



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
ELÉCTRICA – INSTRUMENTACIÓN

DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UN DISPOSITIVO EN ÓPTICA INTEGRADA BASADO EN
LA DEFLEXIÓN ÓPTICA PARA LA DETECCIÓN DE MOLÉCULAS BIOLÓGICAS

TESIS QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
ZOÉ MICHELLE BURGOS TORRES

TUTORA
DRA. CELIA SÁNCHEZ PÉREZ, CCADET

MÉXICO, D. F. ABRIL 2013

JURADO ASIGNADO:

Presidente: DR. AUGUSTO GARCÍA VALENZUELA
Secretario: DR. RAMÓN GUTIÉRREZ CASTREJÓN
Vocal: DRA. CELIA ANGELINA SÁNCHEZ PÉREZ
1^{er}. Suplente: DR. NASER QURESHI
2^{d o}. Suplente: DR. GABRIEL EDUARDO SANDOVAL ROMERO

Lugar donde se realizó la tesis: Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico, UNAM

TUTOR DE TESIS:

DRA. CELIA ANGELINA SÁNCHEZ PÉREZ

FIRMA

Dedicatoria

A Dios

Por darme la oportunidad de vivir y por estar conmigo en cada paso que doy, por fortalecer mi corazón e iluminar mi mente y por haber puesto en mi camino a aquellas personas que han sido mi soporte y compañía durante todo el periodo de estudio. Él es quien me ha dado todo y me ha hecho ser quien soy (1 Corintios 15:10).

A mi mamá, Hilda

Por darme la vida, creer en mí y porque siempre estuvo conmigo. Por haberme apoyado en todo momento pero más que nada, por su amor. Mami gracias por darme una carrera para mi futuro, todo esto te lo debo a ti.

A mi Corazón

Por acompañarme, por impulsarme a seguir adelante, por ayudarme y estar allí incondicionalmente, por apoyarme cuando lo necesito, por ser el ángel que Dios mando a cuidarme. Y por supuesto, Cielo, por darme tu amor, eres el mejor. ¡Te Amo!

A mi familia

A mis hermanos, Mariana y Manolo, quienes de alguna u otra forma fueron usados por Dios para darme grandes lecciones, porque juntos hemos luchado por superarnos y he aquí los resultados. A Les, a mi tía Matty y mi tío Raúl, que estuvieron siempre conmigo dándome su apoyo y sus consejos. A mi papá por su apoyo y porque sin saberlo participó en el plan de Dios para traerme al mundo.

A mis amigos

Con los cuales he compartido las experiencias que me han permitido llegar aquí, por los buenos momentos y los malos también, por las tareas, los trabajos y los desvelos.

Y a todos aquellos que participaron directa o indirectamente en la elaboración de esta tesis que no recordé al momento de escribir esto. Ustedes saben quiénes son.

¡Gracias a ustedes!



Agradecimientos

Mi agradecimiento a la Universidad Nacional Autónoma de México por abrirme las puertas de tan prestigiosa institución para realizar mis estudios de licenciatura y ahora los de maestría.

Agradezco al CCADET, sede de la maestría en Instrumentación y mi lugar de estudio en estos últimos años, por las facilidades otorgadas para la realización de este trabajo dentro de sus instalaciones.

Por supuesto no podría faltar el GSOE y sus integrantes, los cuales hemos compartido conocimientos y experiencias que fueron de gran valor en la conclusión de este trabajo.

Al CONACYT agradezco su programa de becas para los posgrados inscritos en el Programa Nacional de Posgrados de Calidad (PNPC), también agradezco el apoyo financiero a la UNAM a través del proyecto PAPIIT IT100612.

Gracias a los miembros del jurado, Dr. Augusto García, Dr. Ramón Gutiérrez, Dr. Naser Qureshi y Dr. Eduardo Sandoval, por su tiempo y colaboración en la revisión de este trabajo.

Por supuesto agradezco a la Dra. Celia Sánchez por su dirección y su orientación, por su apoyo en todo momento para la realización de este proyecto y su presencia para las revisiones pertinentes para hacer de este, un gran y factible proyecto.

Agradezco además a todos mis profesores y a todas las personas que me instruyeron y aportaron a mi formación tanto en el ámbito profesional, como en el personal y humano....los tengo presentes.

Contenido

Resumen.....	1
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	3
I.1 ANTECEDENTES.....	3
CAPÍTULO II. ANTECEDENTES TEÓRICOS.....	7
II.1 FUNDAMENTOS BÁSICOS.....	7
II.2 ANÁLISIS DE LAS GUÍAS DE ONDA PLANAS.....	8
II.3 DEFLEXIÓN DE UN HAZ GUIADO.....	30
II.4. CONCLUSIONES.....	33
CAPÍTULO III. DISEÑO Y FABRICACIÓN DEL DISPOSITIVO.....	35
III.1 DISEÑO DE LA ESTRUCTURA	35
III.2 FABRICACIÓN DEL DISPOSITIVO	39
III.3 PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO	47
CAPÍTULO IV. RESULTADOS EXPERIMENTALES: DEFLEXIÓN POR MODULACIÓN DE LA TEMPERATURA.....	52
IV.1 MONTAJE EXPERIMENTAL.....	52
IV.2 REALIZACIÓN DE LA PRUEBA.....	58
IV.3 RESULTADOS ESPERADOS	60
IV.4 RESULTADOS EXPERIMENTALES.....	62
CAPÍTULO V. RESULTADOS EXPERIMENTALES: MODULACIÓN DE LA DEFLEXIÓN POR CAMBIO DE ÍNDICE DE REFRACCIÓN EN EL SUPERESTRATO	70
V.1 MONTAJE EXPERIMENTAL	70
V.2 REALIZACIÓN DE LAS PRUEBAS.....	73
V.3 RESULTADOS ESPERADOS.....	76
V.4 RESULTADOS EXPERIMENTALES	80
CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES.....	87

Apéndice. Programas en LabVIEW	90
REFERENCIAS	94

Abstract

This thesis is aimed to verify the implementation of the deflection in a optical device due to a thickness gradient. We present the design, fabrication and experimental validation of the beam deflection principle in a glass integrated optical device. We analyze the deflection caused by a gradient of the effective refractive index in the core of a planar waveguide produced by a thickness gradient. For sensing purposes this deflection is modulated by two cases; for the first by a temperature change in the waveguide, in the second by a change in the refractive index of the upper medium at the surface of the waveguide. Results are analyzed and compared with theoretical results and other results revised in the bibliography, validating the operation of this device.

Resumen

En los últimos años la deflexión óptica ha sido una técnica muy usada para diversas aplicaciones entre ellas la caracterización de materiales. Existen ya configuraciones propuestas de estos dispositivos que plantean una gran sensibilidad teórica pero su implementación suele ser voluminosa y los arreglos experimentales tienen que ser tratados con suma delicadeza.

Por otra parte, la óptica integrada presenta una solución a este problema ya que se ha demostrado que es una opción adecuada para configuraciones con propósitos de sensado. Sin embargo el uso de la técnica de deflexión de haz en dispositivos ópticos integrados se ha limitado a un solo dispositivo en óptica integrada según se reporta en la literatura. En este trabajo se estudió la deflexión de un haz guiado en un dispositivo óptico integrado para detectar un cambio en índice de refracción con el propósito de aplicaciones al sensado de moléculas biológicas.

El objetivo de la tesis es el de validar la aplicación de la deflexión en un dispositivo óptico para aplicaciones de sensado. Se presenta el diseño, fabricación y caracterización de un dispositivo en óptica integrada para la deflexión de un haz láser. Se propone que a través del intercambio iónico es posible fabricar una guía de onda con un cambio gradual en la profundidad en dirección transversal a la dirección de propagación a manera de formar un gradiente de espesor lo que provocará que un haz al propagarse en la guía de onda se defleccione. Posteriormente la deflexión del haz será modulada por dos diferentes efectos, el primero será por un cambio en el índice de refracción de la guía debido a un incremento en la temperatura del dispositivo y el segundo efecto será un cambio de índice de refracción en el medio de la superficie de la guía (superestrato). La modulación del ángulo de deflexión será utilizada entonces para detectar cambios en el índice de refracción en la guía de onda.

Se realizaron las pruebas de modulación con las especificaciones descritas anteriormente y los resultados indican que el dispositivo es capaz de detectar cambios de índice de refracción que se ven manifestados como un cambio en el ángulo de deflexión del haz guiado, por lo cual queda comprobado su funcionamiento.

En el capítulo I del trabajo se plantea la idea principal y los fundamentos para la realización del dispositivo para la deflexión en óptica integrada. En el capítulo II se incluyen los antecedentes teóricos. En el capítulo III se justifican los parámetros de diseño del dispositivo, el proceso que se siguió para su fabricación y las primeras pruebas. En los capítulos IV y V se explica cómo se desarrollan las pruebas para la modulación de la deflexión por cambio de temperatura y por cambio de índice de refracción en el sustrato, respectivamente.

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

I.1 ANTECEDENTES

La deflexión de haz es un método muy utilizado en la óptica ya que ofrece principios simples de operación con configuraciones sencillas (1) (2) (3) (4) (5) (6) (7). Sin embargo estas propuestas están desarrolladas en óptica de volumen, por lo tanto estos sistemas no son fáciles de transportar. En este trabajo se propone un dispositivo deflector de haz en óptica integrada lo que añade la característica de portabilidad a los sistemas de deflexión de haz que se han desarrollado.

La deflexión óptica ocurre a consecuencia de la refracción, donde una imagen de algún objeto a distancia parece haber sido desplazado de su posición original debido a que una gran variación de densidad vertical cambia la superficie; por lo que la imagen podría aparecer distorsionada, invertida u ondulada. Un ejemplo concreto del efecto óptico Mirage o deflexión fototérmica es una carretera caliente que algunas veces parece una superficie reflejante, la cual aparenta ser una piscina de agua. La radiación del sol es absorbida por el concreto o asfalto, resultando en un calentamiento de la superficie. La superficie caliente transfiere energía al aire sobre la superficie. Un gradiente de temperatura se desarrolla entre el aire cercano a la superficie y la masa de aire superior. Debido a que el aire se expande cuando es calentado, la densidad del aire en la superficie es menor que el que está en las capas superiores. El decremento de densidad resulta en un decremento del índice de refracción. Debido a que la velocidad de la luz es más rápida en un medio con índice de refracción bajo, la luz incidente con un ángulo tangente es refractada hacia arriba. Por tanto, un observador apreciará esto como una distorsión de la imagen reflejada.

El efecto Mirage fue introducido en las técnicas de medición hace muchos años y ha sido ampliamente utilizado para la caracterización térmica de materiales (8). Las configuraciones que ya se han propuesto utilizan la medida de la variación de una señal foto-térmica en un interferómetro (9) o en un esquema de deflexión de ángulo (10). El uso de dispositivos deflectores de haz es relativamente nuevo, pues a pesar de que lleva ya algunos años estudiándolos, no todo está dicho acerca de estos dispositivos.

Se han desarrollado sensores de ángulo los cuales se componen de varios elementos para deflectar un haz y para medir esta deflexión (2), están los que se basan en la detección del perfil de intensidad del haz para determinar la deflexión como un corrimiento del perfil (6) y algunos otros basados en cristales magnéticos (11), todos estos en la modalidad de óptica de volumen y para los cuales también se emplean distintos elementos electrónicos fundamentales para la deflexión del haz y la detección como lo son osciloscopios, generadores de funciones y fotodetectores entre otros.

También están los dispositivos de deflexión de haz y entre estos encontramos los que incluyen lentes en su estructura planar integrada (12), algunos incluso integran el detector (13), y existen también otros dispositivos que se basan en el modo a fuga (14).

Como parte de la evolución de este campo de estudio de los deflectores de haz han surgido diseños de varios dispositivos basados en distintos principios de funcionamiento. Uno de los efectos más utilizados para la deflexión es el efecto fototérmico, los dispositivos van desde una guía de onda y prismas para deflectar el haz por el efecto del calor aplicado entre dos electrodos (15), dichos dispositivos pueden evolucionar al fabricarse ya con capas delgadas poliméricas y en combinación con los prismas para formar así un dispositivo sin piezas móviles (16) hasta incluso depositar los electrodos por litografía para así tener circuitos ópticos completamente integrados (10).

Los dispositivos deflectores de haz tienen diversas aplicaciones; una de ellas es para obtener los coeficientes de absorción de polímeros usados en la fabricación de guías de onda (17), algunos otros dispositivos son empleados para medir la profundidad de películas delgadas (18), incluso se puede caracterizar la efusividad térmica en líquidos (8) y hacer mediciones de entalpía (5), recordemos que ya se había señalado que en los dispositivos mencionados está involucrado el efecto fototérmico.

Otro trabajo de investigación para estos dispositivos se ha realizado implicando vibraciones, un ejemplo es un dispositivo en el que se deflecta un haz sobre un tejido biológico para generar ondas acústicas en su superficie y a través de esto determinar algunas propiedades del tejido (4).

La deflexión óptica también puede ser generada por efecto de un gradiente de índice de refracción que en el caso de una guía de onda puede ser logrado a través de un dopaje variable del núcleo de la guía o por un cambio gradual en el espesor de la guía. Como consecuencia las

condiciones de propagación de la señal óptica (el índice de refracción efectivo del modo guiado) variarán provocando la deflexión de éste. Este dispositivo ha sido modelado numéricamente y su aplicación propuesta hacia la medición de moléculas biológicas presentes en la superficie de la guía con lo que se modificará la deflexión en función del cambio del índice de refracción efectivo (19).

Deflectores de haz integrados han sido de interés para aplicaciones militares y aplicaciones comerciales tal como el encendido y apagado de una señal óptica (15), el almacenamiento de datos ópticos, escaneo y rastreo de trayectorias laser. Pruebas anteriores realizadas para los dispositivos de deflexión aplican controles acusto-ópticos, en el caso de este trabajo se diseñará un dispositivo puramente óptico.

En este trabajo de tesis se propone diseñar y fabricar un dispositivo óptico integrado planar con un gradiente de índice de refracción efectivo para producir la deflexión de un haz propagado. Se propone aplicar dos tipos de modulación de la deflexión una por cambios en el índice de refracción del medio en la superficie de la guía y otro por un cambio de temperatura en el dispositivo todo esto enfocado para la detección de moléculas biológicas, de manera que se establezca la sensibilidad experimental del dispositivo considerando la utilización de guías de onda en sustrato de vidrio por el método del intercambio iónico K^+/Na^+ (20).

En este trabajo también se aplicó calor (5) para determinar la deflexión por un cambio en el índice de refracción efectivo.

Finalmente se propone demostrar su funcionalidad en la detección de alguna molécula biológica o en el monitoreo de un proceso biológico exotérmico.

Entre las tareas que se llevaran a cabo para realizar este trabajo se encuentran:

- Caracterización experimental de la deflexión usando perfiles de intensidad de campo cercano del modo guiado utilizando una cámara CCD.
- Caracterizar la modulación de la deflexión debido a un aumento gradual en la temperatura del sustrato.
- Caracterizar la modulación de la deflexión a cambios de índice de refracción en el sustrato (Δn_{sup}) y lograr una calibración experimental.

Por medio del intercambio iónico es posible producir una guía de onda en óptica integrada con un gradiente de índice de refracción ($\Delta n(x)$) y de espesor. Bajo esta condición se logrará la deflexión de un haz de luz que se propaga, que dependerá del índice de refracción del medio que se encuentre en la superficie de la guía, lo que significa la posibilidad de lograr un dispositivo para la deflexión óptica que represente una alternativa para la detección de moléculas biológicas con respecto a otras propuestas de caracterización fototérmica. El contar con una mayor área de contacto en la superficie de la guía con las moléculas (dada la naturaleza del dispositivo) provocará una mayor área de sensado tomando en cuenta que las moléculas biológicas tienen un diámetro del orden de los 100[nm] y la deflexión se realizará sobre algunos milímetros hasta un par de centímetros.

Se buscará producir este gradiente de manera controlada a fin de lograr la fabricación de un dispositivo de acuerdo a los parámetros de diseño descritos más adelante.

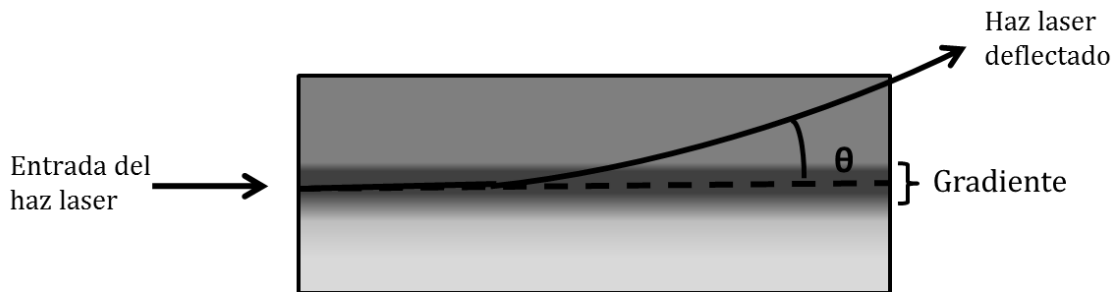


Figura 1.1 Esquema del dispositivo en óptica integrada con un gradiente de espesor.

A partir de los resultados anteriores se llevará a cabo una caracterización de la deflexión utilizando una cámara CCD a la cual se le realizará una interfaz con el programa LabVIEW® para posteriormente poder determinar el ángulo de deflexión θ .

En la primera parte del experimento se aplicará calor para elevar la temperatura del sustrato y obtener una deflexión a la cual se le hará una calibración. Para la segunda parte del trabajo hay que caracterizar el cambio de índice de refracción en el superestrato (Δn_{sup}) y lograr la calibración experimental de la función de sensado, se realizarán pruebas con sustancias de las cuales se conoce el índice de refracción.

CAPÍTULO II. ANTECEDENTES TEÓRICOS

II.1 FUNDAMENTOS BÁSICOS

Convencionalmente se hacen instrumentos ópticos para usarse en la transmisión de luz en forma de haces entre diferentes lugares, estos pueden ser colimados, enfocados o viajar a través de espejos lentes y prismas. Los haces de luz difractan y se ensanchan, pero pueden enfocarse nuevamente gracias al uso de lentes y espejos. Sin embargo dichos haces son fácilmente obstruidos o esparcidos por varios objetos, esta forma de transmisión en el espacio libre es la base de la mayoría de los sistemas ópticos (21).

Existe, sin embargo una tecnología para transmitir luz a través de conductores dieléctricos, *guías de onda ópticas*. Esta tecnología ha sido desarrollada para proveer grandes distancias de transmisión de luz sin el uso de lentes. La *óptica de ondas guiadas* tienen aplicaciones importantes cuando se trata de dirigir haces de luz a lugares incomodos, es decir, de difícil acceso y en la fabricación de dispositivos ópticos y optoelectrónicos en miniatura que requieren el confinamiento, propagación y procesamiento de la luz.

Una *guía de onda óptica* es un conducto de luz que consiste en tener un plano, un canal o un cilindro (fig. 2.1) de un material dieléctrico rodeado de otro material dieléctrico de bajo índice de refracción. La luz es transportada a través del interior del medio con índice de refracción mayor sin radiarse al medio que tiene el menor índice.

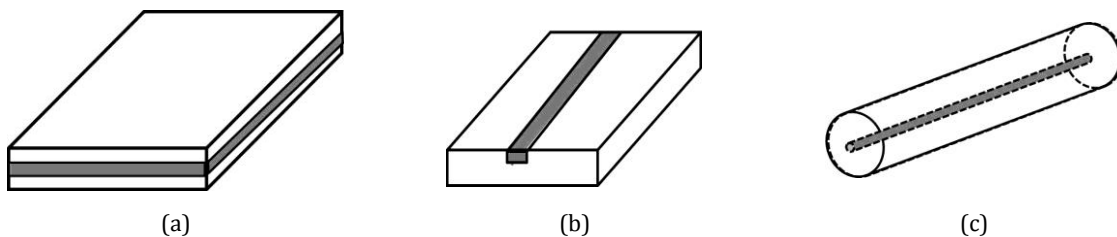


Figura 2.1. Guías de onda ópticas: (a) plana, (b) canal y (c) fibra óptica. (21)

En este trabajo nuestro diseño toma como base una guía de onda óptica planar, será a partir de esta que se diseñara el dispositivo para la deflexión óptica.

II.1.1 Óptica Integrada

Los componentes y sistemas ópticos se consideran que pertenecen al ámbito de la óptica en espacio libre, significa que la luz es transmitida a través de un medio homogéneo (tal como el vacío o el aire) sin manera de ser guiada de algún modo. Los lentes, espejos y estructuras de difracción han sido estudiadas para manejar los haces no guiados en el espacio libre (6).

Sin embargo, una rama importante de la óptica usa estructuras para guiar haces de luz usando reflexiones sobre una interfaz óptica. Las estructuras ópticas que hacen esto posible son las guías de onda y las fibras ópticas, que pueden ser consideradas como un 'cable óptico' en el cual la luz es confinada en una pequeña área y así es transmitida. Las guías de onda son componentes ópticos para la transmisión de la luz y son típicamente fabricadas en sustratos de vidrio, plástico o algún semiconductor y se dan a conocer con el concepto de óptica integrada haciendo una analogía con la electrónica integrada (circuitos integrados). Cuando se combinan con dispositivos ópticos integrados activos como láseres, moduladores o detectores este tipo de óptica forma las bases de la fotónica.

Circuitos ópticos integrados

La óptica integrada es una tecnología que integra varios dispositivos y componentes ópticos para la generación, enfoque, división, combinación, aislamiento, polarización, acoplamiento, modulación y detección de la luz, todo en un solo sustrato. Las guías de onda ópticas proveen las conexiones en estos componentes, estos dispositivos son versiones ópticas de circuitos integrados electrónicos. La óptica integrada ha tenido un gran acierto al miniaturizar la óptica de la misma manera que los circuitos integrados miniaturizaron la electrónica (22).

II.2 ANÁLISIS DE LAS GUÍAS DE ONDA PLANAS

Una guía de onda plana dieléctrica es una placa delgada de material dieléctrico rodeada por un medio de menor índice de refracción que esta placa. La luz es guiada dentro de la placa por reflexión total interna. En los dispositivos de película delgada ésta placa es llamada núcleo y

los medios de arriba y abajo son llamados superestrato y sustrato, respectivamente. Esta geometría es básica pues es la configuración característica de una guía de onda plana (21). El medio interior se llama núcleo (n_1) y los medios exteriores recubrimiento de la guía de onda. Si asumimos que los índices de refracción del recubrimiento: el índice de refracción del superestrato (n_2) y el que el índice de refracción del sustrato (n_2) son iguales, tenemos entonces una guía de onda simétrica plana (fig. 2.2).

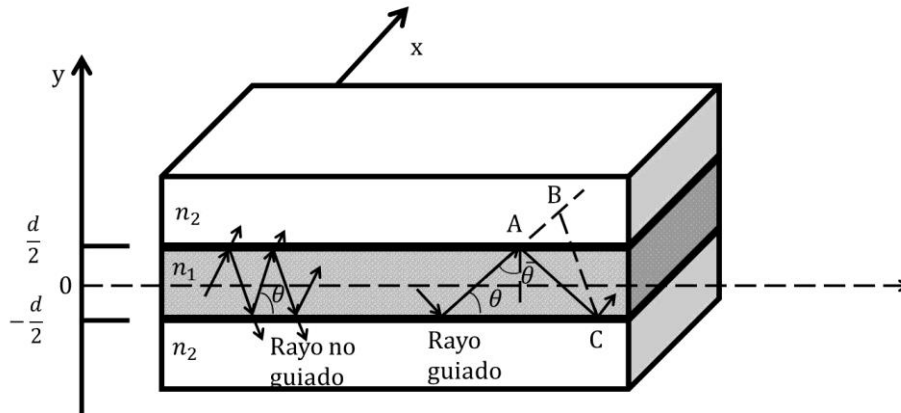


Figura 2.2. Guía de onda plana. Los rayos con ángulo $\theta < \bar{\theta}_c = \cos^{-1}(n_2/n_1)$ son guiados por reflexión total interna. (21)

Los rayos de luz hacen ángulos θ con el eje z , en el plano YZ , sometidos a múltiples reflexiones totales internas en los límites del núcleo de la guía, a condición de que θ sea más pequeño que el complemento del ángulo crítico definido por la ley de Snell $\bar{\theta}_c = \frac{\pi}{2} - \sin^{-1}(n_2/n_1) = \cos^{-1}(n_2/n_1)$. Los rayos viajan en dirección z rebotando en las superficies superior e inferior del núcleo sin tener pérdidas de potencia. Los rayos que se refractan con un gran ángulo, pierden una porción de su potencia en cada reflexión y finalmente desaparecen.

Una aproximación formal para determinar los modos de una guía de onda se encuentra desarrollando las soluciones a las ecuaciones de Maxwell en los medios del interior y el exterior de la guía de onda con las condiciones apropiadas en los límites.

Para estudiar los conceptos que se describen en este apartado se definen las siguientes ecuaciones para el coeficiente de reflexión r y el coeficiente de transmisión t .

Para la polarización TE (Transversal Eléctrica)

$$r_x = \frac{n_1 \cos \theta_1 - n_2 \cos \theta_2}{n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2} \quad \dots(2.1)$$

$$t_x = 1 + r_x \quad \dots(2.2)$$

Para la polarización TM (Transversal Magnética)

$$r_y = \frac{n_2 \cos \theta_1 n_1 \cos \theta_2}{n_2 \cos \theta_1 n_1 \cos \theta_2} \quad \dots(2.3)$$

$$t_y = \frac{n_1}{n_2} (1 + r_y) \quad \dots(2.4)$$

Dados los valores de n_1 , n_2 y θ_1 , se pueden determinar los coeficientes de reflexión determinando primero θ_2 utilizando la Ley de Snell:

$$n_1 \text{sen} = n_2 \text{sen} \theta_2 \quad \dots(2.5)$$

De la cual

$$\cos \theta_2 = (1 - \text{sen}^2 \theta_2)^{1/2} = \left[1 - \left(\frac{n_1}{n_2} \right)^2 \text{sen}^2 \theta_1 \right]^{1/2} \quad \dots(2.6)$$

Cuando $n_1 > n_2$ y $\theta_1 > \theta_c$ nos referimos al caso de reflexión total interna (fig. 2.3), la magnitud de r_x permanece con valor de 1.

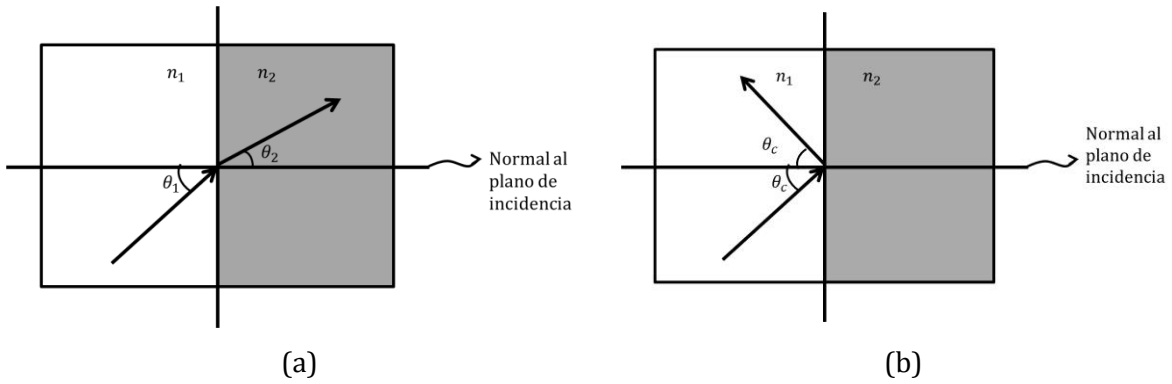


Figura 2.3. Condiciones de frontera para: (a) reflexión y transmisión de un haz de un medio 1 a un medio 2 y (b) reflexión total interna.

Esto se puede demostrar utilizando la ecuación (2.6) para llegar a:

$$\cos \theta_2 = [1 - \text{sen}^2 \theta_1 / \text{sen}^2 \theta_c]^{1/2} = -j \left[\frac{\text{sen}^2 \theta_1}{\text{sen}^2 \theta_c} - 1 \right]^{1/2} \quad \dots(2.7)$$

Sustituyendo (2.7) en la ecuación (2.3) obtenemos la ecuación para el cambio de fase $\varphi_x = \text{arg}\{r_x\}$ que acompaña a la reflexión total interna para una polarización TE, está dada por:

$$\tan \frac{\varphi_x}{2} = \frac{(\text{sen}^2 \theta_1 - \text{sen}^2 \theta_c)^{1/2}}{\cos \theta_1} \quad \dots(2.8)$$

El cambio de fase φ_x se incrementa desde 0 hasta $\theta_1 = \theta_c$ y hasta π en $\theta_1 = 90^\circ$.

Tipos de guías de onda planas

Existen dos tipos de guías de onda: guías de onda simétricas y guías de onda asimétricas. Una guía de onda simétrica es un caso especial para la cual el superestrato (*sup*) y el sustrato (*s*) son del mismo material tal que $n_2 = n_s = n_{sup}$, por lo tanto los corrimientos de fase serán iguales para ambas interfaces (superior e inferior). La guía de onda asimétrica es la configuración más general de las guías de onda que emplea tres diferentes materiales distintos para el sustrato, el núcleo y el superestrato; un ejemplo clásico sería como nuestro

caso de estudio, una guía de onda fabricada en un sustrato de vidrio y cubierta de aire. Si $n_s \neq n_{sup}$ resulta una guía asimétrica donde típicamente $n_s > n_{sup}$. Las interfaces inferior y superior son diferentes lo que resulta entonces en condiciones de fase diferentes dependiendo de la superficie de contacto (21).

II.2.1 Modos de las Guías de Onda

Asumimos que el campo en la guía de onda tiene la forma de una onda plana TE de longitud de onda $\lambda = \lambda_0/n_1$, rebotando hacia atrás y hacia adelante con un ángulo θ mas pequeño que el complementario del ángulo crítico $\bar{\theta}_c$. La onda viaja con velocidad de fase $c_1 = c_0/n_1$, tiene número de onda $k_0 n_1$, y componentes del vector de onda $k_x = 0, k_y = k_0 n_1 \text{sen}\theta$, y $k_z = k_0 n_1 \text{cos}\theta$. El subíndice 0 indica las condiciones para el vacío. Para determinar los modos imponemos una condición de interferencia constructiva.

En un periodo, la onda dos veces reflejada queda detrás de la onda original por una distancia $\overline{AC} - \overline{AB} = 2d \text{sen}\theta$, como en la figura 2.2. Existe también un cambio de fase φ_r introducido por cada reflexión interna en el límite de la guía. Por la condición de autocoherencia el corrimiento de fase entre las dos ondas debe ser cero o múltiplo de 2π ,

$$\frac{2\pi}{\lambda} 2d \text{sen}\theta - 2\varphi_r = 2\pi m, \quad m = 0,1,2, \dots \quad \dots(2.9)$$

La cual es llamada la *ecuación característica*, que también se puede escribir como:

$$2k_y d - 2\varphi_r = 2\pi m \quad \dots(2.10)$$

El cambio de fase φ_r de la reflexión es una función del ángulo θ , este también depende de la polarización de la onda incidente, TE o TM. En el caso TE (el campo eléctrico va en la dirección de x), sustituyendo $\theta_1 = \pi/2 - \theta$ y $\theta_c = \pi/2 - \bar{\theta}_c$ en (2.8) tenemos:

$$\tan \frac{\varphi_r}{2} = \left(\frac{\text{sen}^2 \bar{\theta}_c}{\text{sen}^2 \theta} - 1 \right)^{1/2} \quad \dots(2.11)$$

Dado que φ_r varia desde π hasta 0 como θ varia desde 0 hasta $\bar{\theta}_c$. Reescribiendo (2.9) en la forma $\tan\left(\pi d \text{sen} \theta / \lambda - m \pi / 2\right) = \tan(\varphi_r / 2)$ usando (2.11), obtenemos:

$$\tan\left(\pi \frac{d}{\lambda} \text{sen} \theta - m \frac{\pi}{2}\right) = \left(\frac{\text{sen}^2 \bar{\theta}_c}{\text{sen}^2 \theta} - 1\right)^{1/2} \quad \dots(2.12)$$

Esta es la ecuación de dispersión de los modos; es una ecuación trascendental en una sola variable, θ . Sus soluciones dan lugar a los ángulos θ_m para los cuales se propaga cada uno de los modos (haciendo $\theta = \theta_m$ para cada solución). Ambos lados de la ecuación (2.12) están graficados en la figura 2.4 como función del $\text{sen} \theta$. El lado derecho de la ecuación (LDE), $\tan(\varphi_r / 2)$, es una función monótona decreciente del $\text{sen} \theta$ la cual alcanza el valor de 0 cuando $\text{sen} \theta = \text{sen} \bar{\theta}_c$. El lado izquierdo de la ecuación (LIE), genera dos familias de curvas, $\tan(\pi d / \lambda \text{sen} \theta)$ y $\cot(\pi d / \lambda \text{sen} \theta)$, cuando m es par e impar, respectivamente. Recordemos que los ángulos de los modos están dados por los puntos de intersección.

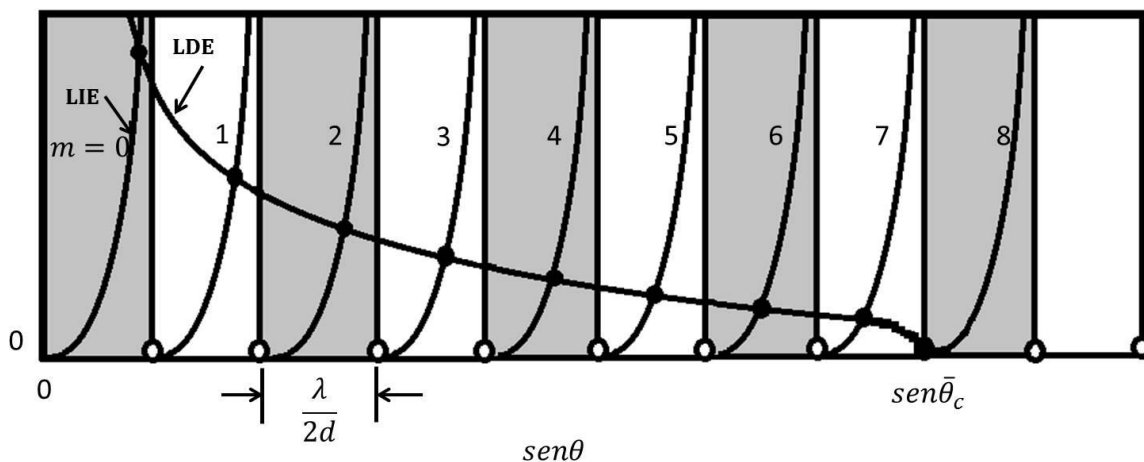


Figura 2.4. Solución gráfica de la ecuación (2.12) para determinar los ángulos de reflexión θ_m de los modos propagados en una guía de onda plana. El LDE y el LIE de la ecuación (2.12), están graficados en función de $\text{sen} \theta$. Los círculos en blanco marcan $\text{sen} \theta_m = m \lambda / 2d$ y los círculos en negro, son los puntos de intersección que marcan θ_m . (21)

Estos ángulos θ_m que están entre 0 y $\bar{\theta}_c$, corresponden a vectores de onda con componentes $0, n_1 k_0 \text{ sen} \theta_m$. Las componentes z son las constantes de propagación:

$$\beta_m = n_1 k_0 \cos \theta_m \quad \dots(2.13)$$

Dado que el valor del $\cos \theta_m$ esta entre 1 y $\cos \bar{\theta}_c = n_2/n_1$, β_m toma valores entre $n_2 k_0$ y $n_1 k_0 \cos \theta_m$, como se muestra en la figura 2.5.

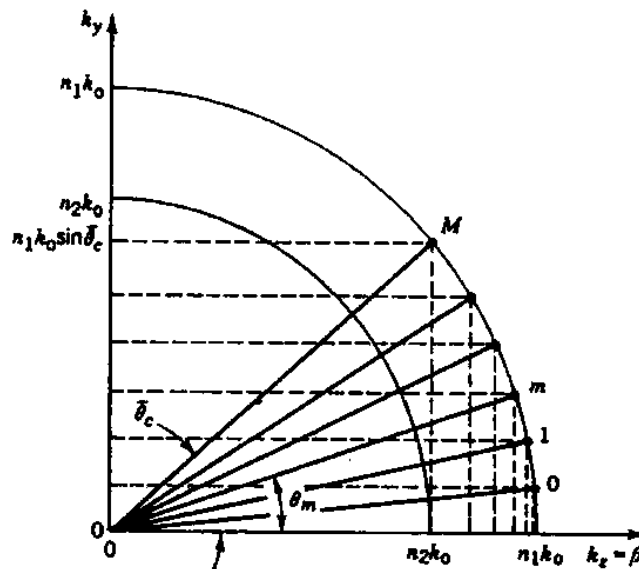


Figura 2.5. Los ángulos de reflexión θ_m y las componentes correspondientes a $k_z = \beta$ y a k_y de los vectores de onda de los modos de la guía de onda están indicados con puntos. Los ángulos θ_m van desde 0 hasta $\bar{\theta}_c$ y las constante de propagación β_m de $n_2 k_0$ hasta $n_1 k_0$. (21)

Los ángulos θ_m y las constantes de propagación β_m de los modos TM pueden ser encontrados utilizando la misma ecuación (2.9). De esta manera, con el cambio de fase φ_r , ahora dado por la ecuación:

$$\tan \frac{\varphi_r}{2} = \frac{(\text{sen}^2 \theta_1 - \text{sen}^2 \theta_c)^{1/2}}{\text{cos} \theta_1 \text{sen}^2 \theta_c} \quad \dots(2.14)$$

Número de modos

Para determinar el número de modos TE que soporta una guía de onda dieléctrica, examinamos el diagrama de la figura 2.4, la abscisa está dividida en intervalos iguales de ancho $\lambda/2d$, cada uno de los cuales contiene un modo marcado por un círculo negro. Esto es extensivo a los ángulos para los cuales $\text{sen} \theta \leq \text{sen} \bar{\theta}_c$, el número de modos TE corresponde por lo tanto al entero más pequeño que es mayor que $\text{sen} \bar{\theta}_c / (\lambda/2d)$, así que:

$$m \doteq \frac{\text{sen} \bar{\theta}_c}{\lambda/2d} \quad \dots(2.15)$$

El símbolo \doteq denota que $\text{sen} \bar{\theta}_c / (\lambda/2d)$ se incrementa al entero más cercano. Sustituyendo $\text{sen} \bar{\theta}_c = n_2/n_1$ en (2.5)

$$m \doteq 2 \frac{d}{\lambda_0} \text{NA} \quad \dots(2.16)$$

Donde

$$\text{NA} = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} \quad \dots(2.17)$$

NA es la apertura numérica de la guía de onda (NA es el seno del ángulo de aceptación de rayos desde el aire hacia la guía de onda).

Cuando $\lambda/2d > \text{sen} \bar{\theta}_c$, o bien, $(\lambda/2d)\text{NA} < 1$, únicamente un modo es permitido. La guía de onda es entonces una guía de onda monomodal. Esto ocurre cuando el núcleo de la guía es lo

suficientemente delgado o la longitud de onda es lo suficientemente grande. En una guía de onda dieléctrica simétrica existe al menos un modo TE, ya que el modo fundamental $m = 0$, siempre es permitido, sin embargo cada uno de los modos $m = 1, 2, \dots$ tiene su propia longitud de onda de corte.

El número de modos puede ser también escrito como una función de la frecuencia (ν) como se muestra en la siguiente ecuación:

$$m \doteq 2 \frac{NA}{c_0/2d} \nu \quad \dots(2.18)$$

La relación se ilustra en la figura (2.6), vemos que m es incrementada en 1 en la medida en que ν es incrementada por $(c_0/2d)/NA$. Una expresión idéntica para el número de modos TM puede ser obtenida de manera similar.

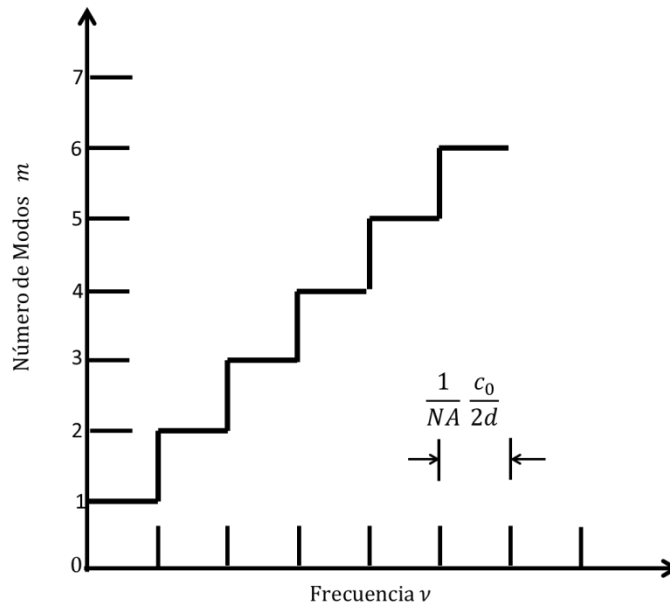


Figura 2.6. Número de modos TE en función de la frecuencia. (21)

II.2.2 Método para resolver la ecuación de dispersión para una Guía de Onda

Para analizar numéricamente una guía de onda se deben seguir los pasos que se describen a continuación (23):

Determinar los parámetros. Se necesita reunir toda la información necesaria de la estructura de la guía de onda y su campo óptico: espesor de núcleo $2d$, índices de refracción (n_1 y n_2), longitud de onda de excitación en el espacio libre λ_0 y la polarización.

Resolución de la ecuación característica. Basado en la estructura (simétrica o asimétrica) y la polarización (TE o TM) se escogerá la ecuación característica apropiada y se resolverá para $m = 0$. La solución numérica puede ser obtenida usando un programa de computadora. El resultado obtenido será el de θ_m para $m = 0$. Después resolver para $m = 1$, si la solución es posible el resultado obtenido será el de θ_m para $m = 1$. Repetir para obtener los modos de orden superior mientras que la solución sea posible. El número de modos permitidos será de $m + 1$.

Determinación de parámetros. De las expresiones matemáticas se obtienen valores para β y el índice efectivo N para cada θ de todos los m posibles. Entonces las condiciones de propagación para todos los modos de propagación están determinadas.

Cálculos extras. De la constante β se pueden obtener algunos parámetros más, incluyendo la forma del campo eléctrico, incluyendo sus componentes oscilante y evanescente.

Constantes de propagación

Ahora se profundizará más en el concepto de la constante de propagación de un modo guiado. En el espacio libre o en un material homogéneo, el vector de onda k es función de la longitud de onda y del índice de refracción del medio en el que se propaga, lo que quiere decir que en el vacío tenemos (23):

$$k_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0} \quad \dots(2.19)$$

y en un material con índice de refracción n

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi n}{\lambda_0} \quad \dots(2.20)$$

Debido a la naturaleza de la propagación en las guías de onda es que en el modelo de rayos ópticos se emplean reflexiones hacia adelante y hacia atrás entre las interfaces superior e inferior del núcleo de la guía, la dirección general de movimiento es en dirección del *eje z*.

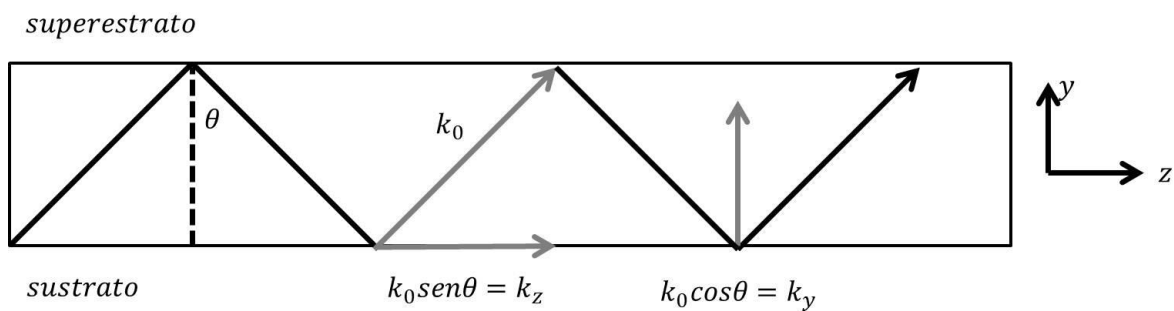


Figura 2.7. Modelo de rayos en la guía de onda. (23)

Se pueden definir las componentes del vector de onda para los rayos en la guía de onda, se usará la convención que se muestra en la figura 2.7, entonces se observa que:

$$k_z^2 + k_y^2 = k_0^2 \quad \dots(2.21)$$

para las componentes z y y de k_0 , k_z y k_y , respectivamente. Con geometría básica se puede encontrar que k en dirección y de la onda está dado por:

$$k_y = k_0 \cos\theta \quad \dots(2.22)$$

y el longitudinal (dirección z) es definido como la constante de propagación

$$k_z = \beta = k_0 \text{sen}\theta \quad \dots(2.23)$$

Por simplicidad se usará el símbolo β [m^{-1}]. β puede ser considerada una constante de propagación efectiva en la dirección de la guía de onda; los rayos en zigzag se mueven en la dirección z con constante de propagación β .

Índice Efectivo

Si el núcleo de la guía de onda es un material con índice de refracción $n > 1$, la constante de propagación efectiva es simplemente modificada por el índice de refracción (23):

$$\beta = nk_0 \text{sen}\theta = Nk_0 \quad \dots(2.24)$$

Donde se define al índice efectivo de la guía de onda, N , como

$$N = n \text{sen}\theta \quad \dots(2.25)$$

La constante de propagación β y el índice efectivo N son dos de las más importantes características que resultan del análisis de las guías de onda.

Ahora analizamos de manera numérica el comportamiento de la propagación de acuerdo a la variación de los parámetros ópticos de una guía plana simétrica (fig. 2.4). Las simulaciones fueron hechas con el programa SLAB que resuelve las soluciones modales de la ecuación de dispersión (2.12)

La siguiente figura (fig. 2.8) muestra cómo cambia el índice efectivo con respecto al cambio de índice de refracción en el núcleo de la guía, se muestra el índice efectivo de los tres primeros modos para un guía de onda de espesor $e_w = 5[\mu\text{m}]$, con índice del sustrato $n_2 = 1.5$ y un índice del núcleo de la guía (n_1) que varía desde 1.51 hasta 1.53; de la figura se observa que

los valores del índice efectivo van desde un valor cercano al del sustrato, en este caso alrededor de 1.507 y los valores máximos se aproximan a el valor del índice de refracción del núcleo de la guía, pero nunca será igual, también se observa que este cambio es lineal en la región simulada.

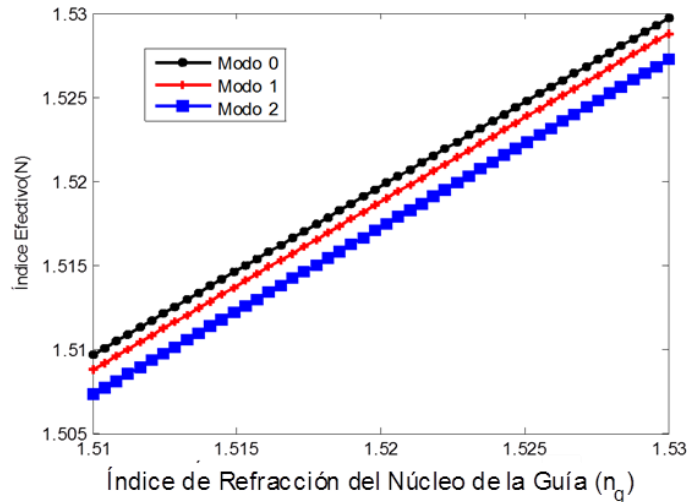


Figura 2.8. Índice efectivo respecto al índice de refracción en el núcleo de la guía.

Lo que vemos en la figura 2.9 es el comportamiento del índice efectivo cuando se varia el índice de refracción del superestrato para este ejemplo tenemos una guía con sustrato $n_s = 1.5$ y un índice de refracción del núcleo de la guía $n_g = 1.51$ y un índice de refracción en el superestrato (n_{sup}) que va de 1.3 a 1.51. En este caso el cambio en el índice efectivo varía al principio de manera muy lenta, se observa que conforme el índice de refracción del superestrato aumenta y se parece más al del sustrato, el índice de refracción efectivo también aumenta. Esto es que mientras $n_{sup} < n_s < n_g$ se conserva la condición de reflexión total interna en la interface núcleo-superestrato y el cambio en el valor de índice efectivo cambia poco para los tres modos.

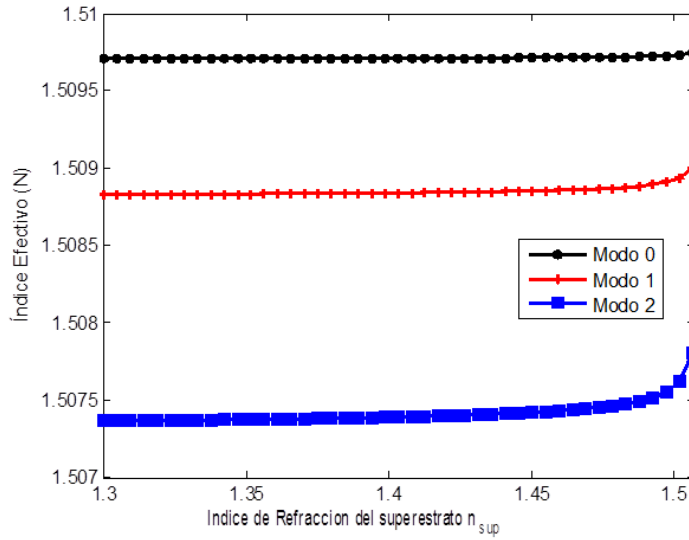


Figura 2.9. Índice efectivo respecto al índice de refracción en el superestrato.

II.2.3 Distribución de Campo

Ahora se determinará la distribución de campo para los modos guiados TE.

Campo interno

El campo dentro de la guía de onda está compuesto por dos ondas planas, una TE y otra TM, viajando a los ángulos θ_m y $-\theta_m$ con el eje z , las componentes de sus vectores de onda son: $0, \pm k_0 n_1 \text{sen} \theta_m, k_0 n_1 \text{cos} \theta_m$, estos tienen la misma amplitud y el mismo cambio de fase $m\pi$ al centro de la guía de onda (la mitad del correspondiente a un recorrido completo). La parte compleja de la amplitud del campo eléctrico es por lo tanto $E_x(y, z) = a_m u_m(y) e^{-j\beta_m z}$ donde $\beta_m = k_0 n_1 \text{cos} \theta_m$ es la constante de propagación, a_m es una constante y $\lambda = \lambda_0 / n_1$.

$$u_m(y) \propto \begin{cases} \cos\left(\frac{2\pi \text{sen} \theta_m}{\lambda} y\right), & m = 0, 2, 4, \dots \\ \text{sen}\left(\frac{2\pi \text{sen} \theta_m}{\lambda} y\right), & m = 1, 3, 5, \dots \end{cases} \quad -\frac{d}{2} \leq y \leq \frac{d}{2} \quad \dots(2.26)$$

Nótese que aunque el campo es armónico, éste no se extingue en la frontera de la guía de onda. El campo óptico del modo propagante es llamado oscilante en el núcleo de la guía (21).

Campo Evanescente

El campo externo se tiene que igualar al campo interno en todos los puntos de la frontera $y = \pm d/2$. Por lo tanto éste tiene que variar con el eje z de acuerdo a $e^{-j\beta_m z}$.

Sustituyendo $E_x(y, z) = a_m u_m(y) e^{-j\beta_m z}$ en la ecuación de Helmholtz $(\nabla^2 + n_2^2 k_0^2) E_x(y, z) = 0$, se obtendrá:

$$\frac{d^2 u_m}{dy^2} - \gamma_m^2 u_m = 0 \quad (2.27)$$

Donde

$$\gamma_m^2 = \beta_m^2 - n_2^2 k_0^2 \quad (2.28)$$

A partir de que $\beta_m > n_2 k_0$ para modos guiados (fig. 2.3), $\gamma_m^2 > 0$, así que la ecuación (2.27) se satisface por las funciones exponenciales $e^{-\gamma_m y}$ y $e^{\gamma_m y}$. Dado que el campo decrece fuera de la guía de onda, tenemos $e^{-\gamma_m y}$ para el medio de transmisión superior y $e^{\gamma_m y}$ para el medio de transmisión inferior,

$$u_m(y) \propto \begin{cases} e^{-\gamma_m y}, & y > \frac{d}{2} \\ e^{\gamma_m y}, & y < -\frac{d}{2} \end{cases} \quad \dots(2.29)$$

La tasa de decaimiento γ_m es conocida como *coeficiente de extinción* y la onda es conocida como *onda evanescente* (23). Sustituyendo $\beta_m = k_0 n_1 \cos\theta_m$ y $\cos\bar{\theta}_c = \frac{n_2}{n_1}$ en la ecuación (2.22), obtenemos:

$$\gamma_m = n_2 k_0 \left(\frac{\cos^2 \theta_m}{\cos^2 \bar{\theta}_c} - 1 \right)^{1/2} \quad \dots(2.30)$$

En la medida que el número de modo m aumenta, θ_m aumenta y γ_m disminuye. Los modos de orden superior, por lo tanto, penetran a mayor profundidad tanto en el sustrato como en el superestrato (21).

Para determinar las constantes de proporcionalidad en (2.26) y (2.29), hacemos continuos los campos interno y externo en $y = \frac{d}{2}$ y utilizamos la normalización

$$\int_{-\infty}^{\infty} u_m^2(y) dy = 1 \quad \dots(2.31)$$

Esto nos da una expresión para $u_m(y)$ válida para toda y . Estas funciones están ilustradas en la figura 2.10. Todos los campos $u_m(y)$ son ortogonales, y l, m representan el número del modo

$$\int_{-\infty}^{\infty} u_m(y) u_l(y) dy = 0, \quad l \neq m \quad \dots(2.32)$$

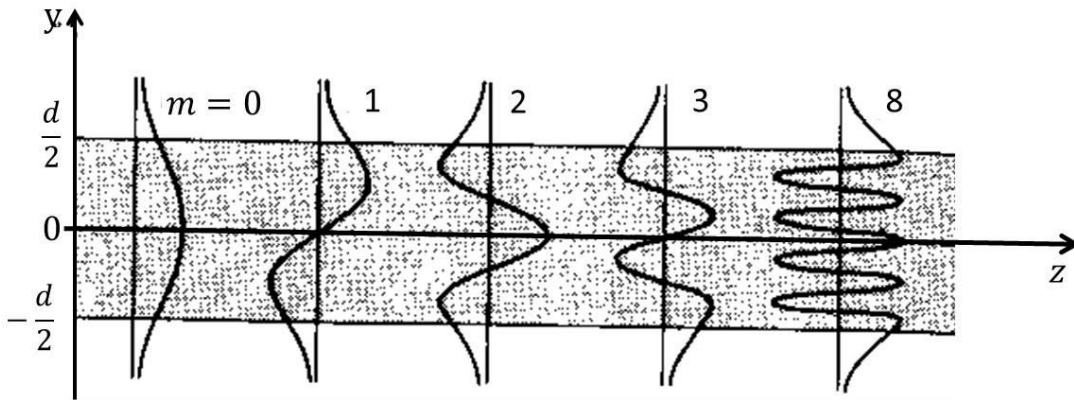


Figura 2.10. Distribución de campo para modos guiados TE en una guía de onda. (21)

Un campo TE arbitrario en la guía de onda dieléctrica puede ser escrito como una superposición de estos modos:

$$E_x(y, z) = \sum_m a_m u_m(y) e^{-j\beta_m z} \quad \dots(2.33)$$

Donde a_m es la amplitud de modo m .

Las distribuciones de campo de los modos TM son determinadas de manera similar (fig. 2.2). Dado que estas distribuciones son paralelas a la frontera de la guía de onda, la componente z del campo eléctrico TM se comporta de manera similar que la componente x del campo eléctrico TE. El análisis puede comenzar obteniendo $E_z(y, z)$. Usando las propiedades de las componentes de las ondas TE y TM, las otras componentes $E_y(y, z)$ y $H_x(y, z)$ se pueden obtener. Como una alternativa, las ecuaciones de Maxwell pueden ser usadas para determinar estos campos.

La distribución de campo del modo TE de menor orden ($m = 0$) toma una forma similar a la de un haz gaussiano. Sin embargo, a diferencia del haz gaussiano, la luz guiada no se propaga en la dirección transversal, ya que lo hace de manera axial. En una guía de onda, la tendencia de la luz a difractarse es compensada por la acción de confinamiento en el medio (fig. 2.11).

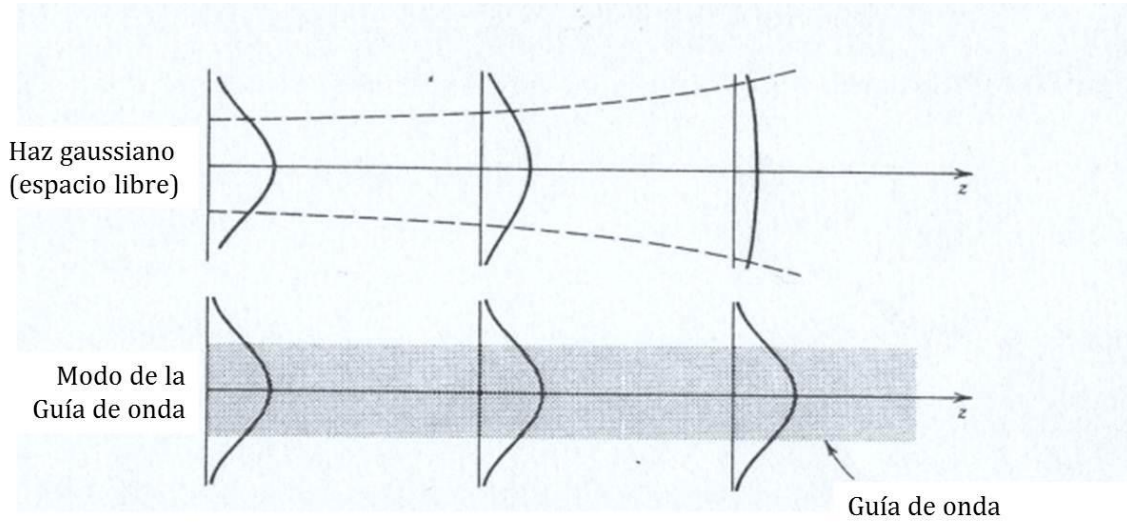


Figura 2.11. Comparación de la propagación entre un haz gaussiano en el espacio libre y un modo en la guía de onda. (21)

Constantes de propagación

Se define para una región de la estructura el vector de onda del modo guiado en la dirección y , como

$$k_{yi} = n_i^2 k_0^2 - \beta^2 \quad \dots(2.34)$$

Donde $i = s, g, sup$ dependiendo en que región de la estructura se trate, sustrato, núcleo o superestrato, respectivamente.

Este vector de onda se escribe explícitamente, para el caso en el cual $k_0 n_1 > \beta > k_0 n_2$, el cual es nombrado, propagación en la región del núcleo.

$$k_{y2} = \sqrt{\beta^2 - n_2^2 k_0^2} = k_0 \sqrt{N^2 - n_2^2} \quad \dots(2.35)$$

$$k_{y1} = \sqrt{n_1^2 k_0^2 - \beta^2} = k_0 \sqrt{n_1^2 - N^2} \quad \dots(2.36)$$

Para el superestrato y el sustrato (2.36) y para el núcleo (2.37) (21).

Notación Exponencial

Las ecuaciones siguientes describen el campo eléctrico del modo guiado para una polarización TE en cada región de la guía de onda

$$E_x(y)|_{sup} = E_{sup0} e^{-k_{ysup}(y-d)} \quad y \geq +d \quad \dots(2.37)$$

$$E_x(y)|_{sg} = E_{g0} e^{jk_{yg}y} \quad -d \leq y \leq +d \quad \dots(2.38)$$

$$E_x(y)|_s = E_{s0} e^{+k_{ys}(y+d)} \quad y \leq -d \quad \dots(2.39)$$

Podemos explicar entonces que el campo eléctrico (óptico) decae afuera de la región del núcleo con una constante k_{ys} o k_{ysup} . Este campo afuera del núcleo recibe el nombre de campo evanescente (23).

La tasa de decaimiento del campo evanescente está dada por la magnitud de k_{ys} o k_{ysup} . Si consideramos el campo en el superestrato, la constante de propagación en forma exponencial sería

$$E_x(y)|_{sup} = E_{sup0} \exp \left[k_0 \sqrt{N^2 - n_{sup}^2} \cdot (y - d) \right] \quad \dots(2.40)$$

Si retomamos la definición del índice efectivo (ecuación (2.25)), podemos reescribir (2.40) como

$$E_x(y)|_{sup} = E_{sup0} \exp \left[k_0 \sqrt{n_g^2 \sin^2 \theta - n_{sup}^2} \cdot (y - d) \right] \quad \dots(2.41)$$

Un valor de k_y más pequeño implica un decaimiento más lento de la función exponencial y por lo tanto una mayor penetración del campo evanescente en la región del superestrato. Para pequeños valores del ángulo de reflexión θ , se obtienen valores pequeños de k_y , y entonces los modos más cercanos al corte tienen ángulos de incidencia más pequeños que los modos que son bien guiados, los modos de orden superior generalmente tienen campos evanescentes más grandes que los modos de menor orden. Vemos esto claramente en la figura 2.12, donde la intensidad del campo afuera del núcleo es distintivamente más grande para valores más grandes de m .

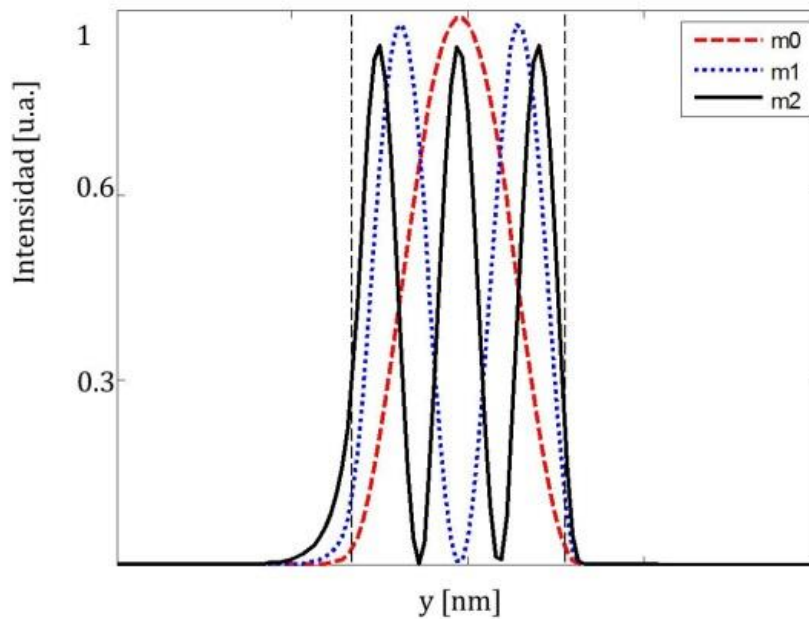


Figura 2.12. Perfiles de intensidad del campo eléctrico en una guía plana asimétrica. La zona del núcleo de la guía de onda está marcada por líneas punteadas verticales.

Al variar los parámetros de la guía de onda también variara el campo evanescente según los diferentes casos. Usando la expresión (2.41) podemos definir la profundidad de penetración como aquella distancia desde la interface para la cual el campo ha caído $\frac{1}{e}$ de su valor en la

interface; la profundidad de penetración está dada entonces por $\frac{1}{k_{y2}}$ y es útil para caracterizar el campo evanescente.

II.2.4 Acoplamiento Óptico en Guías de Onda

La luz puede ser acoplada dentro de una guía de onda enfocándose directamente en un extremo de ella (fig. 2.13). Para excitar un modo dado, la distribución transversal de la luz incidente $s(y)$ debe coincidir con la del modo que se desea excitar. Debido a las pequeñas dimensiones de las guías de onda planas, la alineación y el enfoque son usualmente difíciles. Existen diseños de sensores que utilizan la luz que se propaga dentro de una guía plana (21) para realizar acciones de sensado.

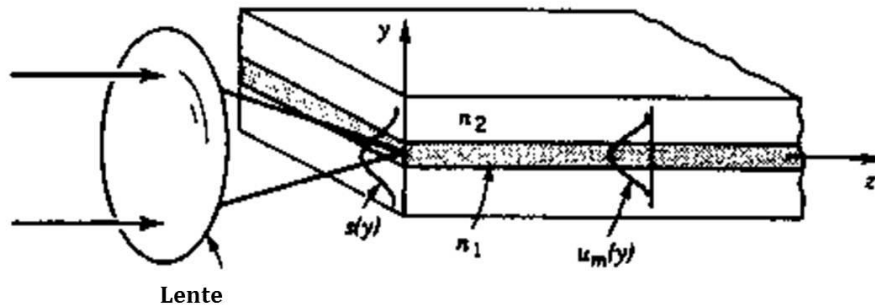


Figura 2.13. Acoplamiento de un haz de luz dentro de una guía de onda

En una guía de onda multimodal, el factor de acoplamiento puede ser evaluado usando una aproximación para rayos ópticos (fig. 2.14). Los rayos guiados dentro de la guía de onda están confinados a un ángulo $\bar{\theta}_c = \cos^{-1}\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$. Debido a la refracción de los rayos incidentes, esto corresponde a un ángulo externo θ_a satisfaciendo:

$$NA = \text{sen}\theta_a = n_1 \text{sen}\bar{\theta}_c = n_1 \left[1 - \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad \dots(2.42)$$

$$= (n_1^2 - n_2^2)^{1/2}$$

Donde NA es la apertura numérica de la guía de onda. Para la máxima eficiencia de acoplamiento la luz incidente debe ser enfocada en un ángulo no mayor que θ_a .

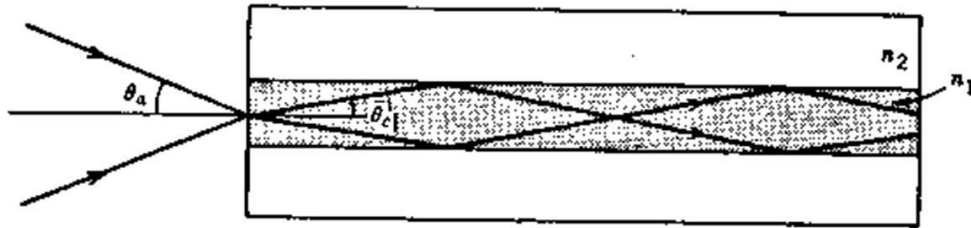


Figura 2.14. Enfoque de rayos dentro de una guía de onda multimodal. (21)

Excitación de una guía de onda

Como hemos visto, la luz se propaga en una guía de onda en forma de modos. La amplitud compleja del campo óptico es generalmente una superposición de estos modos,

$$E(y, z) = \sum_m a_m u_m(y) e^{-j\beta_m z} \quad \dots(2.43)$$

Donde a_m es la amplitud, $u_m(y)$ es la distribución transversal (la cual es real), y β_m es la constante de propagación del modo m .

Las amplitudes de los diferentes modos dependen de la naturaleza de la fuente de luz usada para "excitar" la guía de onda. Si la fuente tiene una distribución que coincida perfectamente con un modo específico, solo ese modo será excitado. Una fuente de distribución arbitraria $s(y)$ excita diferentes modos en diferentes cantidades (21).

$$s(y) = \sum_m a_m u_m(y) \quad \dots(2.44)$$

II.3 DEFLEXIÓN DE UN HAZ GUIADO

Asumimos una guía plana de espesor e_w y de índice de refracción n_g , sobre un sustrato con índice de refracción $n_s < n_g$; hay un gradiente de índice en el plano de la guía de onda de índice de refracción efectivo N del modo guiado, el haz será deflectado hacia el valor más alto de N .

II.3.1 Deflexión por Efecto Térmico

La variación espacial del índice de refracción de un material caliente, o el contacto con un gas o un fluido deflectarán un haz laser. El efecto termo-óptico en una guía de onda óptica presenta una alternativa atractiva para fabricar un deflector (16). Esta deflexión puede ser monitoreada y usada como un elemento de detección de onda térmica en una muestra. Las ondas térmicas juegan un papel que se vuelve más importante en el estudio de diversos materiales y sus parámetros (24). El cambio en el índice de refracción de un material que resulta de un incremento en la temperatura puede escribirse como:

$$\frac{\Delta n}{n} = \frac{1}{n} \frac{dn}{dT} \Delta T \quad \dots(2.45)$$

La deflexión D de un delgado e infinitesimal haz de prueba pasando a través de un medio con un gradiente de índice de refracción está dada por:

$$D = \frac{1}{n} \frac{dn}{dT} \int ds \nabla T \quad \dots(2.46)$$

Donde ∇T : es el laplaciano de la temperatura. Cuando se tiene una guía de onda con un gradiente de índice de refracción y la señal de prueba es un haz gaussiano se usa:

$$D = -\frac{1}{n} \frac{dn}{dT} \int_{-\infty}^{\infty} \nabla T \times d\vec{l} \quad \dots(2.47)$$

Bajo este principio han sido fabricados dispositivos deflectores de haz en guías de onda ópticas planas de películas delgadas poliméricas y su funcionamiento ha sido demostrado con la capacidad de determinar el ángulo de deflexión (10).

II.3.2 Deflexión por Gradiente de Espesor

Suponemos que el espesor de la guía de onda varia en la dirección del *eje x* y es constante a lo largo del *eje z*, por lo que $e = e(x)$ (fig. 2.15(a)). La guía de onda tiene pequeñas variaciones a través del *eje x* lo que se traduce como tener un cambio en el espesor de la guía de onda por lo tanto esto representa un cambio en el índice de refracción efectivo N (19).

Para este caso el ángulo de deflexión lateral de una guía plana en dos dimensiones puede ser aproximado como:

$$\theta = \frac{1}{N} \frac{\partial N}{\partial e} \int_S \frac{de(x)}{dx} \hat{a}_x \cdot d\vec{S} \quad \dots(2.48)$$

Donde \hat{a}_x es el vector unitario en la dirección x y S es la trayectoria del haz en el Plano XZ.

Suponemos que la variación en el espesor de la guía de onda a lo largo del *eje x* es lineal (fig. 2.15 (b)). Además $de(x)/dx$ es constante y por lo tanto puede sacarse de la integral en la ecuación (2.48). Si el ángulo de deflexión es pequeño cuando se llega al final del dispositivo ($z = L$), entonces la trayectoria prácticamente paralela al *eje z* y tenemos entonces que $\hat{a}_x \cdot d\vec{S} \cong dz$ a través de S . La integral de dz es simplemente z , entonces obtenemos:

$$\theta \cong \frac{1}{N} \frac{\partial N}{\partial e} \frac{de(x)}{dx} z \quad \dots(2.49)$$

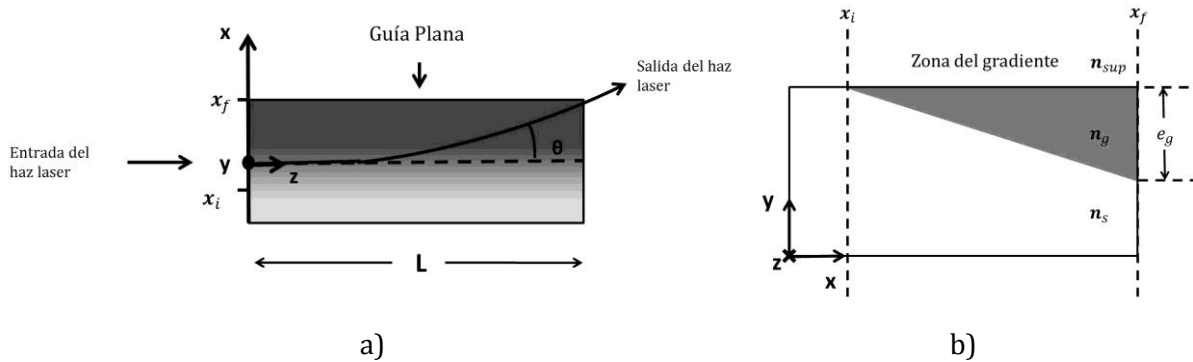


Figura 2.15. Diagrama esquemático de la estructura del dispositivo. a) Vista superior b) Sección transversal

El ángulo de deflexión del haz al final del dispositivo es $\theta_{out} = \theta(L)$. El haz es desplazado como uno solo a lo largo del eje x mientras viaja a través del dispositivo. Si asumimos que $z = 0$ el eje del haz está en $x = 0$, entonces la posición, x_a como función de z puede ser calculada como:

$$x_a(z) \approx \int_0^z \theta(z) dz \quad \dots(2.50)$$

En el final del dispositivo sobre el eje del haz tenemos $x(L) \equiv x$, lo cual está dado por

$$x_{out} \approx \frac{L^2}{2N} \frac{\partial N}{\partial e} \frac{de(x)}{dx} = \frac{L}{2} \theta_{out} \quad \dots(2.51)$$

Ahora el ángulo y la posición del haz en el eje z salen del plano, θ_{out} y x_{out} cambiarán si n_{sup} cambia. Para cambios lo suficientemente pequeños en el índice de refracción del medio superior al exterior de la guía, Δn_{sup} , podemos escribir,

$$\Delta\theta_{out} = \frac{\partial\theta_{out}}{\partial n_{sup}} \Delta n_{sup} \quad \dots(2.52)$$

$$\Delta x_{out} = \frac{\partial x_{out}}{\partial n_{sup}} \Delta n_{sup} = \frac{1}{2} L \frac{\partial\theta_{out}}{\partial n_{sup}} \Delta n_{sup} \quad \dots(2.53)$$

De la ecuación (2.49) obtenemos

$$\frac{\partial\theta_{out}}{\partial n_{sup}} = \left[\frac{1}{N} \frac{\partial^2 N}{\partial n_{sup} \partial e} - \frac{1}{N^2} \frac{\partial N}{\partial n_{sup}} \frac{\partial N}{\partial e} \right] \frac{de(x)}{dx} L \quad \dots(2.54)$$

Podemos referirnos a la derivada $\frac{\partial\theta_{out}}{\partial n_{sup}}$ como la sensibilidad del ángulo de deflexión y a $\frac{\partial x_{out}}{\partial n_{sup}}$ como la sensibilidad del desplazamiento lateral para los cambios en índice de refracción, las derivadas entre los corchetes en (2.54) pueden ser calculadas numéricamente.

II.4. CONCLUSIONES

En este capítulo se mostraron los distintos tipos de guías de onda ópticas y se presentó a las guías de onda planares como nuestro caso particular de estudio ya que el dispositivo para la deflexión óptica que se estudiará a lo largo de este trabajo será del tipo planar.

Se describió la estructura y las partes que conforman una guía plana, así como el detalle de las características de los parámetros de interés en el análisis de la propagación de un haz en dichas guías de onda. También, se desarrolló teóricamente la obtención de los parámetros mencionados.

Por medio del análisis teórico que se desarrolla se determina que si se tienen como medio de propagación guías de onda ópticas que tengan un gradiente de espesor o un gradiente de temperatura que produzca un gradiente en el índice de refracción del núcleo de la guía es posible obtener la deflexión de un haz guiado.

CAPÍTULO III. DISEÑO Y FABRICACIÓN DEL DISPOSITIVO

III.1 DISEÑO DE LA ESTRUCTURA

El sensor en óptica integrada propuesto se basa en el guiado de una onda a través de dispositivos planares, para su fabricación se utilizará la técnica de intercambio iónico en vidrio. El dispositivo se realizará en un sustrato de vidrio y la guía de onda como se dijo se hará a través de intercambio iónico, el dispositivo integrado constará de tres zonas: la guía plana, la guía gradiente y una parte sin intercambio que será simplemente vidrio.

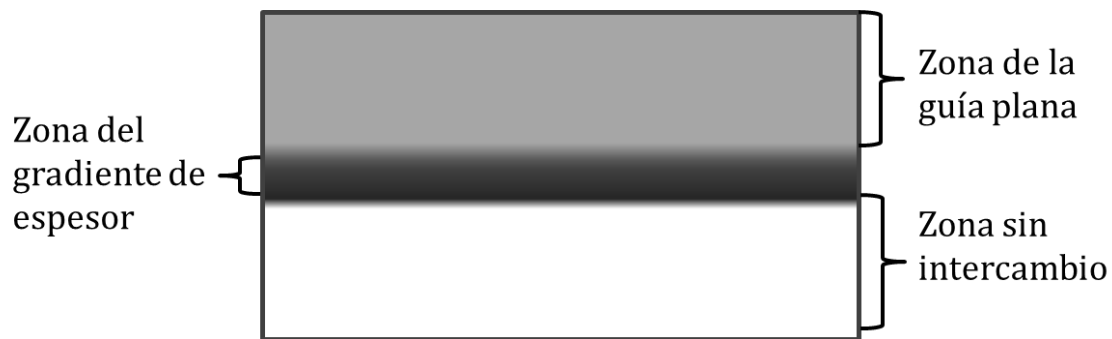


Figura 3.1. Diagrama esquemático de las partes que conforman la estructura del dispositivo

III.1.1 Parámetros de Diseño

Con base a la ecuación de dispersión modal presentada anteriormente el diseño considera fabricar una estructura donde se propague el modo fundamental, para esto determinamos a través de simulaciones cuál será el espesor de corte al cual se propagan los primeros tres modos de la estructura:

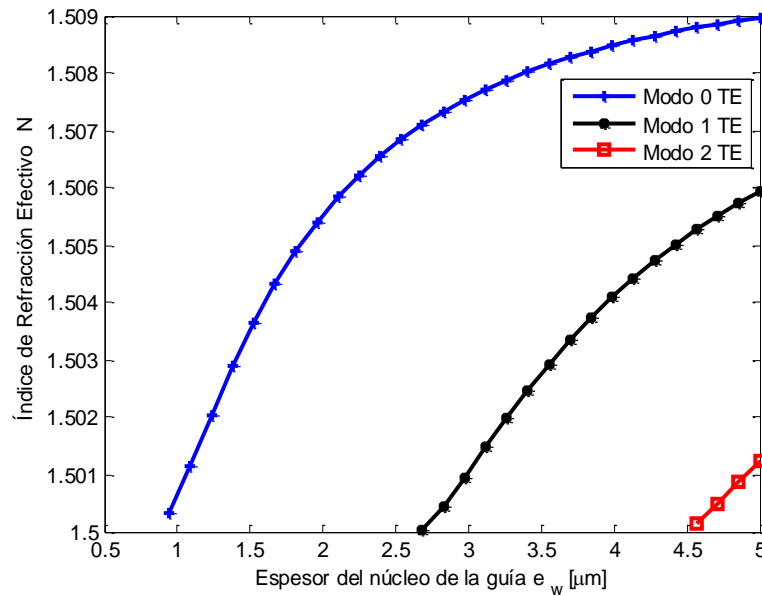


Figura 3.2. Espesor de corte para los modos de una guía de onda plana

Podemos ver en la figura 3.2 que el modo fundamental o modo cero se propaga desde que el espesor de la guía es de aproximadamente $0.9[\mu\text{m}]$ hasta las $2.6[\mu\text{m}]$ ya que a partir de ahí ya se estará propagando el primer modo de orden superior. Por lo tanto el primer parámetro de diseño es que nuestro gradiente de espesor tenga como espesor máximo las $2.6[\mu\text{m}]$ para que sólo se propague el modo fundamental.

Para determinar las dimensiones del gradiente y del dispositivo se toman algunas consideraciones como lo son el ancho del haz láser y la longitud del sustrato de vidrio. El sustrato de vidrio empleado mide aproximadamente $25[\text{mm}] \times 50[\text{mm}]$, por lo tanto al momento de la fabricación éste será el tamaño del dispositivo. En cuanto al ancho del gradiente, se requiere que sea más o menos del mismo orden que el ancho del haz láser. Experimentalmente al medir el haz se obtiene que su ancho es de:

$$a_{\text{láser}} = 1[\text{mm}]$$

Las especificaciones del láser indican que de fábrica el ancho del haz es de $0.8[\text{mm}]$. Para fines prácticos tomaremos $1[\text{mm}]$, que es la medida que se registró experimentalmente, como el ancho que tendrá el gradiente, esto para que la totalidad del haz sufra el efecto del gradiente y ocurra la deflexión (fig.3.3). Si el gradiente fuese más ancho que el haz de luz, seguramente el haz a lo largo de su viaje no se encontraría con un cambio significativo en el espesor que lo hiciera deflectarse, ya que resulta que al tener un gradiente de mayor ancho, los cambios en

espesor son mucho más pequeños, es decir, que cabe la posibilidad que en un $1[mm]$ de este gradiente no haya un cambio significativo en espesor.

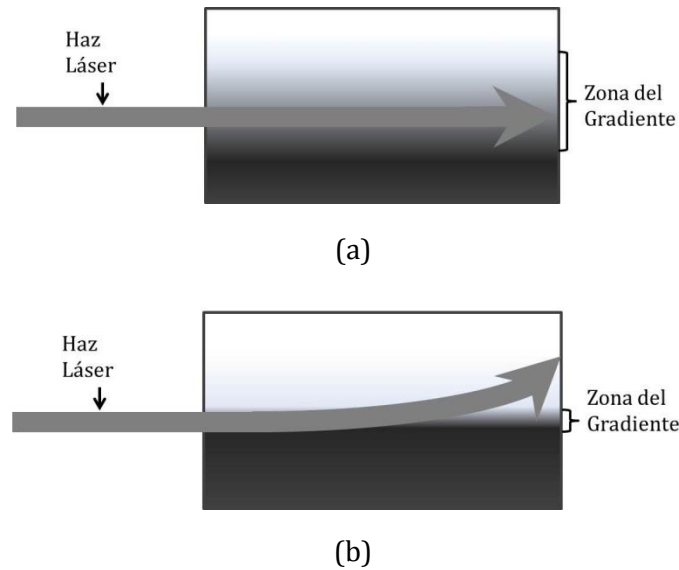


Figura 3.3. Deflexión del haz láser por efecto del ancho del gradiente, (a) $ancho_{láser} < ancho_{gradiente}$ y
(b) $ancho_{láser} \approx ancho_{gradiente}$.

Se hace hincapié en tener especial cuidado con el ancho del gradiente ya que en pruebas preliminares se contaba con un dispositivo que tenía un gradiente con $ancho_{gradiente} > ancho_{láser}$ y las pruebas que se reportan en este trabajo se realizaron también con dicho dispositivo y en efecto no se observa deflexión en el haz que viaja a través de dicho dispositivo, lo cual se atribuye al ancho del gradiente con respecto al ancho del haz. Se llegó a esta conclusión después de analizar que en los perfiles de intensidad que se obtuvieron de la imagen del campo cercano de este dispositivo no había cambios. Los pormenores de esas pruebas no se detallan en este trabajo, pero se toman como bases para realizar un nuevo dispositivo.

Deflexión por modulación de la temperatura

Para este caso llevaremos a cabo el calentamiento del dispositivo desde temperatura ambiente ($25^{\circ}C$ aprox.) hasta los $50^{\circ}C$ para elevar su índice de refracción. Tomando en cuenta que el coeficiente termo-óptico del vidrio es $\partial n / \partial T = 2.06 \times 10^{-6} \left[\frac{1}{^{\circ}C} \right]$, se sabe entonces que por cada grado de temperatura que se aumente el índice de refracción se elevará en

2.06×10^{-6} . Si se supone que en 25° [C] tendremos un índice de refracción en la guía de $n_g = 1.51$, al aumentar la temperatura 25° [C] para llegar al estimado de 50° [C], tendremos un índice de refracción en la guía de $n_g = 1.51005$. Se realiza una simulación modal de la propagación con el índice de refracción final en el núcleo de la guía para tener los datos de índice efectivo.

Reescribimos la ecuación (2.49),

$$\theta \cong \frac{1}{N} \frac{\partial N}{\partial e} \frac{de(x)}{dx} z \quad \dots(3.1)$$

Esto para definir el ángulo a partir del cambio del índice de refracción de la guía por efecto del aumento de la temperatura, modificando (3.1) para dicho cambio de índice de refracción en la guía tenemos (24):

$$\theta \cong \frac{1}{N} \frac{\partial N}{\partial n_g} \frac{dn_g}{dT} z \quad \dots(3.2)$$

A través de esta expresión es que se determinará el ángulo de deflexión del haz láser.

Deflexión por modulación del índice de refracción en el superestrato

Para este caso se realizarán soluciones con distintos cambios de índice de refracción que se colocarán como superestrato para cambiar el índice de refracción efectivo y de esta manera obtener una deflexión. Retomando y renombrando la ecuación (2.58) tenemos (19):

$$\frac{\partial \theta_{out}}{\partial n_{sup}} = \left[\frac{1}{N} \frac{\partial^2 N}{\partial n_{sup} \partial e} - \frac{1}{N^2} \frac{\partial N}{\partial n_{sup}} \frac{\partial N}{\partial e} \right] \frac{de(x)}{dx} L \quad \dots(3.3)$$

Esta expresión se evaluará realizando simulación para obtener el índice de refracción efectivo cuando se cambia el índice de refracción del superestrato de aire a agua. De la figura 3.2 sabemos que en espesores de 0 a $2.5[\mu m]$ únicamente se propaga el modo fundamental, por

lo tanto los parámetros de simulación empleados serán $e_w = 2.5 [\mu m]$, $n_s = 1.5$ y $n_g = 1.51$, los datos resultantes de la simulación se evalúan en (3.3) de manera numérica para obtener $\frac{\partial \theta_{out}}{\partial n_{sup}}$.

III.2 FABRICACIÓN DEL DISPOSITIVO

Un sin número de procesos han sido empleados para fabricar guías de onda en vidrio. Estos procesos son divididos en categorías:

- Sputtering
- Deposición química por evaporación
- Implantación iónica
- Intercambio iónico

Las películas delgadas también son usadas como guías de onda planas poliméricas y son depositadas por spin-coating (17). Las guías de onda son fabricadas por estos procesos, pero el proceso de intercambio iónico ha sido por mucho la técnica más popular para producir componentes ópticos en vidrio. Esta es la técnica que usaremos para realizar las guías de onda plana y gradiente.

III.2.1 Intercambio Iónico

Como ya se mencionó anteriormente el dispositivo se realizará con un sustrato de vidrio, la guía de onda se realizara por intercambio iónico con Nitrato de Potasio (KNO_3).

Vidrio

El sustrato de vidrio es un material muy usado para óptica integrada por su bajo costo, excelente transparencia, disponibilidad en grandes cantidades, el umbral para causarle daño de carácter óptico es elevado y además es muy rígido. También el sustrato de vidrio es amorfo lo que facilita producir componentes de manera indiferente en cuanto a la polarización. Por otro lado, el índice de refracción del vidrio utilizado en la óptica integrada (silicato, fosfato) es cercano a aquel utilizado en las fibras ópticas en sílice y como

consecuencia las pérdidas por acoplamiento entre las guías de onda fabricadas en vidrio, son pequeñas (22).

KNO₃

El compuesto químico nitrato de potasio se obtiene purificando el nitrato de sodio y posteriormente se le hace reaccionar en una solución con cloruro de potasio (KCl), en la cual el nitrato de potasio, menos soluble, cristaliza.

En un proceso de intercambio iónico, un ion en el vidrio (usualmente Na⁺) es reemplazado por un ion más grande tal como Ag⁺, K⁺, Cs⁺, o Ti⁺. En consecuencia el índice de refracción del vidrio aumenta localmente por esfuerzos mecánicos, dando lugar a una guía de onda. El intercambio iónico puede ser puramente un proceso térmico. Sin embargo un campo eléctrico puede ser utilizado para acelerar el proceso. Típicamente los iones son introducidos dentro del vidrio a partir de una sal, pero en el caso del intercambio iónico asistido por un campo eléctrico una película delgada metálica puede ser usada como fuente de iones.

El intercambio iónico es un proceso conveniente para la fabricación de guías de onda por muchas razones:

- El proceso ofrece consideraciones y flexibilidad en la elección de parámetros de fabricación y además puede ser optimizado para una amplia variedad de aplicaciones.
- El proceso es simple y es capaz de obtener varias guías en un mismo proceso. La fabricación de las guías es reproducible y con bajas pérdidas en la propagación. No hay necesidad de un control *in-situ* de los parámetros durante el proceso de fabricación debido a su excelente reproducibilidad.
- Guías de onda con un buen ajuste al tamaño de las fibras monomodales y multimodales pueden ser hechas, esto minimiza las pérdidas de acoplamiento.
- Guías de onda intercambiadas iónicamente tienen una configuración planar sin necesidad de procesos litográficos o de deposición de capas delgadas.

Existe un gran interés por la fabricación de guías de onda por intercambio iónico, esto por sus adecuados espesor e índice de refracción para aplicaciones en circuitos ópticos integrados, además del bajo costo y la simple fabricación (25). El proceso de intercambio iónico tiene un potencial elevado para la fabricación de guías en dispositivos ópticos integrados. Desde la fabricación de la primera guía de onda en vidrio en 1972, se han hecho progresos significativos en este campo, aun así se han desarrollado diferentes procesos de fabricación.

Intercambio iónico con sales

El vidrio con gran cantidad de modificadores de red tiene altas temperaturas de transición vítrea y en general gran viscosidad a altas temperatura. Existen también redes intermedias, las cuales contribuyen a aumentar la fuerza de la red, pero no forman vidrio por ellas mismas. Finalmente existen modificadores de red con baja capacidad de agarre para su red. Generalmente se añaden al vidrio para darle alguna propiedad deseada tal como una bajo punto de dureza o gran resisten a la formación de burbujas durante el proceso, como el Na_2O y el KNO_3 .

Bajo ciertas condiciones es posible reemplazar algunos iones de los modificadores de red por otros con la misma valencia y propiedades químicas. En la región de intercambio que se ha formado, varias propiedades del vidrio son modificadas.

Lo iones K^+ que se introducen en el vidrio son de mayor tamaño que los que salen de la estructura del vidrio. En la temperatura de intercambio el volumen del vidrio puede ajustarse para acomodar los iones más grandes, pero cuando el vidrio se enfría, grandes fuerzas de compresión se desarrollan en la superficie. Estas fuerzas en las superficies tienden a fortalecer el vidrio por la inhibición de la formación y propagación de pequeñas fisuras en él. Por supuesto, el intercambio iónico también modifica las propiedades ópticas y eléctricas del vidrio. Los nuevos iones tienen diferentes polarizaciones, tamaños y movilidades. Este hecho es usado para fabricar guías de onda ópticas por incremento del índice de refracción en áreas seleccionadas del sustrato de vidrio (26).

En este trabajo usaremos el intercambio iónico por calor, la agitación térmica y la movilidad distinta de cero de ciertos iones en el vidrio a una temperatura suficientemente elevada es por lo cual se lleva a cabo el intercambio.

Cualitativamente el intercambio iónico por temperatura sucede de la siguiente manera: un vidrio conteniendo iones A^+ es sumergido en una sal derretida que contiene iones similares, llamada B^+ . En la interface del vidrio y la sal derretida, ambas concentraciones de iones inicialmente bajan de forma repentina desde valores finitos hasta 0.

Por lo tanto no hay un equilibrio, y la mayoría de los iones A^+ y B^+ son casi perfectamente intercambiables en la sal y el vidrio. Además la agitación térmica en la interface produce colisiones aleatorias en las cuales un ion B^+ reemplaza a un ion A^+ y gradualmente este proceso se difunde lejos desde la interface. Por supuesto que en la sal, los iones A^+ se mueven lejos de la interface mucho más rápidamente (y son perdidos en lo que puede considerarse

una reserva infinita de iones B^+) que los iones B^+ en el vidrio la cual lentamente invade al sustrato en forma de una pequeña película cercana a la su superficie.

El proceso se acelera con temperaturas elevadas debido a una agitación térmica fuerte y también porque la matriz de vidrio, a través de la cual se tienen estos movimientos iónicos, es menos rígida.

Cuando el vidrio es llevado afuera de la sal, pero conserva su alta temperatura, el intercambio continúa sin que haya provisión de nuevos iones B^+ . El resultado es que los iones, los cuales ya están en el vidrio, tenderán a redistribuirse ellos mismos para obtener un equilibrio (concentración uniforme de iones A^+ y B^+ a través del sustrato) por movimiento hacia al fondo pero con un decremento en la concentración de la superficie (22).

El proceso se detiene (o la tasa desciende infinitamente lento) solo cuando la fuente de calor es retirada y el sustrato se enfría hasta llegar a la temperatura ambiente. Típicamente las temperaturas de intercambio están entre los 200°C y los 550°C y generalmente no varía mucho dependiendo del punto de fusión de la sal usada y de la fuente de intercambio de iones ya que subir excesivamente el calor puede causar daños en la superficie del sustrato debido a la descomposición de nitratos y la excesiva relajación térmica del vidrio.

El perfil de concentración resultante tiene un máximo en la superficie que se decreta de manera monótona dentro del sustrato debido a la configuración y a la naturaleza del procedimiento.

La figura 3.4 muestra esquemáticamente el proceso requerido para fabricar una guía de onda en un sustrato planar con una sal. Después de la limpieza, una máscara es depositada sobre la superficie para grabar un motivo. La superficie entera es expuesta a un baño con la sal derretida, así los iones son introducidos a la sal, esto en un horno a temperatura controlada. Una vez que se ha retirado del horno, los residuos de la sal y de la máscara son removidos, dejando libre la superficie del vidrio en la cual se ha formado un motivo por intercambio iónico.

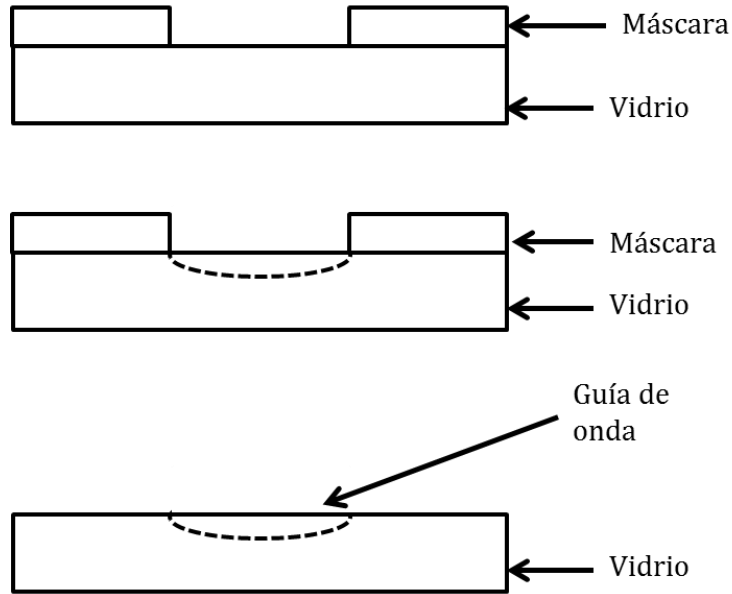


Figura 3.4. Procedimiento para la fabricación de una guía de onda canal por intercambio iónico.

Aunque las guías de onda por intercambio iónico son relativamente fáciles de fabricar, ellas requieren de un buen control en el procedimiento para así lograr guías de onda con bajas pérdidas, dimensiones precisas y buena forma. No es de sorprenderse que en muchas ocasiones se hayan desarrollado y manufacturado vidrios diseñados especialmente para trabajos de intercambio iónico.

Para realizar el gradiente de espesor en la guía, se define una máscara sobre el sustrato que tendrá el motivo del gradiente y se coloca antes de la inmersión en la sal. El material de esta máscara no debe ser susceptible al ataque por los modificadores de red empleados en el intercambio iónico y debe ser impermeable al movimiento iónico para bloquear el intercambio en las zonas deseadas. Varios materiales han sido usados pero una elección conveniente el aluminio evaporado, con un espesor de al menos $100\mu m$. En algunos casos se prefieren mascarar no metálicas. Se recomienda el uso de aluminio anodizado para que sea posible que al remover la máscara no se dañe el vidrio y después de completar el proceso se obtenga una guía de onda con bajas pérdidas.

En nuestro caso particular se requirió la ayuda del Laboratorio de Películas Delgadas del CCADET para depositar un película delgada de aluminio con un gradiente de $1[mm]$, en la figura 3.5 se muestra la estructura del depósito.

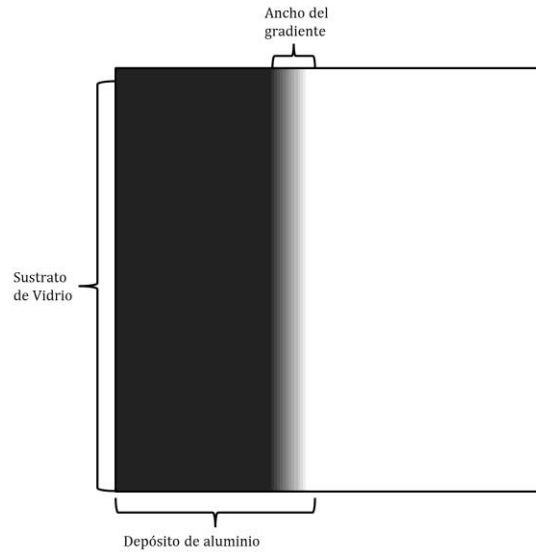


Figura 3.5. Depósito de aluminio para obtener una guía de onda con gradiente de espesor.

Donde se encuentra el aluminio no habrá intercambio y en la parte donde comienza el gradiente habrá menos iones intercambiados debido al espesor del aluminio y éste tendrá distintos espesores cambiando de manera lineal hasta llegar a $1[mm]$ de ancho, a partir de allí ya no habrá máscara de aluminio por lo cual tendremos una sección que será intercambiada completamente y por lo tanto en esta parte tendremos una guía de onda plana.

La naturaleza isotrópica del intercambio iónico térmico se refleja así misma en el hecho de que la concentración de los perfiles de los iones B^+ en los sustratos (y por lo tanto el perfil de índice de refracción resultante en las guía de onda) tienen dimensiones excedidas en lo ancho dos veces más que en lo profundo respecto a la máscara. Esto hace que sea muy difícil fabricar guías de onda con dimensiones de resonancia similares en todas direcciones para un buen ajuste de fibras ópticas que tiene simetría cilíndrica.

El proceso de intercambio iónico depende grandemente de los materiales y las condiciones del intercambio usadas. Solo ciertos tipos de vidrios deben ser usados, y un limitado número de iones tienen las propiedades necesarias para participar en un intercambio.

Temperatura

El rango de temperatura sobre el cual un intercambio debe llevarse a cabo está entre los $200^{\circ}C$ y $550^{\circ}C$, pero es limitado por el punto de fusión de la sal usada y la sensibilidad a la

temperatura de los componentes involucrados. Típicamente los componentes del vidrio en las temperaturas cercanas a los 700°C tienen un punto en el que se hacen muy suaves, en la cual se deforman fácilmente hasta por su propio peso. Se ha encontrado que las temperaturas más adecuadas para realizar el intercambio iónico están alrededor de los 40° a los 60° C cerca del punto de fusión de la sal, esto para asegurar alta movilidad de los iones en la sal y evitar problemas asociados con las altas temperaturas. Se ha considerado que cuando se use nitratos (iones NO_3) para atacar químicamente la superficie del vidrio sea alrededor de 400°C (27).

III.2.2 Proceso de Fabricación

Existen muchas y diferentes maneras para fabricar guías de onda ópticas a partir de sales fundidas. La técnica que aquí se describe es el proceso que se empleó en este trabajo y es una configuración básica que puede ser usada para la fabricación de dispositivos ópticos. Por supuesto que la producción en masa en un ambiente industrial requiere de condiciones diferentes.

Afortunadamente, la mayoría del equipamiento necesario para trabajar el intercambio iónico es de bajo costo. Básicamente se necesita un horno capaz de elevar su temperatura para que haya movilidad de los iones (usualmente de 200° a 500° son suficientes y para el caso especial de este trabajo serán 375°C), sustratos de vidrio y sales. En otros términos, lo que se necesita se puede encontrar en el almacén de un laboratorio químico.

Puede utilizarse un horno vertical, una opción más adecuada sería usar un crisol para tener un acceso más fácil. Esto representa entonces un mejor control a la hora de insertar y remover el sustrato de la sal derretida, así como para introducir algún termómetro. Se requiere de un dispositivo sujetador para mantener suspendido al sustrato dentro de la sal fundida mientras el proceso de intercambio se lleva a cabo (fig. 3.6).

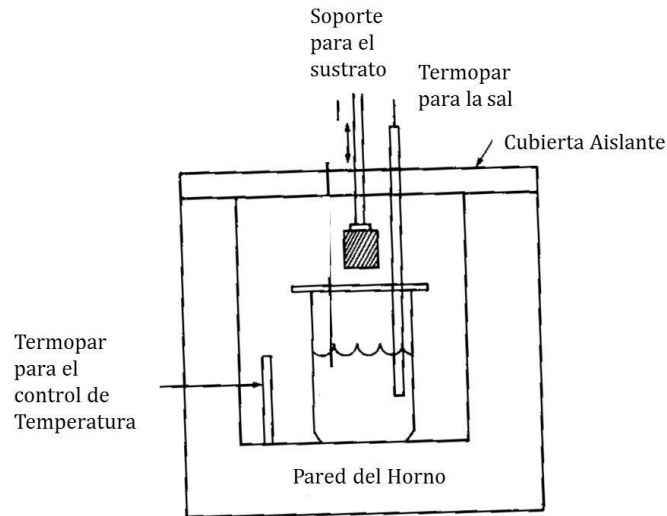


Figura 3.6. Sección transversal del horno vertical durante el proceso de intercambio.

La mayoría de los iones usados en el proceso de intercambio pueden ser obtenidos de sales fundidas. Nitratos de varias clases son ampliamente usados. Las sales deben ser de la mayor pureza posible. Estas son colocadas en un crisol, aunque en el caso de este trabajo se usó un vaso de precipitado para esta función, en su forma sólida sin mayor tratamiento. Cada sal tiene un punto de fusión, en el caso del Nitrato de Potasio (KNO_3) es a 334°C , una vez que se llega a este punto tenemos la sal completamente en estado líquido y es ahí donde se sumerge el dispositivo sujetador con el sustrato de vidrio, recordemos que el horno se controlará a 375°C , esto es por debajo de la temperatura de ebullición del nitrato que es a 400°C . Esta parte del proceso dura dependiendo del espesor deseado, nuestro intercambio tuvo una duración de 8hrs para lograr un espesor de $2.5[\mu\text{m}]$.

Al finalizar este tiempo, la manera de llevar afuera del horno el dispositivo tuvo que ser lenta para no tener un choque de temperatura, que haría que el dispositivo se estrellase. Una vez que el dispositivo estuvo a temperatura ambiente se retiró la película de aluminio sumergiendo el dispositivo en cloruro de hierro, una vez que el metal fue totalmente eliminado el dispositivo de guía de onda estaba listo para probarse.

Como resultado se tiene una guía de onda plana con espesor de $e = 2.5 [\mu\text{m}]$, recordemos que nuestra guía de onda no es completamente plana, sino que tiene una parte de gradiente, este gradiente tiene un ancho de $1[\text{mm}]$ por lo tanto asumiendo un cambio lineal en el eje x podemos obtener el perfil del espesor del gradiente (fig. 3.7).

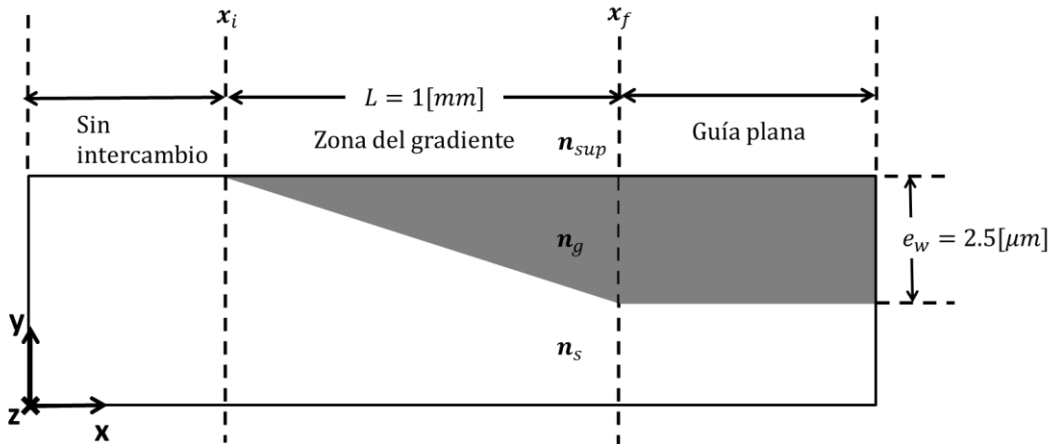


Figura 3.7. Vista frontal de la guía de onda.

Este cambio de espesor se traduce en un cambio de índice efectivo, este efecto es en el que se basa toda la investigación presentada. La sensibilidad de la medida de la deflexión del haz es primariamente dependiente del método de medición para discriminar ruido y la deflexión de la señal (8).

III.3 PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO

Una vez que se tuvo listo el dispositivo se realizaron las primeras pruebas para comprobar su funcionamiento.

Prueba de deflexión por gradiente de espesor

Lo que se pretende con esta prueba es verificar que el gradiente de espesor en la guía de onda provoca la deflexión del haz guiado. Para esto se fijó un sistema de referencia dentro del montaje experimental y se excitó la guía de onda con un haz laser de HeNe primero en la parte de la guía plana y se capturó una imagen del campo cercano (fig. 3.9(a)) con una cámara CCD a la cual llamaremos Plana I, después se movió el haz a un punto diferente dentro de la zona de la guía plana para capturar una nueva imagen que llamaremos Plana II (fig. 3.9 (b)), por último se hizo coincidir el haz laser con el gradiente de espesor y se capturó otra imagen (fig. 3.9 (c)) y esta se llamará Gradiente. El ancho de la imagen es de 640 *pixeles*, cada pixel equivale a 7.4 [μm] lo que da una ancho de 4736 [μm] para una imagen, esto aplica para cada imagen mostrada en lo sucesivo.

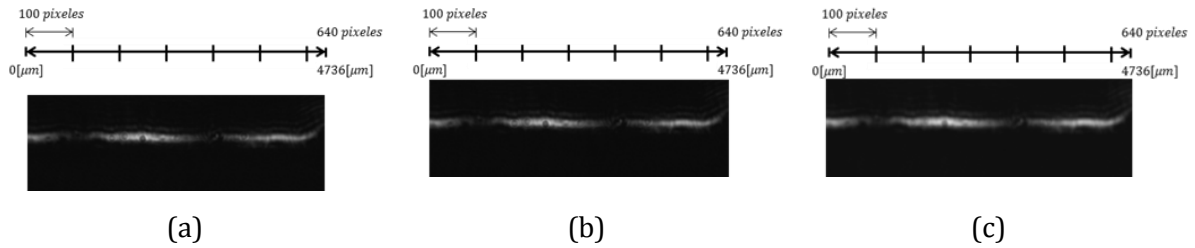


Figura 3.9. Imágenes de campo cercano: (a) Plana I, (b) Plana II y (c) Gradiente.

El sistema de referencia del montaje experimental se fija con la cámara CCD la cual no se mueve durante el experimento, por lo tanto si la prueba se realiza en la parte de la guía plana del dispositivo, el haz viaja de manera recta, es decir, en la misma coordenada x para todo el *eje* z , o sea que si el punto de entrada del haz es $(x, y, 0)$ y éste viaja sin deflectarse su punto de salida en la guía será (x, y, L) , este es el caso de las imágenes Plana I y Plana II, lo cual se muestra gráficamente en la figura 3.10 (a) y (b), respectivamente. Para el caso de la prueba en la zona del gradiente, si bien el haz entra en la coordenada $(x, y, 0)$ el haz a la salida se encuentra en el punto $(x + \Delta x, y, L)$, como se observa en la figura 3.10(c).

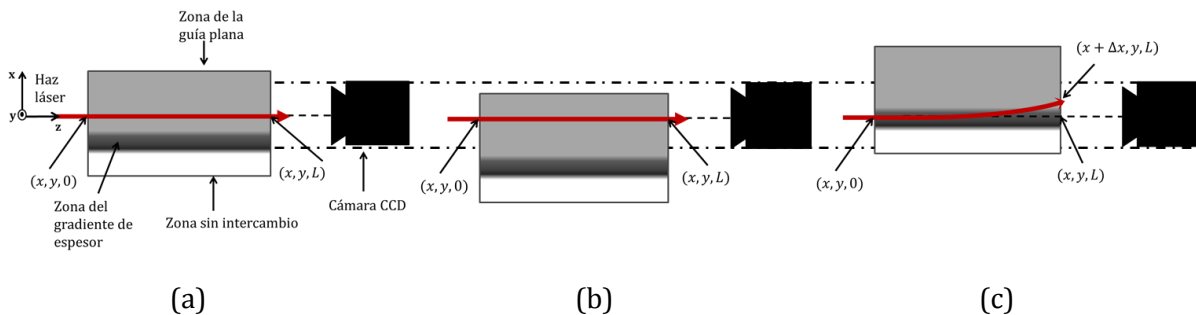


Figura 3.10. Esquema de la trayectoria del haz en la pruebas: (a) Plana I, (b) Plana II y (c) Gradiente.

En la figura 3.11 se muestran los perfiles de intensidad obtenidos de las imágenes de la fig. 3.9 y se verifica que los perfiles de intensidad de los haces que viajan a través de la guía plana, que son los dos que se superponen, marcados con línea continua y línea con guiones se ubican en las mismas coordenadas sobre el *eje* x y están prácticamente ocupando el mismo espacio, tienen casi la misma forma y aunque tenemos unas pequeñas variaciones no representan ningún cambio en general, esto demuestra que la trayectoria de los dos haces en la guía plana es en línea recta, ya que al final se ubican en el mismo punto dentro de nuestro sistema de referencia. El perfil de intensidad del haz que viaja por la zona del gradiente marcado con

línea punteada más clara, se ha desplazado hacia la derecha con respecto a los otros dos perfiles, esto señala una deflexión, pues como se mencionó anteriormente, el punto de entrada del haz fue el mismo para los tres casos con respecto al sistema de referencia, no así el punto de salida. A partir de este resultado se puede comprobar el funcionamiento del dispositivo como fue planteado en su diseño.

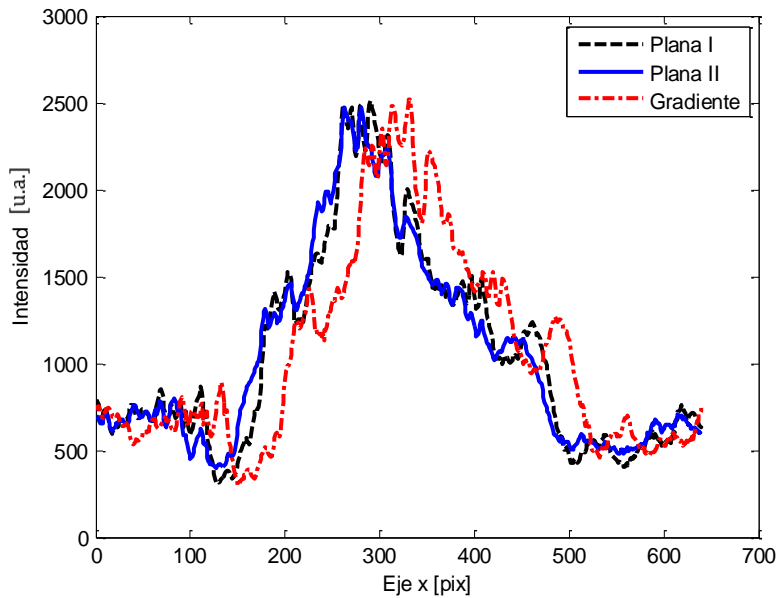


Figura 3.11. Esquema de la trayectoria del haz en la pruebas: (a) Plana I, (b) Plana II y (c) Gradiente.

Prueba cambiando el índice de refracción en el superestrato

Esta prueba, como la anterior, se realizó para mostrar que no existe deflexión del haz que viaja en la zona de la guía plana cuando existe un cambio en el índice de refracción del superestrato. El dispositivo basa su funcionamiento en el hecho de que el gradiente de espesor en el dispositivo provoca la deflexión del haz guiado, luego entonces si no hay gradiente en la guía de onda, no hay deflexión. Para realizar esta prueba se colocó agua en la superficie del dispositivo en la zona de la guía plana (fig.3.12).

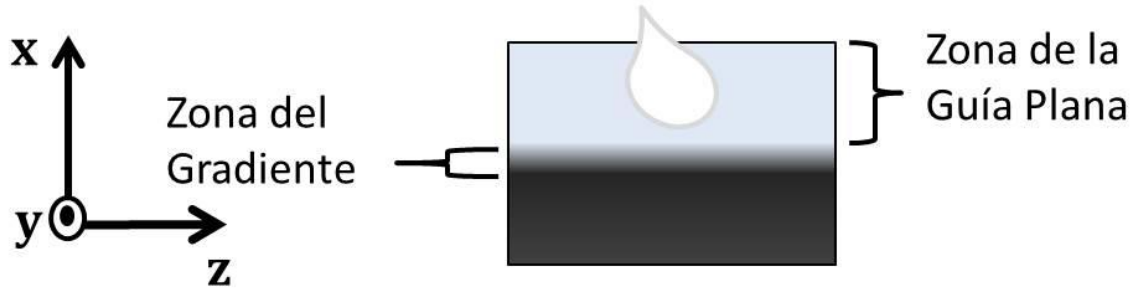


Figura 3.12 .Ubicación de la guía plana en la estructura.

La prueba realizada consistió en capturar una imagen de referencia (fig.3.13(a)) con el haz ubicado en la parte de la guía plana y teniendo al aire como superestrato, luego se coloca una gota de agua en la zona indicada en la figura 3.12 para modificar el índice de refracción del superestrato a $n_{sup} = 1.33$ en el dispositivo y luego capturar otra imagen (fig.3.13 (b)).

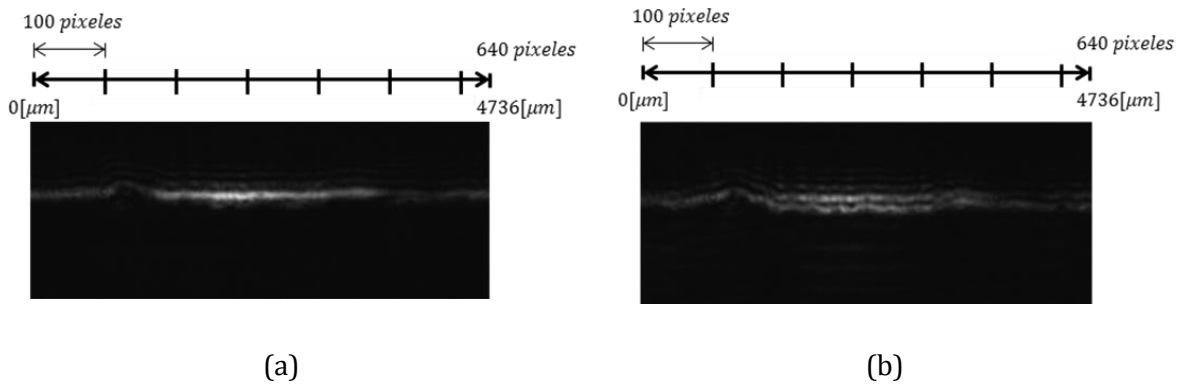


Figura 3.13. Imágenes del campo cercano en la parte de la estructura correspondiente a la guía plana; (a) con aire como superestrato $n_{sup} = 1$ y (b) con agua como superestrato $n_{sup} = 1.33$.

En la imagen de la figura 3.13 (a) se observa la luz confinada en la guía con una distribución determinada cuando el superestrato de la guía es aire, para la figura 3.13 (b) el superestrato ha cambiado a agua y como se observa la intensidad del área iluminada ha disminuido y aunque parece que se ha dividido de alguna manera se conserva la forma esto se observa de manera más clara en la figura 3.14 la cual muestra los perfiles de intensidad obtenidos a partir de las imágenes de la figura 3.13.

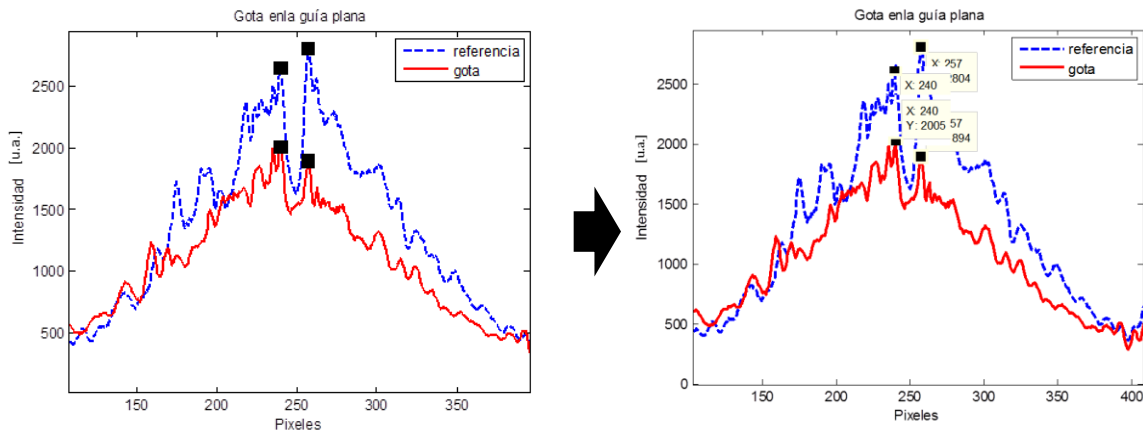


Figura 3.14. Perfiles de intensidad para la prueba en la guía plana, con indicadores de posición.

El perfil de intensidad del haz con aire como superestrato es el que se marca con la línea punteada y la línea continua marca el perfil de intensidad del haz cuando se tienen agua como superestrato (fig. 3.14 (a)), a simple vista se observa que la forma de la curva no cambia aunque si disminuye un poco su intensidad, esto es porque el total de la luz que viajaba por la guía se ha dividido y ahora cuando se coloca el agua como superestrato, una parte de la cantidad total de luz viaja por el agua. De cualquier manera se puede decir que no existe deflexión del haz y para esto se retoman los perfiles de intensidad obtenidos de las imágenes de esta prueba, en estos se ubican visualmente los lóbulos para determinar si existe desplazamiento. Se muestran indicadores para hacer notar ciertas secciones (fig. 3.14 (b)). Las etiquetas se han colocado en puntos donde se observa que la forma del perfil no ha variado mucho y se observa que aunque la intensidad cambia, la posición no. Cualitativamente, para resumir se puede decir que sin gradiente de espesor en la guía de onda no hay deflexión, pues al realizar la prueba de cambio de índice de refracción en el superestrato en la sección del dispositivo donde se encuentra la guía plana no hubo desplazamiento del perfil de intensidad del haz.

En los capítulos siguientes, se describen variantes de las pruebas que se describieron en este capítulo para modular la deflexión por dos efectos distintos, así como los detalles del montaje experimental.

CAPÍTULO IV. RESULTADOS EXPERIMENTALES: DEFLEXIÓN POR MODULACIÓN DE LA TEMPERATURA

El proceso experimental está dividido en dos partes, una es la deflexión por la modulación de la temperatura que implica un cambio en el índice de refracción de la guía de onda y la otra es la deflexión por la modulación del índice de refracción en el superestrato, la cual se describe en el capítulo siguiente. En este capítulo se presentan los análisis y los resultados experimentales de la modulación de la deflexión por temperatura.

IV.1 MONTAJE EXPERIMENTAL

Como se mencionó en los capítulos anteriores en la óptica se necesita de diversos elementos adicionales al dispositivo en óptica integrada que permiten acondicionar la señal de entrada y otros que permiten observar el resultado. El caso de estudio analizado en este trabajo no es una excepción y para la excitación de la guía de onda y analizar los resultados se requirió el uso de distintos elementos ópticos, mecánicos y electrónicos.

La siguiente imagen (Fig. 4.1) muestra un diagrama del montaje experimental utilizado.

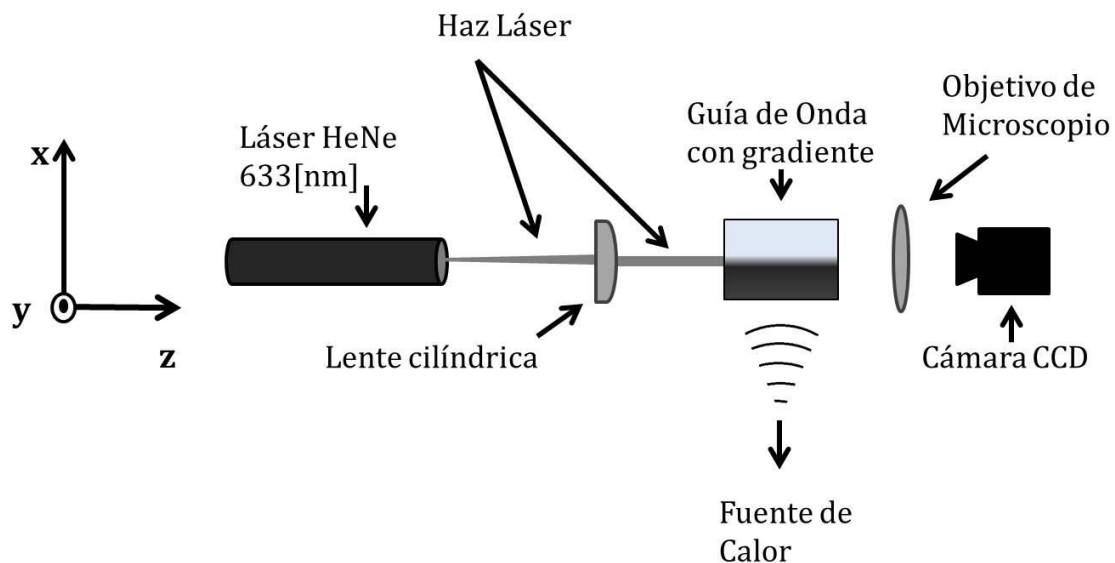


Figura 4.1 Diagrama del montaje experimental, vista superior.

El sistema consiste en un láser HeNe, el haz láser se hace pasar por un lente cilíndrica que enfoca el haz en una sola dimensión (y), el haz colimado se confina en la guía de onda que se está calentando para que se deflece, y para recuperar el haz se utiliza un objetivo de microscopio que amplifica la imagen del haz deflecionado y se proyecta en una cámara CCD, dichas imágenes serán vistas y analizadas en una computadora.

Láser HeNe

El láser que se utilizó (fig. 4.2) fue uno de la marca Melles Griot a 632.8 [nm] de longitud de onda (λ), con las siguientes características (Tabla 4.1):

Potencia de salida	Clase	Diámetro del haz ($\pm 3\%$) [mm]	Divergencia del haz ($\pm 3\%$) [mrad]
15[mW]	IIIb	1.02	0.79

Tabla 4.1. Especificaciones del láser



Figura 4.2 Laser HeNe Melles Griot

Lente Cilíndrica

Las lentes cilíndricas tienen una superficie plana y otra cilíndrica (fig. 4.3). Ellas pueden tener longitudes focales positivas o negativas y son típicamente usadas para enfocar la luz y convertirla en una línea.

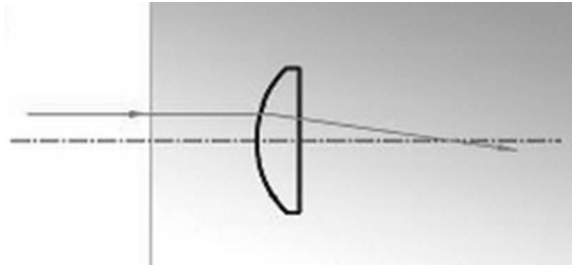


Figura 4.3. Lente cilíndrica

Ésta enfoca la luz en una sola dimensión. Su forma física es similar a una porción de cilindro. Las lentes cilíndricas pueden transformar un punto de luz en la imagen de una línea, la cual es útil para generar una línea láser (fig. 4.4). Las lentes que magnifican en una sola dirección pueden ser usadas para comprimir imágenes, pueden ser usadas para enfocar luz dentro de un pequeño plano o bien para hacer que la luz converja en una línea de un detector.

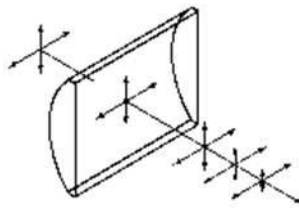


Figura 4.4. Lente cilíndrica

Se usa esta lente cilíndrica porque se necesita un haz delgado que para que entre en la parte de la guía de onda únicamente, sin radiar demasiada luz en el sustrato, las especificaciones de la lente usada se muestran en la Tabla 4.2.

Modelo	Longitud focal(mm)	Largo (mm)	Ancho (mm)	Radio (mm)	Espesor central (mm)	Espesor en los bordes (mm)
LJ1212L2-A	30.0	40.0	20.0	15.5	5.7	2.0

Tabla 4.2 Especificaciones de la lente cilíndrica

Cámara CCD

Cámara Sony modelo XCD-V50 (fig. 4.5), es una video cámara de uso industrial que utiliza el IEEE 1394-2002 *Digital Interface*. Toma imágenes de 640x480 pixeles, lo cual resulta en un total aproximado de 300,000 pixeles, donde cada celda unitaria (pixel) es de 7.4 [μm] x7.4 [μm].



Figura 4.5. Cámara CCD Sony XCD-V50

Termómetro

Para medir la temperatura se utilizó un multímetro Fluke 189 (fig. 4.6). El Fluke 189 tiene un rango de operación es de los -200 °C a 1350 °C (-328 °F a 2462 °F).

El termómetro del multímetro FLUKE 189 utiliza una sonda termopar tipo K, lo que quiere decir que es de Cromel (aleación de Ni-Cr) / Alumel (aleación de Ni -Al). Un termopar es un transductor formado por la unión de dos metales distintos que produce un voltaje, que es función de la diferencia de temperatura entre uno de los extremos denominado "punto caliente" o unión caliente o de medida y el otro denominado "punto frío" o unión fría o de referencia. Posee buena resistencia a la oxidación, es para aplicaciones de uso general y su rango de medida: -40 a 260°C.



(a)



(b)

Figura 4.6. Instrumentos para medir la temperatura: (a)Multímetro ; (b)Termopar

Descripción del arreglo experimental

Todos los elementos descritos en la figura 4.1 se colocaron en platinas micrométricas para su desplazamiento en las tres dimensiones (x, y, z). Para excitar la guía de onda se necesitaba que el haz láser se alineara con el sustrato justamente en la parte superior de este, que corresponde a la ubicación de la guía de onda, por supuesto que el spot era mucho más grande que el espacio de la guía, para esto se utilizó la lente cilíndrica que se ubicó a su distancia focal con respecto a la guía, la lente confina el haz en el *eje y* y entonces el haz se alinea con ayuda de las platinas de posicionamiento para que entre en la guía a la cual se le elevará la temperatura, comúnmente las técnicas fototérmicas se basan en la inducción de calor en un material [28] como se hace en esta ocasión. Como fuente de calor se utilizó un arreglo con un cautín que calienta una placa de aluminio que está en contacto con el dispositivo en la parte donde se encontraba la guía de onda de manera que transmitiera este calor al dispositivo y así elevar su temperatura (fig. 4.7).

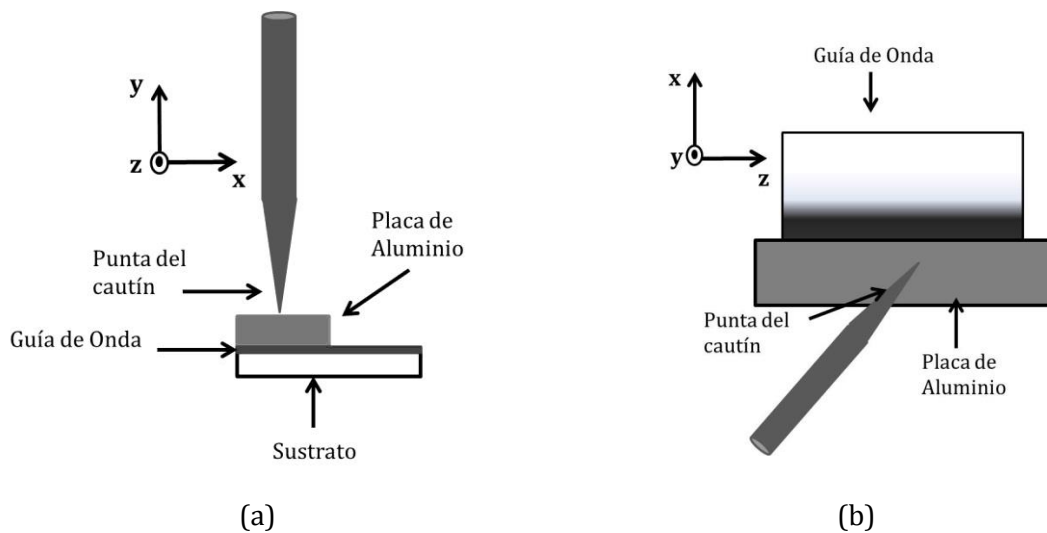


Figura 4.7. Esquema del arreglo de la fuente de calor: (a) vista frontal y (b) vista superior.

Ya que el haz está alineado con la guía de onda, la luz se confina en ella y viaja hasta la salida de la guía de onda se ubicaba un objetivo de microscopio de 40x para magnificar la imagen de campo cercano del haz que sale de la guía de onda.

Se capturaron imágenes del campo cercano con la cámara CCD en las que se observa la salida de la guía de onda. Estas imágenes fueron capturadas con un programa en LabVIEW© especialmente diseñado para este propósito, el cual capturó una imagen cada 30[s] durante el

calentamiento (APÉNDICE A), además también se realizó un programa en Matlab para extraer de las imágenes los perfiles de intensidad del haz a la salida de la guía.

Las fotografías que se capturan, como ya se mencionó, son del campo cercano (fig. 4.8) que es la imagen que se forma a la salida del dispositivo.

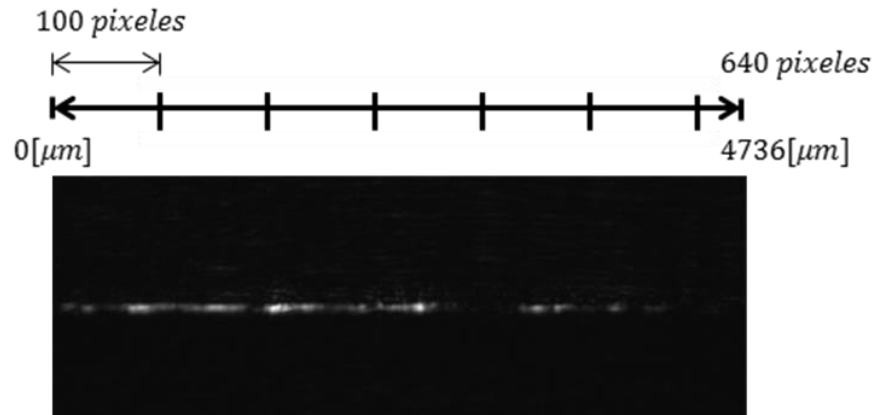


Figura 4.8. Fotografía/Imagen del campo cercano a la salida del dispositivo sensor.

Todas las imágenes de campo cercano que se obtienen conservan la misma orientación y se conforman de las mismas partes (fig. 4.9). En las imágenes que se capturaron se podrá observar la parte de la guía de onda, que es la parte más iluminada; el sustrato se ubica en la parte superior de la imagen, en el que se observan pequeñas líneas en menor intensidad y en la parte inferior está el aire; esto es porque las imágenes están invertidas debido al uso del objetivo de microscopio a la salida de la guía de onda.

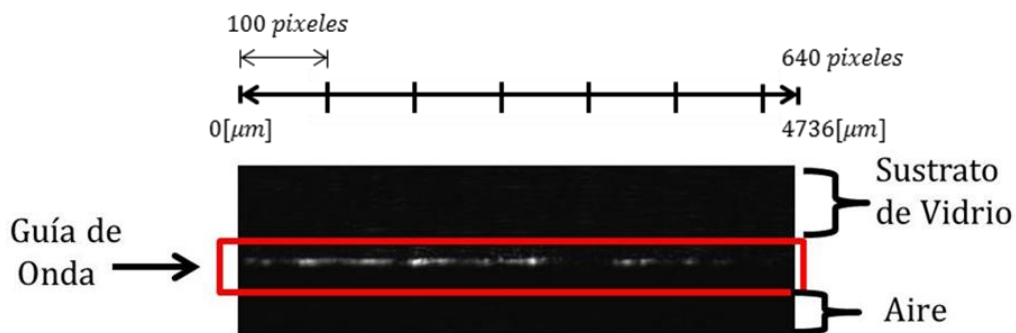


Figura 4.9 Explicación de la fotografía del campo cercano, partes que la conforman.

IV.2 REALIZACIÓN DE LA PRUEBA

Una vez que el montaje experimental está listo la prueba se inicia cuando se enciende la fuente de calor, en ese momento ($t = 0$) comenzó el registro de la temperatura y se capturó una imagen. Para las pruebas de este capítulo el superestrato fue aire.

Como se explicó anteriormente a partir de $t = 0$ se tomaron imágenes cada 30[s] durante una hora y simultáneamente se registró la temperatura, esto para tener información de cómo aumenta la temperatura conforme avanza el tiempo y cómo se comporta el haz guiado en el dispositivo.

Para medir la temperatura, el termopar se colocó en contacto con el área del gradiente en la guía de onda. El registro de la temperatura se hizo con la interfaz a la computadora del multímetro Fluke. En la figura 4.10 se muestra el registro de la temperatura en el dispositivo:

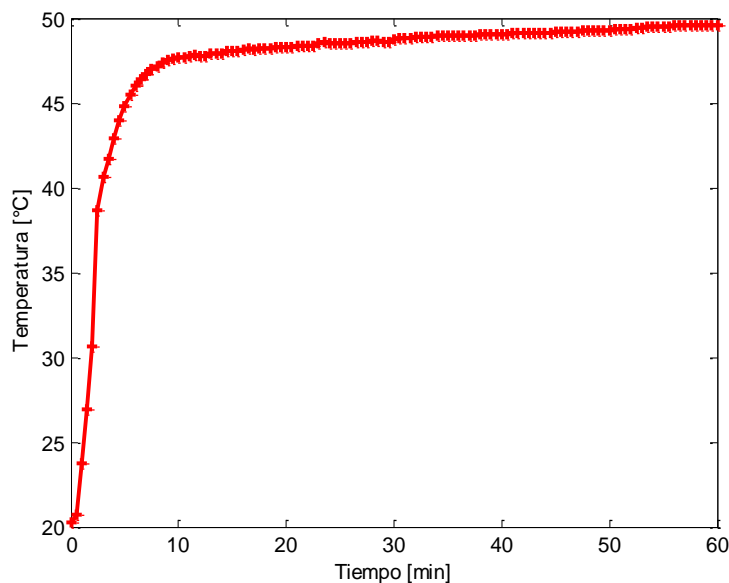


Figura 4.10. Gráfica de la temperatura como función del tiempo en la zona del gradiente del dispositivo sensor.

Se observa que el cambio de temperatura más representativo se lleva a cabo de $t = 0[\text{min}]$ a $t = 12[\text{min}]$. En la figura 4.11 se muestran algunas imágenes de las que se capturaron durante los 60 minutos de la prueba.

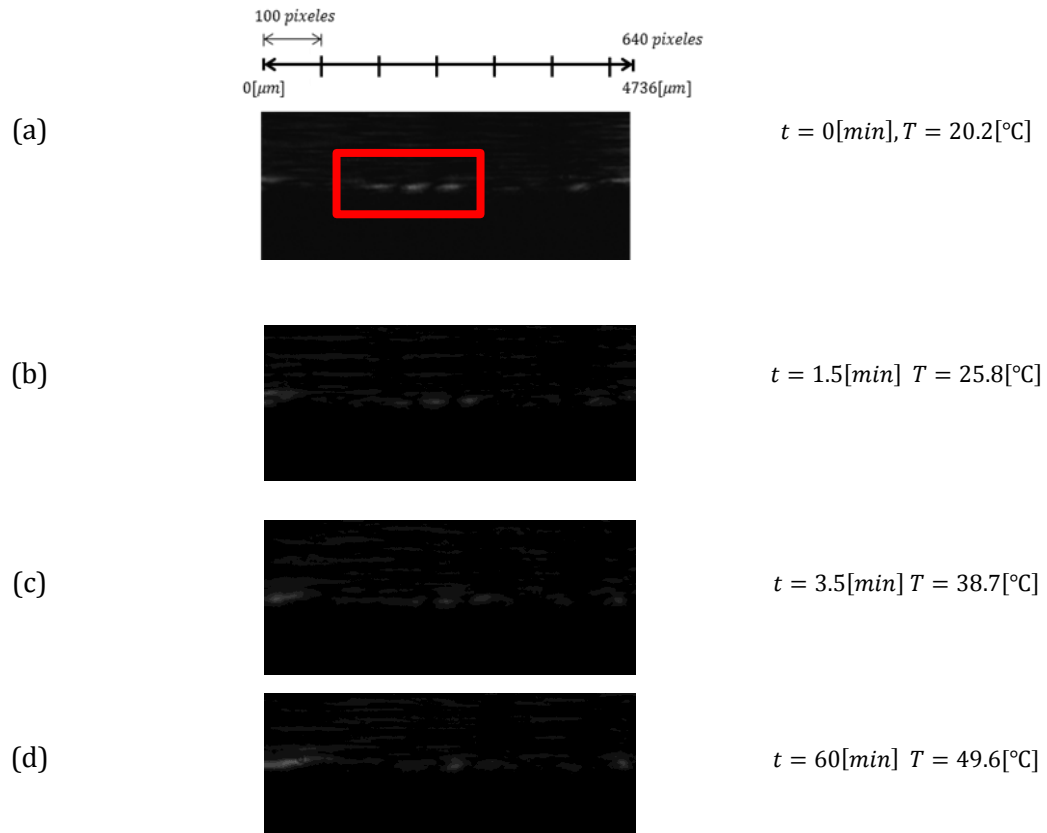


Figura 4.11. Imágenes capturadas a distintos tiempos t en el proceso de aumento de temperatura (T)

En las fotografías se observa que la forma y la intensidad de la zona iluminada varía. Dentro de la zona de la guía de onda de la figura 4.11 (a) lo que se observa en el recuadro es nuestra zona modal ya que como se puede observar hay tres spots iluminados, más representativos, que son los modos de la guía de onda, si se observa la siguiente imagen (fig. 4.11 (b)) vemos que esta zona modal se ha desplazado hacia la derecha que es la parte más fría del dispositivo y donde se tiene el mayor índice de refracción, también se puede ver que además de cambiar su posición, la intensidad de iluminación de los spots también varía pues en la fig. 4.11(a) se ve que los spots son más iluminados y definidos, iluminación y definición que se pierde con el tiempo. A consecuencia del aumento de temperatura, el índice de refracción de la guía de onda se eleva y por lo tanto la zona modal se sigue desplazando (fig. 4.11 (c) y (d)).

IV.3 RESULTADOS ESPERADOS

Estos cálculos se realizan partiendo del hecho de que un cambio de temperatura en el dispositivo supone un cambio de índice de refracción en el mismo, por lo tanto al aumentar la temperatura de la guía de onda se cambia también su índice de refracción con lo que se espera obtener una modulación de la deflexión como función del cambio de temperatura. Este proceso puede ser utilizado para detectar procesos biológicos exotérmicos.

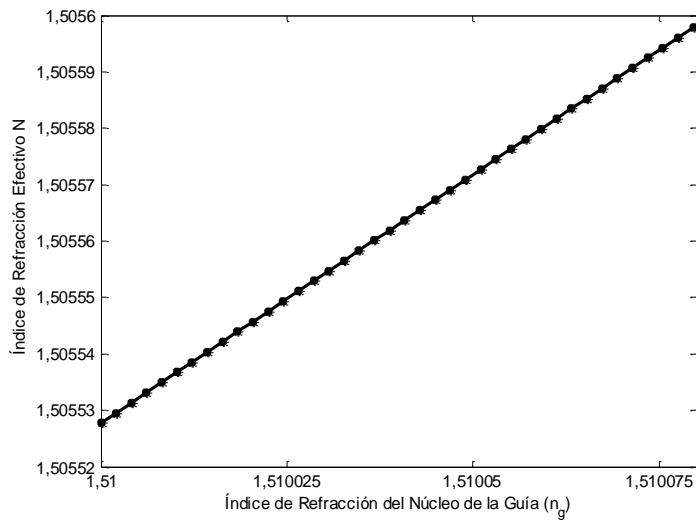
Simulación en Slab

Se usó el programa llamado SLAB que resuelve la ecuación de dispersión, que es la propagación en una guía de onda, el programa entrega como resultado la simulación del comportamiento de la guía de onda plana simulada, de aquí se obtiene información tal como el índice de refracción efectivo o la intensidad de campo eléctrico y magnético.

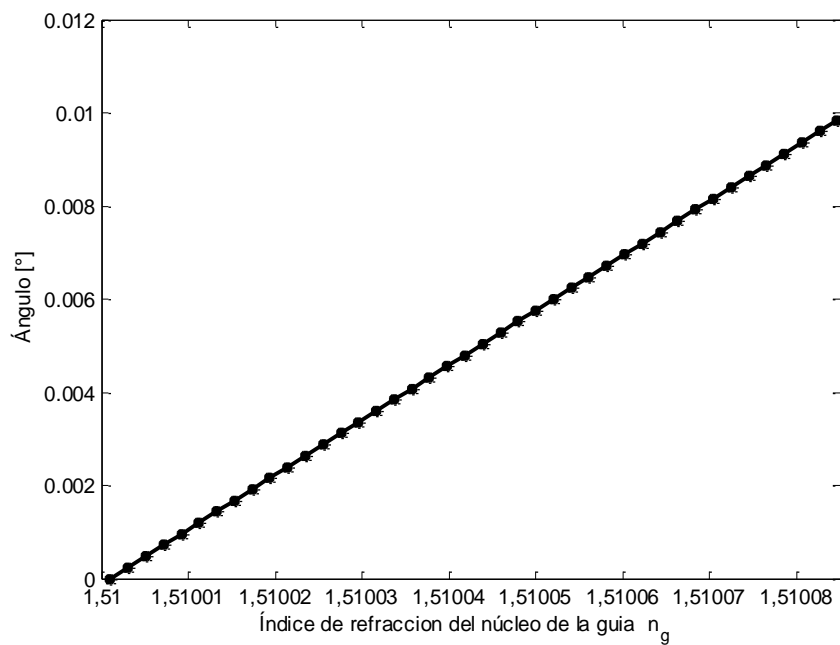
Se simula entonces una guía de onda plana con variación el índice de refracción del núcleo para obtener el comportamiento del índice de refracción efectivo. Para la simulación el índice de refracción de la guía irá de $n_g = 1.51$ a $n_g = 1.5101$, que es un cambio de índice de 1×10^{-3} el cual en la práctica se logrará al elevar la temperatura del dispositivo y aunque parece un número pequeño, tratándose de índices de refracción es un cambio significativo.

Para esta simulación se usó $\lambda = 638 [nm]$ que es la longitud de onda del láser utilizado, $n_s = 1.5$, un espesor de $e_w = 2.5[\mu m]$ en el cual se propaga únicamente el modo fundamental y una variación de 1.51 a 1.5101 para n_g , dado que se supone una temperatura inicial de $25[^\circ C]$ y una final de $50[^\circ C]$, de esta manera se tiene un aumento de la temperatura de $25[^\circ C]$, por lo tanto, como se dijo en el capítulo anterior, se tiene un índice de refracción en la guía de $n_g = 1.5101$, porque para el vidrio se ha reportado un coeficiente termo-óptico de $\frac{\partial n}{\partial T} = 2.06 \times 10^{-6} \left[\frac{1}{^\circ C} \right]$ (13).

Los resultados se observan en la figura 4.12 que se muestra a continuación.



(a)



(b)

Figura 4.12. Simulación variando el índice de refracción por cambio de Temperatura (a) Índice efectivo del modo fundamental y (b) Ángulo de deflexión

En la figura 4.12 (a) se observa cómo cambia el índice efectivo en función del índice de refracción del núcleo de la guía de onda (n_g), estos son los resultados de la simulación obtenidos con el programa SLAB que resuelve la ecuación de dispersión (2.12). Se puede ver

que conforme aumenta n_g , el índice efectivo también lo hace, prácticamente de manera lineal, pero nunca llega el valor del máximo de índice de refracción que toma la guía.

En la figura 4.12 (b) se observa el ángulo de deflexión que corresponde a los cambios de índice de refracción en la guía según el índice de refracción efectivo obtenido de la simulación, estos resultados fueron obtenidos al evaluar de manera numérica la ecuación (2.53).

IV.4 RESULTADOS EXPERIMENTALES

Se comienza a partir del registro de la temperatura en el dispositivo (Fig. 4.10). Del archivo numérico se extrae que la temperatura inicial fue $T_{inicial} = 20.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ y la temperatura final $T_{final} = 49.1\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Para determinar el incremento de temperatura se hace $\Delta T = T_{final} - T_{inicial}$ y se obtiene un $\Delta T = 28.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ para hacer en $t = 0 \rightarrow \Delta T = 0$.

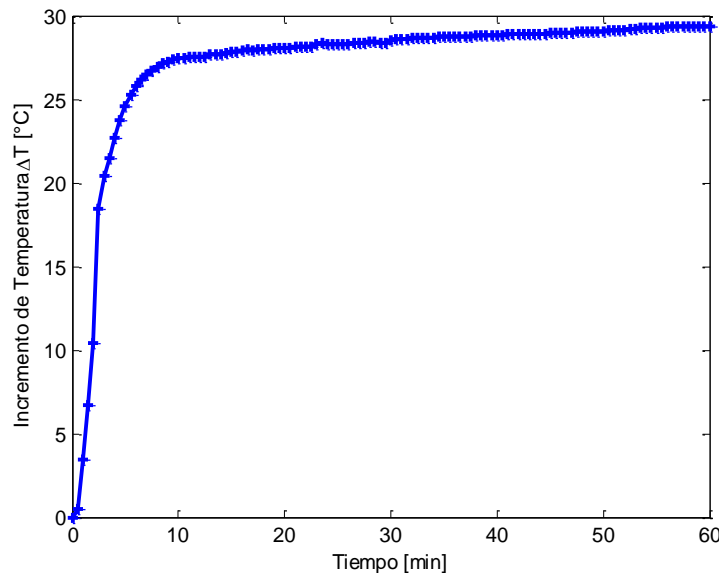


Figura 4.13. Incremento de Temperatura, ΔT en la zona del gradiente del dispositivo.

Para recordar, el coeficiente termo-óptico del vidrio [9] es de $\frac{\partial n}{\partial t} = 2.06 \times 10^{-6} \left[\frac{1}{^{\circ}\text{C}} \right]$, de esta manera se sabe cómo va cambiando el índice de refracción a medida que la temperatura

va subiendo. Así que para $t = 0 \rightarrow \Delta n = 0$ y para cuando aumenta el primer grado de temperatura se tiene un $\Delta n = 2.06 \times 10^{-6}$, y así sucesivamente. La figura 4.14 muestra cómo se incrementa el índice de refracción del núcleo de la guía con el tiempo, como se dijo anteriormente, este incremento de índice está dado por el incremento de la temperatura en la guía de onda.

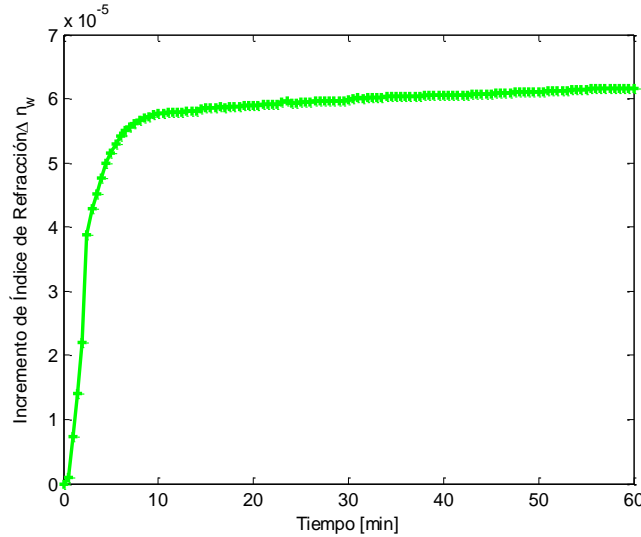


Figura 4.14. Incremento del índice de refracción, Δn_g por efecto de la temperatura.

Para los resultados experimentales se obtiene los perfiles de las imágenes capturadas cada 30 segundos las cuales se colocan en una secuencia de tiempo y como resultado se muestra la imagen de la figura 4.15:

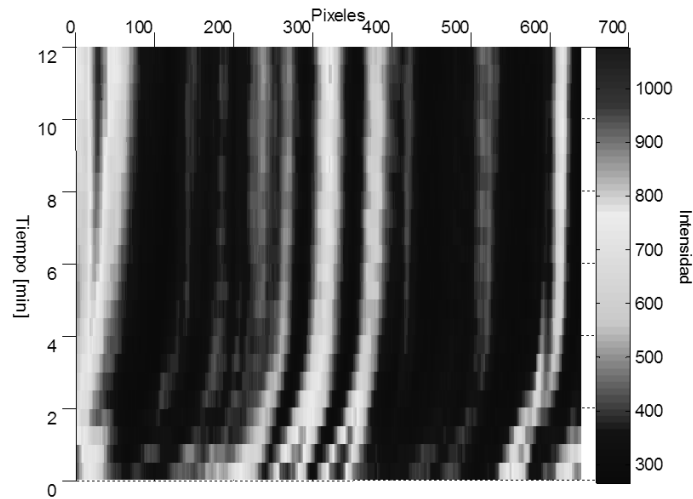


Figura 4.15. Perfiles de intensidad para la prueba de temperatura, en $z=L$.

Lo que se ve como las zonas más claras son los puntos máximos del perfil y a través de estos se puede distinguir la trayectoria que forma el haz a través del tiempo, la deflexión más notoria ocurre en los primeros 5 minutos y como se observa, sólo se muestran los perfiles hasta el minuto 12, esto es porque de la figura 4.10 se sabe que el cambio significativo de temperatura ocurre dentro de este lapso de tiempo, de los minutos 10 a 60 la trayectoria presenta la misma tendencia (casi recta) y en ese tiempo la temperatura aumento sólo 2°C , de $T = 47.7[^{\circ}\text{C}]$ en $t = 10[\text{min}]$ a $T = 49.6[^{\circ}\text{C}]$ en $t = 60[\text{min}]$.

En la figura 4.16 se muestran los perfiles de intensidad de la imagen de la figura 4.11 (a) y de la imagen capturada para el minuto 12, que son los perfiles para $t = 0[\text{min}]$ y $t = 12[\text{min}]$, con $T = 20.2[^{\circ}\text{C}]$ y $T = 47.8[^{\circ}\text{C}]$, respectivamente. Los perfiles mostrados se ubican sobre el eje x donde se encuentra la guía de onda gradiente y en $z = L$, donde $L = 24[\text{mm}]$. Para la comparación se utiliza el perfil de intensidad del haz en el tiempo $t = 0[\text{min}]$ que es el del inicio de la prueba y esto se ve en la gráfica marcado con la línea continua, se usa este perfil como referencia ya que en ese momento todavía no hay ningún cambio y se compara con el perfil de intensidad a $t = 12[\text{min}]$ porque en este tiempo ya se dio el mayor aumento de temperatura y a partir de este tiempo la temperatura se mantiene prácticamente estable y por lo tanto en este punto se observa la máxima deflexión, este perfil de intensidad es el denotado en la gráfica como final y está marcado con la línea punteada.

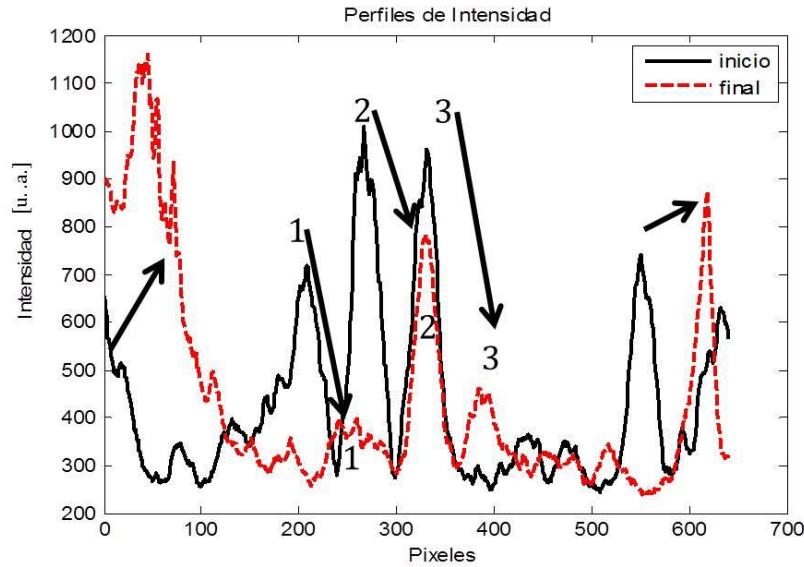


Figura 4.16. Perfiles de intensidad para las imágenes de campo cercano en $t = 0$ y $t = 60[\text{min}]$.

De la Fig. 4.16 se observa que en efecto existe un desplazamiento en la forma de la curva y un pequeño cambio en intensidad, los lóbulos se han mantenido en número, pues aún se pueden identificar, aunque su intensidad ha cambiado un poco aun así se puede ver que se han desplazado. La serie de números que se ven en esta figura se han colocado para hacer notorio el desplazamiento que se ha descrito. Estos números marcan cada uno de los lóbulos para identificarlos y así ver como se han desplazado. Esta ubicación y colocación de los números indicadores fue posible a pesar del cambio en la forma de onda gracias a que este proceso se llevó a cabo de manera paulatina y se tuvo la oportunidad de observar con ayuda de los programas en LabVIEW® y MATLAB® diseñados para este propósito, como el perfil de intensidad se iba desplazando conforme avanzaba el tiempo y aumentaba la temperatura.

El cambio de intensidad en los lóbulos de los perfiles que se muestran en la figura anterior (fig. 4.16) se debe a que cuando se excita la guía de onda el haz se acopla de una cierta forma a los modos del dispositivo y al cambiar el haz su dirección de propagación la manera en la que se acopla cambia, excita a otros modos de la estructura y por lo tanto su intensidad cambia dado que cambia su acoplamiento modal. Para extraer la trayectoria del haz de la gráfica de la imagen 4.15 se ubican las coordenadas de los puntos máximos que son los que representan como los lóbulos se fueron moviendo en el tiempo y se colocaron en un nuevo gráfico (fig. 4.17), ésta es la vista superior de los perfiles y se observa cómo forma la trayectoria que sigue el haz, por lo tanto se puede obtener experimentalmente el ángulo de deflexión.

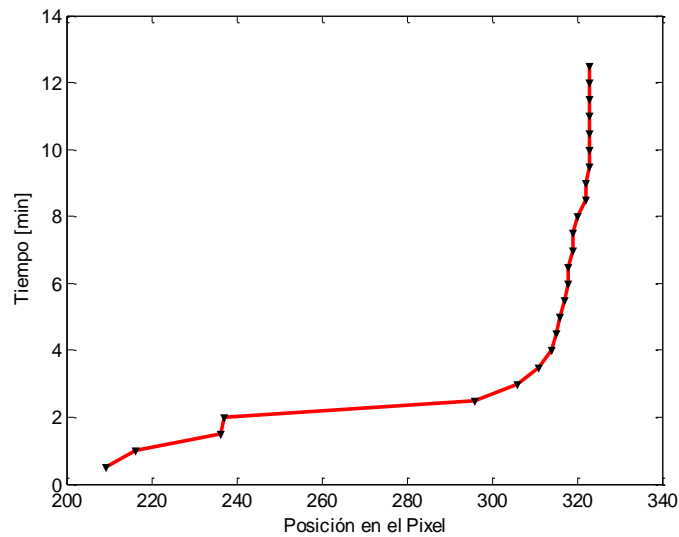


Figura 4.17. Trayectoria del haz en el cambio de temperatura/tiempo.

Analizando de esta manera los resultados se puede determinar la trayectoria deflectada que muestra el camino que sigue el haz, se sabe que conforme el tiempo avanza y la temperatura aumenta tenemos también un aumento en el índice de refracción del núcleo que a su vez cambia el índice de refracción efectivo y provoca la deflexión del haz, como se ha descrito anteriormente. Para completar el procedimiento y determinar el ángulo de deflexión del haz, se sabe que un pixel de la cámara CCD es de $7.4[\mu m]$, por lo tanto es posible presentar los desplazamientos en distancia.

En la figura 4.18 se presenta la trayectoria del haz (fig. 4.17) esta vez en distancia y como función de la temperatura, esto porque la variable que se midió y la cual se controló es la temperatura, la línea punteada es una curva que representa con cambios más sutiles la trayectoria del haz.

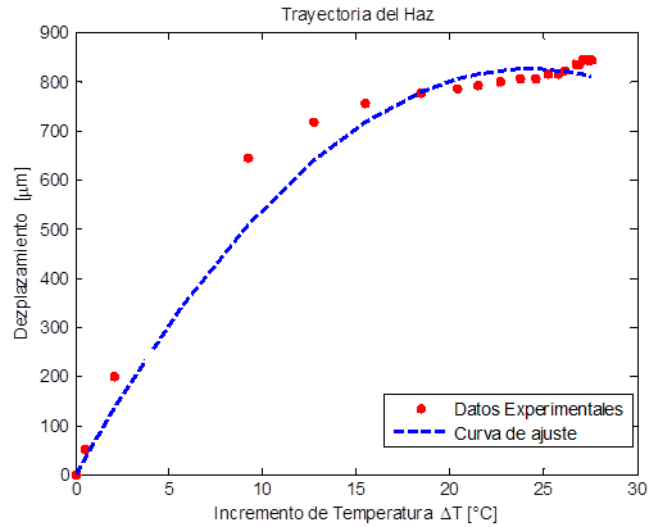


Figura 4.18. Desplazamiento del haz en función del cambio en la temperatura y su ajuste a un modelo de 2 orden.

Se conocen las distancias a las cuales se colocaron los elementos del arreglo experimental y se conocen también los puntos de la trayectoria sobre el *eje x* que siguió el haz conforme aumentaba la temperatura, los cuales se mostraron en la figura 4.18 ya en micrómetros, por lo tanto es posible determinar el ángulo de deflexión para cada temperatura por medio de trigonometría. Este ángulo experimental que se calcula será posible compararlo con el ángulo teórico que se calculó a partir del índice efectivo obtenido de la simulación con los valores de índice de refracción del núcleo correspondientes a la temperatura; el ángulo teórico resulta en función del índice de refracción del núcleo de la guía de onda n_g , porque es así como lo requiere la ecuación (2.12). El ángulo de deflexión que se obtiene experimentalmente está en función de la temperatura porque de la prueba se obtiene el dato de un punto en la trayectoria para cada temperatura, por esta razón será necesario asociar el índice de refracción en el núcleo de la guía de onda n_g de la figura 4.12 con el coeficiente termo-óptico del vidrio para así mostrar el ángulo de deflexión obtenido teóricamente en función de la temperatura.

En la figura 4.19 se muestra el ángulo teórico ya en función de la temperatura y el ángulo determinado experimentalmente. Los puntos indican el ángulo calculado experimentalmente y la línea punteada es la envolvente que los une. Se observa que un punto queda fuera, el cual podríamos descartar ya que tiene casi el mismo valor que el anterior y de allí aumenta rápidamente, la línea continua corresponde al ángulo calculado teóricamente. Detallando, se

observa que cuando la temperatura aumenta de 5°C a 10°C se observa un cambio muy fuerte en el ángulo, si vemos en la figura 4.13 éste aumento de temperatura ocurrió muy rápido y debido a que las temperaturas se tomaron cada 0.5 [min] no se tiene registro de mediciones que pudieran hacer más gradual este cambio lo que se traduciría en más valores para el ángulo en ese rango.

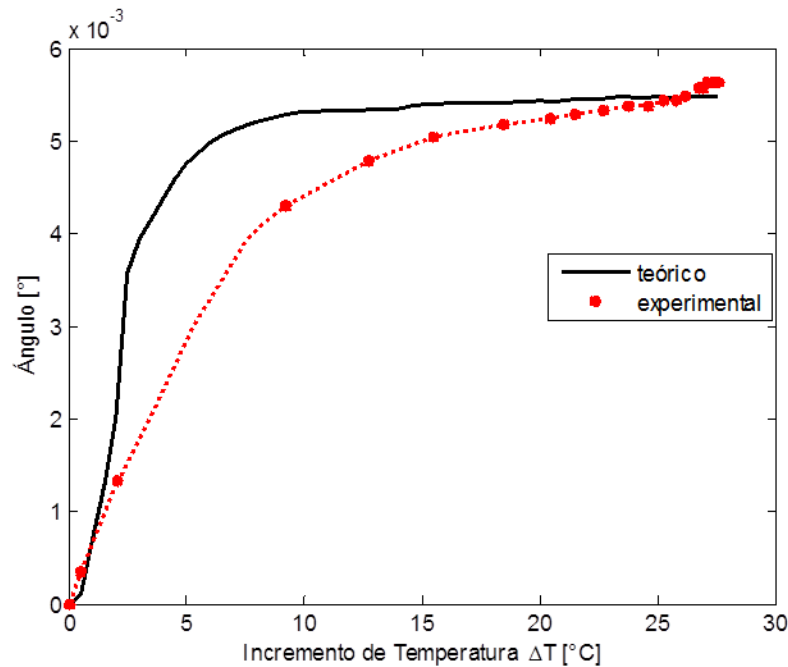


Figura 4.19. Desplazamiento del haz en función del cambio en índice de refracción.

Se observa que el comportamiento del ángulo experimental y el ángulo teórico tienen una forma de onda similar aunque no tengan una coincidencia exacta en los valores, este es proceso experimental por lo cual no se tienen resultados ideales o que se ajusten perfectamente, sin embargo ambas aumentan de una manera muy parecida y convergen hacia los mismos valores. Estas diferencias se pueden atribuir a que la temperatura que se registró fue al exterior del dispositivo y existe la posibilidad que en el interior del vidrio la temperatura fuese mayor.

Con esto se puede ver que es posible lograr una deflexión a partir de un cambio de índice de refracción en la guía, en este caso el cambio de índice es debido a un aumento en la temperatura. Aunque las curvas teórica y práctica no parecen coincidir totalmente, los resultados esperados y los experimentales, numéricamente hablando, no son tan dispares. Al

tener estos resultados se creó una expectativa de lo que se habría de obtener como resultado en la prueba experimental lo cual permitió tener un parámetro de comparación para calificar los resultados.

Al realizar esta prueba y con el análisis de los resultados se encuentra una aplicación de este dispositivo para monitorear cambios de temperatura en procesos celulares, es decir, se puede colocar un cultivo de células en la superficie del dispositivo y capturar una imagen de campo cercano para obtener el perfil, pasado algún tiempo se capturaría una nueva imagen y se obtendría un perfil, los perfiles se compararían y si se encuentra un desplazamiento en ellos se estaría hablando de un cambio en la temperatura y por lo tanto de procesos exotérmicos, es decir células que liberan calor y por lo tanto aumenta su temperatura la cual influirá para cambiar el índice de refracción efectivo y como resultado se tiene un haz deflectado.

CAPÍTULO V. RESULTADOS EXPERIMENTALES: MODULACIÓN DE LA DEFLEXIÓN POR CAMBIO DE ÍNDICE DE REFRACCIÓN EN EL SUPERESTRATO

En esta sección se describe el proceso experimental de modulación de la deflexión cambiando el índice de refracción del superestrato.

V.1 MONTAJE EXPERIMENTAL

En esta versión del experimento los elementos del montaje y las funciones de sus partes son prácticamente igual a las del experimento anterior, la diferencia es que en esta ocasión en lugar de cambiar el índice de refracción efectivo en la guía de onda elevando su temperatura con la fuente de calor, el índice de refracción variará por una sustancia con índice de refracción conocido que se colocará a manera de superestrato en la parte superior de la guía.

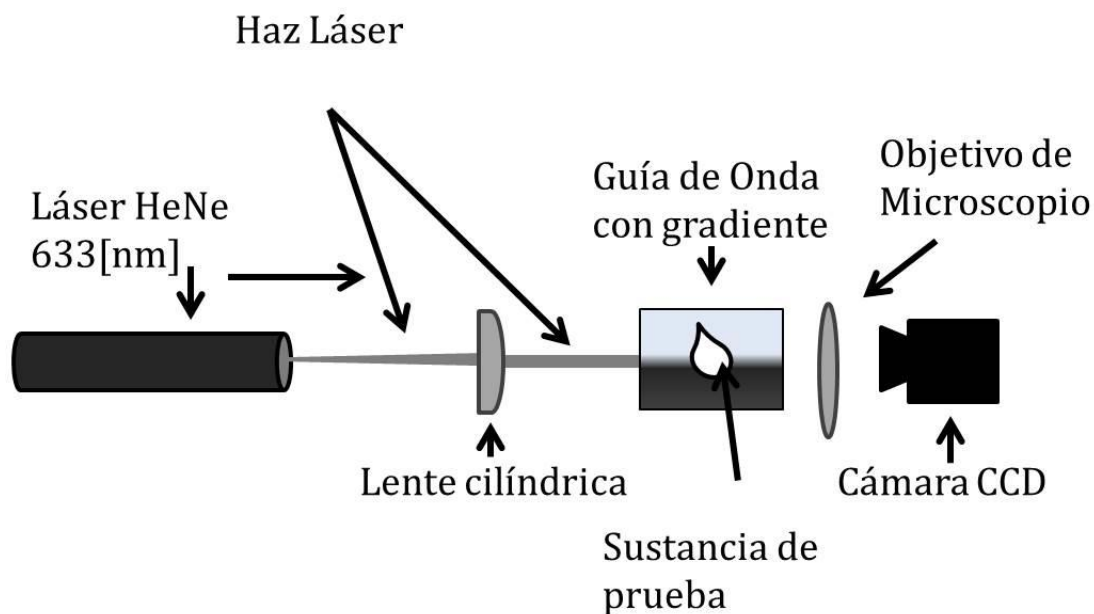


Figura 5.1 Diagrama del montaje experimental

En el experimento realizado en el capítulo anterior se tenía aire como superestrato, en esta ocasión se colocaron sustancias de distintos índices de refracción en la superficie de la guía (Fig.5.2) a manera de tener un superestrato distinto al aire, el cual se cambió para variar el índice de refracción en la superficie de la guía de onda, colocando diversas sustancias de diferentes índices de refracción. Los diferentes índices de refracción en el superestrato provocaron un cambio en el índice de refracción efectivo, lo que a su vez llevó a distintas deflexiones en la trayectoria del haz.

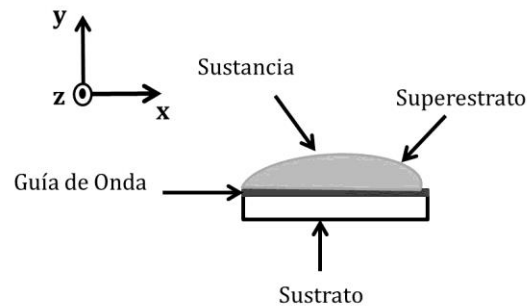


Figura 5.2. Esquema del dispositivo para variar el índice de refracción del superestrato. Vista lateral del dispositivo.

Descripción del arreglo experimental

El arreglo experimental es básicamente el mismo que en la prueba anterior, a excepción de que en esta prueba no hacen falta los elementos que servían para suministrar calor. Ya que se tiene el sistema alineado la prueba consistió en colocar una gota de solución preparada con cloruro de potasio (KCl) en la parte superior de la guía de onda donde se ubica el gradiente y obtener una imagen de campo cercano, de igual manera se colocó el objetivo de microscopio para ampliar la imagen.

Como en el caso anterior, se capturaron las imágenes con la cámara CCD. Para poder capturarlas, se utilizó una variante del programa en LabVIEW© utilizado en el experimento anterior que, de igual manera, se obtienen los perfiles de intensidad para analizar los datos. La imagen de referencia será una imagen que se capturó cuando aún no se colocaba la sustancia acuosa en el superestrato, después de esto se colocó la gota de solución de KCl y se capturó una nueva imagen para hacer la comparación.

Una vez que se obtiene esta imagen se retira la gota de solución con ayuda de una jeringa y se limpia el dispositivo de manera que no quede ningún residuo que pueda altera la siguiente medición. Se realizó este procedimiento para las soluciones acuosas restantes.

V.1.1 Variación del índice de Refracción en el Superestrato

Esto se lograra a través de colocar como superestrato diferentes soluciones de agua y cloruro de potasio (KCl) en distintas concentraciones que darán como resultado soluciones con distintos índices de refracción conocidos.

Se reportan (Tabla 5.1) los índices de refracción de soluciones de agua y KCl en diferentes concentraciones:

% de Solutos por Solución	Índice de Refracción
0.5	1.3334
1	1.334
1.5	1.335
2	1.336
2.5	1.3365
3	1.337
3.5	1.338
4	1.3385
4.5	1.339
5	1.34

Tabla 5.1. Índice de refracción de la solución de agua con KCl a distintas concentraciones.

Si se sabe que el índice de refracción del agua es de $n = 1.33$ y para las soluciones el índice de refracción está dado por:

$$n_{solución} = \frac{V_{solutos}n_{solutos} + V_{solvente}n_{solvente}}{V_{total}} \quad \dots(5.1)$$

Con la ecuación (5.1) entonces se puede determinar el cambio de índice de una solución a otra con respecto al agua (Tabla 5.2).

% de Solutos por Solución	Δn
0.5	1×10^{-4}
1	1×10^{-3}
1.5	2×10^{-3}
2	3×10^{-3}
2.5	3.5×10^{-3}
3	4×10^{-3}
3.5	5×10^{-3}
4	5.5×10^{-3}
4.5	6×10^{-3}
5	1×10^{-2}

Tabla 5.2. Cambios de índice de refracción con respecto al agua.

V.2 REALIZACIÓN DE LAS PRUEBAS

Soluciones experimentales

Se prepararon soluciones de KCl en agua para los siguientes Δn y se les dio un nombre para identificarlas:

Nombre	Δn
C1	1×10^{-4}
C2	1×10^{-3}
C3	1×10^{-2}

Tabla 5.3. Nombres e índices de refracción para las soluciones de KCl

Las pruebas que se realizaron fueron con agua y las tres soluciones de KCl.

Prueba con agua

La primera prueba se realiza con agua. De esta manera tendremos un índice de refracción inicial en el superestrato de $n_{sup} = 1$ que corresponde al aire y que cambiara a $n_{sup} = 1.33$ que es el que le corresponde al agua.

El tamaño de la gota que se colocó sobre el dispositivo se controló de manera que fuese el mismo en todas las pruebas, esto se hizo usando jeringas para insulina y la medida de la gota fue de 10u (equivalente a 0.1ml). Se cuidó que la gota de agua o solución quedase siempre al centro del dispositivo (fig. 5.3) sobre el gradiente en dirección al eje de propagación z.

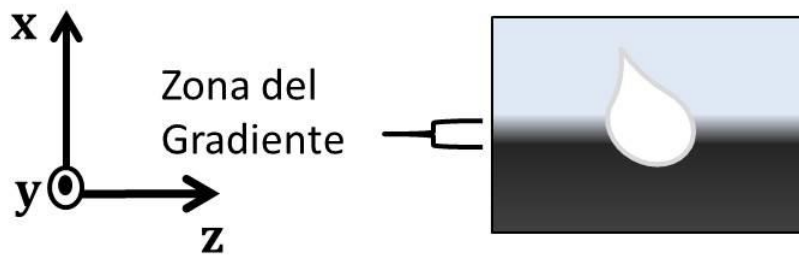


Figura 5.3. Ubicación de la gota experimental sobre la guía de onda.

Se capturó una imagen al inicio de la prueba (fig. 5.4 (a)) para tener una referencia, una vez que se tuvo esta imagen se colocó cuidadosamente una gota de agua al centro del dispositivo y nuevamente se capturó una imagen (fig. 5.4 (b)).

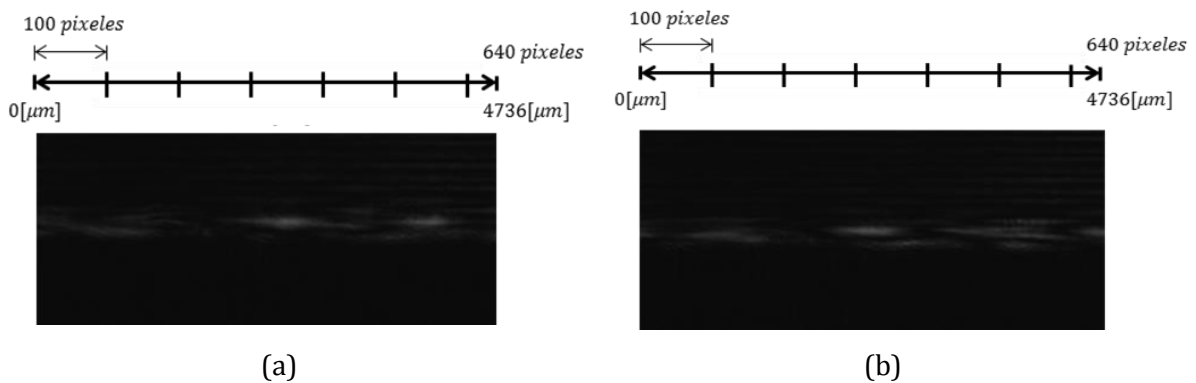


Figura 5.4. Imágenes del campo cercano a la salida de la guía de onda: (a) imagen de referencia y (b) imagen con la gota de agua.

Como se puede observar, existen diferencias entre ambas imágenes, la intensidad y el tamaño de las áreas iluminadas es distinta en cada una, esto se apreciará mejor al obtener los perfiles de intensidad.

Prueba con Solución C1

Para continuar se verificó que el dispositivo estuviera completamente libre del agua que se usó en la prueba anterior, es decir, limpio. Una vez hecho esto, se capturó una imagen (fig. 5.5(a)) y se procedió a colocar cuidadosamente en el centro del gradiente una gota de la Solución C1 e inmediatamente se capturó una nueva imagen (fig. 5.5 (b)) después de esto se limpió el dispositivo. Estas son imágenes del campo cercano a la salida de la guía de onda:

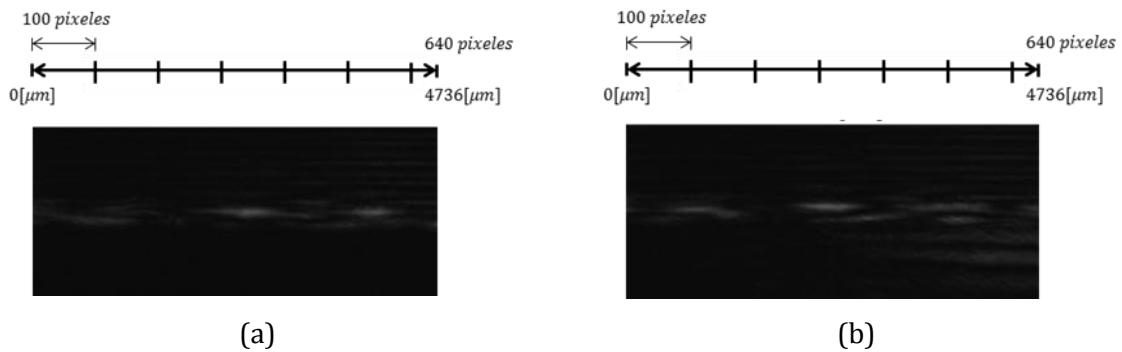


Figura 5.5. Imágenes del campo cercano a la salida de la guía de onda: (a) imagen de referencia y (b) imagen con la gota de solución C1.

Prueba con la Solución C2

Nuevamente, se verificó la limpieza del dispositivo; una vez hecho esto se capturó la imagen (fig. 5.6 (a)) que nos servirá de referencia ($n_{sup} = 1$) y después se colocó con cuidado la gota de Solución C2 ($n_{sup} = 1.334$) y se capturó una imagen de esta acción (fig. 5.6 (b)).

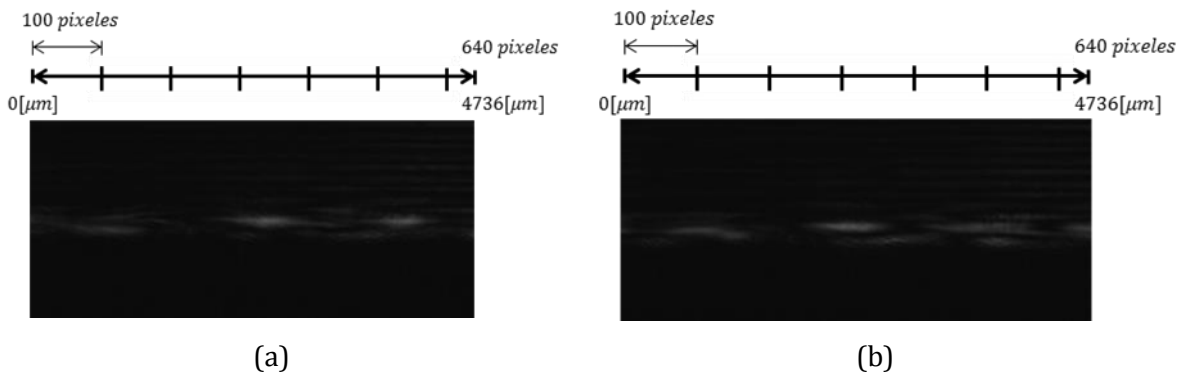


Figura 5.6. Imágenes del campo cercano a la salida de la guía de onda: (a) imagen de referencia y (b) imagen con la gota de solución C2.

Prueba con Solución C3

Como en las pruebas anteriores una vez que se verificó que el dispositivo estaba completamente limpio se capturó la imagen de referencia (fig. 5.7 (a)) y luego de colocar la gota de la Solución C3, se capturó la imagen del campo cercano (fig. 5.7 (b)).

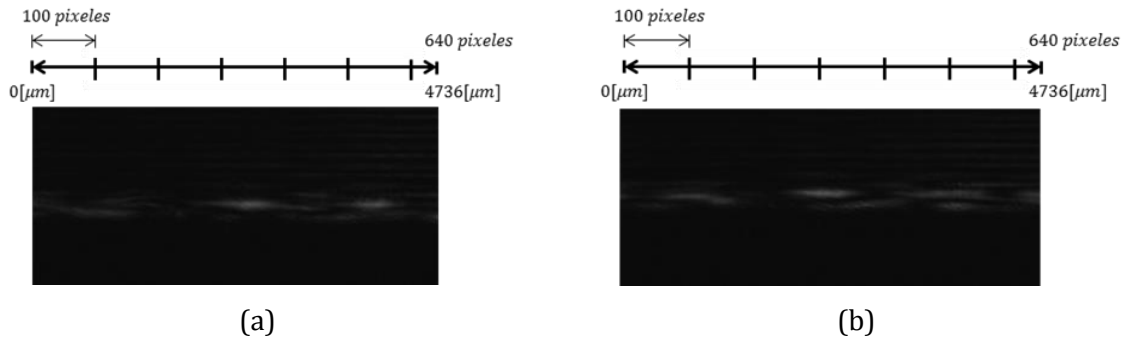


Figura 5.7. Imágenes del campo cercano a la salida de la guía de onda: (a) imagen de referencia y (b) imagen con la gota de solución C3.

V.3 RESULTADOS ESPERADOS

Parámetros de la Simulación

El tamaño del espesor del núcleo de la guía de simulación será de $2.5[\mu\text{m}]$, pues anteriormente se determinó que con este espesor en el dispositivo únicamente se propaga el modo fundamental. Para determinar las medidas más adecuadas para el espesor del sustrato y del superestrato se realizó una primera simulación donde el espesor del sustrato y del superestrato fue $10[\mu\text{m}]$ para cada uno, las cuales se sabe son dimensiones sobradas.

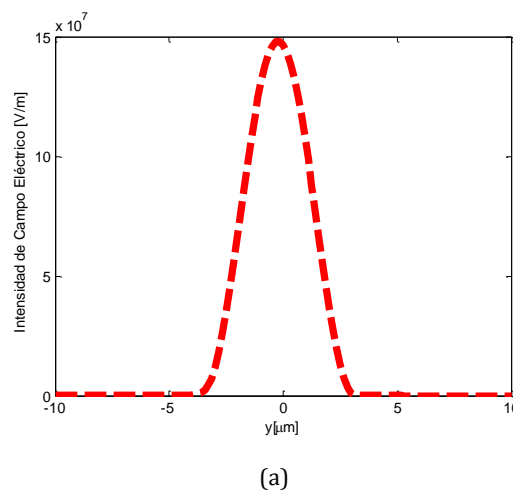


Figura 5.8. Distribución del campo eléctrico para determinar las dimensiones de simulación de la guía de onda.

En la figura 5.8 se puede observar la distribución de campo eléctrico, el punto 0 en el eje y indica el centro del núcleo de la guía de onda, hacia abajo se ubica el sustrato y hacia arriba el superestrato.

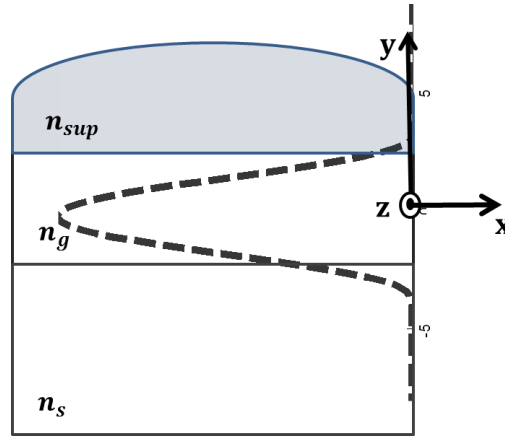


Figura 5.9. Distribución del campo eléctrico en la estructura del sensor.

Si se ubica la distribución del campo en la estructura física (fig. 5.9) se puede ver que la penetración del campo eléctrico no irá más allá de los $-5[\mu\text{m}]$ hacia el sustrato, ni de los $5[\mu\text{m}]$ para el superestrato, por lo tanto para las simulaciones se tomarán las siguientes dimensiones (fig. 5.10): $5[\mu\text{m}]$ para el superestrato, $2.5[\mu\text{m}]$ para el núcleo y $10[\mu\text{m}]$ para el sustrato, porque a estas distancias ya no se tiene penetración del campo evanescente.

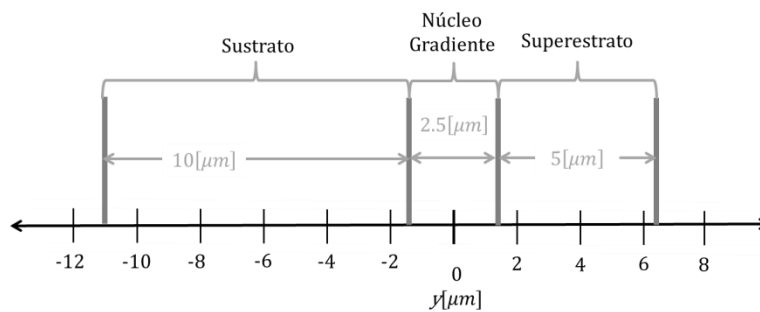
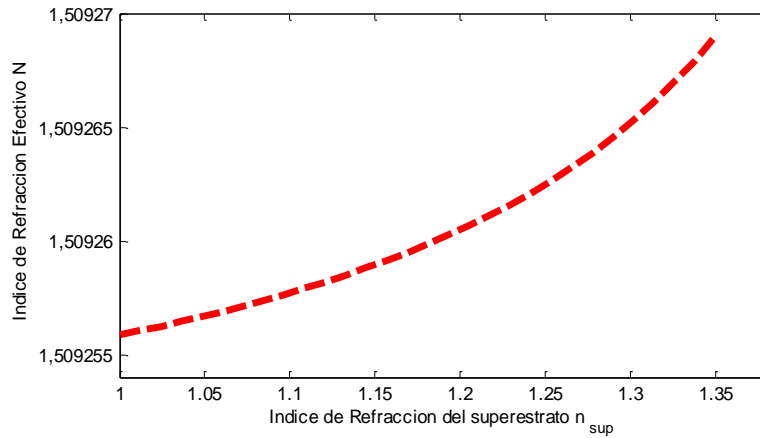


Figura 5.10. Esquema de la estructura para la Simulación.

En la figura 5.11 se observa cómo cambia el índice de refracción efectivo en función del índice de refracción del superestrato. Con las dimensiones antes mencionadas se irá de un

$n_{sup} = 1$ que corresponde al del aire, hasta llegar a $n_{sup} = 1.35$ considerando un medio de prueba acuoso ($n_{sup} = n_{agua} + \Delta n = 1.33 + 1 \times 10^{-2} = 1.34$).



(a)

Figura 5.11. Índice de Refracción efectivo para la variación del índice de refracción del superestrato para el modo 0.

Se realizaron simulaciones dependientes del espesor de la guía, a continuación (fig. 5.12) se muestra cómo cambia el índice efectivo para una guía con índice de refracción del superestrato de 1.33, con índice de refracción del núcleo de guía es 1.51 y el del sustrato es de 1.5.

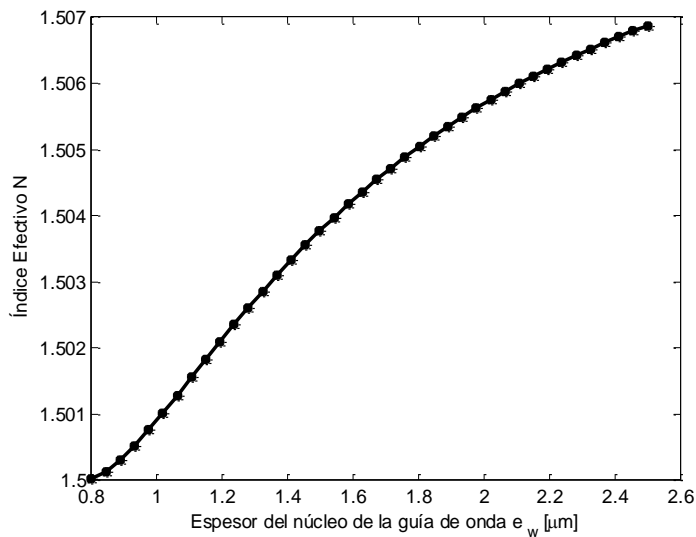


Figura 5.12. Índice efectivo en función del espesor para una guía de onda con índice del superestrato $n_{sup} = 1.33$

Se puede ver que los valores de índice de refracción efectivo se encuentran entre los valores de n_s y n_g . Del análisis teórico se sabe que el valor de índice de refracción efectivo aumentará de manera asintótica hasta el valor de n_g .

Los índices efectivos que se obtendrán para los superestratos con las soluciones C1, C2 y C3, tendrán la misma forma de la curva pero con distintos valores.

En la figura 5.13 se muestra la sensibilidad $\frac{\partial \theta_{out}}{\partial n_{sup}}$, que significa cómo cambia el ángulo de deflexión con respecto al cambio en índice de refracción del superestrato dependiendo del espesor.

Los datos obtenidos de la figura 3.4 son los que se evaluarán en (3.3) para obtener la sensibilidad $\left(\frac{\partial \theta_{out}}{\partial n_{sup}}\right)$ cuando se tiene agua como superestrato.

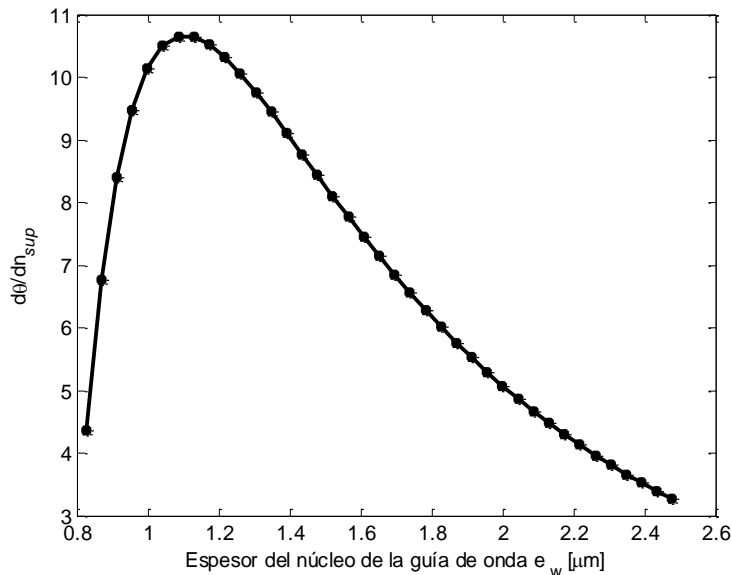


Figura 5.13. Sensibilidad en función del espesor de la guía e_w .

Se puede ver que a partir del espesor $0.8 [\mu m]$ la sensibilidad empieza a aumentar y que entre el espesor $1[\mu m]$ y el $1.2 [\mu m]$, ésta alcanza su valor máximo, de allí en adelante conforme aumenta el espesor la sensibilidad va disminuyendo, entonces de esta gráfica se obtiene que la

máxima sensibilidad para estas condiciones se experimenta cuando el espesor esta entre $1[\mu m]$ y $1.2[\mu m]$.

El ángulo resultante que se tiene para esta simulación es de $\theta = 7.9^\circ$ en el punto máximo de sensibilidad, de igual manera tendremos la misma forma de la curva y esperamos resultados similares para los demás índices del superestrato.

Los datos que se tomaron como base para determinar el ángulo de deflexión de $\theta = 7.9^\circ$ fueron los del agua, y de allí se procedió con un análisis teórico para determinar el incremento de ángulo dependiendo del incremento de índice. Como se calculó y se mostró en la sección anterior (fig. 5.13) se espera que el ángulo de deflexión sea de $\theta = 7.9^\circ$, con un incremento de índice de refracción en el superestrato de $\Delta n_{sup} = 1 \times 10^{-4}$ se tiene un incremento en ángulo de $\Delta\theta = 0.041^\circ$, para $\Delta n_{sup} = 1 \times 10^{-3}$ un incremento en ángulo de $\Delta\theta = 0.047^\circ$ y para $\Delta n_{sup} = 1 \times 10^{-2}$ existe un incremento en ángulo de $\Delta\theta = 0.11^\circ$. Estos ángulos y sus incrementos son evaluados a partir de datos que se usaron para las simulaciones tomando en cuenta las condiciones en las que se realizaran las pruebas experimentales y son para los cambios máximos.

V.4 RESULTADOS EXPERIMENTALES

En la siguiente gráfica (fig. 5.14) se pueden ver las referencias tomadas en cada prueba. Se toma como referencia el perfil de la imagen capturada al inicio de cada prueba, es decir, cuando se tiene como superestrato al aire, y se observa que las referencias tomadas en las cuatro pruebas coinciden, y aunque la coincidencia no es perfecta podríamos decir que la referencia es prácticamente la misma en todas las pruebas, lo que quiere decir que se parte de las mismas condiciones en cada prueba.

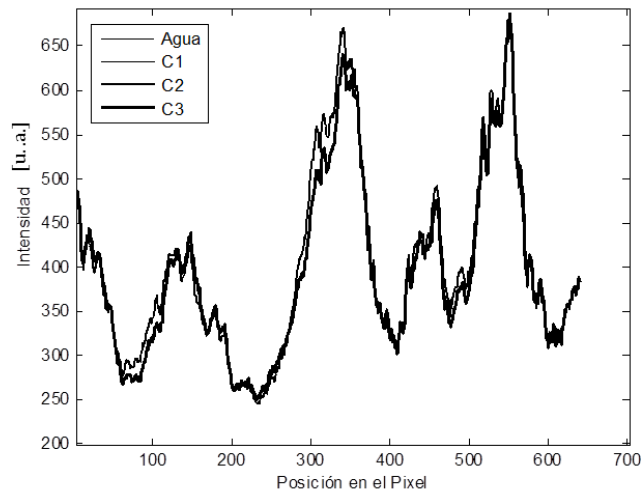


Figura 5.14. Perfiles de Intensidad de las referencias para las pruebas de cambio de índice de refracción en el superestrato.

El siguiente gráfico (fig. 5.15) muestra los perfiles de intensidad obtenidos en cada una de las pruebas, estos perfiles fueron tomados de las imágenes que se capturaron ya que se tenía como superestrato al agua o a cualquiera de las otras tres soluciones de KCl. Solo con fines ilustrativos se toma la referencia de la *prueba con agua* para verla junto con los perfiles deflectados que se obtienen cuando se colocan los diferentes superestratos a la guía de onda, cuando llegue el momento de calcular la deflexión se hará con la referencia correspondiente a cada prueba. Es claro que cada cambio de índice de refracción en el superestrato tiene una ubicación distinta de los modos a la salida del dispositivo. La forma de la curva de las referencias es la misma en los cuatro casos como tenía que ser, pues en ese punto de la prueba las condiciones eran las mismas y para cuando se colocó a las soluciones como superestrato también se observa que la forma de onda se mantienen, aunque con el cambio de intensidad del que ya se había hablado y por supuesto se encuentran desplazadas.

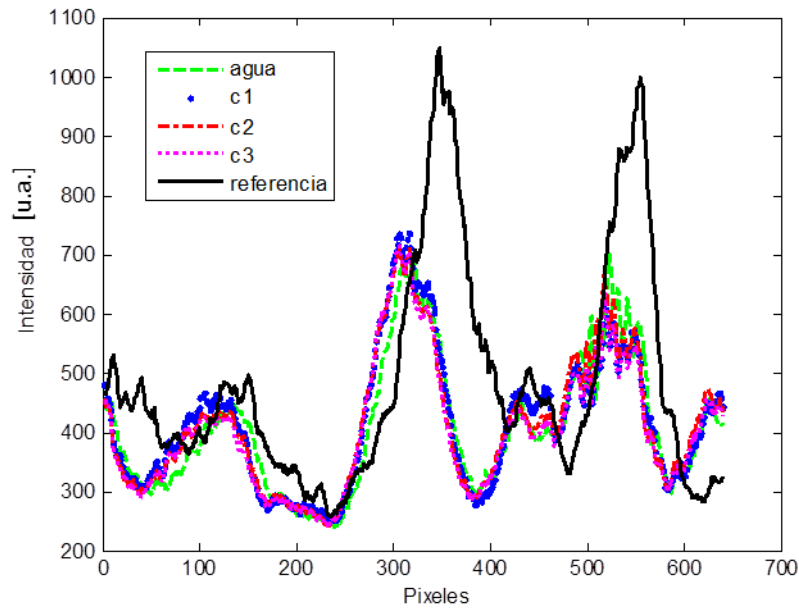


Figura 5.15. Perfiles de intensidad de todas las soluciones de prueba.

El desplazamiento de los perfiles de intensidad que se muestra en la fig. 5.15 puede ser poco claro debido a que se encuentran muy juntos. Si se hace un acercamiento a la fig. 5.15 obtenemos la fig. 5.16.

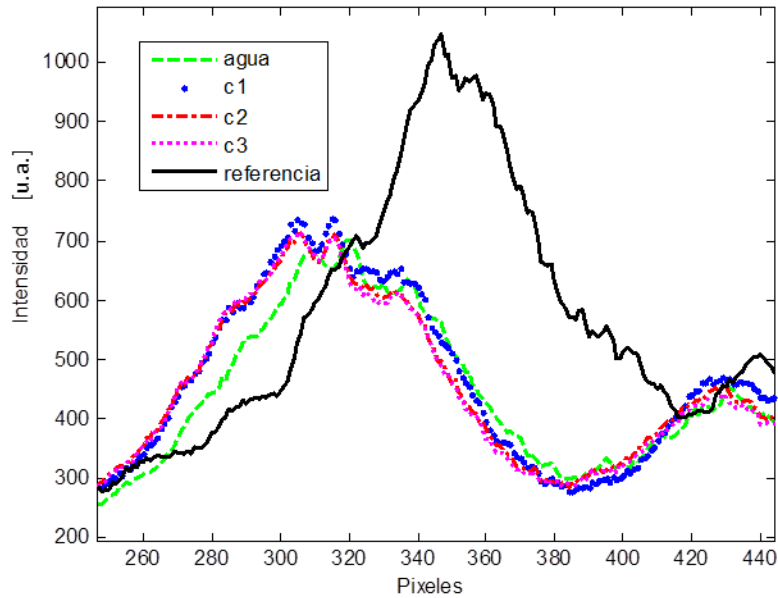


Figura 5.16. Perfiles de intensidad de todas las soluciones de prueba (acercamiento de la fig. 5.18)

En el acercamiento se puede observar de manera más clara el desplazamiento de los perfiles con respecto a la referencia y entre ellos. En la siguiente figura (fig. 5.17) se muestran los perfiles de cada prueba por separado con su respectivo desplazamiento al cambiar el índice de refracción del superestrato, ahora en esos perfiles se ubicarán los máximos para determinar el desplazamiento de los mismos, con respecto a su posición inicial.

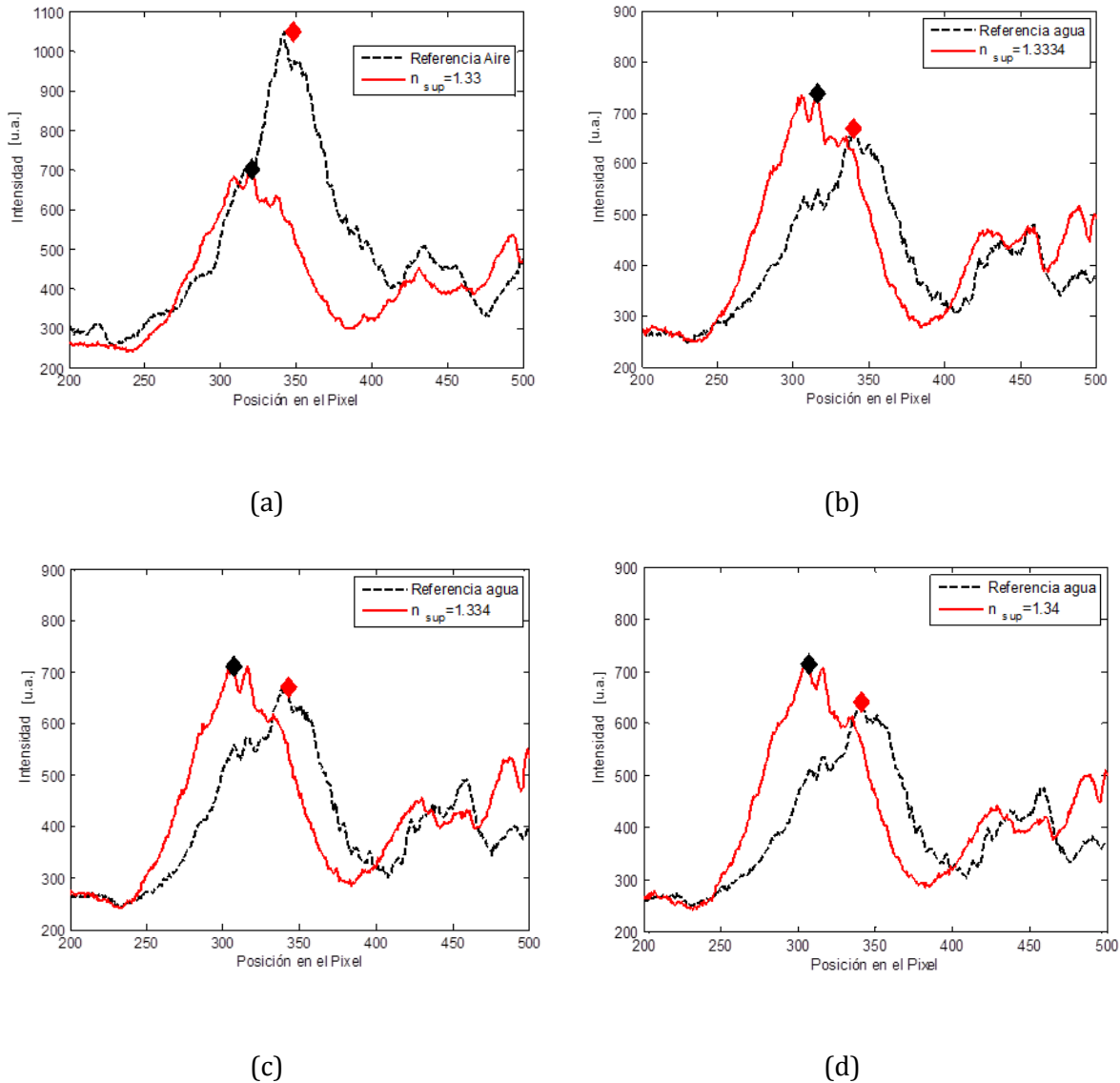


Figura 5.17. Perfiles de Intensidad para las pruebas de cambio de índice de refracción en el superestrato con indicadores en los puntos máximos;(a) Prueba con Agua, (b) Prueba con C1, (c) Prueba con C2 y (d) Prueba con C3.

De igual manera que en el capítulo anterior se puede determinar el ángulo de deflexión por medio de trigonometría, conociendo el desplazamiento sobre el *eje x* para cada cambio en índice de refracción.

El ángulo de deflexión experimental calculado para el agua es de $\theta = 2.66^\circ$, en la sección anterior se calculó un ángulo de deflexión teórico de $\theta = 7.9^\circ$, decir que los resultados teóricos y experimentales no concuerdan sería un poco apresurado pues se dijo que este ángulo de $\theta = 7.9^\circ$ es el ángulo máximo con dependencia del espesor, si bien lo que se muestra en la figura 5.13 es la sensibilidad de allí se extrae que para espesores de $2.3[\mu m]$ a $2.5[\mu m]$, que es el caso de la guía de onda usada, se tienen ángulos entre $\theta = 2.5^\circ$ y $\theta = 2.75^\circ$, al tener esta información se puede decir que un ángulo $\theta = 2.66^\circ$ es un valor de ángulo de deflexión aceptable como resultado, el valor teórico más cercano al obtenido experimentalmente es de $\theta = 2.64^\circ$ si a partir de éste valor teórico como ángulo de deflexión con agua como superestrato se realiza nuevamente los cálculos teóricos para determinar el incremento de ángulo correspondiente, para poder compararlos con los resultados experimentales; de los resultados teóricos tenemos que con un incremento de índice de refracción en el superestrato de $\Delta n_{sup} = 1 \times 10^{-4}$ hay un incremento en ángulo de $\Delta \theta = 0.019^\circ$, para $\Delta n_{sup} = 1 \times 10^{-3}$ tenemos un incremento en ángulo de $\Delta \theta = 0.026^\circ$ y para $\Delta n_{sup} = 1 \times 10^{-2}$ existe un incremento en ángulo de $\Delta \theta = 0.57^\circ$.

En la gráfica (fig. 5.18) se muestra la comparación del ángulo de deflexión en función del incremento de índice de refracción del superestrato se muestran los valores de los ángulos conforme cambió el índice de refracción del superestrato, el primer punto en la gráfica pertenece al ángulo de deflexión para el agua con respecto al aire con un valor experimental de $\theta = 2.66^\circ$ y teórico de $\theta = 2.64^\circ$. Los puntos que siguen en la gráfica corresponden a incrementos de índice de refracción de $\Delta n_{sup} = 1 \times 10^{-4}$, $\Delta n_{sup} = 1 \times 10^{-3}$ y $\Delta n_{sup} = 1 \times 10^{-2}$, con respecto al índice de refracción del agua.

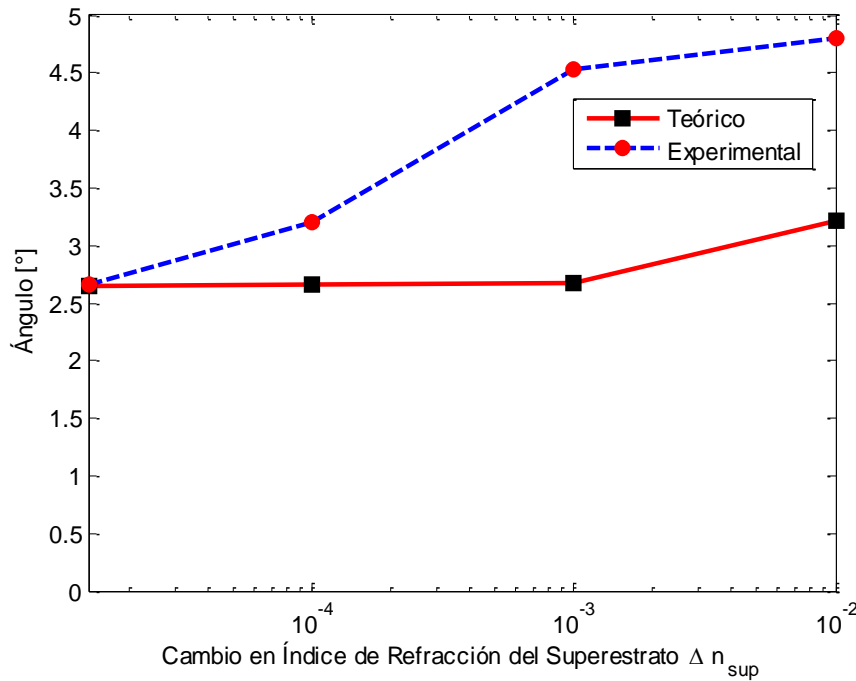


Figura 5.18. Ángulo de deflexión en función del índice de refracción del superestrato n_{sup} .

La siguiente tabla (Tabla 5.4) muestra la comparación de los resultados de los ángulos obtenidos teóricamente y de los ángulos calculados con los resultados experimentales.

n_{sup}	Δn_{sup}	Ángulo Teórico	Ángulo Experimental
Respecto al Aire			
1.33	0.33	2.64	2.66
Respecto al Agua			
1.3334	1×10^{-4}	2.66	3.1989
1.334	1×10^{-3}	2.6700	4.5302
1.34	1×10^{-2}	3.2140	4.7963

Tabla 5.4. Valores de ángulo de deflexión teóricos y experimentales.

Se sabe que el ángulo de deflexión experimental para cuando se tiene agua como superestrato tiene coincidencia con los resultados que se esperaban obtener de acuerdo al análisis teórico, pero al momento de incrementar el índice de refracción ya no son tan semejantes los

resultados. Estas variaciones en el valor de ángulo de deflexión pueden deberse a que la comparación teórica se realizó con los valores teóricos para el modo fundamental y cabe la posibilidad que en la práctica se haya excitado un modo de orden superior que resulte en valores de ángulo diferente.

De los datos experimentales se tiene que con un incremento de índice de refracción en el superestrato de $\Delta n_{sup} = 1 \times 10^{-4}$ hay un incremento en ángulo de $\Delta \theta = 0.53^\circ$, para $\Delta n_{sup} = 1 \times 10^{-3}$ el incremento en el ángulo es de $\Delta \theta = 1.9^\circ$ y para $\Delta n_{sup} = 1 \times 10^{-2}$ existe un incremento en ángulo de $\Delta \theta = 2.04^\circ$.

A pesar de las variaciones existentes entre los datos teóricos y los experimentales podemos afirmar que es posible utilizar el dispositivo diseñado como un sensor de deflexión de ángulo que detecta cambios de índice de refracción en el superestrato como se probó en este experimento. Se entiende que es necesario seguir trabajando en esta línea y cuidar los detalles de las condiciones de la realización del experimento para obtener un comportamiento lo más semejante al desarrollo teórico, a pesar de esto el funcionamiento del dispositivo por modulación del índice de refracción en el superestrato ha queda probado.

Los resultados experimentales obtenidos, demuestran que usar este dispositivo para detectar cambios de índice de refracción es posible y que se puede observar una deflexión ante un cambio de índice de refracción, esto abre las puertas al desarrollo de la aplicación de un detector de moléculas biológicas, pues podríamos colocar las moléculas en la parte superior del dispositivo y capturar una imagen para obtener el perfil y compararla con un perfil de referencia y si se registra deflexión sabremos que hubo un cambio de índice de refracción en el superestrato. Por medio de un análisis numérico se podría determinar el ángulo de deflexión y por lo tanto saber cuál es el índice de refracción de la muestra, lo cual sería de utilidad si se habla de caracterización de moléculas biológicas.

CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES

El objetivo de este trabajo de tesis fue demostrar la posibilidad de deflectar un haz en un dispositivo óptico integrado, esto a través de utilizar una guía de onda con gradiente de espesor y en presencia de un cambio en el índice de refracción. Se propuso el diseño de un dispositivo óptico integrado planar con un gradiente de índice de refracción efectivo para producir la deflexión de un haz propagado y se llevó a cabo la fabricación de este diseño. Ya que se tuvo el dispositivo se realizó una primera prueba que consistió en analizar la modulación de la deflexión por un cambio de temperatura en la guía de onda con gradiente de espesor, para lo cual se calentó el dispositivo, logrando un cambio en el índice de refracción en la guía (debido al aumento de temperatura) que sumado al gradiente de espesor lograron entonces un cambio en el índice efectivo, que da como resultado una modulación del modo guiado por efecto de la temperatura. En la segunda prueba se trabajó bajo el mismo principio del cambio de índice efectivo debido al gradiente de espesor, pero en esta ocasión el cambio de índice de refracción efectivo se produjo por cambios en el índice de refracción del medio en la superficie de la guía, lo cual también fue comprobado, pues en este caso por medio del análisis de los datos experimentales se probó que el haz propagado se deflectaba. La realización de este trabajo está enfocada hacia la detección de moléculas biológicas, que si bien no se llevó a cabo en este trabajo, marca un antecedente para lograrlo.

Dentro de este trabajo caracterizamos experimentalmente la deflexión con ayuda de una cámara CCD, esto se hizo tomando imágenes de campo cercano, las cuales se procesaron con programas de los que se podía obtener el perfil de intensidad de las imágenes. Con estos programas también se identificó la posición de los perfiles en cada momento y dadas las condiciones del experimento, estos perfiles mostraron un desplazamiento, indicando un cambio en la dirección de propagación del haz guiado.

Se realizaron pruebas en la zona de la guía plana del dispositivo, donde no hay gradiente, que consistieron en cambiar el índice de refracción del superestrato en un rango amplio y se obtuvieron los perfiles, al compararlos se mostró que no había ningún desplazamiento en esta zona. La ubicación de los perfiles se mantuvo en la misma posición sin importar el índice de refracción en el superestrato.

Al momento de caracterizar la modulación de la deflexión debido a un aumento gradual en la temperatura del sustrato se registró la temperatura dos veces por minuto, de esta manera se conocieron los valores de como aumento la temperatura con respecto al tiempo. Con estos datos y el coeficiente termo-óptico del vidrio ($\frac{dn}{dT}$) se determinó el cambio en índice de refracción de la guía de onda gradiente, estos datos se utilizaron en la ecuación descrita para determinar el ángulo de deflexión del haz, los valores resultantes se compararon con los resultados obtenidos teóricamente. Como ambos son congruentes confirmamos la capacidad de este dispositivo para experimentar una deflexión en presencia de cambios de temperatura, lo cual se propone para monitorear cambios de temperatura en procesos biológicos, por ejemplo procesos exotérmicos realizados por células.

Para la caracterización de la modulación de la deflexión por cambios de índice de refracción en el superestrato (Δn_{sup}) se realizaron soluciones de KCl a distintas concentraciones, las cuales tenían un aumento de índice de refracción (Δn_{sup}) de 1×10^{-4} , 1×10^{-3} y 1×10^{-2} con respecto al índice de refracción del agua ($n_{agua} = 1.3$), de estas pruebas se obtuvo el comportamiento del índice efectivo; dichos datos son los que se usaron para determinar la sensibilidad $\frac{\partial \theta}{\partial n_{sup}} = 10.8$ que resultó ser la máxima para una guía de onda con espesor entre $1[\mu m]$ y $1.2[\mu m]$, para nuestro caso particular fue $\frac{\partial \theta}{\partial n_{sup}} = 3.2$ con una guía de onda de espesor $2.5[\mu m]$. Con estos datos se conoció cómo cambia el ángulo de deflexión con respecto al gradiente de espesor de la guía. Además, se realizó una calibración experimental ubicando la posición del máximo del perfil con respecto al sistema de referencia obteniendo así su correspondiente ángulo de deflexión. Sabemos que existen distintos valores de ángulo dependiendo del espesor de la guía de onda, los valores obtenidos experimentalmente se ajustan a los teóricos y aunque la coincidencia con los resultados teóricos no es perfecta permite verificar que el dispositivo es funcional para deflectar un haz ante cambios de índice de refracción.

En este trabajo obtenemos incrementos de ángulos de 0.019° , 0.026° y 0.57° , en trabajos realizados anteriormente (7) se reportan ángulos de deflexión de $0.8[\text{mrad}]$, medidos con un

resonador de capa delgada, que aproximadamente equivalen a 0.05, o sea que los resultados se encuentran en el mismo orden de magnitud.

Este dispositivo requerirá de mejoras, sin embargo este trabajo sienta las bases para el desarrollo de un sistema para aplicaciones de sensado en las que se requiera portabilidad, donde un dispositivo integrado, buena sensibilidad y robustez sean indispensables.

Apéndice. Programas en LabVIEW

Programa para capturar una imagen



Figura A.1. Panel de control del programa para capturar una imagen.

La figura A.1 muestra el panel del programa para capturar una imagen, el cual contiene un control para elegir la cámara, un indicador que muestra la imagen en continuo el botón para capturar, el indicador que muestra la imagen capturada y el botón para detener.

En la figura A.2 se tiene el diagrama de bloques del programa en 1 se abre la cámara, en 2 se configura la adquisición, en 3 se crea espacio en memoria y se indica que se usara el modo disparo, en 4 comienza la adquisición en 5 se graba de manera continua, esperando el disparo para obtener la imagen en 6 cuando el botón "obtener imagen" es verdadero se despliega la imagen en el indicador del panel de control, en 7 se detiene la adquisición y el 8 muestra la ventana de error en caso de que uno ocurra.

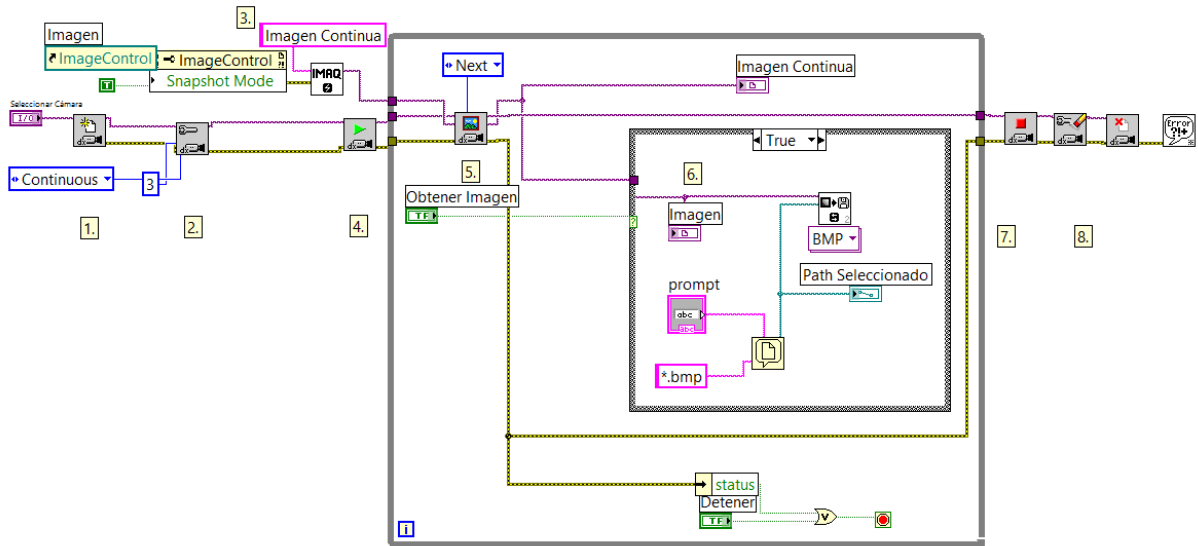


Figura A.2. Diagrama de Bloques del programa para capturar una imagen.

Programa para capturar la imágenes cada 30[s] en la prueba de modulación de temperatura



Figura A.3. Panel de control del programa para capturar la secuencia de imágenes.

La figura A.3 muestra el panel de control del programa en LabVIEW diseñado para capturar imágenes de campo cercano a la salida del dispositivo sensor cada 30[s]. Antes de ejecutar el programa se definieron los datos de entrada del programa que fueron la cámara que capturará las imágenes y el número de imágenes que se deseaba capturar en este caso 120, esto para tener una imagen cada 0.5 [min]. En el panel de control se mostraban indicadores con el progreso en la adquisición, y el número de tomas que se han realizado al momento de la lectura.

El programa es una secuencia de tres cuadros, la figura A.4 muestra el primer cuadro de la secuencia del diagrama de bloques del programa, se han colocado etiquetas numéricas para facilitar su descripción.

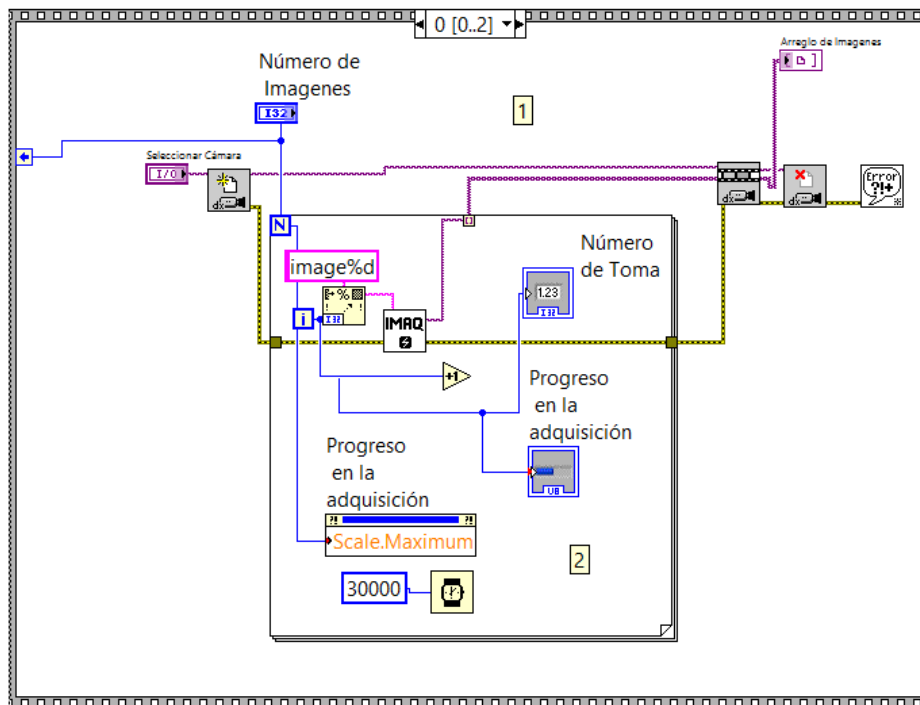


Figura A.4. Diagrama de Bloques del primer cuadro de la secuencia del programa para capturar la secuencia de imágenes.

La sección del programa marcada con el número 1 es para adquirir una secuencia de imágenes las cuales se guardan en un arreglo. En la sección 2 es un ciclo for que cada 30 segundos genera un espacio en memoria para guardar la imagen capturada, es aquí donde se

indica tomar una imagen cada 30 segundos, también se incluye el indicador del progreso en la adquisición que va aumentando conforme avanza la adquisición.

En la figura A.5 se muestra el segundo cuadro de la secuencia donde se extraen las imágenes del arreglo capturado en el cuadro anterior, se les asigna un nombre y se guardan como imágenes individuales.

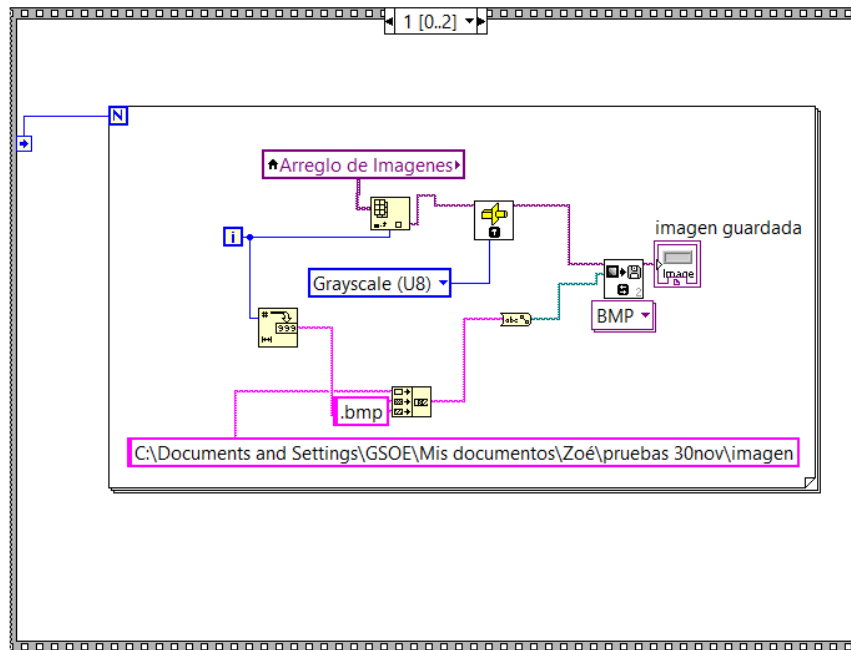


Figura A.3. Diagrama de Bloques del segundo cuadro de la secuencia del programa para capturar la secuencia de imágenes.

El tercer cuadro de la secuencia es para borrar el arreglo, no se muestra imagen.

REFERENCIAS

1. *Heat flux sensor based on photothermal beam deflection for thermal characterization of liquids.* **Sandoval-Romero, G., y otros, y otros.** Bellingham, WA : s.n., 2004. Proceedings of SPIE. págs. 274-284.
2. *Theoretical analysis of 2D laser angle sensor and several design parameters.* **Xiaoyong, F y Maosheng, C.** 34 (2002), Optics & Laser Technology, págs. 225-229.
3. *Deflection estimation of a full scale prestressed concrete girder using long-gauge fiber optic sensors.* **Chung, W, y otros, y otros.** 22(2008), Construction and Building Materials, págs. 394-401.
4. *Estimation of viscoelastic surface wave parameters using a low cost optical deflection method.* **Brum, J, y otros, y otros.** 3 (2010), Physics Procedia, págs. 755-760.
5. *Development of a heat sensor for the measurement of reaction enthalpy based on laser deflection.* **Schneider, T, Politi, M y Baptista, M.** 362 (2000), Thermochemica Acta, págs. 170-184.
6. *Detection sensitivity of de optical beam deflection method characterized with the optical spot size detector.* **Lee, E, y otros, y otros.** 10(2010), Current Applied Physics, págs. 834-837.
7. *Sensitivity analysis of angle-sensitive detectors based on a film resonator.* **García-Valenzuela, A., Peña-Gomar, M. y Villatoro, J.** 42(2003), Optical Engineering, págs. 1084-1092.
8. *Device for characterization of thermal effusivity of liquids using photothermal beam deflection.* **Sandoval-Romero, G E, García-Valenzuela, A y Sánchez- Pérez, C.** 78 (2007), Review of Scientific Instruments, págs. 104901-1/104901-7.
9. *A versatile beam deflection sensor utilizing optical fibers.* **J, Vattulainen y R, Hernberg.** 64(1993), Review Scientific Instruments, págs. 1451-1455.
10. *A thin-film polymeric waveguide beam deflector based on thermo-optic effect.* **Jang, Chiou-Hung, y otros, y otros.** 2001 (13), IEEE Photonics Technology Letters, págs. 490-492.
11. *Compact optical roll-angle sensor with large measurement range and high sensitivity.* **Li, S., y otros, y otros.** 2005(3), Optics Letters, págs. 242-244.
12. *Theory and design of an integrated optical sensors based on planar waveguiding lenses.* **Liñares, J, Montero, C y Sotelo, D.** 180 (2000), Optics Communications, págs. 29-36.
13. *A planar waveguide optical sensor employing simple light coupling.* **Ablet, M., y otros, y otros.** 134 (2009), Analyst, págs. 1544-1547.

14. *Electrooptic Beam Deflection Using the Leaky Mode of a Planar Waveguide*. **Himel, M, y otros, y otros**. 3 (1991), IEEE Photonics Technology Letters, págs. 921-923.
15. *Polymeric Waveguide prism-based electro-optic beam deflector*. **Chiou-Hung, Jang, y otros, y otros**. 40 (2001), Optical Engineering, págs. 1217-1222.
16. *An integrated thin-film thermo-optic waveguide beam deflector*. **Suning, Tang, Bulang, Li y Xinghua, Han**. 76 (2000), Applied Physics Letters, págs. 2289-2291.
17. *Scanning photothermal beam deflection imaging with and without constant inversion on polymers for integrated optical application*. **Einsiedel, H y Mittler-Neher, S**. 288 (1996), Thin Solid Films, págs. 243-247.
18. *Thermal-wave detection and thin-films thickness measurements with laser beam deflection*. **Opsal, Jon, Rosencwaig, A y Willenborg, L**. 22 (1983), Applied Optics, págs. 3169-3176.
19. *Planar Integrated Optical Sensors Based on the Mirage Effect*. **García-Valenzuela, A y Sánchez-Pérez, C**. 21(2010), Measurement Science and Technology, págs. 54011-54014.
20. *Characterization of planar optical waveguides by K-ion exchange in glass*. **Yip, G L y Albert, J**. 10 (1983), Optics Letters, págs. 151-153.
21. [aut. libro] Bahaa Saleh Malvin Carl Teich. *Fundamentals of Photonics*. s.l. : Wiley, 1991, págs. 238-263.
22. [aut. libro] Iraj Najafi. *Introduction to Glass Integrated Optics*. s.l. : Artech House, 1992, págs. 25-38.
23. [aut. libro] Zappe Hans. *Fundamentals of Micro-optics*. s.l. : Cambridge University Press, 2010, págs. 321-349.
24. [aut. libro] Darryl Almond y Patel Pravin. *Photothermal science and techniques*. s.l. : Chapman & Hall, 1996, págs. 142-145.
25. [aut. libro] Hiroshi Nishihara, Masamitsu Haruna y Toshiaki Suhara. *Optical Integrated Circuits*. s.l. : McGraw Hill Professional, 1987, págs. 19-22.
26. [aut. libro] Wes R Jamroz, Roman Kruzelecky y Emile I Haddad. *Applied Microphotonics*. s.l. : Taylor & Francis, 2010, págs. 219-223.
27. *Angle Selective Enhancement of Beam Deflection in High Speed Electrooptic Switches*. **Glebov, A, y otros, y otros**. 9 (2007), IEEE Photonics Technology Letters, págs. 701-703.