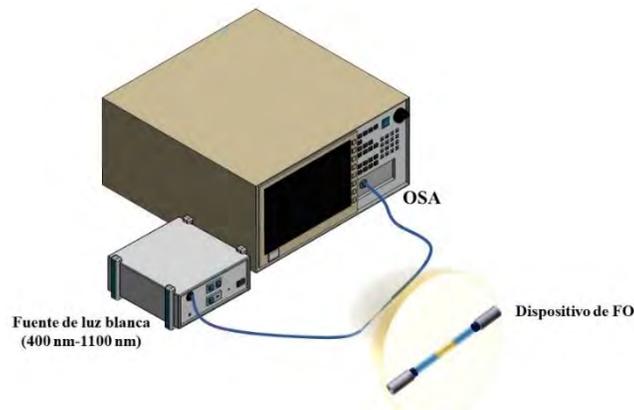


Figura 3.18. Sistema de interrogación espectral de un dispositivo SPR de fibra óptica en transmisión.

3.5.1. Medición de índice de refracción mediante SPR en fibra óptica

En el caso de los dispositivos SPR de fibra óptica su desempeño es evaluado por medio del análisis de la señal transmitida para diferentes condiciones en el medio externo, en este caso las variaciones de índice de refracción del medio que rodea la sección SM metalizada. Para la caracterización a índice de refracción del dispositivo, se prepararon un conjunto de soluciones que contienen diferentes concentraciones de agua y glicerina, en la Tabla 3.4 se muestra las proporciones de las soluciones, con sus respectivos índices de refracción calculados [93] y medidos con el refractómetro de Abbe comercial modelo WY1A.

Soluciones		Índice de refracción	
Agua (%)	Glicerina (%)	Calculado	Medido
100	0	1.3324	1.3302
92	8	1.3428	1.3428
84	16	1.3539	1.3530
78	22	1.3622	1.3620
68	32	1.3761	1.3761
62	38	1.3845	1.3815
56	44	1.3928	1.3900

Tabla 3.4. Índice de refracciones de soluciones de agua con diferentes concentraciones de glicerina.

El desempeño del dispositivo SPR de fibra óptica se puede analizar numéricamente con el programa desarrollado a partir del modelo presentado en las primeras secciones de este

capítulo, usando los parámetros de fabricación y considerando que RI del medio externo varía de acuerdo a la Tabla 3.4, donde la condición de resonancia descrita por la Ec. 2.4 se ve modificado por este último. En la gráfica (Figura 3.19.) se despliega los espectros SPR de transmisión, resultado de la simulación, para una fibra SM450 con L_{SM} de 10 mm con un recubrimiento de Au con espesor de 30 nm. Se observa un desplazamiento del espectro SPR a longitudes de onda largas cuando el RI aumenta de 1.3324 hasta 1.3928, la λ_{SPR} aparece primeramente en 551.5 nm y se desplaza hasta 632.8 nm, respectivamente. Además, el ancho espectral de cada espectro SPR transmitido y la potencia de transmisión del mínimo va disminuyendo conforme el RI incrementa.

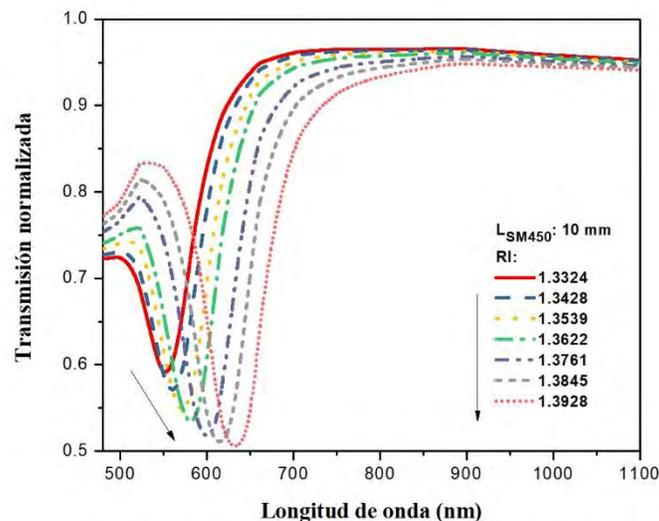


Figura 3.19. Espectros SPR de transmisión numérico para diferentes RI, de un dispositivo SPR de fibra SM450 y L_{SM} de 10 mm con una película delgada de Au con espesor de 30 nm.

La curva característica que relaciona el RI y los desplazamientos del pico de resonancia, respecto de la longitud de onda del espectro obtenido cuando el RI es de 1.3324, se observa en la gráfica de la Figura 3.20 y se obtiene siguiendo la posición de las λ_{SPR} en cada uno de los espectros SPR transmitidos de la Figura 3.19 para cada RI. La posición de cada mínimo se aproxima a un polinomio de segundo orden, como se puede observar en la línea punteada (amarillo) que representa el ajuste realizado. Se realizó un análisis alternativo al seguimiento del mínimo; el procedimiento consiste en obtener la primera derivada de cada una de los espectros SPR mostrados en la Figura 3.19. Al hacer esto los puntos de inflexión, a la izquierda (A) y a la derecha (B) del mínimo se convierten en un mínimo y un máximo en la

derivada, respectivamente. En la Figura 3.20 se gráfica la curva característica de los puntos de inflexión obtenidas, tanto para el punto de inflexión A (puntos y línea punteada rojo) como para el punto de inflexión B (puntos y línea punteada azul). Las tres curvas características presentan un comportamiento no lineal, ajustándose a un polinomio de segundo orden. En la Tabla 3.5, se presentan las sensibilidades numéricas obtenidas para cada curva característica obtenidas de la Figura 3.20. Ya que no se encontró evidencia de una mejora en el comportamiento de la curva característica, considerando los puntos de inflexión de la derivada, se puede optar por seguir el mínimo que es un procedimiento más rápido.

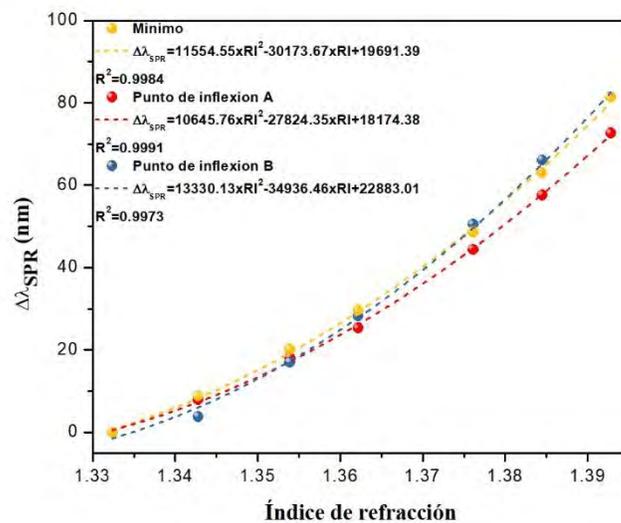


Figura 3.20. Curvas de caracterización numérico de un dispositivo SPR de fibra SM450 y L_{SM} de 10 mm con una película delgada de Au con espesor de 30 nm.

	Mínimo		Punto de inflexión A		Punto de inflexión B	
	Sensibilidad		Sensibilidad		Sensibilidad	
	(nm/RIU)		(nm/RIU)		(nm/RIU)	
RI	1.3324	1.3928	1.3324	1.3928	1.3324	1.3928
Numérico	616.89	2012.68	544.47	1830.47	585.67	2195.95

Tabla 3. 5. Sensibilidades obtenidas de cada método aplicado para el análisis numérico.

El proceso de caracterización experimental realizado sobre algunos de los dispositivos fabricados se puede explicar de la siguiente manera: la fibra óptica se coloca sobre la montura representada en la Figura 3.21, con una base con dimensión de 6x7.5x1 mm (ancho x largo

x alto), y con una celda circular con un diámetro de 5 mm y 2.5 mm de altura para contener los líquidos bajo estudio. De tal manera que la sección SM de longitud L_{SM} es posicionada sobre la ranura de la celda de prueba, se sujeta utilizando los opresores colocados a cada extremo de la placa. Antes de iniciar el proceso la fibra se somete a un proceso de limpieza con alcohol isopropílico y/o acetona para eliminar residuos en su interfaz. Posteriormente, considerando al medio externo como aire ($n=1$) la señal transmitida es grabada y fijada en el OSA, en un spam de 480-1200 nm. Esta primera señal se considera como señal de referencia A o señal cero, fundamental para la normalización de la potencia transmitida de las subsecuentes mediciones de índice de refracción.



Figura 3. 21. Montura (7.5x6x1 mm) con celda de prueba (diámetro 5 mm) para el análisis experimental de un dispositivo de fibra óptica a índice de refracción con sujetadores.

Unas gotas de la primera solución con RI de 1.3324 (100% Agua) se vierten en el contenedor en el que se posicionó la sección SM, el espectro de transmisión es grabada y guardada como una segunda señal B en el OSA. Se realiza la normalización de la potencia de transmisión de esta señal mediante la diferencia en escala logarítmica con la señal de referencia en aire (señal B – señal A); esta diferencia permite excluir de B la forma del espectro de la fuente de luz y exhibir solamente el espectro SPR característico para el índice de refracción correspondiente. Al término de cada medición, la sección SM se limpia nuevamente para remover algún posible residuo de la solución probada que haya quedado adherido a la película de oro. La interrogación del dispositivo durante la limpieza permite visualizar que la señal transmitida regresé al valor de la señal de referencia para evitar variaciones en futuras mediciones. El

mismo proceso es realizado para la caracterización del dispositivo a subsecuentes índices de refracción.

Las señales de transmisión obtenidas de cada medición, son extraídas del OSA para el procesamiento de las mismas en una computadora. En la Figura 3.22 a) se muestra la gráfica de los espectros SPR transmitidos característicos obtenidos experimentalmente usando los RI de la Tabla 3.4 para un dispositivo de fibra SM450 y L_{SM} de 10 mm con un recubrimiento de Cr y Au, con espesores de 3 nm y 30 nm, respectivamente. Mientras que en la Figura 3.22 b) son desplegados los espectros SPR transmitidos de un dispositivo de fibra SMF28 y L_{SM} de 10 mm con las mismas especificaciones de recubrimiento que el dispositivo anterior. Para el primer dispositivo bajo prueba, la λ_{SPR} a $n_{G|0\%}=1.3324$ aparece en 582.96 nm, en tanto al segundo dispositivo de prueba λ_{SPR} se presenta a 580.08 nm. Se observa en ambas gráficas el desplazamiento a longitudes de ondas largas conforme el RI incrementa.

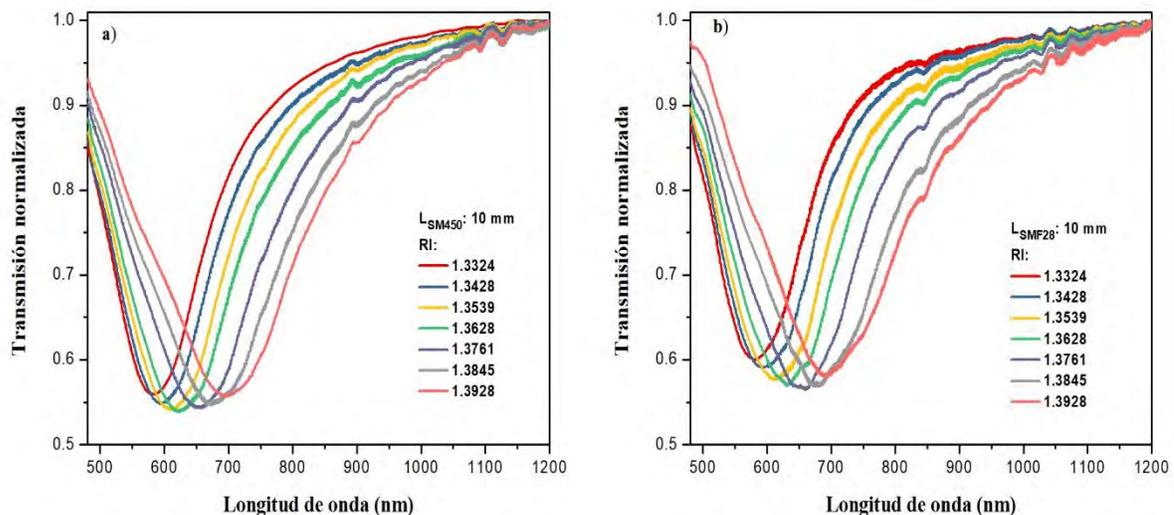


Figura 3.22. Espectros SPR de transmisión experimental para diferentes RI, de un dispositivo SPR de fibra SM450 y L_{SM} de 10 mm con una película delgada de Cr-Au con espesor de 3 nm y 30 nm, respectivamente. a) FO-SM SM450, b) FO-SM SMF28.

La curva característica experimental se calcula siguiendo la posición de las λ_{SPR} en los espectros SPR transmitidos para cada RI y es ajustada con una tendencia polinómica de segundo orden. En las gráfica (Figura 3.23.) se observan las curvas característica (línea amarilla) de los mínimos para RI de $n_{G|0\%}=1.3322$ a $n_{G|44\%}=1.3928$, para un dispositivo de FO SM450 (Figura 3.23. a)) y para uno de FO SMF28 (Figura 3.23 b)). De igual forma que

en el análisis numérico, se analizó los puntos de inflexión de los espectros SPR transmitidos experimentales. La curva de los puntos de inflexión A (línea punteada roja) presenta un comportamiento lineal, mientras que los puntos de inflexión B (línea punteada azul) presentan un comportamiento no lineal. En la Tabla 3.6., se muestran la información obtenida de las curvas características del dispositivo de FO por cada punto de seguimiento utilizado en el análisis de las curvas SPR. El comportamiento no lineal de las curvas características, tanto del mínimo como del punto de inflexión B se puede atribuir a la respuesta del dispositivo SPR respecto al índice de refracción del medio externo. En donde se observa que además de que existe un desplazamiento del mínimo λ_{SPR} se observa un ensanchamiento de sus curvas SPR, y ambas contribuyen a ese comportamiento en el intervalo de mediciones. En la literatura se puede encontrar que este es un comportamiento típico de los dispositivos SPR de fibra óptica [94].

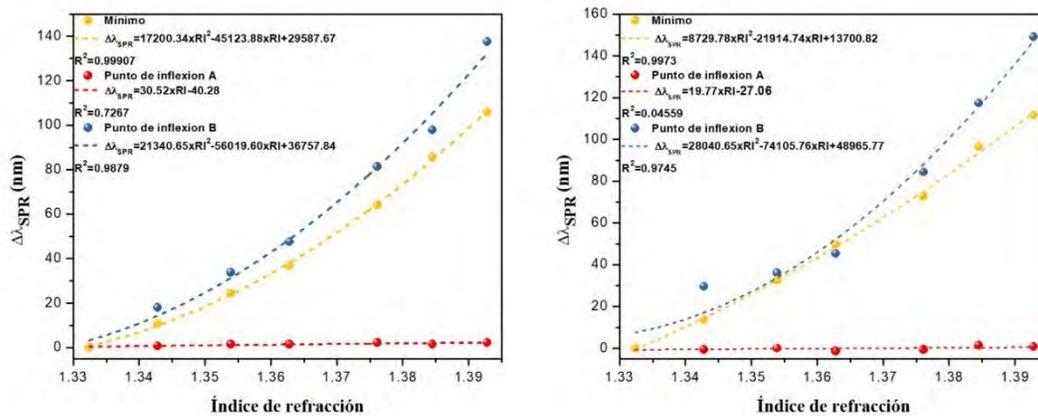


Figura 3.23. Curva de caracterización experimental del desplazamiento de la longitud de onda de resonancia de un dispositivo SPR de fibra SM450 y L_{SM} de 10 mm con una película delgada de Cr-Au con espesor de 3 nm y 30 nm, respectivamente, a) FO-SM SM450, b) FO-SM SMF28.

	Mínimo			Punto de inflexión A			Punto de inflexión B		
	λ_{SPR} (nm)	$\Delta\lambda_{SPR}$ (nm)	S (nm/RIU)	λ_{SPR} (nm)	$\Delta\lambda_{SPR}$ (nm)	S (nm/RIU)	λ_{SPR} (nm)	$\Delta\lambda_{SPR}$ (nm)	S (nm/RIU)
	@1.3324		(RI: 1.3324 y 1.3928)	@1.3324			@1.3324		(RI: 1.3324 y 1.3928)
SM450	582.96	113.0	813.2 2904.55	523.2	2.16	30.52	639.84	137.5	848.96 3426.91
SMF28	580.08	111.6	1344.89 2402.94	521.76	0.72	19.77	644.16	149.0	616.96 4004.27

Tabla 3. 6. λ_{SPR} , $\Delta\lambda_{SPR}$, sensibilidad de cada punto de seguimiento utilizado en el análisis experimental de cada dispositivo de FO.

Otra forma de caracterizar la respuesta de los dispositivos SPR de fibra óptica es a partir del FWHM o $\Delta\lambda_{0.5}$ de los espectros SPR característicos en cada RI. En las gráficas (Figura 3.24) se muestran los anchos espectrales de cada curva SPR de la Figura 3.22 para un dispositivo FO SM450 y SMF28; respectivamente, donde ambas curva característica tienen un comportamiento no lineal, ajustándose a un polinomio de segundo. En la Tabla 3.7. se muestra las sensibilidades obtenidas de cada dispositivo de FO, analizando sus anchos espectrales ($\Delta\lambda_{0.5}$).

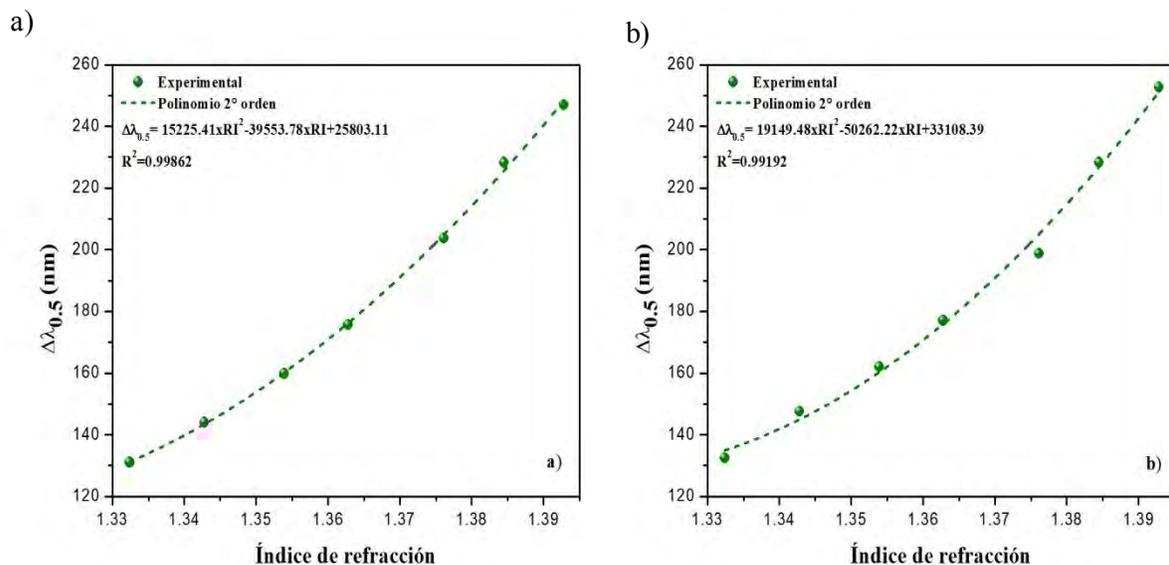


Figura 3. 24. Curva de caracterización experimental del ancho espectral de un dispositivo SPR de fibra SM450 y L_{SM} de 10 mm con una película delgada de Cr-Au con espesor de 3 nm y 30 nm, respectivamente, a) FO-SM SM450, b) FO-SM SMF28.

	FWHM o $\Delta\lambda_{0.5}$
	S (nm/RIU)
	(RI: 1.3324 y 1.3928)
SM450	1018 - 2858.12
SMF28	767.31 - 3080.57

Tabla 3. 7. Sensibilidades de cada dispositivo obtenido a partir del FWHM o $\Delta\lambda_{0.5}$.

En ocasiones los dispositivos manifiestan espectros SPR no bien definidos especialmente en la región del mínimo, lo que dificulta la localización de la λ_{SPR} mediante funciones predeterminadas de softwares comerciales. Se programó un algoritmo en el laboratorio de SOM (Anexo A.1) para la localización del mínimo basado en el valor del FWHM, en forma general

el algoritmo obtiene la profundidad del espectro SPR para obtener el valor medio de la altura y consecutivamente el ancho espectral. Con el FWHM se coloca un puntero a su valor medio consiguiendo así el valor de λ_{SPR} . El análisis fue realizado para el dispositivo caracterizado anteriormente, en la gráfica (Figura 3.25) se muestra la curva característica obtenida del algoritmo desarrollado y es comparada con la curva de la Figura 3.23 a), donde la λ_{SPR} se obtiene de la localización del mínimo de un software comercial. La nueva curva es ajustada a un polinomio de segundo orden y la variación es mínima.

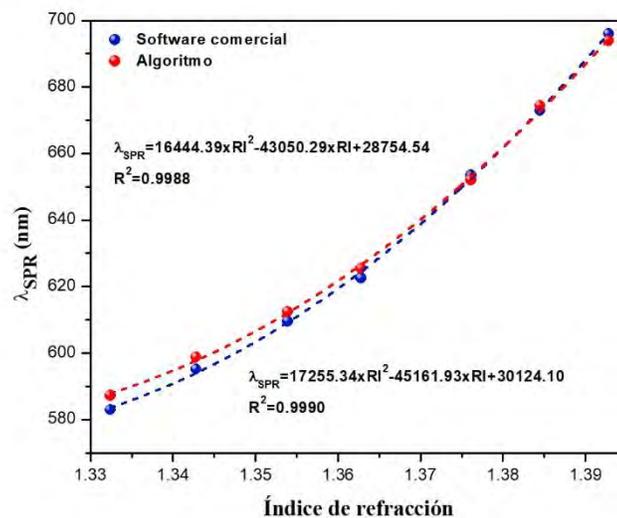


Figura 3.25. Curvas de caracterización experimental de un dispositivo SPR de fibra SM450 y L_{SM} de 10 mm con una película delgada de Cr-Au con espesor de 3 nm y 30 nm, respectivamente. La curva roja es construida mediante el análisis de un algoritmo desarrollado en el laboratorio de SOM, en la curva azul se utiliza una función predeterminado de un programa comercial.

	Mínimo
	S (nm/RIU)
	(RI: 1.3324 y 1.3928)
Software comercial	1018-2858.12
Algoritmo	770.72 - 2757.20

Tabla 3. 8. Sensibilidades del dispositivo de FO SM450 a partir del seguimiento del mínimo con dos métodos diferentes.

3.5.2. Medición de índice de refracción en un sistema de microfluído

A menudo, para la caracterización de la respuesta a índice de refracción de los dispositivos de FO se requieren de muestras líquidas biológicas y/o químicas cuyas cantidades se ven limitadas por cuestiones de accesibilidad o costos, por lo tanto es importante desarrollar métodos de interrogación que permita realizar la caracterización utilizando cantidades pequeñas de estas muestras. Para ello se propone el diseño y fabricación de celdas de microfluído, donde el dispositivo de fibra óptica pueda ser incorporado para su caracterización y así utilizar un volumen más pequeño. Se diseñó una celda con dimensiones de 30x25x15 mm y un canal con una sección transversal de $\sim 700 \mu\text{m} \times 700 \mu\text{m}$ por el que pasará el fluido de prueba, con dos puertos de entrada para la inyección de los líquidos y un puerto de salida del fluido, como se representa en la Figura 3.26.a). La celda es fabricada con la impresora 3D de formlabs [95] con la tecnología de estereolitografía con resina fotocurable estandar Clear (FLGPCL02 formlabs) bajo el proyecto Laboratorio Nacional de Micro y Nanofluídica del CIO donde el CIO participa. El proceso de fabricación se puede explicar como: i) Se realiza el diseño CAD de la pieza, ii) se traslada el archivo STL al programa PreForm, donde se acomoda la pieza en 3D para comenzar la impresión, iii) al finalizar la impresión la pieza es retirada de la impresora y es sometida a un baño de alcohol isopropílico aproximadamente 15 minutos para eliminar residuos de la resina fotocurable, y con aire comprimido se va removiendo residuos de los canales dentro de la celda y iv) la pieza es colocado en una cámara de luz ultravioleta (UV) para su curación en un tiempo de 20 minutos. Sin embargo, la celda es translúcida y poco transparente debido a la rugosidad del acabado final. lo que dificulta observar los canales dentro de la celda, pero al recubrir la superficie con barniz transparente (esmalte de uña) se puede mejorar la transparencia de la pieza.

El dispositivo de fibra óptica a caracterizar es posicionado dentro del canal de la celda por donde pasara el fluido de prueba, la sección LSM es colocado entre la entrada y salida del fluido. Para garantizar una sujeción y alineación del dispositivo se colocaron un par de sujetadores de FO en una montura, como se muestra en la Figura 3.26.b). Esta montura tiene un diseño que facilita ensamblar y desmontar la celda de microfluído en ella, como se observa en la Figura 3.26 c). Luego los extremos son sellados con la misma resina fotopolimérica

permitiendo fijar el dispositivo en la celda de microfluído y cerrar el sistema de fluido, para que circule el líquido con facilidad desde el puerto de entrada al de salida.

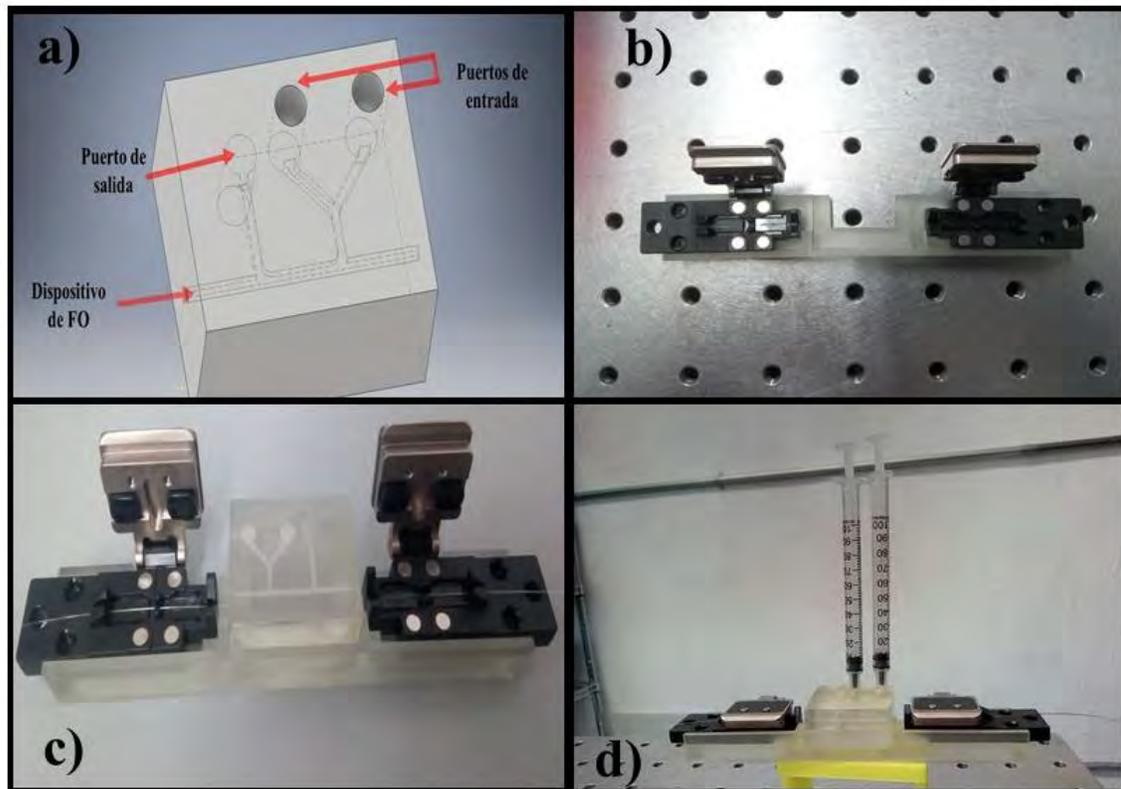


Figura 3.26. Celda de microfluído para la caracterización del dispositivo de FO. a) Representación isométrica de la celda de microfluído. b) Montura con sujetadores de FO. c) Alineación y sujeción del dispositivo de FO en la celda de microfluído. d) Inyección de muestras líquidas en el puerto de entrada.

Debido al sistema cerrado al que se incorporó el dispositivo de FO, el acceso a la señal de referencia en aire resultó difícil de obtener para poder realizar la normalización de las señales necesaria para las subsecuentes mediciones de RI. Afortunadamente, este reto puede ser superado de acuerdo a lo reportado en [96], quienes proponen un método para obtener un espectro SPR para sensores encapsulados o inaccesibles, se plantea y demuestra que tomar como señal de referencia a una de las señales medidas de RI es una alternativa viable.

Por lo tanto, se captura como referencia la señal de $n_{G0\%}=1.3324$ que es inyectada dentro del canal de fluido por medio de jeringas de insulina U-100 (Figura 3.26 d)), consecutivamente se procede a la inyección de las soluciones presentadas en la Tabla 3.4 para realizar la

medición de la respuesta óptica a cada una, ver Figura 3.27. Cabe recalcar que se debe seguir el procedimiento de limpieza del canal de fluido después de cada medición, se inyecta alcohol isopropílico en el segundo puerto de entrada.

Los espectros SPR modificado presentan una forma totalmente diferentes a la del protocolo general, se aprecia como los espectros SPR parte del valor de referencia en $T=0$ dB, hasta alcanzar un valor máximo, luego decrece hasta un valor mínimo y finalmente comienza ascender hasta mantenerse constante. No obstante, se aprecia que para RI igual a la referencia, en este caso $n_{G0\%}=1.3324$, la curva SPR será una línea horizontal $T = 0$ dB en todo el intervalo de longitudes de onda. Es posible que durante la inyección del fluido dentro del canal se generó una fricción en su trayecto, ocasionando un cambio en la temperatura. Por lo tanto, para descartar el cambio en el índice de refracción afectado por el efecto de la temperatura, se dio un tiempo de estabilidad del fluido de 5-10 minutos para cada muestra inyectada. Aunque otra alternativa sería colocar la celda de microfluído en una placa peltier.

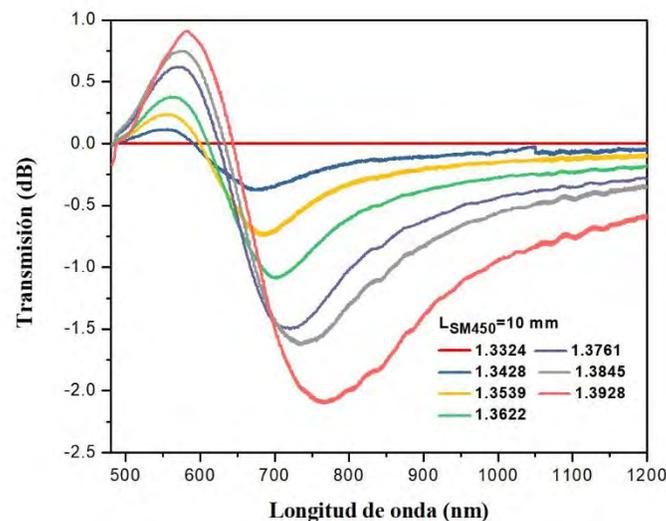


Figura 3.27. Espectros SPR de transmisión experimental para diferentes RI con referencia a 1.3324 (\neq aire), de un dispositivo SPR de fibra SM450 y L_{SM} de 10 mm con una película delgada de Cr-Au con espesor de 3 nm y 30 nm, respectivamente.

Previo a la discusión de los espectros SPR obtenidos de la Figura 3.25, claramente se puede observar que existen puntos estratégicos en términos de longitud de onda que varían ante los cambios de RI presentados en la caracterización del dispositivo de FO, tales como la λ_{SPR} del máximo y del mínimo de la señal, en comparación al espectro SPR tradicional cuya referencia

en aire solo permite seguir el valor mínimo de la curva SPR. Sin embargo, dado a la señal constante (0 en escala logarítmica) que se presenta cuando el RI es igual a la de referencia, se puede observar un cruce de las demás señales sobre esta línea, la cual también puede utilizarse como un parámetro de caracterización de los dispositivos, una λ_{SPR} de cruce por cero que además puede resultar más simple de identificar.

Por lo tanto, seguir tres puntos (máximo, mínimo, cruce) en los espectro SPR proporciona la construcción de tres curvas características independientes y se puede eliminar así problemas de incertidumbre sobre el espectro SPR tradicional en la localización solamente de un mínimo. En la gráfica de la Figura 3.28, se muestran las curvas características del seguimiento de la λ_{SPR} para los máximos, mínimos y el cruce por la referencia. Las curvas para el mínimo y máximo son ajustadas a un polinomio de segundo orden, mientras que para el cruce presenta un comportamiento lineal. La sensibilidad varía en cada tipo de seguimiento de la λ_{SPR} ; en la Tabla 3.9. se muestran las sensibilidades (S), acompañado de las λ_{SPR} a $n_{G8\%}=1.3428$ y los desplazamiento de λ_{SPR} .

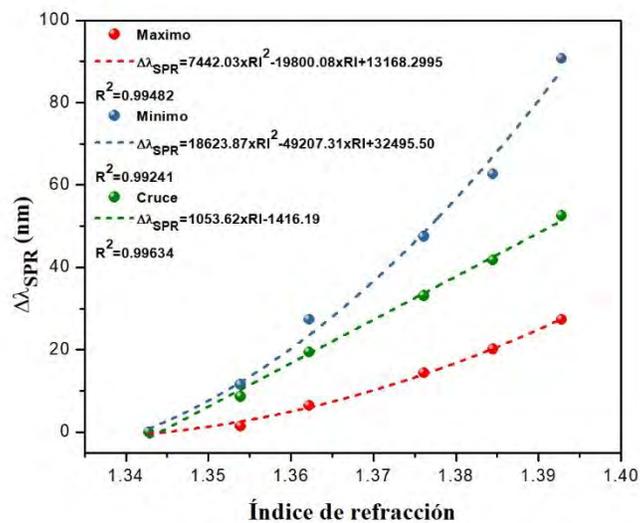


Figura 3. 28. Curvas de caracterización experimental de máximos, mínimos, cruce, de un dispositivo SPR de fibra SM450 y L_{SM} de 10 mm con una película delgada de Cr-Au con espesor de 3 nm y 30 nm, respectivamente.

	Máximo			Mínimo			Cruce		
	λ_{SPR} (nm)	$\Delta\lambda_{SPR}$ (nm)	S (nm/RIU)	λ_{SPR} (nm)	$\Delta\lambda_{SPR}$ (nm)	S (nm/RIU)	λ_{SPR} (nm)	$\Delta\lambda_{SPR}$ (nm)	S (nm/RIU)
	@1.3428			@1.3428			@1.3428		
SM450	554.91	27.26	186.23 930.43	673.71	90.72	806.61 2671.34	590.91	52.56	1053.62

Tabla 3. 9. λ_{SPR} , $\Delta\lambda_{SPR}$, sensibilidad para cada punto de seguimiento aplicado en el análisis experimental del dispositivo de FO SM450 en un sistema de microfluído.

3.5.3. Medición de temperatura usando el dispositivo SPR de fibra óptica

Se ha demostrado la sensibilidad del dispositivo SPR en fibra óptica a cambios de índice de refracción del medio externo en el que está inmerso; sin embargo, no se debe olvidar que el índice de refracción se ve modificado por el factor temperatura (T). Se propone un sensor de temperatura en la superficie del dispositivo SPR de fibra óptica mediante la transducción de un material que posea de un coeficiente termo-óptico (TOC: Thermo-optic coefficient) grande y conocido. El TOC es una propiedad inherente de los materiales y se manifiesta por la dependencia del índice de refracción a las variaciones de temperatura. Uno de los materiales que tiene un TOC alto y que ha sido muy utilizado para este tipo de estudios es el PDMS (Polydimethylsiloxane) con un TOC de $-4.5 \times 10^{-4}/^{\circ}\text{C}$.

La preparación del dispositivo SPR para la medición de temperatura se puede describir de la siguiente manera: i) Se utilizó un contenedor de 30x10x10 mm fabricado con la impresora 3D, ii) se limpió la superficie del dispositivo de FO y se fija con una porción de resina foto-curable a los bordes del contenedor para sujetarlo, iii) se capturó la señal en aire como referencia para la normalización de las subsecuentes mediciones y iv) se preparó el PDMS y v) se vertió del PDMS contenedor hasta cubrir al dispositivo de FO; el protocolo seguido es expuesto en el Anexo A.2 [97]. El sistema de interrogación empleado para la caracterización a temperatura se muestra en la Figura 3.29, el dispositivo SPR con PDMS es colocado sobre una placa Peltier, permitiendo controlar los cambios de temperatura en la superficie.

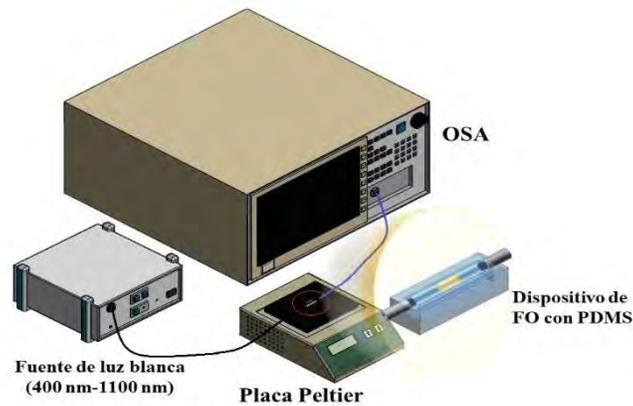


Figura 3.29. Sistema de interrogación espectral de un dispositivo SPR de fibra óptica en transmisión para la medición de temperatura.

Utilizando el modelo teórico descrito en las primeras secciones de este capítulo se modificó el algoritmo para simular el comportamiento del dispositivo ante cambios de temperatura. Cuando la temperatura cambia el índice de refracción del PDMS cambiará, es necesario calcular el índice de refracción del PDMS para cada temperatura, para esto se utiliza la siguiente relación $n_{\text{PDMS}} = 1.4295 + (TOC * (25\text{ }^{\circ}\text{C} - T))$ que describe el comportamiento del índice de refracción del PDMS ante cambios de temperatura. En la gráfica de la Figura 3.30 a) se muestra los espectros SPR simulados de un dispositivo SPR a cambios de temperatura para una FO- SM450 de LSM450 de 10 mm, en un intervalo de medición de 10 °C a 40 °C con cambios de 5 °C. Se puede ver que el desplazamiento de los espectros SPR conforme la temperatura aumenta es realizado a longitudes de onda corta (blue shift), esta tendencia se debe al valor negativo del TOC interpretándose como una disminución del índice de refracción con el aumento de la temperatura. El seguimiento de la λ_{SPR} de los espectros SPR simulados permite construir la curva característica respecto a la temperatura como se muestra en la gráfica de la Figura 3.30 b), se observa que este comportamiento se puede aproximar a una línea recta para el intervalo de medición.

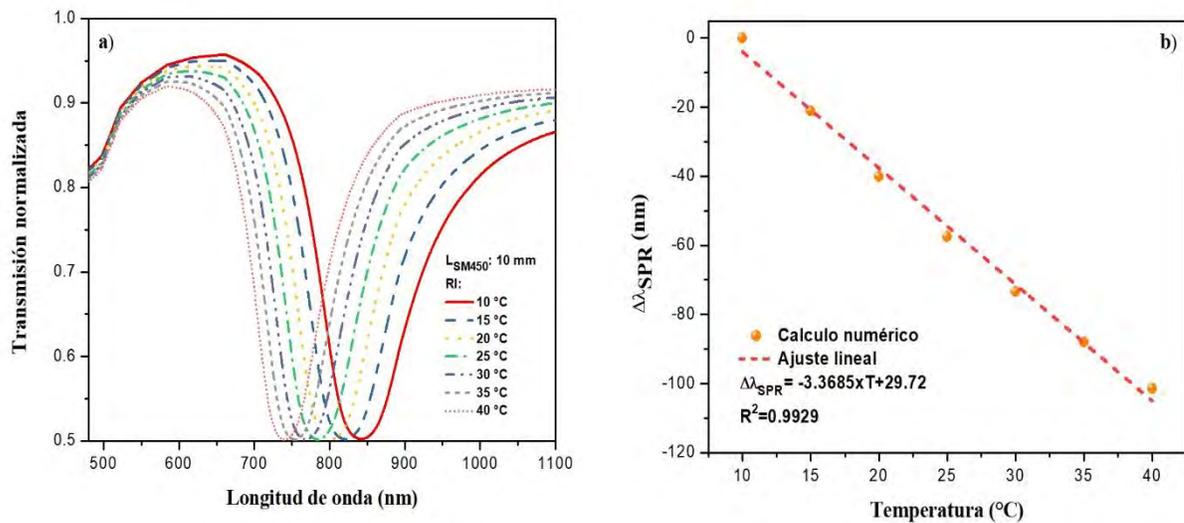


Figura 3. 30. a) Espectros SPR de transmisión numérico para diferentes T , de un dispositivo SPR de fibra SM450 y L_{SM} de 10 mm con una película delgada de Au con espesor de 30 nm. b) Curva característico numérico.

La demostración del sensor de temperatura se realizó con un dispositivo SPR de FO-SM450 con L_{SM} 10 mm, para efectos de normalización se utilizó la señal de referencia del dispositivo en aire previo al encapsulamiento con PDMS. El dispositivo de FO con PDMS es puesto sobre la placa Peltier junto con una cubierta para mantener la temperatura constante en la superficie. En la gráfica (Figura 3.31. a)), se muestran los espectros SPR transmitidos de cada temperatura, se observa el mismo comportamiento en el desplazamiento a longitudes cortas como los del modelo teórico. Se observa que la señal tiene un pequeño rizo debido tal vez a la manera en que se adhiere el PDMS al oro y la manera en que responde el material a los cambios de temperatura así como el desempeño del OSA que se utilizó, que tiene ya algunos problemas, se realizó un suavizado de los espectros SPR (Figura 3.31. b)) para definir la forma de las curvas y facilitar la búsqueda de λ_{SPR} . Para la temperatura de 10 °C la λ_{SPR} se presenta en 851.55 nm teniendo un $\Delta\lambda_{SPR}$ total de 87.84 nm en el intervalo de temperaturas. La curva característica a temperatura presenta un comportamiento lineal, presentando una sensibilidad de -3.013 nm/°C. Esta sensibilidad es una de las más grandes reportadas para un sensor de temperatura de fibra óptica.

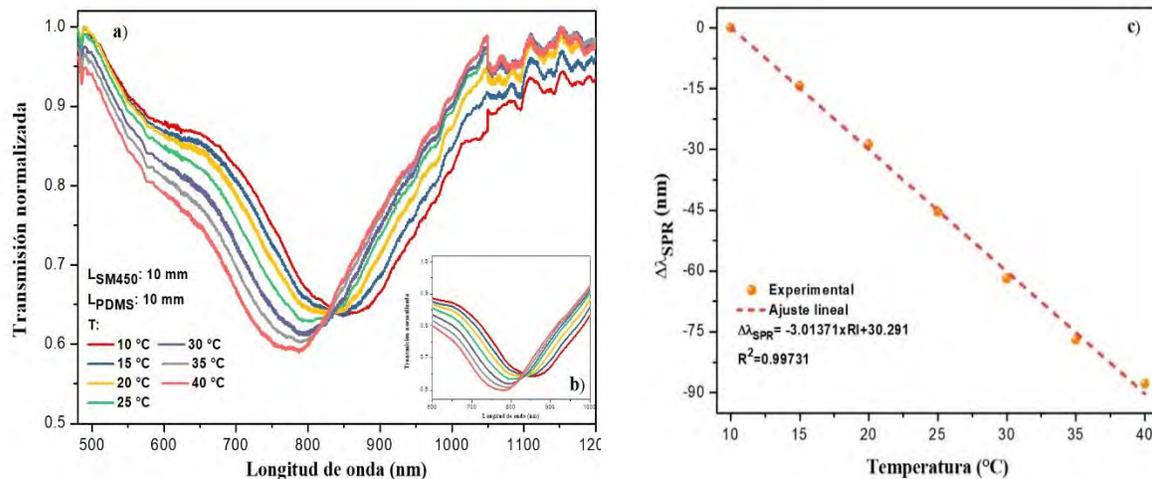


Figura 3. 31. a) Espectros SPR de transmisión experimentales para diferentes T , de un dispositivo SPR de fibra SM450 y L_{SM} de 10 mm con una película delgada de Au con espesor de 30 nm, b) Suavizado de los espectros SPR transmitidos, c) Curva característica experimental.

3.6. Conclusiones

El contar con un modelo teórico, que si bien en nuestro caso no logra empatar completamente con los resultados experimentales obtenidos (debido principalmente a que desconocemos los valores exactos de algunos de los parámetros fundamentales del experimento como los índices de refracción del núcleo y el revestimiento de la fibra óptica, la constante dieléctrica del metal, y el espesor final de la película delgada) es un elemento que ayuda a entender el fenómeno SPR y el papel que juega cada uno de los elementos del dispositivo. Pero lo más importante, ya que el modelo si logra mostrar el comportamiento del dispositivo real, es un elemento esencial en el diseño de los dispositivos de fibra óptica reales.

La estructura MM-SM-MM ofrece la oportunidad de desarrollar dispositivos de fibra óptica, con campo evanescente expuesto, robustos y fáciles de fabricar, la metodología propuesta tiene como objetivo garantizar la repetitividad en su fabricación. Así mismo la metodología propuesta para el recubrimiento de la fibra óptica con una película delgada de metal permite demostrar que es posible fabricar de manera simple y repetible dispositivos SPR de fibra óptica. Una vez fabricados los dispositivos de FO, se dispone de una plataforma para el estudio de la dependencia del SPR a los cambios de índice de refracción de una sustancia. En el análisis de los espectros de transmisión obtenidos, el foco de atención se centra en el

seguimiento de la longitud de onda de resonancia λ_{SPR} . Este seguimiento permite construir la curva de caracterización, que relaciona un único valor de RI con una λ_{SPR} . Si la película delgada depositada en la superficie de la FO presenta irregularidades, puede ocasionar que los espectros SPR no se encuentren bien definidos y esto da como consecuencia que los desplazamientos no presenten una tendencia con un comportamiento secuencial, ocasionando por lo tanto que el seguimiento de la λ_{SPR} se vuelva complicado.

Al incorporar la tecnología SPR en los dispositivos de fibra óptica se logró aumentar la sensibilidad de estos a los cambios de RI del medio externo. Se demostró que es posible determinar el índice de refracción de una sustancia utilizando este tipo de dispositivos, para esto se sumerge la fibra óptica en el líquido y se obtiene la λ_{SPR} del espectro SPR característico, este valor se sustituye en la ecuación de la curva de calibración ajustada y obtiene el valor del RI del líquido. Se observó que los dispositivos de FO estudiados tienen la capacidad de medir cambios de índice de refracción de 6.14×10^{-4} y 1.7×10^{-4} en un rango dinámico de 1.33-1.36 y 1.36-1.41; respectivamente, con una resolución del analizador de espectro de 0.5 nm.

Se probó que es posible integrar un dispositivo de FO en un sistema de microfluído y realizar mediciones con volúmenes de $\sim 100 \mu\text{L}$. La celda de microfluído es una plataforma de medición que puede ser llevado fuera de laboratorio, paso importante para futuras aplicaciones en campo, pero además sirve como elemento de protección del dispositivo y permite limitar la cantidad de analito. Aprovechando las características únicas de los dispositivos SPR de fibra óptica para medir índice de refracción, se propuso un sensor de temperatura utilizando como medio externo un material con un TOC alto. Se observó que el dispositivo SPR embebido en PDMS puede medir cambios de temperatura con una sensibilidad 3 órdenes de magnitud mayor que las rejillas de Bragg o de periodo largo.

CAPÍTULO 4. EL LABORATORIO EN FIBRA ÓPTICA

HECHO EN EL CIO

4.1. Dispositivos SPR de fibra óptica interrogados en reflexión

Se ha demostrado que es posible realizar mediciones refractométricas analizando la señal transmitida de un dispositivo SPR de fibra óptica. Sin embargo, los esquemas en transmisión no son siempre la mejor alternativa para el sensado, especialmente cuando las muestras a analizar son líquidas (biológicas o químicas) y se encuentran almacenadas en contenedores pequeños. En este capítulo se demuestra que es posible construir dispositivos SPR en la punta de una fibra óptica analizados en reflexión que además pueden monitorear más de un parámetro a la vez. Este dispositivo es una propuesta totalmente original del SOM.

4.2. Fabricación de las puntas de fibra óptica

Considerando la reflexión de Fresnel en una fibra óptica, cuando se realiza un corte recto o un pulido transversal sobre el extremo de la fibra el 4% de la luz incidente será reflejada debido a la diferencia del índice de refracción de la FO y del aire, principio que permite la fabricación de dispositivos de fibra óptica en punta basados en la reflexión de la luz. El proceso de fabricación del dispositivo MM-SM-MM, descrito en el Capítulo 3, puede ser modificado para tener un dispositivo de fibra óptica en punta, a continuación se describe una metodología para su fabricación:

- 1.) Fabricación de la punta de fibra óptica.** Es importante mencionar que la estructura que se propone fabricar en la punta de la fibra óptica es MM-SM-MM, la metodología de fabricación es por tanto la misma que se realizó desde el paso 1-3 de la sección 3.4. En esta estructura, que se muestra en la Figura 4.1, a diferencia de la mostrada en la Fig. 3.11 b) solo existe una sección MM que va a hacer la función de inyectar la luz a la sección SM y coleccionar la luz reflejada en la punta de la FO SM. En esta estructura se evita el paso 4. En el extremo de la sección SM, debido al cambio de RI, una porción de la luz incidente será reflejada.

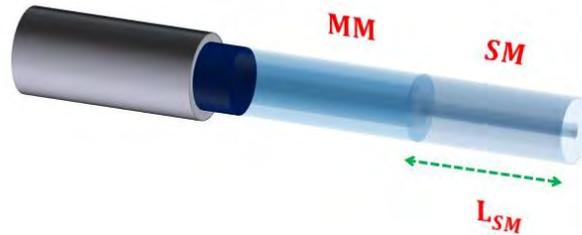


Figura 4. 1 Dispositivo MM-SM-MM en punta

Hasta este punto se obtiene una punta de fibra óptica con el 4% de reflectividad; para aumentarla se propone colocar un espejo sobre la superficie transversal de la fibra SM.

- 2.) **Colocación de las puntas de FO en la montura de almacenamiento.** Los dispositivos de FO en punta son colocados en la montura de almacenamiento para la deposición del espejo, la colocación debe ser realizado de manera que la parte transversal de la FO quede sobre el borde de la montura. La sección longitudinal de la SM es protegida para evitar depositar sobre él cualquier metal que no sea Cr y Au, porque pueden modificar las condiciones de la resonancia del plasmon superficial.
- 3.) **Deposición del espejo.** La montura con las fibras ópticas se coloca sobre la pieza de sujeción de forma vertical. Se busca que la sección transversal de la punta de la SM este paralela a la fuente donde se encuentra el material que se va a depositar. La deposición del espejo es realizado por el proceso de evaporación térmica de Aluminio (Al) y posteriormente Silicio (Si) como protección, siguiendo el paso 7 de la sección 3.4, con espesores y razón de evaporación de 120 nm y 5 Å/s y 20 nm y 2 Å/s, respectivamente.
- 4.) **Recubrimiento de los dispositivos en punta con películas delgadas de Cr y Au.** Los dispositivos con espejo en la punta son nuevamente acomodados sobre la ventana de la montura de almacenamiento, dejando expuesta la sección L_{SM} de la fibra SM a las fuentes de emisión y se procede a depositar Cr y Au siguiendo el procedimiento descrito en los pasos 7 y 8 de la sección 3.4.

5.) Dispositivos SPR en punta. Al depositar la película delgada de Au sobre el recubrimiento de la sección SM de las puntas de fibra óptica, como se observa en la Figura 4.2., se obtienen las condiciones necesarias para la medición de índice de refracción con la técnica de resonancia de plasmón superficial. El espejo depositado en la punta de fibra óptica, permite una interrogación del espectro en reflexión.

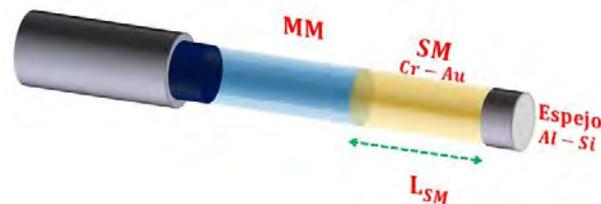


Figura 4. 2. Dispositivo SPR en punta de fibra óptica.

4.3. Caracterización de los dispositivos

La caracterización de los dispositivos SPR en punta de fibra óptica se realizó en reflexión. A diferencia de los dispositivos en transmisión de la sección 3.5, el sistema de interrogación que se muestra en la Figura 4.3 está conformado por: una fuente de luz blanca, acoplador multimodo 2x1 (Thorlabs), dispositivo en punta de fibra óptica a caracterizar y analizador de espectros ópticos (OSA).

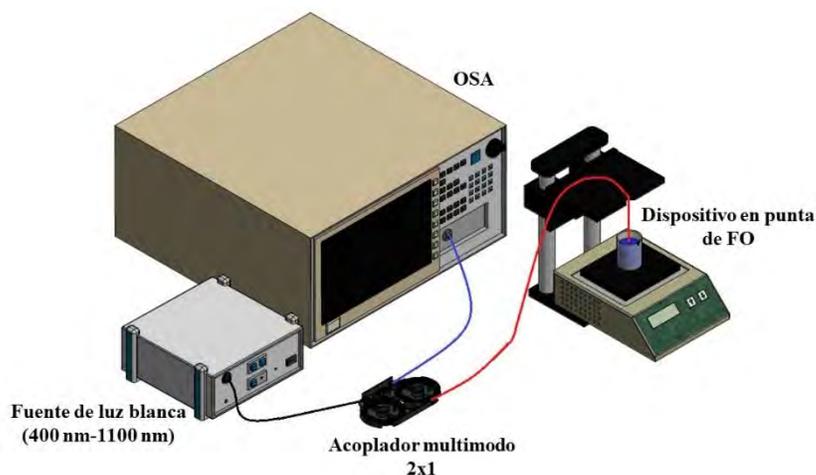


Figura 4. 3. Sistema de interrogación espectral de un dispositivo SPR de fibra óptica en reflexión.

La fuente de luz blanca se conecta a una de las fibras ópticas de entrada del acoplador y la luz es guiada al dispositivo de FO donde el plasmón superficial es excitado, en el extremo de la punta la luz es reflejada por un espejo. El 50% de la luz reflejada es guiada de regreso a la

fuelle y el otro 50% al OSA, donde se obtiene el espectro SPR. Dadas las características de la fuente, que consiste de un foco incandescente y electrónica que no se ven afectados por la luz reflejada, no es necesario utilizar un aislador de fibra óptica a la entrada de la fuente de luz. La respuesta del dispositivo SPR se caracterizó a diferentes índices de refracción. Los índices de refracción empleados son soluciones de agua y glicerina a diferentes concentraciones mostrados en la Tabla 3.4. La punta en fibra óptica se encuentra suspendida en el aire y se procede a su limpieza con acetona y/o alcohol isopropílico, la señal en reflexión es grabada en el OSA y se utilizará como señal de referencia para la normalización de las subsecuentes señales de medición de RI.

Las señales en reflexión obtenidas de cada medición, son extraídas del OSA para analizarlas y procesarlas en una computadora. En la Figura 4.4 a) se muestra la gráfica de los espectros SPR característicos medidos en reflexión, usando los RI de la Tabla 3.4. La λ_{SPR} a $n_{G0\%}=1.3324$ aparece en 558.51 nm en un dispositivo de FO SM450 en punta con una L_{SM} de 10 mm y un recubrimiento de Cr y Au, con espesores de 3 nm y 30 nm, respectivamente. En la punta del dispositivo tiene un espejo depositado de Al-Si, con 120 nm y 20 nm, respectivamente. Se observa el desplazamiento a longitudes de ondas largas conforme el RI incrementa, como ocurre en transmisión.

Con el seguimiento de la posición de las λ_{SPR} en los espectros SPR en reflexión se construye la curva característica RI vs. $\Delta\lambda_{SPR}$, ajustada a un polinomio de segundo orden, que se muestra en la gráfica de la Figura 4.4 b) para los RI $n_{G0\%}=1.3324$ a $n_{G44\%}=1.3928$ se observa $\Delta\lambda_{SPR}$ de 155.52 nm. La sensibilidad varía entre 508.98 nm/RIU y 4359.01 nm/RIU en el intervalo de mediciones, como se muestra en la Tabla 4.1. Queda demostrado que la punta de fibra óptica fabricada sirve para realizar mediciones de RI, que estas mediciones se pueden realizar de una manera mas simple y rápida ya que solo es necesario sumergir la punta en el contenedor donde está el líquido bajo análisis.

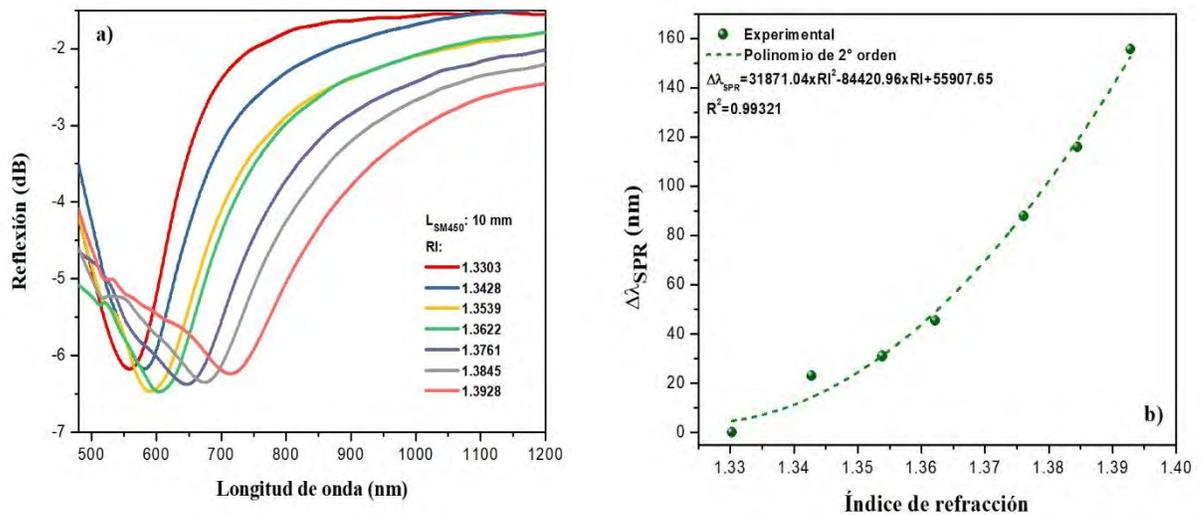


Figura 4. 4. a) Espectros SPR de transmisión experimental para diferentes RI, de un dispositivo SPR en punta de fibra SM450 y L_{SM} de 10 mm con una película delgada de Cr-Au con espesor de 3 nm y 30 nm, respectivamente, b) Curva característica experimental.

	Mínimo		
	λ_{SPR} (nm)	$\Delta\lambda_{SPR}$	S (nm/RIU)
	@1.3324	(nm)	(RI: 1.3324 y 1.3928)
SM450	558.51	155.52	508.98 - 4359.01

Tabla 4. 1. Sensibilidad del dispositivo SPR de FO en reflexión.

4.4. Detección simultanea del índice de refracción, la temperatura y el nivel de un líquido con una punta de fibra óptica.

En una muestra líquida la medición del índice de refracción se ve perturbada por la temperatura [98], por lo que el sensado de las dos variables físicas simultáneamente provee una medición confiable. En [99] reportan un sensor de fibra óptica basado en la resonancia de plasmón superficial en transmisión para la medición simultanea del índice de refracción y temperatura al generar dos canales SPR en una misma estructura para la medición individual de cada parámetro, en la Figura 4.6 se puede observar la representación de este sensor. Sin embargo, hasta ahora no se ha demostrado que es posible medir con una punta de fibra óptica

el índice de refracción, la temperatura y el nivel de un líquido de manera simultánea, en este trabajo proponemos llevarlo a cabo siguiendo el mismo principio propuesto en [99].



Figura 4. 5. Representación del sensor de fibra óptica propuesto con dos canales SPR. Nota Fuente: Adaptado de [96].

El primer paso es recurrir al modelo teórico utilizado y simular el efecto de cada uno de estos parámetros en la respuesta del dispositivo. Si se observa la gráfica de la Figura 3.6 obtenidas gracias a la simulación del modelo teórico descrito en el capítulo 2, para un espesor de película fijo con un RI del medio externo constante, la pérdida de la potencia de transmisión aumenta conforme se aumenta la longitud de la sección SM (L_{SM}). Además de la Figura 3.5 se aprecia que no existe un desplazamiento de la λ_{SPR} ; bajo estas consideraciones se puede interpretar que la profundidad del valle en el espectro de transmisión del SPR puede ser utilizado para detectar el nivel (NL) de un líquido. Considerando esta respuesta, es de suponer que con el esquema en punta propuesto, conforme la punta de FO se introduce en el contenedor la longitud de fibra expuesta a la muestra líquida aumenta y por lo tanto debe de aumentar la profundidad del valle del espectro SPR.

Para la detección simultánea de los tres parámetros (RI, T, NL) se propone un dispositivo SPR en la punta de una fibra óptica como el que se muestra en la Figura 4.6. Se puede decir que este esquema tiene dos canales SPR que permiten la detección simultánea de tres parámetros. Uno de los canales SPR está formado por una sección de L_{SM} que está cubierta por PDMS (L_{PDMS}) para la detección de la temperatura por medio de los desplazamientos en longitud de onda (λ_{PDMS}) de uno de los valles en el espectro. Mientras que el otro canal formado por la sección restante descubierta ($L_{RI} = L_{SM} - L_{PDMS}$) permite la detección del RI y el nivel de un líquido a través de su longitud de onda de resonancia (λ_D) y la potencia de reflexión (t_{NL}), respectivamente, de uno de los valles del espectro. Para la detección de nivel

del líquido el punto de inicio (0 mm) es tomada en la frontera entre la sección L_{PDMS} y L_{RI} , y como punto final (L_{RI}) la frontera entre la sección MM y SM .

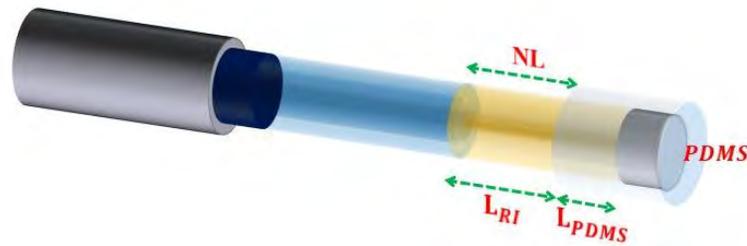


Figura 4. 6. Dispositivo SPR en punta de FO recubierta con PDMS en una extensión de la L_{SM}

El modelo teórico nos permite simular el comportamiento del dispositivo SPR de FO bajo el esquema de la detección simultánea, para una punta de FO-SM450 con L_{SM} 10 mm que está dividida en dos secciones, L_{PDMS} de 2 mm y L_{RI} de 8 mm. La primera diferencia respecto a los espectros en los que se tiene un dispositivo SPR de fibra óptica con una sola sección de detección, es la presencia de dos valles en el espectro de reflexión. Debido a que el RI de la sustancia bajo análisis es menor que el RI del PDMS, el valle localizado a la izquierda de la gráfica (longitudes de onda menores) corresponde al L_{RI} . Cuando la T y NL se mantiene fija y cambia el RI del líquido, se observa un desplazamiento de λ_D ideal hacia longitudes de ondas largas y la λ_{PDMS} se mantiene fijo como se observa en la gráfica de la Figura 4.7.a). Se observa también que la potencia de reflexión va cambiando; sin embargo, esto no indica un cambio en el nivel del líquido ya que su valor se encuentra a una λ_D diferente. Caso contrario a situación mostrada en la gráfica de la Figura 4.7.b) donde el cambio de nivel se manifiesta en el primer valle que muestra λ_D constante con un aumento en la potencia t_{NL} del mínimo conforme el líquido abarca toda la extensión L_{RI} . En la gráfica (Figura 4.7.c)) se simulan cambios en la T (20 °C a 40 °C) para un índice de refracción y nivel fijo, observando que la λ_{PDMS} se desplaza a longitudes de ondas cortas y la λ_D presenta un desplazamiento tenue, esto debido al TOC que posee el líquido bajo estudio.

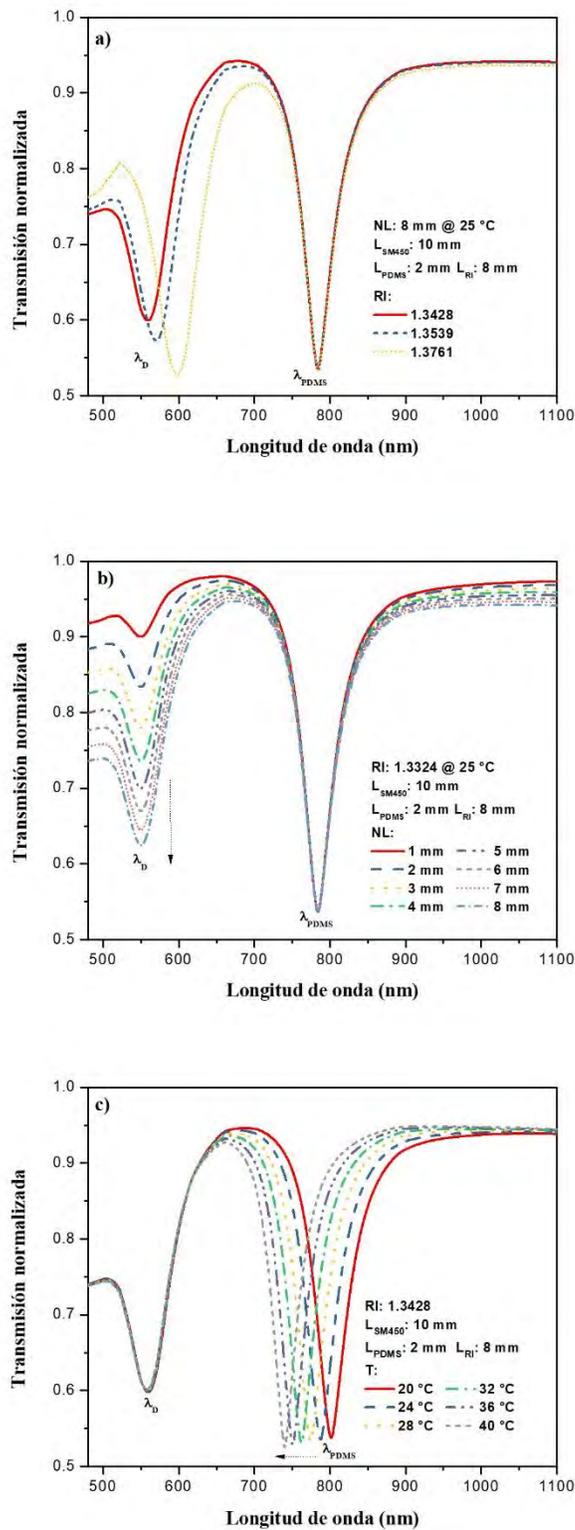


Figura 4. 7 Simulación de los espectros con dos canales SPR para la detección multiparamétrica en una punta SPR de FO-SM450 de L_{SM} de 10 mm, cubierta en una L_{PDMS} de 2 mm con PDMS y L_{RI} de 8 mm. a) Detección del RI, con T (25 °C) y NL fijo (8 mm), b) Detección del NL, para T (25 °C) y RI fijo (1.3324), c) Detección de temperatura para RI (1.3324) y NL fijo (8 mm).

Se realizó experimentalmente la detección simultánea de los tres parámetros, en un dispositivo SPR en punta de FO-SMF28 con una L_{PDMS} de 2 mm y L_{RI} de 8 mm, recubierta de una película de Cr-Au de espesor 3 nm y 30 nm; respectivamente. El sistema de interrogación en reflexión del dispositivo propuesto es presentado en la Figura 4.3, para la normalización de las señales se captura la señal de referencia en aire antes de que se recubriera con PDMS la punta de FO. La detección del RI se realiza introduciendo el dispositivo SPR en una muestra líquida, concentraciones de agua y glicerina de la Tabla 3.4, con una temperatura (24 °C) y nivel (8 mm) constante. En las gráficas de la Figura 4.8 a) se pueden observar dos valles SPR, canales, donde se distingue el desplazamiento *red shift* de λ_D conforme aumenta el RI (1.3324 y 1.3428), se observa también que λ_{PDMS} se mantiene constante.

Para la detección del nivel, una pieza de sujeción del dispositivo SPR en punta es anclada a una montura de desplazamiento en Y (perpendicular a la superficie) incorporando una escala milimétrica como referencia de la L_{RI} cubierta por el líquido. En las gráficas de la Figura 4.8 b) se observa los cambios en el espectro de reflexión cuando la punta de la fibra óptica se va introduciendo en el líquido. Se observa un cambio en el nivel sobre L_{RI} desde 0 mm hasta 8 mm; se parte de 0 mm desde la frontera entre la sección con PDMS y la sección de fibra óptica sin recubrir, hasta 8 mm en la sección MM-SM, cuando se ve cubierta esta sección por la muestra líquida con índice de refracción de 1.3324 y temperatura constante de 30 °C. Se observa que λ_D y λ_{PDMS} se mantienen constantes y la variación se presenta en la potencia de t_{NL} de la λ_D , a partir del cambio en este valor (ΔR_λ) se ajusta la curva característica experimental, como se observa la gráfica de la Figura 4.9 a).

En la detección de la temperatura para un índice de refracción de 1.3324 y nivel constante de 8 mm se obtiene un desplazamiento *blue shift* de la λ_{PDMS} , en la gráfica (Figura 4.8 c)) se muestran los espectros SPR para las temperaturas de 24 °C a 40 °C con incrementos de 2 °C y el desplazamiento de λ_{PDMS} es ajustada a la curva característica de la gráfica de la Figura 4.9 b). Sin embargo, no se percibe el desplazamiento de λ_D como se demuestra en el modelo teórico, donde el TOC de la muestra líquida influida por la temperatura conlleva a la variación de λ_D , esto se puede deber a que el dispositivo de FO no tiene la resolución suficiente que permita la visualización de este cambio.

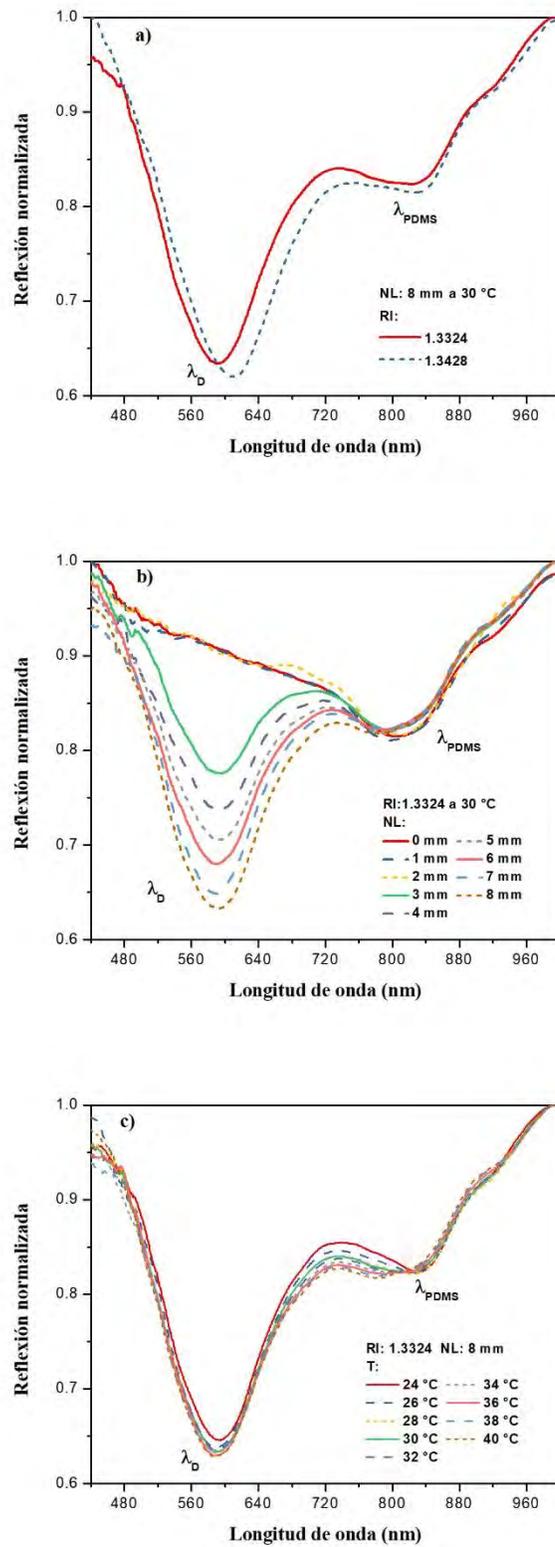


Figura 4. 8. Espectros con dos canales SPR experimentales para la detección multiparamétrica en una punta SPR de FO-SM450 de L_{SM} de 10 mm, cubierta en una L_{PDMS} de 2 mm con PDMS y L_{RI} de 8 mm. a) Detección del RI, con T y NL fijo, b) Detección del NL, para T y RI fijo, c) Detección de temperatura para RI y NL fijo.

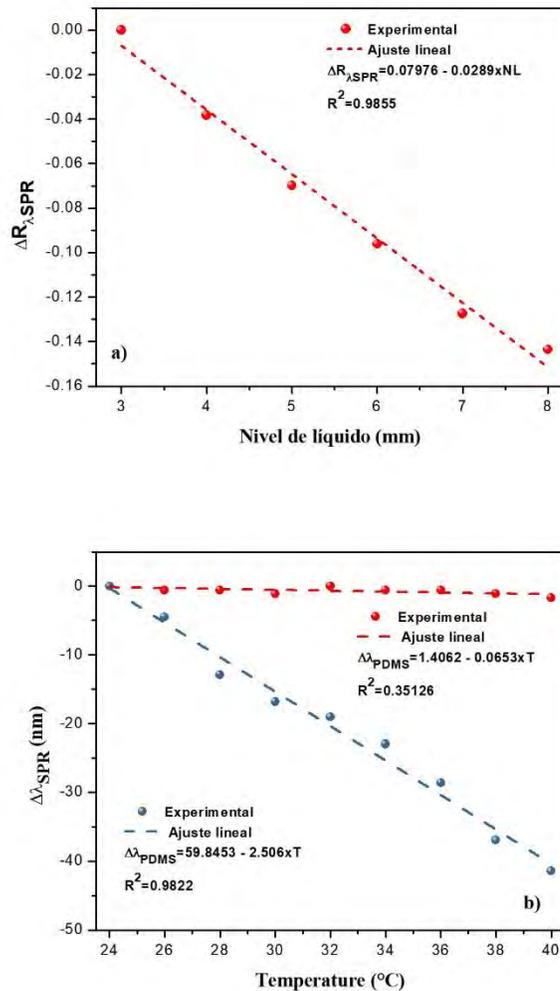


Figura 4. 9. Curvas de caracterización experimental para la medición multiparamétrica de un dispositivo SPR en punta de fibra SMF28 y L_{SM} de 10 mm con una película delgada de Cr-Au con espesor de 3 nm y 30 nm, respectivamente. a) Detección del NL, para T y RI fijo, b) Detección de temperatura para RI y NL fijo.

4.5. Aplicaciones

La tecnología de sensores de FO-SPR ofrece la posibilidad de conducir la luz a una ubicación remota proporcionando información de una o más variables físicas, químicas o biológicas, con las ventajas como inmunidad a señales electromagnética externas, estructura compacta y resistencia a ambientes hostiles.

En la industrias y el control de procesos el índice de refracción es un parámetro importante que permite distinguir la presencia de sustancias sean o no ajenas al proceso de producción

[100], además la detección del nivel de un líquido permite cuantificar el volumen de producción dentro de grandes contenedores [101], no obstante la temperatura es un parámetro importante de detectar en diferentes procesos y en la medición del índice de refracción de las sustancias ya que están íntimamente ligados.

Para la industria aeronáutica la detección del nivel en el combustible de los reactores es de gran necesidad, debido a los sistemas incorporados en los aviones existen filtraciones de agua en los tanques de combustible que por su densidad y bajo la influencia de la gravedad puede formar capas de hielo en la parte inferior del tanque interfiriendo en el flujo del combustible [102]. Por lo tanto para poder determinar la presencia de un líquido distinto al combustible mediante la detección de su índice de refracción es necesario contar también con un sistema para medir el nivel de combustible y la temperatura.

En aplicaciones biológicas muchas veces se requiere de sensores capaces de realizar la detección de más de un parámetro pero que a su vez sean plataformas compactas y sencillas de fabricar e interrogar, esto nos lleva a la idea de poder construir “Lab on a tip”[103]. Estos laboratorios de fibra óptica permiten además de una medición *in vivo* e *in situ* especialmente útiles en el campo de la biología [104], donde la cuantificación de moléculas presentes en una muestra líquida puede ser realizado a través de la medición del índice de refracción que se encuentra relacionado por su concentración. La temperatura es un parámetro que influye sobre las características de los elementos biológicos por lo tanto contar con sensores que permitan medirlo es muy importante.

4.6. Conclusiones

Se propuso y demostró un dispositivo SPR de fibra óptica para la detección simultánea de tres parámetros. Se desarrolló una metodología para la fabricación de los dispositivos SPR en punta, una capa de Aluminio y Silicio fueron depositados en la punta de FO sobre su sección transversal que actúan como espejo y mejoran la reflectividad y aumentan la intensidad de la señal óptica. El dispositivo SPR en reflexión fue caracterizado a diferentes índice de refracción de una solución de agua con diferentes concentraciones de glicerina presentando cambios en la posición del λ_{SPR} . Se fabricó un dispositivo para demostrar que es posible la detección simultánea del índice de refracción, temperatura y nivel de un líquido.

El espectro de reflexión del dispositivo fabricado presenta dos valles independientes y separados cuya longitud de onda de resonancia depende del índice de refracción del líquido bajo análisis y del PDMS. En el valle presentado en longitudes de ondas cortas se puede medir del índice de refracción y nivel conforme el dispositivo es inmerso en un líquido, los cambios de estos parámetros pueden ser medidos en base al desplazamiento de la longitud de onda y la reflectividad del valle, respectivamente. Mientras que con el valle formado por el índice de refracción del PDMS en longitudes de onda largas se puede medir cambios de temperatura en un líquido al medir el desplazamiento de la longitud de onda hacia longitudes de ondas cortas conforme la temperatura aumenta, debido a su alto TOC negativo. Los dispositivos SPR en la punta de fibra óptica se adaptan a condiciones donde los esquemas de transmisión no son la mejor alternativa.

CONCLUSIONES

La Refractometría, que comprende una serie de técnicas y métodos para medir el índice de refracción de una muestra sólida, líquida o gaseosa, recientemente ha tomado mucho auge debido al enorme potencial que tiene en campos tan importantes como la salud, el medio ambiente, los procesos de producción o la seguridad. Los refractómetros de fibra óptica, que aún están en una fase de investigación + desarrollo, están dirigidos a resolver problemas muy específicos en donde se puedan explotar sus características únicas. En este trabajo se propone el diseño de un refractómetro de fibra óptica basado en el fenómeno de resonancia de plasmón superficial que se puede interrogar en transmisión o reflexión. Basados en el principio de operación se simuló la respuesta del dispositivo diseñado, utilizando un modelo teórico propuesto por [58] en la literatura especializada, con el fin de encontrar los parámetros de diseño que nos aseguraran la mejor respuesta a índice de refracción. En base a estos parámetros se fabricaron varios dispositivos que posteriormente se caracterizaron, la metodología de fabricación y de caracterización se encuentran bien descritas y detalladas en el documento, además se demuestra que los refractómetros fabricados tienen una sensibilidad y resolución superior a los refractómetros de bulto, aunque un rango dinámico más limitado. Estos refractómetros son versátiles y pueden utilizarse para sensar un número importante de parámetros físicos, químicos o biológicos, en este trabajo se demuestra que los refractómetros fabricados pueden medir además la temperatura y el nivel de un líquido en un contenedor de manera independiente o simultánea.

En este trabajo, de entre todas las fibras ópticas o estructuras de fibras ópticas descritas en la literatura y disponibles para nosotros se seleccionó una estructura de fibra óptica conocida como heteronúcleo, que consiste de una fibra monomodo estándar entre dos fibras multimodo idénticas y que en el documento está descrita como MM-SM-MM. Esta estructura fue reportada por primera vez por Iga et al hace casi 20 años con la intención de generar campo evanescente en la frontera externa de la fibra óptica. Esta propiedad es la que más nos interesó pero además tiene otras características interesantes e importantes a considerar como son la simplicidad del proceso de fabricación y la robustez de la estructura. Como inconveniente, la intensidad del campo evanescente expuesto es pequeña por lo que la respuesta del

dispositivo a cambios de índice de refracción es mala, sensibilidad baja, y el rango dinámico es muy limitado, valores de índice de refracción cercanos al del revestimiento de la fibra monomodo. Para mejorar la sensibilidad al índice de refracción se recubre la fibra óptica de una película delgada de metal en el que el campo evanescente pueda generar una onda plasmónica. La teoría y los fundamentos de la resonancia de plasmón superficial está suficientemente descrita en la literatura científica, lo que ha facilitado la consulta y en consecuencia el entendimiento del fenómeno. En este trabajo nos hemos enfocado en proponer las metodologías de fabricación de las estructuras de fibra óptica MM-SM-MM y de recubrimiento de su superficie con películas delgadas de Cr, para mejora la adherencia del vidrio, y oro. Primero se determinó los parámetros óptimos de diseño para el dispositivo SPR de fibra óptica, se realizó un análisis numérico de la simulación SPR del modelo teórico en la estructura heteronúcleo, el resultado numérico indicó que para una sección de 10 mm de SM con espesor de 30 nm de Oro se tiene espectros SPR mejor definidos. A partir de estas características se realizó la fabricación de la estructura MM-SM-MM como dispositivos de campo evanescente expuesto, desarrollando una metodología para optimizar el proceso y obtener una repetitividad en la fabricación.

El depósito de las películas delgadas se hizo por evaporación térmica, para hacerlo adecuadamente y poder generar una metodología se diseñaron y fabricaron monturas, para almacenar hasta 35 dispositivos de fibra óptica, y soportes para sujetar esta montura dentro de la cámara de la evaporadora. La geometría cilíndrica de la fibra óptica presenta algunos retos cuando se quiere recubrir su superficie con una película delgada, después de analizar las alternativas se decidió integrar un mecanismo que permite rotar 180° la montura, para depositar película delgada de metal sobre dos extremos opuestos de la periferia de la fibra óptica y obtener una película metálica cuasi-homogénea.

Para el análisis experimental de la respuesta de estos dispositivos SPR de fibra óptica a cambios de índice de refracción se diseñaron y fabricaron plataformas compactas, reconfigurables y de fácil manejo. Una de estas plataformas es una celda microfluídica donde se introduce la fibra óptica en un canal de sección transversal de $700 \times 700 \mu\text{m}$, y con la que fue posible hacer mediciones del índice de refracción en volúmenes pequeños de hasta $100 \mu\text{L}$ y con una sensibilidad de 1000 nm/RIU . Esta es la primera vez que se construye en el CIO un refractómetro de estas cualidades. Se diseñaron y fabricaron plataformas con 6

canales de microfluidos en los que se pueden integrar los dispositivos para interrogar varios procesos. La temperatura es un factor que afecta el índice de refracción y se debe considerar en todo refractómetro, ya sea que se construya un interferómetro insensible a temperatura o que se integre un termómetro al sistema. En el caso de las fibras ópticas, en el que la medida es puntual en una región de aproximadamente $100 \mu\text{m}^2$, el uso de termómetros convencionales es poco práctico e inútil por lo que lo ideal es que el termómetro esté integrado en la fibra óptica. Debido a la alta sensibilidad de los refractómetros de fibra óptica basados en SPR se propuso medir la temperatura aprovechando el mismo mecanismo de transducción utilizando un material con un TOC grande y conocido como lo es el PDMS, este sensor de temperatura tiene una sensibilidad de $3000 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ para el rango de mediciones. Esto permitió demostrar que es posible medir de manera simultánea el índice de refracción y la temperatura de un líquido.

En el proceso de análisis experimental se tuvieron dificultades para determinar los parámetros característicos de la respuesta plasmónica de la señal transmitida, principalmente la localización de la longitud de onda de resonancia que permite definir el índice de refracción del medio externo. El problema se debía a la presencia de rizo en la señal y que generaba poca definición en los espectros SPR transmitidos, especialmente en el valle y que dificultaba la identificación de la longitud de onda del mínimo que correspondía a la de resonancia. Para resolver este problema se decidió aplicar un suavizado digital de las señales para definir la curva SPR y localizar el mínimo. Para simplificar y automatizar el análisis de la señal se desarrolló un algoritmo que obtenía de manera automática las características del espectro SPR.

En afán de construir dispositivos de FO más prácticos y fáciles de utilizar, y adecuados cuando se utilizan muestras líquidas, se construyeron dispositivos SPR de FO que operan en reflexión. Se propuso y demostró que es posible realizar mediciones simultáneas de más de un parámetro utilizando un refractómetro SPR en la punta de una fibra óptica. Se presentaron los resultados obtenidos en la medición simultánea del índice de refracción, la temperatura y el nivel de un líquido almacenado en un pequeño contenedor. A diferencia de los dispositivos SPR en transmisión, estos dispositivos presentan un mayor ruido en las señales reflejadas y con un nivel en la potencia más baja lo que complica enormemente en análisis de la señal, sin embargo esto se puede mejorar si se utilizan mejores fuentes de luz, dispositivos de fibra

óptica con menos pérdidas, analizadores de espectros óptico con mayor resolución o mejorando la fabricación de los espejos depositados en la punta de fibra óptica. También se puede migrar a estructuras de fibra óptica con campo evanescente expuesto de mejor desempeño.

REFERENCIA

- [1] J. Crisp and B. Elliott, “4 - Propagation of light along the fiber,” in *Introduction to Fiber Optics (Third Edition)*, Third Edit., J. Crisp and B. Elliott, Eds. Oxford: Newnes, 2005, pp. 23–39.
- [2] J. Dakin and R. G. W. Brown, *Handbook of optoelectronics. Volume 2, Enabling technologies.* .
- [3] K. S. Thyagarajan and A. Ghatak, *Fiber Optic Essentials*. Wiley, 2007.
- [4] I. Thormählen, J. Straub, and U. Grigull, “Refractive Index of Water and Its Dependence on Wavelength, Temperature, and Density,” *J. Phys. Chem. Ref. Data*, vol. 14, no. 4, pp. 933–945, 1985.
- [5] M. Born and E. Wolf, *Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light*. Elsevier Science, 2013.
- [6] J. Kenkel, *Analytical Chemistry for Technicians, Third Edition*. CRC Press, 2010.
- [7] RUDOLPH RESEARCH ANALITYCAL, “REFRACTOMETERS.” [Online]. Available: <https://rudolphresearch.com/products/refractometers/>. [Accessed: 03-May-2018].
- [8] Bellingham+Stanley, “Refractometers overview.” [Online]. Available: <https://www.bellinghamandstanley.com/ltd/refractometers.html>. [Accessed: 03-May-2018].
- [9] A.KRÜSS Optronic, “Refraktometer.” [Online]. Available: <https://www.kruess.com/produkt-kategorie/refraktometer/abbe-refraktometer/>. [Accessed: 04-May-2018].
- [10] A. ENTERPRISE, “Refractometer.” [Online]. Available: <https://refractometer.com/digital-refractometer/>. [Accessed: 25-May-2018].
- [11] sartorius stedium, “Process Refractometry,” *WI-4002*, 2011. [Online]. Available: http://microsite.sartorius.com/fileadmin/sartorius_pdf/alle/WP-Process_Refractometry-e.pdf. [Accessed: 25-May-2018].
- [12] N. Diaz-Herrera, O. Esteban, M. C. Navarrete, and A. Gonzalez-Cano, “Fiber optic salinity probe,” 2004, vol. 5502, p. 455.
- [13] Y. Qian, Y. Zhao, Q. Wu, and Y. Yang, “Review of salinity measurement

- technology based on optical fiber sensor,” *Sensors Actuators B Chem.*, vol. 260, pp. 86–105, May 2018.
- [14] M. S. Jadhav *et al.*, “Fluoride contamination sensor based on optical fiber grating technology,” *Opt. Fiber Technol.*, vol. 38, pp. 136–141, Nov. 2017.
- [15] F. Jiménez-Márquez, J. Vázquez, J. Úbeda, and J. L. Sánchez-Rojas, “Temperature dependence of grape must refractive index and its application to winemaking monitoring,” *Sensors Actuators B Chem.*, vol. 225, pp. 121–127, Mar. 2016.
- [16] R. C. R. Santos, R. B. Vieira, and A. Valentini, “Monitoring the conversion of soybean oil to methyl or ethyl esters using the refractive index with correlation gas chromatography,” *Microchem. J.*, vol. 109, pp. 46–50, Jul. 2013.
- [17] T. A. Oyehan, I. O. Alade, A. Bagudu, K. O. Sulaiman, S. O. Olatunji, and T. A. Saleh, “Prediction of the refractive index of haemoglobin using the Hybrid GA-SVM approach,” *Comput. Biol. Med.*, Apr. 2018.
- [18] P. Hariharan, *Optical interferometry*. Academic Press, 2003.
- [19] J. G. Webster and H. Eren, *Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook, Second Edition: Electromagnetic, Optical, Radiation, Chemical, and Biomedical Measurement*. CRC Press, 2014.
- [20] R. Haglund, “The Properties of Light,” in *Springer Handbook of Lasers and Optics*, New York, NY: Springer New York, 2007, pp. 3–32.
- [21] P. Boisseau, P. Houdy, and M. Lahmani, “Nanoscience.”
- [22] P. Nath, H. K. Singh, P. Datta, and K. C. Sarma, “All-fiber optic sensor for measurement of liquid refractive index,” *Sensors Actuators A Phys.*, vol. 148, no. 1, pp. 16–18, Nov. 2008.
- [23] H. Su and X. G. Huang, “Fresnel-reflection-based fiber sensor for on-line measurement of solute concentration in solutions,” *Sensors Actuators B Chem.*, vol. 126, no. 2, pp. 579–582, Oct. 2007.
- [24] P. Nath and M. Buragohain, “Single-mode fibre coupler as refractometer sensor,” *Indian Acad. Sci.*, vol. 79, no. 6, pp. 1525–1532, 2012.
- [25] Y. Zhao, Z. Deng, and Q. Wang, “Fiber optic SPR sensor for liquid concentration measurement,” *Sensors Actuators B Chem.*, vol. 192, pp. 229–233, Mar. 2014.
- [26] X. Shu, X. Zhu, S. Jiang, W. Shi, and D. Huang, “High sensitivity of dual resonant

- peaks of long-period fibre grating to surrounding refractive index changes,” *Electron. Lett.*, vol. 35, no. 18, p. 1580, 1999.
- [27] J. Villatoro, D. Monzón-Hernández, and D. Talavera, “High resolution refractive index sensing with cladded multimode tapered optical fibre.”
- [28] L. C. Oliveira, A. M. N. Lima, C. Thirstrup, and H. F. Neff, *Surface plasmon resonance sensors : a materials guide to design and optimization*. 2015.
- [29] R. W. Wood, “XLII. On a remarkable case of uneven distribution of light in a diffraction grating spectrum,” *London, Edinburgh, Dublin Philos. Mag. J. Sci.*, vol. 4, no. 21, pp. 396–402, 1902.
- [30] W. L. Barnes, A. Dereux, and T. W. Ebbesen, “Surface plasmon subwavelength optics,” *Nature*, vol. 424, p. 824, Aug. 2003.
- [31] T. SØNDERGAARD and S. I. BOZHEVOLNYI, “SURFACE PLASMON POLARITON GUIDING IN PHOTONIC BANDGAP STRUCTURES,” in *Surface Plasmon Nanophotonics*, Dordrecht: Springer Netherlands, pp. 73–86.
- [32] S. A. Maier, *Plasmonics: Fundamentals and Applications*. Springer US, 2007.
- [33] M. Bertolotti, C. Sibilía, and A. M. Guzman, *Evanescent Waves in Optics: An Introduction to Plasmonics*. Springer International Publishing, 2017.
- [34] J. R. Sambles, G. W. Bradbery, and F. Yang, “Optical excitation of surface plasmons: An introduction,” *Contemp. Phys.*, vol. 32, no. 3, pp. 173–183, 1991.
- [35] E. Wijaya *et al.*, “Surface plasmon resonance-based biosensors: From the development of different SPR structures to novel surface functionalization strategies,” *Curr. Opin. Solid State Mater. Sci.*, vol. 15, no. 5, pp. 208–224, 2011.
- [36] H. Frey and H. R. Khan, *Handbook of Thin-Film Technology*. 2015.
- [37] A. D. Taylor, J. Ladd, J. Homola, and S. Jiang, “Surface Plasmon Resonance (SPR) Sensors for the Detection of Bacterial Pathogens,” in *Principles of Bacterial Detection: Biosensors, Recognition Receptors and Microsystems*, M. Zourob, S. Elwary, and A. Turner, Eds. New York, NY: Springer New York, 2008, pp. 83–108.
- [38] P. Singh, *Surface Plasmon Resonance*. Nova Science Publishers, Incorporated, 2014.
- [39] M.-C. Estevez, M. A. Otte, B. Sepulveda, and L. M. Lechuga, “Trends and challenges of refractometric nanoplasmonic biosensors: A review,” *Anal. Chim. Acta*, vol. 806, pp. 55–73, Jan. 2014.

- [40] J. Homola and M. Piliarik, "Surface Plasmon Resonance (SPR) Sensors," in *Springer Ser Chem Sens Biosens*, vol. 4, 2006, pp. 45–67.
- [41] F. W. Steinbruck Andrea, Csaki Andrea, *Reviews in Plasmonics 2010, Chapter 1*, vol. 2010. 2012.
- [42] R. K. Gupta, "Sensing Through Surface Plasmon Resonance Technique," *Rev. Plasmon.*, 2016.
- [43] J. Homola, S. S. Yee, and G. Gauglitz, "Surface plasmon resonance sensors: review," *Sensors Actuators B Chem.*, vol. 54, no. 1–2, pp. 3–15, Jan. 1999.
- [44] J. Homola, "Present and future of surface plasmon resonance biosensors," *Anal. Bioanal. Chem.*, vol. 377, no. 3, pp. 528–539, 2003.
- [45] S. P. Resonance, "Advanced Methods in Structural Biology," pp. 227–237, 2016.
- [46] B. Liedberg, C. Nylander, and I. Lundström, "Biosensing with surface plasmon resonance-how it all started," 1995.
- [47] R. B. M. (Richard B. M. . Schasfoort and A. J. Tudos, *Handbook of surface plasmon resonance*. Royal Society of Chemistry, 2008.
- [48] K. S. Phillips and Q. J. Cheng, *Surface plasmon resonance*. 2008.
- [49] X. D. Hoa, A. G. Kirk, and M. Tabrizian, "Towards integrated and sensitive surface plasmon resonance biosensors: A review of recent progress," *Biosens. Bioelectron.*, vol. 23, no. 2, pp. 151–160, 2007.
- [50] C. Zhang and D. Van Noort, *Cells in microfluidics*, vol. 304. 2011.
- [51] M. Zekriti, "Temperature Effects on the Resolution of Surface-Plasmon-Resonance-Based Sensor."
- [52] M. Piliarik, M. Vala, I. Tichý, and J. Homola, "Compact and low-cost biosensor based on novel approach to spectroscopy of surface plasmons," *Biosens. Bioelectron.*, vol. 24, no. 12, pp. 3430–3435, Aug. 2009.
- [53] T. . Chinowsky, J. . Quinn, D. . Bartholomew, R. Kaiser, and J. . Elkind, "Performance of the Spreeta 2000 integrated surface plasmon resonance affinity sensor," *Sensors Actuators B Chem.*, vol. 91, no. 1–3, pp. 266–274, Jun. 2003.
- [54] T. M. Chinowsky *et al.*, "Portable 24-analyte surface plasmon resonance instruments for rapid, versatile biodetection," *Biosens. Bioelectron.*, vol. 22, pp. 2268–2275, 2007.

- [55] M. Couture, S. S. Zhao, and J.-F. Masson, “Modern surface plasmon resonance for bioanalytics and biophysics,” *Phys. Chem. Chem. Phys.*, vol. 15, no. 27, pp. 11190–11216, 2013.
- [56] M. de F. F. Domingues and A. Radwan, “Optical Fiber Sensors in IoT,” 2017, pp. 73–86.
- [57] C. A. J. Gouveia, J. M., and P. A.S., “Refractometric Optical Fiber Platforms for Label Free Sensing,” in *Current Developments in Optical Fiber Technology*, InTech, 2013.
- [58] B. D. Gupta and R. Kant, “Recent advances in surface plasmon resonance based fiber optic chemical and biosensors utilizing bulk and nanostructures,” *Opt. Laser Technol.*, vol. 101, pp. 144–161, May 2018.
- [59] C. Nylander, B. Liedberg, and T. Lind, *Gas detection by means of surface plasmon resonance*, vol. 3. Elsevier, 2012.
- [60] R. C. Jorgenson and S. S. Yee, “A fiber-optic chemical sensor based on surface plasmon resonance,” *Sensors Actuators B Chem.*, vol. 12, no. 3, pp. 213–220, Apr. 1993.
- [61] Y. Zhao, M. Lei, S.-X. Liu, and Q. Zhao, “Smart hydrogel-based optical fiber SPR sensor for pH measurements,” *Sensors Actuators B Chem.*, vol. 261, pp. 226–232, May 2018.
- [62] V. Semwal, A. M. Shrivastav, R. Verma, and B. D. Gupta, “Surface plasmon resonance based fiber optic ethanol sensor using layers of silver/silicon/hydrogel entrapped with ADH/NAD,” *Sensors Actuators B Chem.*, vol. 230, pp. 485–492, Jul. 2016.
- [63] Rajan, S. Chand, and B. D. Gupta, “Fabrication and characterization of a surface plasmon resonance based fiber-optic sensor for bittering component-Naringin,” *Sensors Actuators, B Chem.*, vol. 115, no. 1, pp. 344–348, May 2006.
- [64] L. Coelho, J. M. M. M. De Almeida, J. L. Santos, R. A. S. Ferreira, P. S. André, and D. Viegas, “Sensing Structure Based on Surface Plasmon Resonance in Chemically Etched Single Mode Optical Fibres.”
- [65] A. A. Rifat *et al.*, “Photonic crystal fiber based plasmonic sensors,” *Sensors Actuators B Chem.*, vol. 243, pp. 311–325, May 2017.

- [66] J. Wu, S. Li, M. Shi, and X. Feng, "Photonic crystal fiber temperature sensor with high sensitivity based on surface plasmon resonance," *Opt. Fiber Technol.*, vol. 43, pp. 90–94, Jul. 2018.
- [67] J. Albert, S. Lepinay, C. Caucheteur, and M. C. DeRosa, "High resolution grating-assisted surface plasmon resonance fiber optic aptasensor," *Methods*, vol. 63, no. 3, pp. 239–254, Oct. 2013.
- [68] B. Lee, S. Roh, and J. Park, "Current status of micro- and nano-structured optical fiber sensors," *Opt. Fiber Technol.*, vol. 15, no. 3, pp. 209–221, 2009.
- [69] A. K. Sharma, A. K. Pandey, and B. Kaur, "A Review of advancements (2007–2017) in plasmonics-based optical fiber sensors," *Opt. Fiber Technol.*, vol. 43, pp. 20–34, Jul. 2018.
- [70] O. S. Wolfbeis, *Springer Series on Chemical Sensors and Biosensors: Method and Applications*, vol. 4. 2006.
- [71] M. Kanso, S. Cuenot, and G. Louarn, "Sensitivity of Optical Fiber Sensor Based on Surface Plasmon Resonance: Modeling and Experiments," 2008.
- [72] Y. Ying, G. Si, F. Luan, K. Xu, Y. Qi, and H. Li, "Recent research progress of optical fiber sensors based on D-shaped structure," *Opt. Laser Technol.*, vol. 90, pp. 149–157, May 2017.
- [73] M. F. Ubeid and M. M. Shabat, "Analytical sensitivity and reflected power through a D-shape optical fibre sensor," *Opto-electronics Rev.*, vol. 22, no. 3, pp. 191–195, 2014.
- [74] M.-H. Chiu, "New idea for a D-type optical fiber sensor based on Kretschmann's configuration," *Opt. Eng.*, vol. 44, no. 3, p. 030502, Mar. 2005.
- [75] A. Mason, *Sensing Technology: Current Status and Future Trends III*. .
- [76] S. Guo and S. Albin, "Transmission property and evanescent wave absorption of cladded multimode fiber tapers," *Opt. Express*, vol. 11, no. 3, p. 215, 2003.
- [77] Ó. Esteban, F. B. Naranjo, N. Díaz-Herrera, S. Valdueza-Felip, M.-C. Navarrete, and A. González-Cano, "High-sensitive SPR sensing with Indium Nitride as a dielectric overlay of optical fibers," *Sensors Actuators B Chem.*, vol. 158, no. 1, pp. 372–376, Nov. 2011.
- [78] J. Zhao *et al.*, "Surface plasmon resonance refractive sensor based on silver-coated

- side-polished fiber,” *Sensors Actuators B Chem.*, vol. 230, pp. 206–211, Jul. 2016.
- [79] M. Iga, A. Seki, and K. Watanabe, “Hetero-core structured fiber optic surface plasmon resonance sensor with silver film,” *Sensors Actuators B*, vol. 101, pp. 368–372, 2004.
- [80] R. Biswas and P K Karmakar, “All fiber optic hetero-core spliced multimode single mode multimode filter,” *Opt. Quantum Electron.*, vol. 48.
- [81] F. Xu, D. Chen, B. Peng, J. Xu, and G. Wu, “All-fiber refractometer based on core mismatch structure,” *Laser Phys.*, vol. 22, no. 10, pp. 1577–1580, 2012.
- [82] J. Villatoro and D. Monzón-Hernández, “Low-cost optical fiber refractive-index sensor based on core diameter mismatch,” *J. Light. Technol.*, vol. 24, no. 3, pp. 1409–1413, Mar. 2006.
- [83] M. Iga, A. Seki, Y. Kubota, and K. Watanabe, “Acidity measurements based on a hetero-core structured fiber optic sensor,” *Sensors Actuators B Chem.*, vol. 96, no. 1–2, pp. 234–238, Nov. 2003.
- [84] M. Iga, A. Seki, and K. Watanabe, “Hetero-core structured fiber optic surface plasmon resonance sensor with silver film,” *Sensors Actuators, B Chem.*, vol. 101, no. 3, pp. 368–372, Jul. 2004.
- [85] A. Seki, K. Narita, and K. Watanabe, “Refractive Index Measurement in Sucrose Solution and Beverage Using Surface Plasmon Resonance Sensor Based on Hetero-core Structured Fiber Optic,” *Procedia Chem.*, vol. 20, pp. 115–117, Jan. 2016.
- [86] L. S. Goh, N. Kumekawa, K. Watanabe, and N. Shinomiya, “Hetero-core spliced optical fiber SPR sensor system for soil gravity water monitoring in agricultural environments,” *Comput. Electron. Agric.*, vol. 101, pp. 110–117, Feb. 2014.
- [87] A. Hosoki, M. Nishiyama, H. Igawa, Y. Choi, and K. Watanabe, “Surface Plasmon Resonance Hydrogen Sensor based on Hetero-core Optical Fiber Structure,” *Procedia Eng.*, vol. 47, pp. 128–131, Jan. 2012.
- [88] H. A. Macleod, H. Angus and Macleod, *Thin-film optical filters*. 2001.
- [89] R. Gupta, Banshi Dhar and Srivastava, Sachin Kumar and Verma, “Fiber optic sensors based on plasmonics,” *World Scientific*. 2015.
- [90] A. K. (Ajoy K. . Ghatak and K. Thyagarajan, *An introduction to fiber optics*. Cambridge University Press, 1998.

- [91] C. M. (Clifford M. . Krowne and Y. (Yong) Zhang, *Physics of negative refraction and negative index materials : optical and electronic aspects and diversified approaches*. Springer, 2007.
- [92] “Single Mode Fiber.” [Online]. Available: https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=949&pn=SM450. [Accessed: 21-Oct-2018].
- [93] S. Sharma, P. B. Patel, R. S. Patel, and J. J. Vora, “Density and comparative refractive index study on mixing properties of binary liquid mixtures of eucalyptol with hydrocarbons at 303.15, 308.15 and 313.15 K,” *J. Chem.*, vol. 4, no. 3, pp. 343–349, 2007.
- [94] Z. Liu *et al.*, “Dual-channel surface plasmon resonance refractive index sensor based on modified hetero-core structure fiber,” *Opt. Commun.*, vol. 403, pp. 290–295, Nov. 2017.
- [95] “Form 2: Desktop Stereolithography (SLA) 3D Printer | Formlabs.” [Online]. Available: <https://formlabs.com/3d-printers/form-2/>. [Accessed: 02-Nov-2018].
- [96] E. Rodríguez-Schwendtner, A. González-Cano, N. Díaz-Herrera, M. C. Navarrete, and Ó. Esteban, “Signal processing in SPR fiber sensors: Some remarks and a new method,” *Sensors Actuators B Chem.*, vol. 268, pp. 150–156, Sep. 2018.
- [97] W. Schrott, M. Svoboda, Z. Slouka, M. P??íbyl, and D. ??nita, “PDMS microfluidic chips prepared by a novel casting and pre-polymerization method,” *Microelectron. Eng.*, vol. 87, no. 5–8, pp. 1600–1602, 2010.
- [98] G. Abbate, U. Bernini, E. Ragozzino, and F. Somma, “The temperature dependence of the refractive index of water,” *J. Phys. D. Appl. Phys.*, vol. 11, no. 8, pp. 1167–1172, Jun. 1978.
- [99] J. S. Velázquez-González, D. Monzón-Hernández, D. Moreno-Hernández, F. Martínez-Piñón, and I. Hernández-Romano, “Simultaneous measurement of refractive index and temperature using a SPR-based fiber optic sensor,” *Sensors Actuators B Chem.*, vol. 242, pp. 912–920, Apr. 2017.
- [100] A. G. Leal-Junior, C. Marques, A. Frizera, and M. J. Pontes, “Multi-interface level in oil tanks and applications of optical fiber sensors,” *Opt. Fiber Technol.*, vol. 40, pp. 82–92, Jan. 2018.

- [101] P. Antunes, J. Dias, T. Paixão, E. Mesquita, H. Varum, and P. André, “Liquid level gauge based in plastic optical fiber,” *Measurement*, vol. 66, pp. 238–243, Apr. 2015.
- [102] G. Onorato, G. Persichetti, I. A. Grimaldi, G. Testa, and R. Bernini, “Optical fiber fuel level sensor for aeronautical applications,” *Sensors Actuators A Phys.*, vol. 260, pp. 1–9, Jun. 2017.
- [103] C.-L. Zhang, Y. Gong, Y. Wu, Y.-J. Rao, G.-D. Peng, and X. Fan, “Lab-on-tip based on photothermal microbubble generation for concentration detection,” *Sensors Actuators B Chem.*, vol. 255, pp. 2504–2509, Feb. 2018.
- [104] J. S. Paiva, P. A. S. Jorge, C. C. Rosa, and J. P. S. Cunha, “Optical fiber tips for biological applications: From light confinement, biosensing to bioparticles manipulation,” *Biochim. Biophys. Acta - Gen. Subj.*, vol. 1862, no. 5, pp. 1209–1246, May 2018.

ANEXO A

Anexo A.1 Algoritmo para la obtención del FWHM y la λ_{SPR} desarrollado en el laboratorio de SOM

```

clear all; close all; clc;
T=csvread('Au_30_RI.dat'); %Archivo .dat

%%
rut=size(T,1);
No=rut;
vec_SPR=zeros(No-1,2); %Vector donde se guardan los picos SPR y su potencia
vec_width=zeros(No-1,1); %Vector donde se guardan los anchos
vec_altura=zeros(No-1,1); %Vector donde se guardan las alturas del peak SPR a ancho medio.

for rut= 2:No
LW=T(1,:); %Vector con longitud de onda
y=T(rut,:);

nsize = size(y,2);

[pmin,indmin] = min(y);

[pmax,indmax] = max(y(1:indmin));
half=pmax-((pmax-pmin)/2);

%Calculo de la posición de los dos puntos de la altura media, para calcular el FWHM

%Barrido antes del mínimo
for iii = 1:nsize-1
    if (y(iii)>=half) && (y(iii+1)<half)
        break;
    end
end
%Barrido después del mínimo
for jjj = indmin:nsize-1
    if (y(jjj)<=half) && (y(jjj+1)>half)
        break;
    end
end

width=(jjj-iii); %Ancho en columna
widthMedia =round(width/2); %Mitad del ancho en columna
a=iii+widthMedia; %Ubicación columna del peakSPR

pointL=[T(1,iii),T(rut,iii)]; %Punto Izquierdo Media altura
pointR=[T(1, jjj),T(rut, jjj)]; %Punto Derecho Media altura

```

```

widthLamda=pointR(1)-pointL(1);      %Ancho en nm
peakSPR=[T(1,a),T(rut,a)];          %Longitud de onda SPR

vec_SPR(rut-1,1)=T(1,a);
vec_SPR(rut-1,2)=T(rut,a);          %Vector con las LSPR de los espectros SPR
vec_width(rut-1,1)=widthLambda;     %Vector con los FWHM de los espectros SPR

vec_altura(rut-1,1)=half-T(rut,a);
figure
hold on
plot(LW,y)
plot(pointL(1),pointL(2),'g*')
plot(pointR(1),pointR(2),'g*')

plot(peakSPR(1),peakSPR(2),'r*')
xlim([480 1200])
hold off
end

```

Anexo A.2 Protocolo para el uso de PDMS

- 1) El PDMS (Sylgard 184, Dow Corning) se prepara mezclando minuciosamente en un tubo eppendorf el pre-polímero y el agente de curado, con una relación de peso de 10:1.
- 2) Una desgasificación del PDMS es realizado por medio de una desecadora por un tiempo de 20 minutos, el objetivo de este proceso es remover las burbujas de aire presentes en la mezcla del PDMS.
- 3) El PDMS es depositado en el área del sustrato de interés y es curado en un contenedor durante 60 minutos a 60 °C.

ANEXO B

TRABAJOS

- M. del C. Alonso-Murias, J.S. Velázquez-González, C.E. Domínguez-Flores, O. Rodríguez-Quiroz y D. Monzón-Hernández. “*Fabricación de sensores de índice de refracción de fibra óptica en punta basados en la resonancia de plasmón superficial*”. LXI CONGRESO NACIONAL DE FÍSICA, Noviembre 2018.
- J.S. Velázquez-González, M. del C. Alonso-Murias, O. Rodríguez-Quiroz, C.E. Domínguez-Flores, y D. Monzón-Hernández. “*Análisis numérico de un sensor de índice de refracción de fibra óptica basado en la resonancia de plasmón superficial*”. LXI CONGRESO NACIONAL DE FÍSICA, Noviembre 2018.
- M. d. C. A. Murias, J. S. Velázquez-González, and D. Monzón-Hernández, "SPR fiber tip sensor for the simultaneous measurement of refractive index, temperature, and level of a liquid," in *26th International Conference on Optical Fiber Sensors*, OSA Technical Digest (Optical Society of America, 2018), paper TuE79.
- Monserrat Alonso Murias, Josué I. Basulto, J. Salvador Velázquez González, S. Marquez, and David Monzón-Hernández. “*Optical fiber Surface Plasmon Resonance-based temperature sensor*”. 19th International Symposium on Optomechatronic Technology Cancún, México, Nov. 2018

ESTANCIAS DE INVESTIGACIÓN

JUNIO 2018

- Grupo de Fotónica Aplicada de la Universidad del País Vasco. “*Fabricación de interferómetros con fibras especiales*”. Dr. Joel Villatoro. Bilbao, España.

ESCUELAS DE VERANO

JUNIO 2018

- Beca Universidad Menéndez Pelayo. “*III International School on Light Sciences and Technologies*”. Santander, España.

CERTIFICACIONES

NOVIEMBRE 2017-2019

- Desarrollador Asociado Certificado de LabVIEW.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por su apoyo en la asignación de la beca, fundamental en el desarrollo y continuidad de mi proyecto de tesis para la obtención de grado de la Maestría en Optomecatrónica. De igual manera agradezco a las autoridades académicas del Centro de Investigaciones en Óptica, A.C. (CIO) por su apoyo para poder asistir a eventos académicos nacionales e internacionales durante el posgrado. A los laboratorios y talleres dentro del CIO que fueron una pieza importante en el desarrollo del proyecto.

Mi mayor gratitud con el Prof. David Mozón-Hernández, por su valiosa dirección y asesoría para el desarrollo de la tesis y obtención del grado, y aceptarme en el Grupo de Sensores Óptico y Microdispositivos (GSOM). Agradezco y admiro la calidad humana que posee, demostrando siempre la confianza, el apoyo incondicional, los consejos y su preocupación, que hace de ello un ambiente de trabajo grato y admirable. Por su ejemplo de ser justos, honestos, trabajadores y la accesibilidad en todo momento; por las oportunidades y experiencias de crecimiento que me brindó tanto profesional como personal durante mi estancia. Agradezco al Dr. Salomón por su apoyo, colaboración y por aceptar ser parte de mi comité revisor, de quien obtuve sugerencias y comentarios constructivos para reforzar el trabajo. Así mismo al Dr. Rigoberto por los comentarios y sugerencias que hizo para mejora del trabajo. Agradezco a los compañeros del laboratorio SOM por su apoyo. A mis compañeros de generación del posgrado por los momentos compartidos. De manera especial al M.O. Juan Vicente y al M.O. Andrés por convertirse en mis mejores amigos y colegas, una amistad acompañada del apoyo incondicional, la preocupación, y horas eternas de pláticas donde los regaños, las rizas y más que una lágrima nunca faltaron. Al Dr. Salvador por su apoyo y amistad incondicional tanto académico como personal, quien junto a su esposa Brenda no dudaron nunca en tenderme una mano y preocuparse por mí.

Por último pero no menos importante a Lucy, Andres, Lupita, Yeshua y Natanael (mi familia), por su cariño, paciencia, preocupación, apoyo en todo momento y sus palabras de ánimo. La distancia no fue un obstáculo para saber de su amor, gracias por estar siempre para mí y ser los pilares que me sostienen en cada reto.