

UNIVERSIDAD DE SONORA

DIVISIÓN DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES
DEPARTAMENTO DE INVESTIGACIÓN EN FÍSICA



EL SABER DE MIS HIJOS
HARÁ MI GRANDEZA

“Instrumentación de un Sistema Experimental para la Caracterización de una Guía de Onda tipo ARROW”

Tesis profesional presentada por

DAVID OMAR QUIRINO PEÑA

como requisito para obtener el título de

INGENIERO EN TECNOLOGÍA ELECTRÓNICA

Directoras de Tesis:

Dra. Milka del Carmen Acosta Enríquez

Dra. Alicia Vera Marquina



Hermosillo, Sonora, México a 03 de Noviembre de 2011

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mis maestros, compañeros y familia, agradeciéndoles el esfuerzo y dedicación que me otorgaron durante varios años de estudio dentro de la carrera profesional, alcanzando en mí una gran satisfacción.

AGRADECIMIENTOS

A mis maestros Milka del Carmen Acosta E., Alicia Vera M. y Dainet Berman M., así como a mi madre y hermanos, quienes me otorgaron parte de su tiempo en la enseñanza y apoyo en todos los aspectos, con el fin de concluir este trabajo tan importante en el desarrollo de mi vida profesional. Asimismo, agradezco al Dr. Ignacio Zaldívar Huerta, por su colaboración en este experimento.

RESUMEN

En este trabajo se presenta la instrumentación de un sistema experimental para la caracterización de guías de onda tipo ARROW, con el fin de medir las pérdidas de potencia que presentan las señales ópticas que se propagan a través de la guía de onda. En este sistema se empleó una fuente de luz LASER con potencia de $1.5\mu\text{W}$ y longitud de onda de 633nm , una fibra óptica Multimodo, un objetivo óptico 20X. Para el sistema posicionador se emplearon bases 3D con cabeza posicionadora de dos ángulos. En la salida de la guía se colocó una fibra óptica Multimodo para capturar la señal óptica. Finalmente a la salida de la fibra óptica se conectó un fotodetector para la medir la potencia, logrando obtener una lectura de 680nW . Para las mediciones de potencia se consideró un haz de luz gaussiano de entrada sobre la guía de onda.

CONTENIDO

	Página
I.- INTRODUCCION.....	6
II.- INSTRUMENTACIÓN ÓPTICA.....	8
1.-INTRODUCCION.....	8
2.-SISTEMA LASER.....	8
3.-OBJETIVO DE MICROSCOPIO.....	10
4.-FIBRAS OPTICAS.....	12
5.-GUIA DE ONDA.....	22
6.-FOTODETECTOR.....	29
7.- BASE POSICIONADORA 3D.....	31
III.- SISTEMA DE ALINEACIÓN DE UNA GUIA DE ONDA.....	33
1.-INTRODUCCION.....	33
2.- ARREGLO EXPERIMENTAL.....	33
3.-ANALISIS DE RESULTADOS.....	35
IV.- CONCLUSIONES.....	39
V.-REFERENCIAS.....	40

I.- INTRODUCCION

Los dispositivos de óptica integrada se han desarrollado desde los años 80's, esto es con el propósito de miniaturizar los dispositivos ópticos existentes, de manera similar a los circuitos integrados en microelectrónica, integrándolos en un mismo sustrato para generar circuitos electrónicos de óptica integrada.

Actualmente se han desarrollado guías de onda ópticas con base en Silicio debido a sus propiedades ópticas, mecánicas y eléctricas para establecer enlaces entre los diversos componentes que forman el dispositivo óptico integrado.

Los procesos de fabricación y simulación de dispositivos de óptica integrada, solo pueden ser validados mediante datos experimentales que soporten los resultados de dichas simulaciones. Básicamente los sistemas experimentales tienen la misma configuración: una fuente de luz, puede ser un LED o LASER, después un sistema de posicionamiento de fibra óptica y finalmente un dispositivo para el patrón de lectura: un fotodetector o una cámara CCD [10].

En este trabajo se utilizó la instrumentación de un sistema experimental para la caracterización de guías de onda tipo ARROW, con el fin de medir las pérdidas de potencia que presentan las señales ópticas que se propagan a través de la guía de onda.

El objetivo general es medir la cantidad de potencia óptica que puede transmitir una guía de onda tipo ARROW de Oxido de Silicio y Nitrato de Silicio, tomando en cuenta los parámetros de apertura numérica, ángulo crítico, potencia de entrada y salida, pérdidas y dispersiones de potencia óptica que se presentan, luz reflejada y refractada. Esta caracterización es realizada antes de asignarle una aplicación para comunicaciones por fibra óptica.

En este trabajo se presenta un sistema de instrumentación óptico para realizar la caracterización de guías de onda tipo ARROW, así como el análisis de resultados y conclusiones que se adquirieron de las pruebas realizadas a la guía.

II.- INSTRUMENTACION ÓPTICA

En el desarrollo del sistema experimental para la caracterización de una guía de onda tipo ARROW se utilizan diversos dispositivos, es por esto que se requiere del estudio y entendimiento del funcionamiento de cada uno de ellos, para lograr llevar a cabo con exactitud y eficacia las mediciones que se requieren para la caracterización del elemento a prueba.

1.- INTRODUCCION

A continuación se demuestra el funcionamiento de cada uno de los componentes que se utilizan en el sistema experimental para la caracterización de guías de onda, así como aquellos conceptos que se requieren para un mejor entendimiento de cada uno de ellos. Se requieren de las ciencias como la Física y Química, la primera antes nombrada se usa con el fin de estudiar los aspectos de la trayectoria de los rayos de luz, como son sus ángulos de incidencia, refracción y reflexión, pérdidas de potencia, dispersión y modos de propagación. La segunda ciencia nombrada se aplica ya que algunos componentes utilizados en este trabajo de tesis están contruidos de diferentes elementos y compuestos químicos, dependiendo su funcionamiento de las reacciones o estimulaciones químicas que se llevan a cabo en ellos.

2.- SISTEMA LASER

La energía electromagnética aparece en múltiplos de cantidad discreta conocida como "*cuanto*", estos *cuantos* se les llaman fotones cuando se irradia la energía. Un fotón es una cantidad que esta en alguna parte entre una onda y una partícula. Cuenta con una longitud de onda, misma que corresponde a la radiación y una cantidad de energía igual a un *cuanto*, pero sin masa, siendo los fotones de gran importancia en los emisores y detectores utilizados en sistemas de fibra óptica.

La energía que corresponde a un cuanto y se encuentra en un fotón esta dado por:

$$E = hf \tag{1}$$

Donde:

E = energía de un cuanto en joules.

h = constante de Planck, 6.626×10^{-34} joules-segundo.

f = frecuencia de la radiación en Hertz.

Por lo tanto, se tiene que la energía en un fotón varía directamente con la frecuencia. Para la frecuencia de radio, la energía por fotón es tan pequeña y el número de fotones presentes en incluso las señales más débiles es tan grande que pocas veces es necesario considerar los fotones en absoluto. Con la luz, sin embargo, la frecuencia es mucho mayor y la cantidad de energía de un fotón es a veces suficiente para crear un electrón libre cuando un fotón choca con un átomo. Los fotones también pueden activar el movimiento de un electrón desde un estado de valencia a otro. De manera similar, el movimiento de un electrón de un nivel de energía superior a uno menor causa la emisión de un fotón.

Al utilizar los niveles de energía en átomos, se utiliza el electrón-volt (eV) y no el joule, como la unidad de energía. El electrón-volt es la energía que pierde o gana un electrón moviéndose por una diferencia de potencial de un volt, teniendo en cuenta que un volt es igual a un joule por coulomb, así que la energía dada a un electrón es:

$$1eV = \left(1 \frac{\text{joule}}{\text{coulomb}}\right) (1.6 \times 10^{-19} \text{ coulomb}) = 1.6 \times 10^{-19} \text{ joule} \quad (2)$$

El LASER (Amplificación de Luz por Emisión Estimulada por Radiación) actúa como un oscilador óptico, generando luz con coherencia de fase con un ancho de banda mucho más reducido del que es posible con otras fuentes de luz. Un diodo LASER tiene una anchura de línea de emisión de unos 2nm, en comparación con 50nm para un Diodo Emisor de Luz (LED). Los LASER producen más luz en el cono reducido requerido para el acoplamiento a la fibra óptica, esta es una ventaja muy grande con las fibras monomodo, que son muy angostas y tienen una apertura numérica pequeña.

En este trabajo de tesis se utilizó un LASER HeNe, el cual es un dispositivo optoelectrónico, que emite un haz de luz de 1.5mW de potencia a una longitud de onda de 633nm, la cual corresponde al color rojo dentro del espectro electromagnético, por este motivo se eligió para trabajar en el sistema, ya que a simple vista y con el

microscopio se lograba ver el haz de luz, logrando así facilitar su manipulación y enfocar el haz de luz dentro de la fibra óptica y en la guía de onda tipo ARROW.

Este tipo de LASER está diseñado de gases de Helio y Neón, que funciona cuando ocurre la emisión estimulada de los átomos de Neón, los átomos de Helio son usados para excitar los átomos de Neón por colisiones atómicas.

El LASER HeNe consiste en una mezcla de gases de Helio y Neón dentro de un tubo como se muestra en la figura 1. Al final del tubo se encuentran espejos que reflejan la radiación estimulada y acumulan la intensidad en la cavidad, en otras palabras, en la cavidad se reflejan los fotones, logrando así la concentración de fotones en la cavidad [1].

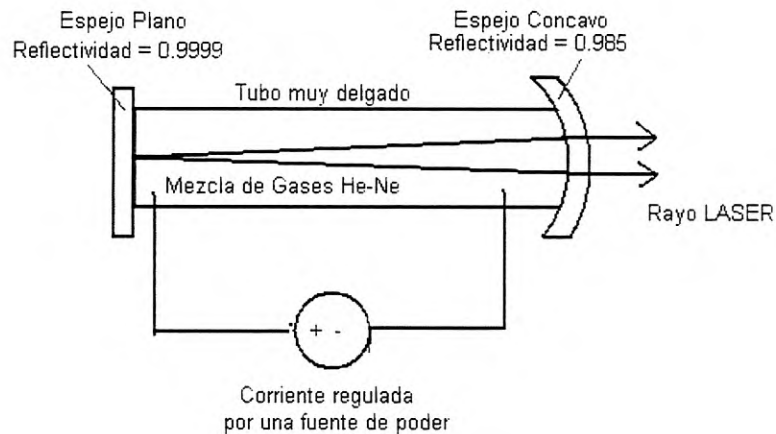


Figura1. Esquemático básico de un LASER HeNe.

El LASER que se utilizó en este sistema experimental se colocó sobre una base, la cual tiene tres tornillos de posicionamiento de alta precisión, logrando movimientos en 3D (ejes X, Y y Z), por lo tanto, este debe de estar perfectamente nivelado con la mesa holográfica y centrado hacia un extremo de la fibra óptica, para lograr capturar una máxima potencia.

3.- OBJETIVO DE MICROSCOPIO

Un objetivo de microscopio es una lente de cristal o plástico, pulido de forma que sus dos superficies sean esféricas o planas, las cuales pueden ser más delgadas en el centro que en el borde o viceversa. En la figura 2 se puede observar una lente convexa, la cual forma un punto focal, en donde se tiene un grupo de rayos paralelos $F1$, al eje principal

pasa por el punto focal $F2$ tras converger por efecto de las lentes, la distancia del punto focal a la lente se la llama distancia focal f ; la distancia focal es la distancia a la imagen que corresponde a un objeto situado en el infinito [2].

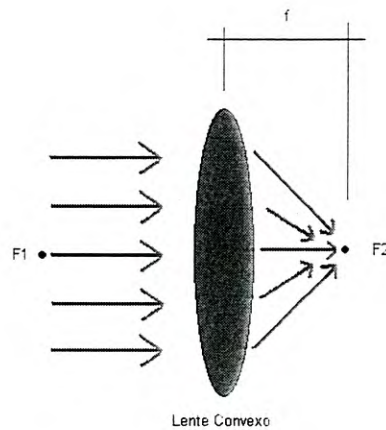


Figura 2. Convergencia de un grupo de rayos paralelos con una distancia focal f .

Las lentes se distinguen entre sí de acuerdo a su forma y material de que están hechos, la forma determina si son lentes convergentes o divergentes, divergente es lo contrario a convergente, el material de la lente tiene un índice refractivo, mismo que determina las propiedades refractivas de la lente [3].

Las lentes cóncavas son más delgadas en el centro que en sus extremos, hace que los rayos que entran como haz paralelo diverjan, todos estos dispositivos que alejan los rayos exteriores del eje central y al hacerlo, añaden divergencia al haz, a estas lentes se le llaman divergentes. En la figura 3 los rayos paralelos entran a la lente y al salir parecen divergir de $F2$; aun así, ese punto se toma como punto focal. Cuando un haz paralelo de rayos atraviesa una lente convergente, el punto hacia el cual converge (o cuando atraviesa una lente divergente, el punto del cual diverge) es el punto focal de la lente [4].

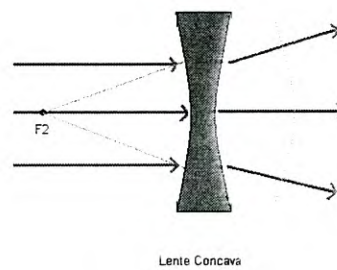


Figura 3. Divergencia de un grupo de rayos paralelos, donde $F2$ es el punto focal.

En el presente sistema experimental se utilizó un objetivo óptico 20X, porque el punto focal se encuentra a una distancia de 5mm, por lo que a esta distancia se puede maniobrar el extremo de la fibra óptica Monomodo sin dañar la lente ni la fibra al hacer contacto una con otra. Al utilizar otro tipo de objetivo óptico el punto focal estaría mas cerca de la lente, lo cual se dificulta para centrar la fibra en el punto focal y provocarse daños al chocar una con otra.

El objetivo óptico tiene una lente convexa, entonces el haz del LASER pasa por esta lente, provocándose un haz convergente, por lo tanto este haz se enfoca con precisión sobre la fibra óptica. Es decir, la fibra óptica se colocó en el punto focal de la lente convexa del objetivo óptico con ayuda de una base 3D, la cual cuenta con tornillos de precisión para movimientos en los ejes X, Y y Z. De esa manera se obtuvo una mejor recepción de potencia óptica, aprovechando al máximo la potencia del LASER.

4.- FIBRAS OPTICAS

Las fibras ópticas son guías de onda para la luz, las cuales están construidas de un núcleo y un revestimiento que rodea al núcleo como se observa en la figura 4. El núcleo y revestimiento están hechos de materiales transparentes, ya sea de vidrio o plástico, siendo el índice de refracción del revestimiento menor que el del núcleo, lo cual provoca que la luz salgan del núcleo para ser refractados de nuevo hacia él, dándose la propagación de la luz dentro de la fibra óptica.

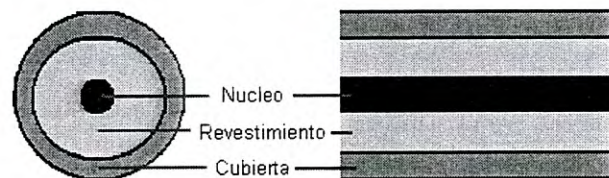


Figura 4. Corte transversal y lateral de una Fibra Óptica.

Las fibras ópticas se utilizan por lo general en sistemas de comunicaciones, al aplicar en un extremo de la fibra una fuente de luz modulada y en el otro extremo conectar un fotodetector, este sistema básico se muestra en la figura 5. La fuente de luz puede ser un diodo emisor de luz (LED) o un diodo LASER (LD), debiéndose de encenderse o apagarse para hacer que conmute entre los dos niveles de potencia distintos para la transmisión digital. Las señales analógicas se pueden transmitir de manera digital por

medio de la modulación por codificación de pulsos (PCM), la cual consiste en designarle un valor binario a cada nivel de la señal analógica. En esencia, una conversión analógica a digital de un tipo especial en donde la información contenida en las muestras instantáneas de una señal analógica está representada mediante palabras digitales en un flujo serial de bits [5].

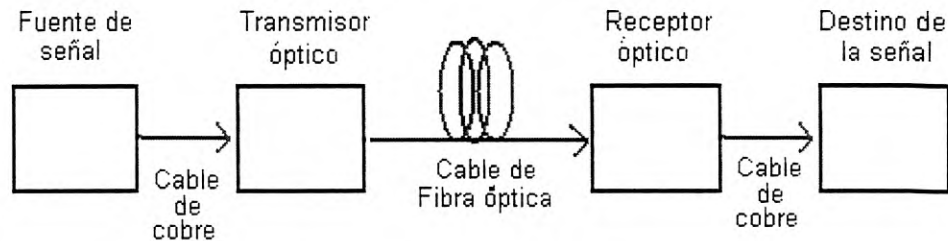


Figura 5. Sistema básico de comunicaciones por fibra óptica.

La fibra óptica se utiliza como un sustituto del cable de cobre como son el cable coaxial o par trenzado, así como un enlace por microondas punto a punto. Tienen muchas aplicaciones como en sistemas de comunicaciones telefónicas, de televisión y redes de computadoras. Cuenta con ventajas sobre el cable de cobre, una de ellas es que tienen mayor ancho de banda que el coaxial, dando mayor tasa de transmisión de datos, este ancho de banda permite multiplexar más señales. Se pueden construir con menores pérdidas que los cables de cobre, incrementando la distancia permisible entre repetidores y amplificadores.

Una ventaja más ante el cable eléctrico es que las señales que se transmiten dentro de una fibra, no llevan corrientes eléctricas, son inmunes a la diafonía (crosstalk) entre cables y la interferencia electromagnética desde otras fuentes. Es decir, que no afecta a la señal que se transmite por una fibra al estar junto a otra fibra, siendo lo contrario en un cable de cobre. Por la misma razón las fibras ópticas son útiles donde interesan las comunicaciones seguras, dado a que no se puede sacar una derivación sin primero tener que romperla o causar una interrupción evidente.

Las ventajas en tamaño y peso sobre el cable eléctrico, el costo depende de la aplicación, puede ser más barato que el cable coaxial pero más caro que el par trenzado. En aplicaciones de larga distancia de mayor ancho de banda, el costo está a favor de la fibra óptica. No puede sustituir al cable de cobre en el caso de la transmisión de potencia, dado a que la fibra trabaja en escala de miliwatts y son estrictamente para la transmisión de información y no de energía.

La fibra óptica tiene muy poca resistencia mecánica, por ello se encierra en una cubierta protectora. Se pueden incluir dos o más fibras en un cable para lograr un mayor ancho de banda y redundancia en caso de que se rompa una fibra. También es más fácil construir un sistema full-duplex, el cual consiste en dos fibras, una para transmitir y otra para recibir.

El funcionamiento de las fibras ópticas se basa en la reflexión total interna. En la figura 6 se muestra la refracción y la reflexión total interna, donde la transmisión de la luz dentro de la fibra se basa en el ángulo de incidencia y ángulo crítico, así como los índices de refracción del núcleo y revestimiento, donde el índice de refracción se expresa como:

$$n = \frac{c}{v} \quad (3)$$

Donde:

n = índice de refracción de un medio.

c = velocidad de la luz en el espacio libre.

v = velocidad de la luz en el medio.

Teniendo que la velocidad de propagación de cualquier onda electromagnética en un medio se relaciona con la constante dieléctrica:

$$\epsilon_r = \left(\frac{c}{v}\right)^2 \quad (4)$$

Donde:

ϵ_r = permitividad relativa, conocida también como la constante dieléctrica del medio.

Al combinar las dos ecuaciones anteriores se obtiene una relación simple entre el índice de refracción y la constante dieléctrica:

$$n = \sqrt{\epsilon_r} \quad (5)$$

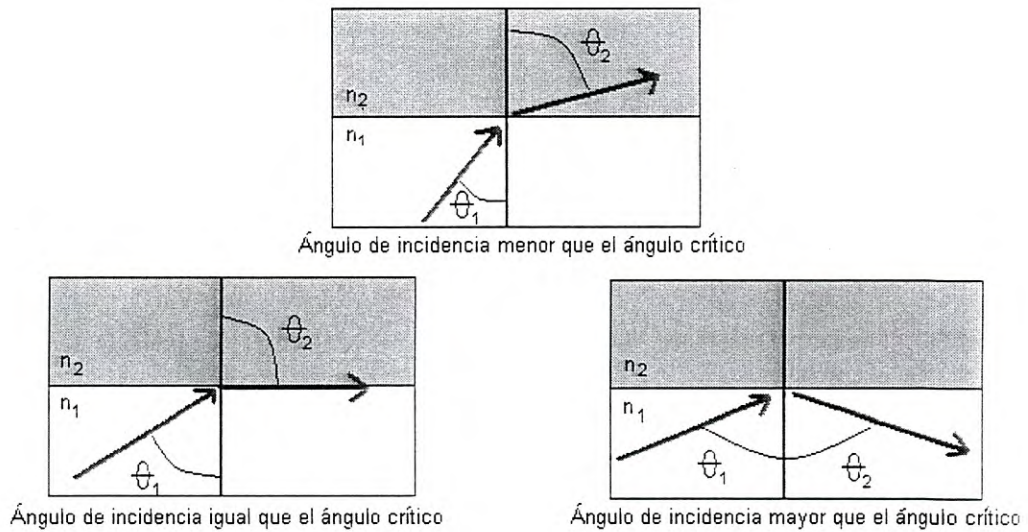


Figura 6. Refracción y reflexión total interna (n_1 mayor que n_2).

La apertura numérica (N.A.) de una fibra óptica tiene una estrecha relación con el ángulo crítico o ángulo límite, se utiliza en las especificaciones de la fibra y los componentes que funcionan con ella [6]. La apertura numérica se define como el indicador del ángulo máximo con que un haz de luz puede ingresar a la fibra para que se produzca la reflexión total interna, la cual está dada por:

$$N.A. = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} \quad (6)$$

Esta ecuación supone que la luz entra a la fibra desde el espacio libre [7].

El ángulo de aceptación total es dos veces el que se determina mediante la apertura numérica como se observa en la figura 7; cualquier luz que entra al cono de aceptación se reflejara internamente y podría propagarse por la fibra óptica. La luz que entra desde el exterior del cono de aceptación se refracta hacia el revestimiento y no se propaga la luz dentro de la fibra óptica.

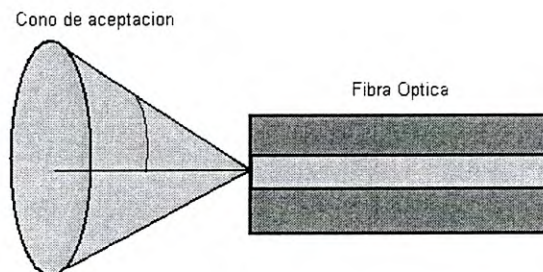


Figura 7. Cono de aceptación.

La fibra óptica es una guía de onda, la luz se propaga en varios modos específicos. Si el diámetro de la fibra es relativamente grande, la luz que se introduce en ella a diferentes ángulos excitará diferentes modos, por otra parte, si el diámetro es pequeño, podría soportar solo un modo o ninguno.

La propagación multimodo causará dispersión, del mismo modo que en las guías de ondas. La dispersión da como resultado la diseminación del impulso y limita el ancho de banda utilizable por la fibra. La fibra monomodo tiene dispersión mucho menor en comparación con una multimodo, pero su fabricación es más costosa, además posee una apertura numérica pequeña, lo cual provoca que sea más difícil de acoplar la luz hacia dentro y fuera de la fibra óptica. El diámetro máximo permisible para una fibra monomodo varía con la longitud de onda de la luz que se emplea y está dado por la siguiente ecuación:

$$r_{max} = \frac{0.383\lambda}{N.A.} \quad (7)$$

Donde:

r_{max} = radio máximo del núcleo.

λ = longitud de onda.

N.A. = Apertura numérica.

Las fibras ópticas se dividen en monomodo y multimodo, esto depende del tamaño del diámetro de su núcleo, pero también se dividen en fibras con índice de refracción escalonado y fibras con índice de refracción gradual. La primera nombrada es debido a que el índice de refracción cambia de manera abrupta entre el núcleo y el revestimiento. En cambio, la segunda nombrada es una fibra multimodo, pero el índice de refracción disminuye poco a poco desde el centro del núcleo, así que la luz viaja más rápido cerca del exterior. Las fibras con índice gradual tienen menor dispersión que la fibra multimodo con índice escalonado, aunque se prefieren las fibras monomodo para la mayor parte de las aplicaciones importantes. En la figura 8 se muestran los cortes transversales de los tres tipos de fibras ópticas.

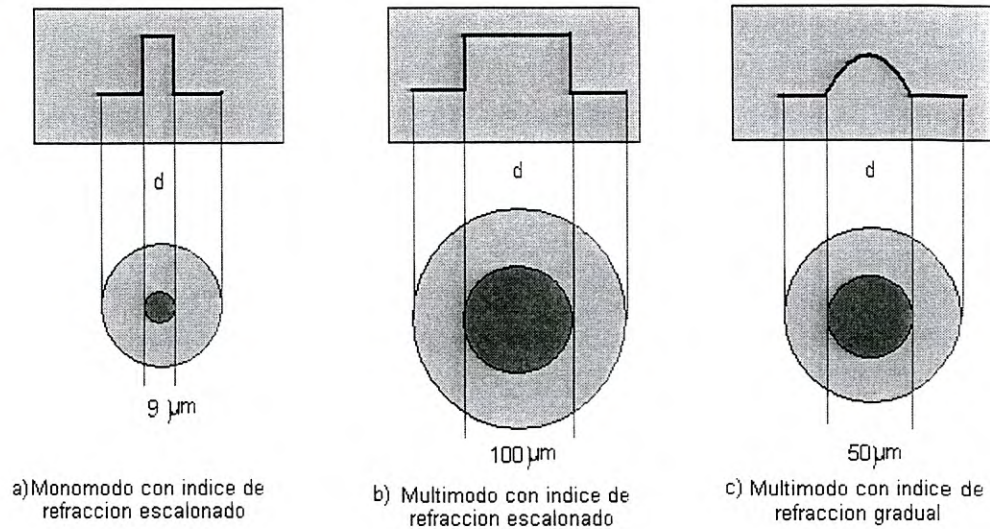


Figura 8. Tipos de Fibra Óptica: a) Monomodo, b) Multimodo índice de refracción escalonado y c) Multimodo índice refracción gradual. (las dimensiones son representativas).

La mayoría de las fibras ópticas están fabricadas de vidrio de alta calidad, pero algunas fibras multimodo de bajo costos están hechas de plástico acrílico, estas son diseñadas para aplicaciones de cortas distancias. Las pérdidas de señal en estas fibras son mucho mayores que en las de vidrio, pero carece de importancia en enlaces cortos, en la escala de metros o menos. Las fibras monomodo y multimodo de índice refractivo gradual siempre están hechas de vidrio, algunas fibras multimodo de índice refractivo escalonado pueden estar hechas de plástico, con un núcleo aproximado de 1mm.

La dispersión se debe a la propagación de más de un modo, resulta del hecho de que en la propagación multimodo, la señal viaja más en algunos modos que en otros. En la figura 9 se muestra el efecto de la propagación multimodo en el tiempo que tarda una señal en ir de un extremo de la fibra a otro.

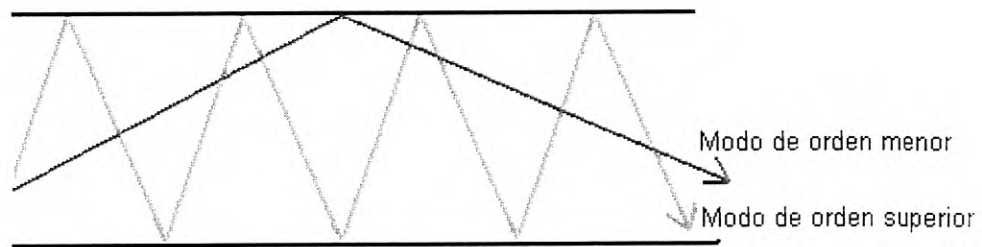


Figura 9. Propagación Multimodo.

Las fibras monomodo están libres de dispersión modal. Las fibras multimodo con índice de refracción gradual reducen la dispersión, aprovechando el hecho de que las señales se propagan en los modos de orden superior pasan más tiempo cerca del exterior del núcleo que las que se propagan en los modos de menor orden. La reducción del índice de refracción hacia el exterior del núcleo da como resultado mayor velocidad en esta región, así que los componentes de la señal con modo de orden superior, que tienen que viajar más, se propagan con más rapidez. El resultado que la dispersión se reduce en gran medida, aunque no se elimina.

Las fibras monomodo exhiben cierta dispersión, conocida como dispersión intramodal, debido a que toma lugar dentro de un modo de propagación. También se llama dispersión cromática, porque resulta de la presencia de diferentes longitudes de onda. La longitud de onda de luz visible corresponde a su color. En los sistemas de comunicaciones ópticas, la luz infrarroja es mucho más común que la luz visible.

Una forma de dispersión intramodal se llama dispersión del material, debido a que depende del material del núcleo. Un haz de luz, incluso la luz LASER consiste en más de una longitud de onda, y las longitudes de onda diferentes se propagan a velocidades distintas en el vidrio. Este efecto es el mismo que hace que la luz blanca se descomponga al pasar por un prisma. Las longitudes de onda que corresponden a los distintos colores del espectro visible tienen diferentes velocidades de propagación dentro del vidrio, dando como resultado índices de refracción diferentes. Por lo tanto se refractan a diferentes ángulos, como se muestra en la figura 10. En una fibra óptica, la diferencia en velocidad de propagación para las diferentes longitudes de onda hace que tomen cantidades variables de tiempo para propagarse por la fibra.

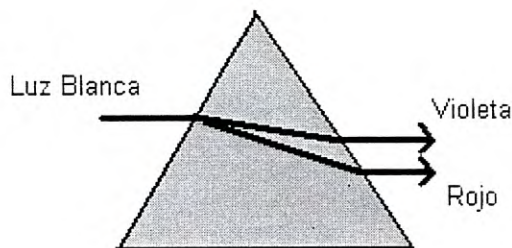


Figura 10. Dispersión cromática en un prisma.

La dispersión de guía de onda es otra dispersión en las fibras ópticas monomodo, esta resulta del hecho de que parte de la energía se propaga en el revestimiento y no en el núcleo. Como los dos componentes de la fibra tienen índices de refracción diferentes, la

luz se propaga a distintas velocidades en los dos. La dispersión se incrementa con el ancho de banda de la fuente de luz, y tomando en cuenta que en sistemas donde es de gran interés esta dispersión, entonces se utiliza como fuente de luz el LASER y no los LED, debido a que la anchura de línea es más reducida.

La dispersión aumenta de acuerdo a la longitud de la fibra, puesto que una diferencia en la velocidad de las dos señales produce una diferencia en el tiempo requerido para llegar al extremo de la fibra, esta diferencia es proporcional a la longitud de la fibra. Mientras más grande sea el ancho de banda de la señal, mayor es el efecto de una determinada cantidad de dispersión. La dispersión en una fibra monomodo se expresa en unidades de tiempo y no de ancho de banda, entonces la dispersión es la duración del pulso de salida cuando se aplica a la entrada un pulso de luz extremadamente corto.

La dispersión en una fibra esta dada en picosegundos por nanómetros de la anchura de línea de la fuente por kilómetro de longitud de la fibra óptica, puede definirse una constante de dispersión cromática D_c y la dispersión por kilómetro, entonces:

$$D = D_c \Delta\lambda \quad (8)$$

Donde:

D = dispersión por kilómetro en ps/km.

D_c = dispersión cromática en ps/nm/km.

$\Delta\lambda$ = anchura de línea de la fuente.

Entonces la dispersión total es:

$$\Delta t = D l \quad (9)$$

Donde:

Δt = dispersión total en picosegundos.

D = dispersión de la fibra en ps/km.

l = longitud de la fibra en km.

Para una fibra óptica de vidrio común existe una pérdida con la longitud de onda, donde el pico es prominente aproximadamente a 1400nm, se debe a la presencia de iones de agua en el vidrio, debe de evitarse la operación cerca de esta longitud de onda, esto se observa en la figura 11. La pérdida en las fibras de vidrio es mínima a longitudes de onda alrededor de los 1550nm, en la región infrarroja del espectro. En las fibras de plástico tienen un mejor desempeño a 660nm, que corresponden a la luz roja visible. Las pérdidas son un factor importante que limita la distancia entre repetidores y amplificadores, ya que incluso con los diodos LASER la potencia de luz puede acoplarse en la fibra en la escala de miliwatts.

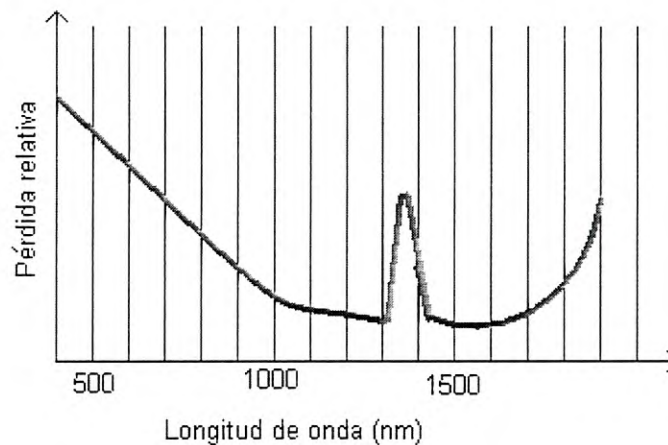


Figura 11. Variación de pérdida con la longitud de onda en una fibra óptica de vidrio.

Las fibras ópticas no se utilizan siempre a longitud de onda de pérdida mínima, muchos sistemas de corto alcance utilizan una longitud de onda de aproximadamente 820nm, debido a que los LED a esta longitud de onda son menos costosos que los diseñados para longitudes de onda mas grandes. Los enlaces de alta tasa de transmisión de datos y larga distancia podrían estar más limitados por la dispersión que por la pérdida de potencia, pueden operar a la longitud de onda de dispersión mínima de 1300nm. Otra posibilidad es modificar la fibra cambiando su composición o la manera en que varía el índice de refracción para acercar su longitud de onda de dispersión cero a la longitud de onda de pérdida mínima.

La mecánica de las fibras ópticas es muy importante, ya que doblar mucho una fibra incrementa las pérdidas, causando que parte de la luz se encuentre con el revestimiento a menos del ángulo crítico, esto se muestra en la figura 12:

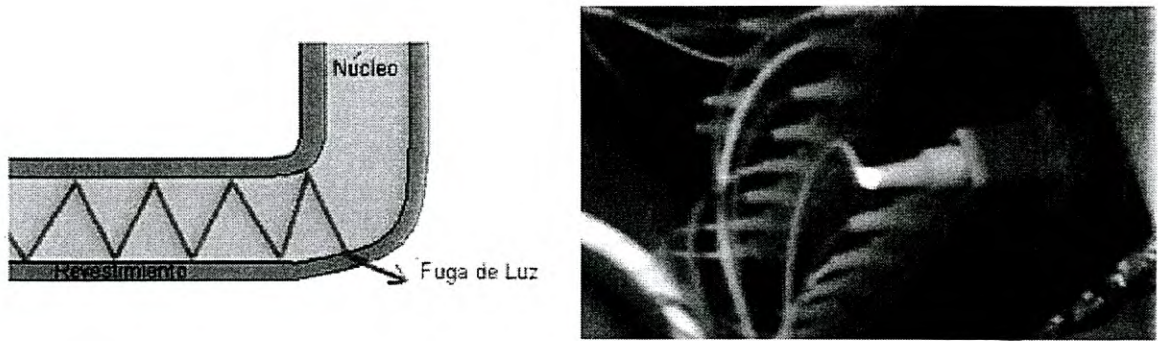


Figura 12. Pérdidas por causa de la curvatura.

También las pérdidas varían mucho de acuerdo al tipo de la fibra, las fibras de plástico podrían tener pérdidas de cientos de decibeles por kilómetro, las fibras de vidrio multimodo con índice de refracción gradual tienen pérdidas de unos 2 a 4 decibeles por kilómetro, en tanto las fibras monomodo tienen pérdidas de 0.4 dB/km o menos. Las pérdidas de más consideración son en los empalmes y conectores. Estas pérdidas resultan de la desalineación axial o angular, espacios vacíos entre las fibras, mismos que dan lugar a la dispersión de la luz, así como superficies rugosas o ásperas en los extremos de la fibra permiten que escape la luz en varios ángulos. La figura 13 muestra estos problemas.

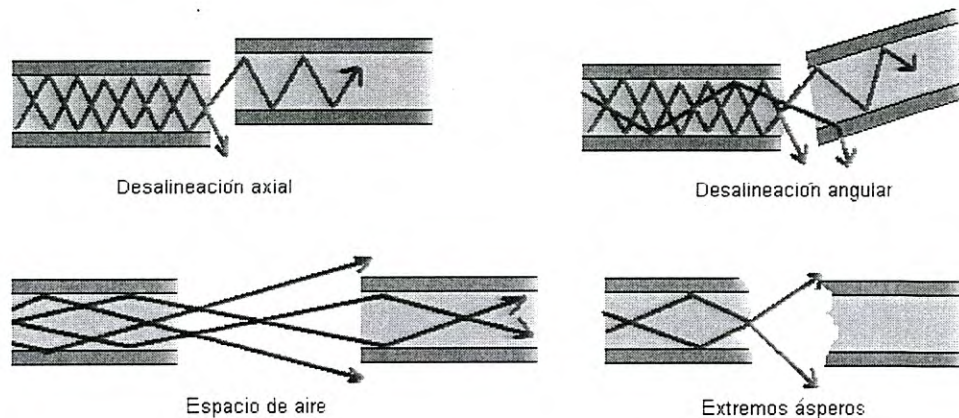


Figura 13. Pérdidas por acoplamiento.

El acoplamiento de la fibra a fuentes de luz y fotodetectores también genera pérdidas, en particular cuando tiene que ver con incompatibilidades en la apertura numérica o en el tamaño de las fibras ópticas. Algunas fuentes de luz tienen un tramo de fibra óptica, si esta fibra se une a con otra con un diámetro más pequeño o menor apertura numérica, se perderá parte de la luz. En el caso de acoplar una fibra más pequeña, parte de la luz de

la primera nunca entra a la segunda, pero si la segunda fibra tiene igual o mayor diámetro pero una apertura numérica más pequeña, parte de la luz que entra ya no se propaga, esto se muestra en la figura 14:

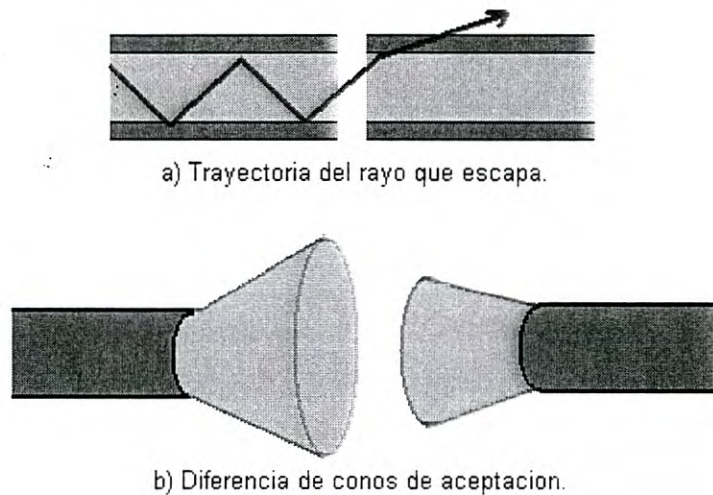


Figura 14. Pérdida debida al acoplamiento con fibra con menor apertura numérica.

La figura 14 (a) muestra un rayo que entra a la segunda fibra, pero después escapa del núcleo atravesando el revestimiento, provocándose la pérdida de la señal, en la figura 15 (b) se ilustra el problema mostrando el cono de aceptación para cada fibra, la primera fibra emite luz en un ángulo más grande que la que acepta la segunda fibra [6].

5.- GUIA DE ONDA

Una guía de onda óptica es un dispositivo para conducir la luz de un punto a otro, por medio de reflexión total interna en un medio transparente y con un índice de refracción mayor que al del entorno. Las guías de onda son elementos básicos de los sistemas y circuitos optoelectrónicos, por un lado sirven como elementos pasivos para llevar la luz de un punto a otro como un cable eléctrico, y por otro lado sirven como elementos activos para actuar sobre la luz cuando se construyen de materiales con propiedades electroópticas o no lineales. Los rayos de luz incidente, reflejado y refractado se puede observar en la figura 15, se tienen dos medios con diferentes índices de refracción n_1 y n_2 , donde n_2 es mayor que n_1 , entonces, el rayo incidente en la interfaz da lugar a un rayo refractado que se propaga al otro lado de la interfaz. Es decir, penetra al medio con índice de refracción n_2 , también se tiene un haz reflejado, el cual se mantiene en el medio con índice refracción n_1 , se refleja cuando choca en la interfaz del medio n_2 , la

dirección de este rayo reflejado no depende de los medios y forma una bisectriz de los ángulo formados por los rayos incidente y reflejado.

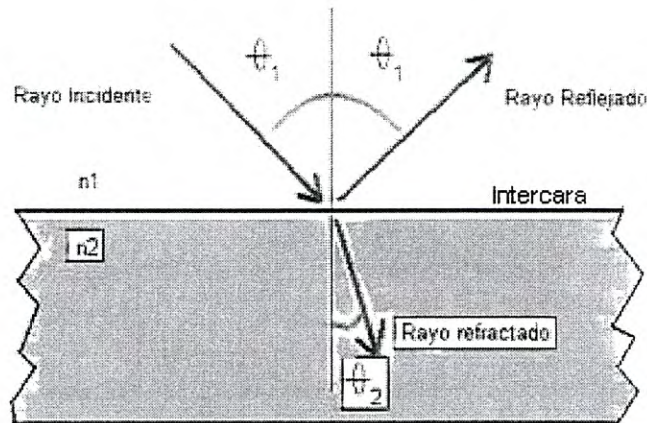


Figura 15. Rayo Incidente, Reflejado y Refractado en una guía de onda plana con índices de refracción $n_2 > n_1$.

La dirección del rayo refractado depende de los medios n_1 y n_2 , en relación a la ley de Snell para ángulos, la cual está dada por:

$$\frac{\text{sen } \theta_1}{\text{sen } \theta_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad (10)$$

Donde θ_1 y θ_2 son ángulos entre el rayo correspondiente y la normal a la intercara. Como el índice de refracción depende de la longitud de onda, la refracción se produce a distintos ángulos para cada longitud de onda. La intensidad de la luz reflejada I_R es proporcional a la intensidad de luz incidente I_0 :

$$I_R = R I_0 \quad (11)$$

El coeficiente de proporcionalidad R , es la reflectancia de la intercara, el cual depende de la polarización de la luz, el ángulo de incidencia y los índices de refracción de los dos medios. Para la incidencia normal a la intercara $\theta_1 = 0$ entre dos medios transparentes de reflectancia es simplemente:

$$R = \left(\frac{n-1}{n+1} \right)^2 \quad (12)$$

Donde $n = n_2/n_1$ es el índice de refracción relativo del medio 2 respecto al 1.

Cuando n_1 es mayor que n_2 y el ángulo de incidencia es mayor que el ángulo límite, θ_{lim} esta dado por:

$$\text{Sen}\theta_{lim} = n = \frac{n_2}{n_1} \quad (13)$$

Entonces, no se produce el fenómeno de reflexión total interna, el cual se usa para propagar la luz dentro de las fibras ópticas o en este caso sobre las guías de onda. La guía de onda más sencilla es una capa delgada con un índice de refracción mayor que el del substrato en el cual la luz se propaga en su interior a través de múltiples reflexiones internas totales en las intercaras de la capa. Entonces se toma en cuenta la intensidad de luz transmitida al segundo medio I_T , la cual es proporcional a la intensidad de la luz incidente I_0 :

$$I_T = TI_0 \quad (14)$$

Donde el coeficiente de proporcionalidad T se le llama transmitancia, por lo tanto la luz que no es reflejada en la intercara es transmitida a través de la guía de onda, la transmitancia de la intercara esta dada por:

$$T = \frac{I_T}{I_0} = \frac{I_0 - I_R}{I_0} = 1 - R \quad (15)$$

Los modos de propagación en las guías de onda de pueden observar en la figura 16, donde la guía de onda plana integrada esta formada por una capa transparente de índice de refracción n_2 , la cual es mayor que la otra capa con n_1 , así como una capa de substrato n_s . Cuando un haz de luz llega a la intercara con la capa superior, este se separa en dos haces, uno será reflejado de nuevo hacia el interior de la guía de onda, y el otro será refractado a la capa superior. Lo mismo ocurre en la intercara interior n_2 , de modo que el rayo de luz se reflejara varias veces entre las dos capas internas hasta que la luz se pierda debido a que la luz se escapa a las zonas de menor índice de refracción.

Cuando el ángulo que forma el haz con la normal a la intercara Θ es mayor que los ángulos límite para las intercaras superior e inferior, toda la luz es reflejada y el rayo refractado desaparece. Por lo tanto no hay perdidas, salvo por la absorción o esparcimiento de la guía de onda, lográndose así propagarse el haz de luz a largas distancias.

Una condición para que el haz de luz se propague dentro de la guía de onda es que el ángulo Θ sea mayor que los dos ángulos críticos ($\Theta > \Theta_1$ y $\Theta > \Theta_s$).

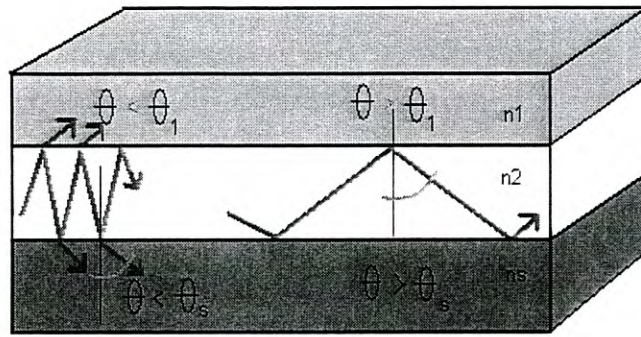


Figura 16. Rayos de luz no guiados y guiados en la guía de onda.

Para calcular la potencia de luz de entrada a la guía se considera la teoría de haces gaussianos, donde se considera que la amplitud del campo inyectado presenta el comportamiento siguiente:

$$|E(x, y, z)| = E_0 \times \frac{\omega_0}{\omega(z)} \times \exp\left[\frac{-r^2}{\omega^2(z)}\right] \quad (16)$$

Donde:

E_0 es la amplitud del haz en el origen ($z=0$).

ω_0 es el parámetro gaussiano en $z=0$, generalmente llamado "spot size" porque este corresponde al haz en el cual la mayor parte de energía está concentrada (criterio e^{-2} para la potencia).

$\omega(z)$ considera la divergencia del haz.

$$\omega^2(z) = \omega_0^2 \left[1 + \left(\frac{z}{z_0} \right)^2 \right] \quad (17)$$

z_0 es una constante física. En nuestro caso, $z_1 \gg z_0$, por lo que es posible reescribir:

$$\omega(z \gg z_0) = \frac{\omega_0 \cdot z}{z_0} = \frac{\lambda_0 \cdot z}{\pi \cdot n \cdot \omega_0} \quad (18)$$

La distribución del campo eléctrico se ensancha al propagarse en z como se muestra en la figura 17. Sin embargo, bajo la hipótesis de un medio no disipador o amplificador, la conservación de la energía impone una reducción de la amplitud de la distribución del campo, en un factor $\omega_0/\omega(z)$.

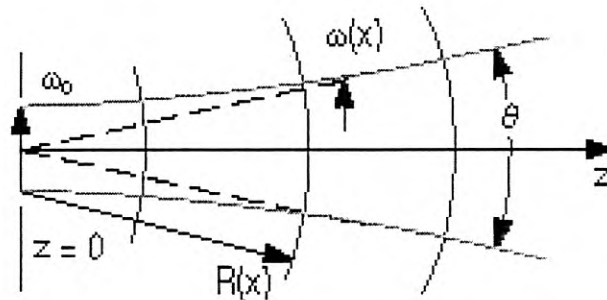


Figura 17. Ensanchamiento de un haz gaussiano al tiempo de su propagación y aproximación lineal.

La expresión de la potencia óptica transportada por la onda electromagnética óptica se determina por la expresión siguiente:

$$P = \frac{1}{2\eta} \cdot E \cdot E^* = \frac{E_0^2}{2\eta} \cdot \frac{\omega_0^2}{\omega^2} \exp\left[\frac{-2r^2}{\omega^2}\right] \quad (19)$$

Donde η la impedancia del medio que se consideró igual a la del vacío 367.7Ω . La distribución de la potencia es siempre gaussiana, pero el parámetro cambia en un factor de $\sqrt{2}$.

Sin embargo, es necesario trasladar a z_0 los perfiles medidos en $z_1=2\mu\text{m}$. Para corregir la divergencia del haz se emplearon las expresiones siguientes:

$$\omega_1 = 2a \quad (20)$$

$$\omega_0 = \frac{\lambda_0 \cdot z_1}{2\pi a} \quad (21)$$

La gaussiana obtenida en $z=0$ es mucho más angosta pero tiene una amplitud de $1/K$ con [9].:

$$K = \frac{\omega_0^2}{2\eta\omega^2} \quad (22)$$

Para calcular el número de modos soportados en que se puede propagar en una guía de onda esta dada por [10]:

$$M = 2 \frac{h}{\lambda} (N.A) \quad (23)$$

Donde:

M = número de modos ($M \leq 2.405$ se considera Monomodo y $M > 2.405$ se considera Multimodo).

h = Altura de la guía

λ = longitud de onda utilizada.

$N.A.$ = Apertura numérica.

Si el ángulo de luz de incidencia sobre una guía de onda se aumenta suficientemente, se alcanza un ángulo crítico, por lo que la onda de incidencia está reflejada totalmente. La onda transmitida se atenúa rápidamente en el segundo medio [13], esta dado por:

$$(\theta_i)_{\text{critico}} = \text{sen}^{-1} \frac{n_2}{n_1} \quad (24)$$

Solamente los ángulos de incidencia más grandes que este ángulo crítico darán lugar a propagar modos dentro de la guía de onda tipo ARROW.

El campo eléctrico que se propaga dentro de una guía de onda no depende del tiempo ni de la distancia de propagación, esto se puede observar en la figura 18, donde el modo fundamental $m=0$ corresponde a los rayos de luz propagándose paralelos a las intercaras de la guía de onda, la intensidad de luz es máxima en el centro de la guía.

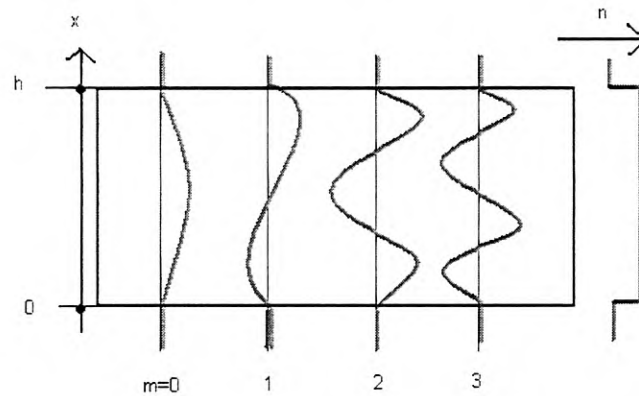


Figura 18. Distribución del campo eléctrico para los diferentes modos de una guía de onda plana.

Se considera que el número de modos es finito y este va decreciendo conforme se disminuye la anchura de la guía de onda, pudiéndose encontrar guías de onda con un sólo modo de propagación o incluso ninguno. Para el caso de modos superiores, la intensidad de luz oscila con un número de *nodos* es igual a m , estos *nodos* se definen como los puntos del espacio donde la intensidad del campo eléctrico es cero. La luz viaja con más velocidad en materiales con menor índice de refracción que en materiales con mayor índice de refracción y esta aumenta con m .

El grosor de las capas que envuelven a una guía de onda deben de ser mayor que la profundidad de penetración de la luz que se propaga sobre ella, con el fin de que no haya pérdidas y para asegurar así que la reflexión total interna se lleve a cabo.

La intensidad de luz que sale de la guía de onda se denomina onda evanescente, la cual se utiliza en algunos dispositivos para acoplar la onda de una guía a otra mediante dispositivos denominados acopladores ópticos. Asimismo, la velocidad de propagación de la luz dentro de la guía de onda disminuye conforme aumenta m , esto se basa en que cuando un rayo de luz que se propaga sobre la guía tiene mayor inclinación tendrá mayor número de reflexiones en las intercaras, por lo tanto recorrerán una mayor distancia.

Las guías de onda se fabrican con materiales con una energía del borde de absorción mayor que la energía de los fotones de la luz para asegurar su transparencia. Dentro del espectro visible suelen utilizarse silicio, dieléctricos, semiconductores o polímeros [8].

La guía de onda ARROW caracterizada se diseñó y fabricó en el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE) en Puebla, Mex. Se fabricó con un núcleo de

Nitruro de Silicio (Si_3N_4) y revestimiento de Oxido de Silicio (SiO_2), los cuales presentan índices de refracción $n_1=1.97$ y $n_2=1.48$ respectivamente. La figura 19 muestra la guía caracterizada vista en un microscopio electrónico.

Para el proceso de fabricación se emplearon obleas de silicio tipo n de resistividad $\rho=2-5$ $\Omega\text{-cm}$, orientación 100 μm y grosor 5 μm .

Las películas del núcleo y revestimiento fueron obtenidas mediante la técnica de depósito químico en fase de vapor asistido por plasma (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition- PECVD). Se les realizó un pulido de las caras de la guía óptica utilizando abrasivos, esto fue con la finalidad de eliminar las fracturas y grietas para asegurar una buena inyección de la luz en la misma [10].

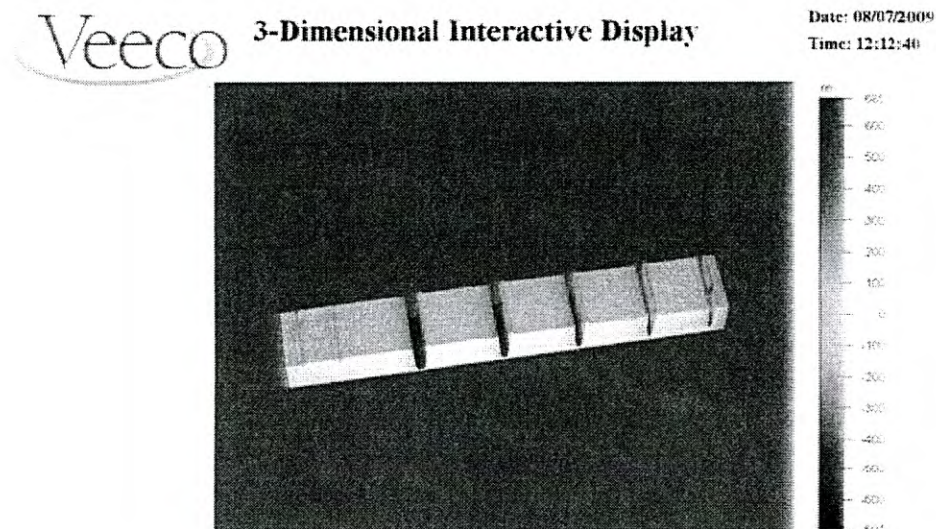


Figura 19. Guía de onda tipo ARROW vista en un microscopio electrónico.

Las guías de ondas tipo ARROW se fundamentan en la reflexión total interna de un haz de luz en la interface de dos películas dieléctricas con diferentes índices de refracción, donde el índice de refracción del núcleo n_1 debe ser mayor que del revestimiento n_2 [1]. La figura 20 muestra la guía de onda bajo prueba montada sobre una base especial, la cual se diseñó y se mando a fabricar.

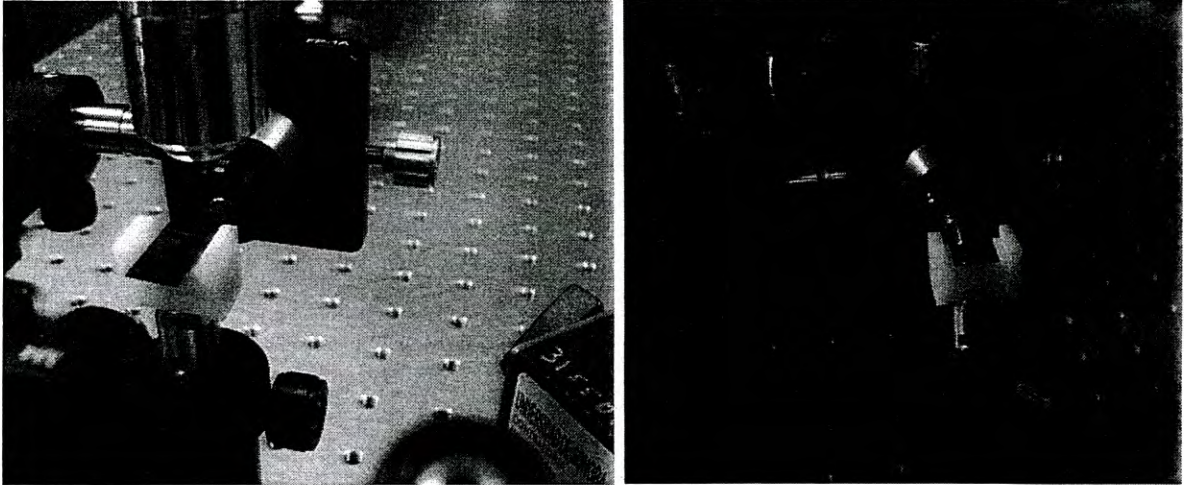


Figura 20. Guía de Onda ARROW montada sobre una base especial.

6.- FOTODETECTOR

En los sistemas de comunicaciones ópticas, se utilizan fotodetectores de dos tipos: diodos PIN y fotodiodos de avalancha APD.

Como fotodetector, el diodo PIN aprovecha su amplia región de agotamiento, en la que los fotones forman pares de electrón-hueco. Si un fotón tiene suficiente energía para mover un electrón de la banda de valencia a la de conducción, puede, al interactuar con un electrón, dar lugar a un electrón libre, además, como este diodo está polarizado a la inversa, el electrón libre y el hueco migran en direcciones opuestas, así que se forma una corriente proporcional a la potencia de luz [6].

Un fotodetector PIN se muestra en la figura 21, el cual es un dispositivo optoelectrónico que detecta las señales de ondas de luz que recibe y la convierte en una señal eléctrica con un nivel apropiado para receptores electrónicos. Se utilizan en conversiones óptico-eléctricas. Un amplificador de ganancia variable o amplificadores limitadores son usados para dar un nivel de señal al circuito de decisión. Esto significa que es un dispositivo de tres capas de diferentes materiales: tipos p , i (intrínseco) y n , el material intrínseco tiene un bandgap bajo, siendo éste el que absorbe los fotones que entran al dispositivo, donde el bandgap de mencionada capa determina las longitudes de onda de luz más grandes que pueden ser absorbidas. La estructura dopada causa un alto campo eléctrico que puede ser convertida al cruzar la capa del material intrínseco. Cuando un fotón se absorbe, un hueco y un electrón se crean en esta capa. El barrido del campo eléctrico de estas dos partículas cargadas hacia afuera que se recogerán en un circuito eléctrico

externo, así el fotodetector PIN es un convertidor de fotones a electrones. La cantidad de corriente producida por unidad de entrada de potencia es llamada respuesta del detector.

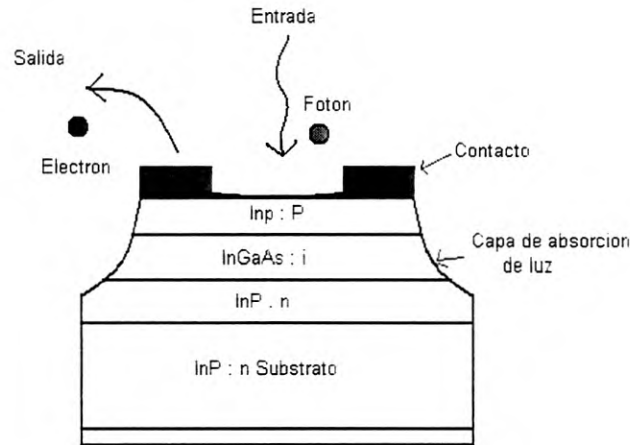


Figura 21. Diagrama de un Fotodetector PIN.

Los materiales comunes para los detectores PIN es un material intrínseco tipo i de Indio Galio y Arsénico (InGaAs) sin impurificar, rodeado por dos materiales dopados tipo p y n de Indio y Fosforo (InP). Un buen diseño de los fotodetectores pueden convertir cerca del 90% de los fotones recibidos a electrones.

El fotodiodo de avalancha APD también opera con polarización inversa, se polariza justo por debajo de su voltaje de ruptura inversa. La formación de par electrón-hueco es debido a la absorción de un foton de luz entrante que puede iniciar la ruptura por avalancha, creando hasta 100 pares mas electrón-hueco, dado a este efecto, se tiene que este fotodiodo es de alta sensibilidad, alrededor de 5 a 7 dB mayor que el diodo PIN [11].

En los fotodetectores se toma en consideración la corriente de oscuridad, la cual es una fuga de corriente en ausencia de luz, es decir, la corriente inversa normal del diodo. Esta corriente de oscuridad fija un nivel de sensibilidad. Se genera por pares electrón-hueco creados por actividad térmica, la cual se incrementa con la temperatura, teniéndose un valor común aproximado a 0.05 nA a una temperatura de 25°C.

Igualmente, en los fotodetectores se considera la responsividad, la cual es una medida de la sensibilidad del detector a la luz y el tiempo de respuesta del detector, teniendo como unidades los Amper por Watt (AW). Esta característica de los fotodetectores es muy importante en la aplicación de sistemas de alta velocidad, ya que esta limita la tasa máxima de transferencia de datos que se puede utilizar [12].

En este sistema experimental se utilizó un diodo PIN marca Thorlabs modelo PM100 para detectar la cantidad de potencia que se transmite en una guía de onda ARROW.

7.- BASE POSICIONADORA 3D

Las bases posicionadoras 3D se utilizaron para montar y centrar la fibra óptica sobre el punto focal del objetivo óptico 20X, así como para alinear las fibras ópticas con la guía de onda tipo ARROW.

En la figura 22 se muestran las bases posicionadoras, estas bases cuentan con tornillos de precisión, los cuales se giran para tener movimientos en los tres ejes X-Y-Z. En la figura 22 a) se muestra una base donde se montó el objetivo óptico 20X y se centró un extremo de la fibra óptica en el punto focal, esto con el fin de insertar en la fibra la máxima cantidad de potencia óptica suministrada por el LASER HeNe, la figura b) es una base 3D, esta se utiliza para mover la fibra óptica, es decir, sirve para alinear la fibra con la guía de onda, ya que la guía caracterizada es un arreglo de varias guías, donde cada una está separada aproximadamente $25\mu\text{m}$ entre una y otra. La figura c) es una cabeza posicionadora, en ella se montan los extremos de las fibras ópticas, esta cabeza también se puede mover en los tres ejes, por lo que se dificulta aún más para lograr el centrado y alineado de la *FIBRA-GUIA-FIBRA* para obtener la inyección y recepción de las potencias respectivamente, pero con ello se obtienen mejores resultados en estos dos parámetros.

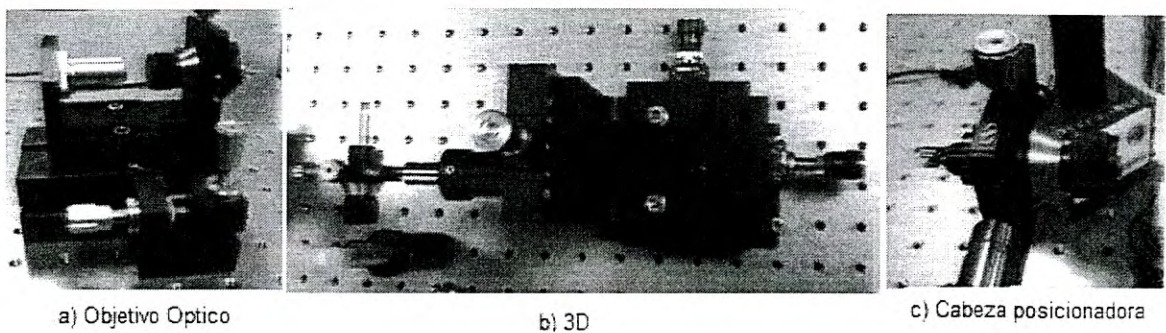


Figura 22. Bases posicionadoras: a) para montar un objetivo óptico, b) base 3D con movimientos X-Y-Z y c) cabeza posicionadora montada en una base 3D.

III.- SISTEMA DE ALINEACIÓN DE UNA GUIA DE ONDA

En este capítulo se describe el arreglo experimental y el análisis de los resultados obtenidos de las pruebas realizadas a la guía de onda tipo ARROW.

1.- INTRODUCCION

En este capítulo se muestra la implementación del sistema experimental para la caracterización de una guía de onda tipo ARROW. Las características de los componentes y dispositivos utilizados son mencionados, así como especificaciones para el montaje, con el fin de lograr la alineación evitando pérdidas de luz al entrar a la guía de onda.

2.- ARREGLO EXPERIMENTAL

En este trabajo se realizó la caracterización de las pérdidas que presenta la guía de onda para conducir la luz con una longitud de onda de 633nm. Se considera a la guía de onda como un elemento pasivo para transportar luz.

En la figura 23 se ilustra el diagrama del sistema experimental implementado y en la figura 24 se observa una fotografía del mismo sistema. En el trabajo se empleó una fuente de luz LASER HeNe marca Research Electro-optics Inc. modelo 30025, con potencia de salida de 1.5mW y longitud de onda de 633nm, una base que contiene un objetivo óptico de 20X y un sistema de posicionamiento 3D para lograr focalizar la luz a un tramo de 0.3m de fibra óptica multimodo 65/125.

Para el sistema de posicionamiento se utilizaron dos bases con movimientos X-Y-Z, con el fin de colocar la fibra multimodo a la entrada y otro tramo del mismo tipo de fibra a la salida de la guía de onda, para inyectar y capturar la luz respectivamente.

La guía de onda se montó sobre una base fija especial. Un microscopio con un objetivo óptico 20X, se utilizó para poder alinear la fibra óptica axialmente sobre la guía de onda, tratando de reducir las pérdidas de potencia. Finalmente, se empleó un fotodetector PIN conectado al medidor de potencia marca Thorlabs modelo PM100, para medir la potencia de salida que presenta la señal óptica que se propaga a través de esta guía de onda.

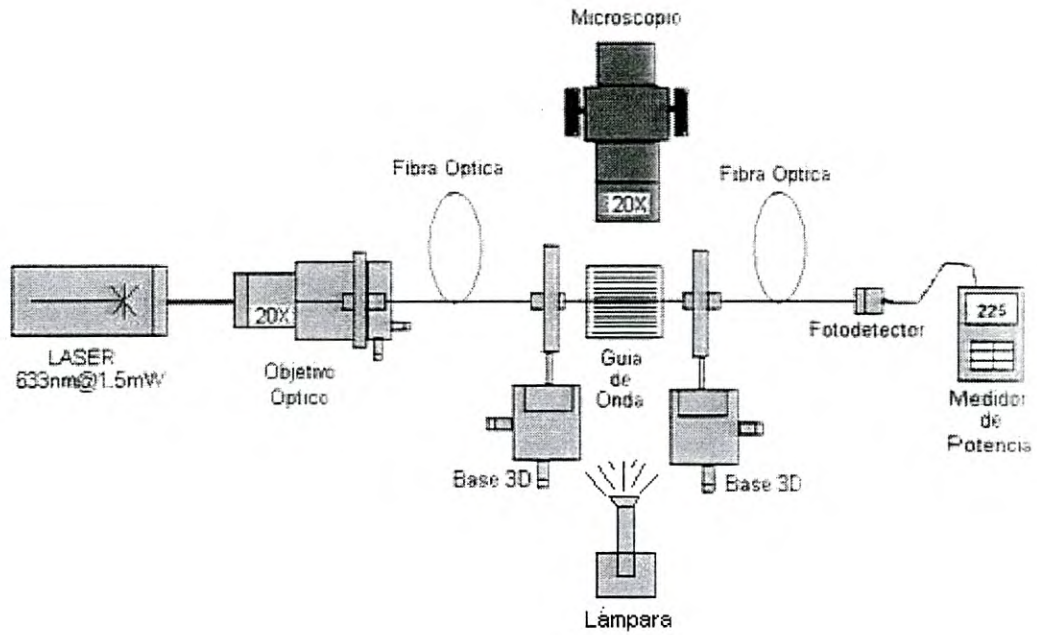


Figura 23. Diagrama del Sistema Experimental para la Caracterización de una Guía de Onda tipo ARROW.

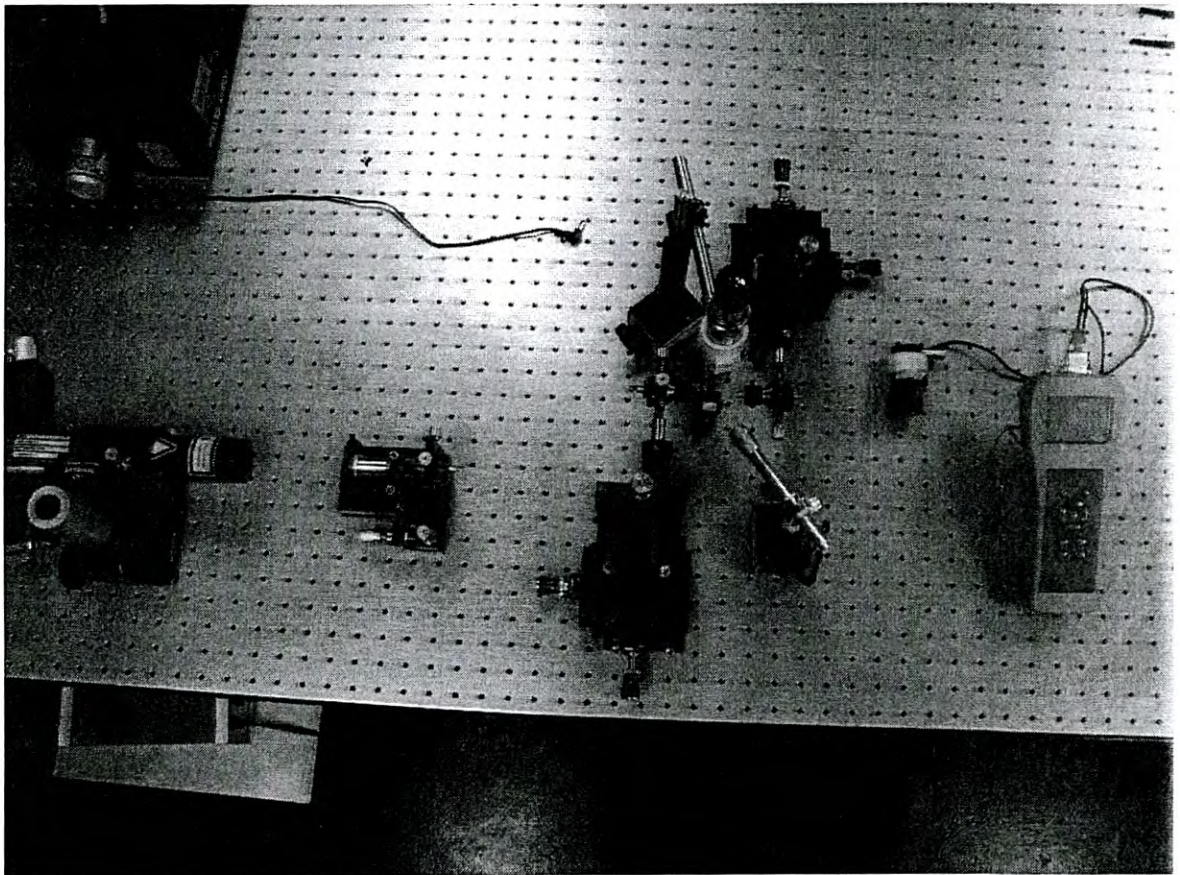


Figura 24. Instrumentación de un Sistema Experimental para la Caracterización de una Guía de Onda tipo ARROW.

3.- ANALISIS DE RESULTADOS

Para realizar una correcta caracterización de la guía de onda tipo ARROW, es necesario considerar los diferentes parámetros con que cuenta, como son: índice de refracción relativo, reflectancia de la intercara, intensidad de luz reflejada, transmitancia, intensidad de luz transmitida y número de modos soportados por la guía, así como la potencia de entrada y salida en el dispositivo.

En la figura 25 se observa como se trasmite la luz del LASER en la fibra óptica habiendo pasado por el objetivo óptico 20X y después en la guía de onda ARROW.

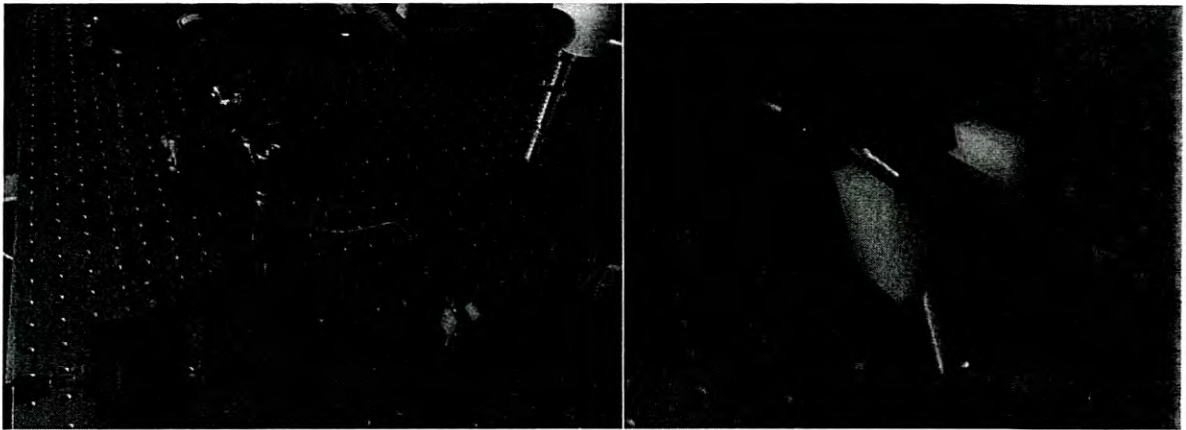


Figura 25. Transmisión de la luz del LASER en la fibra óptica y en la guía de onda ARROW.

La guía de onda con la que se trabajó cuenta con dos capas, las cuales son: un núcleo de Nitruro de Silicio (Si_3N_4) con índice de refracción $n_1=1.97$ y revestimiento de Oxido de Silicio (SiO_2) con índice de refracción $n_2=1.48$. Al utilizar la ecuación (6) tenemos una Apertura Numérica (*N.A.*) para esta guía de onda de 1.3001. Asimismo, si el ángulo de la incidencia se aumenta suficientemente, se alcanza un ángulo crítico por el que la onda de incidencia está reflejada totalmente. La onda transmitida se atenúa rápidamente en el segundo medio. Conforme a la ecuación (24) se tiene un ángulo crítico para esta guía de onda de 48.70° , solamente los ángulos de incidencia más grandes que este ángulo crítico dará lugar a propagar modos dentro de la guía.

El LASER HeNe tiene un haz de luz de una potencia de 1.5mW, la cual se converge por medio del objetivo óptico 20X al primer tramo de fibra óptica, a la salida de este tramo se colocó el fotodetector PIN, obteniendo una potencia óptica de 250 μW , esta potencia se inyecta a la guía de onda tipo ARROW. Debiendo de realizar los cortes de la fibra óptica con una clibadora, la cual es una herramienta de corte, misma que cuenta con una navaja

de diamante, logrando con ello un corte casi perfecto, esto es con el fin de reducir las pérdidas de potencia por cortes ásperos, el cual produce reflejos y cambios de ángulo de propagación de la luz.

Con ayuda del microscopio se colocaron la guía y la fibra óptica a $2\mu\text{m}$ de separación entre ellas, obteniendo los parámetros de propagación de la luz como se muestran en la tabla 1:

Parámetro	Formula	Resultado
Intensidad de luz incidente	$P_{total} = P_{in} e^{-2\left(\frac{W_z}{W_c}\right)^2}$	23 μW .
Índice de refracción relativo	$n = \frac{n_2}{n_1}$	0.7512.
Reflectancia de la intercara	$R = \left(\frac{n - 1}{n + 1}\right)^2$	0.0201
Intensidad de luz reflejada	$I_R = RI_0$	464.25nW
Transmitancia	$T = \frac{I_T}{I_0} = \frac{I_0 - I_R}{I_0} = 1 - R$	0.9799
Intensidad de luz transmitida	$I_T = TI_0$	22.537 μW
Número de Modos	$M = 2 \frac{h}{\lambda} (NA)$	20.53 Modos.

Tabla 1. Parámetros en la guía de Onda ARROW caracterizada.

Estos resultados indican que la guía de onda tipo ARROW cuenta con buena capacidad de transmitir potencia óptica de un punto a otro, teniéndose relativamente un bajo nivel de pérdidas.

En el sistema experimental, en la salida de la guía de onda se colocó un segundo tramo de fibra óptica con distancia de separación de $2\mu\text{m}$, esto es para medir la potencia con el fotodetector PIN, obteniéndose una lectura de potencia de salida (P_{out}) de 680nW,

conforme a la potencia de entrada (P_{in}) a la guía que es de $23 \mu\text{W}$, se tiene una potencia en dBm tomando en cuenta que:

$$P(\text{dBm}) = 10 \text{ Log}_{10} \left(\frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} \right) \quad (25)$$

Se obtiene como resultado -15.2922 dBm , lo cual significa que son pérdidas de potencia óptica. En la figura 26 se observa cómo se inserta y recibe la potencia óptica en la guía de onda bajo prueba.

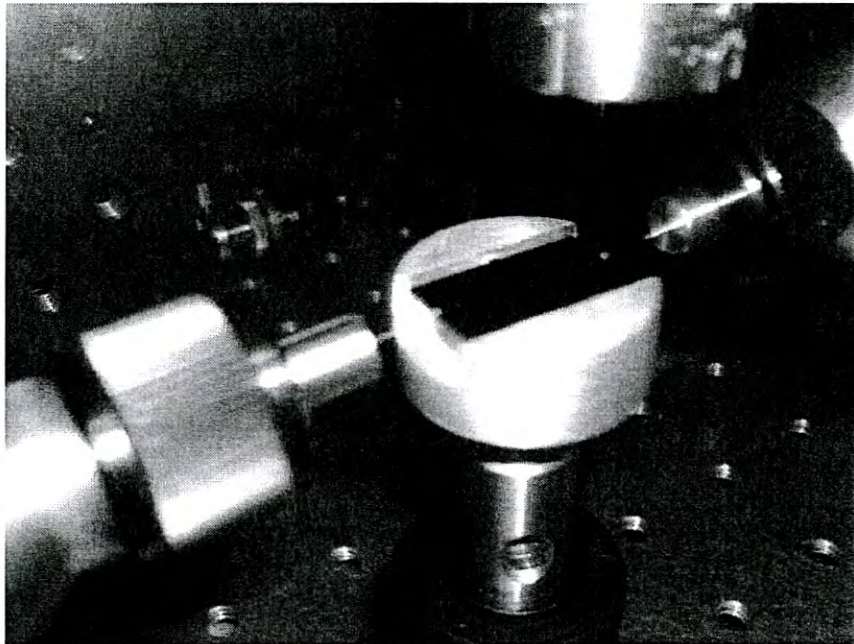


Figura 26. Inserción y recepción de potencia óptica en una guía de onda ARROW.

En la tabla 2, se muestra la relación que existe entre las potencias óptica suministrada por el LASER HeNe, fibra óptica monomodo y la guía de onda ARROW, indicándose la pérdida total de salida que presenta la guía caracterizada conforme a la potencia de entrada.

Potencia de salida del LASER	Potencia de salida de la Fibra Óptica	Potencia de entrada en la guía ARROW	Potencia de salida en la guía ARROW	Pérdidas de Potencia en la guía ARROW
1.5 mW	250 μW	23 μW	680 nW	22.32 μW
1.7609 dBm	-6.025 dBm	-16.3827 dBm	-31.6749 dBm	-15.2922 dBm

Tabla 2. Comparación de las potencias que existe entre los dispositivos del sistema experimental en Watts y dBm.

La guía de onda ARROW caracterizada es de tipo Multimodo, dado a que el campo eléctrico se puede propagar en 20.53 modos para la longitud de onda utilizada.

En el sistema experimental se tiene un haz gaussiano, lo que significa que la potencia máxima de un haz se encuentra en el centro del mismo, entonces, fue imposible poder centrar la fibra óptica sobre la guía de onda, por la diferencia de dimensiones que contaba cada una. Si se centraba la fibra sobre la guía, una gran parte se transmitía por encima de la guía y se recibía la luz en el segundo tramo de fibra óptica, obteniéndose altas mediciones de potencia transmitida, lo cual realmente es una medición errónea, dado a que no era transmitida por la guía de onda, sino por encima de esta.

IV.- CONCLUSIONES

Se requirió de la comprensión de la teoría del funcionamiento de cada uno de los componentes y dispositivos utilizados en el sistema experimental, con el fin de que fueran utilizados y manipularlos adecuadamente, logrando así facilitar el montaje, armado y procedimiento para realizar las pruebas y cálculos necesarios para la caracterización del dispositivo.

Se desarrollo la instrumentación de un sistema experimental para la caracterización de guías de onda tipo ARROW. Para obtener las pérdidas de la guía se calculó la potencia de entrada a la guía, para lo cual se consideró que la potencia de inyección presenta una distribución de tipo gaussiano, así mismo se tomaron en cuenta los parámetros característicos de la guía de onda, como son la apertura numérica, los índices de refracción, reflectancia, transmitancia, intensidad transmitida y número de modos soportados, con estas consideraciones se calculó la potencia de inyección y recepción: *FIBRA-GUIA-FIBRA*.

Referente a la inyección de potencia en la guía de onda, se logró capturar un 10% de la potencia suministrada por la fibra óptica, esto es por la diferencia de dimensiones que presenta la guía comparadas con la fibra óptica, dado a que la guía de onda tipo ARROW tiene una altura de $5\mu\text{m}$ y la fibra óptica tiene un núcleo de $65\mu\text{m}$, por lo que al acoplar la luz de un medio a otro de diferentes dimensiones, se tienen grandes pérdidas de potencia óptica.

Se considera que la inyección de potencia mejoraría si se emplea una fibra óptica con menor radio de núcleo como una fibra monomodo. Asimismo las guías de onda tipo ARROW se podrían diseñar modificando sus dimensiones, en especial aumentando la altura, de tal forma que se logre capturar mas potencia suministrada por la fibra óptica multimodo.

Se pudiera utilizar un polarizador en el primer tramo de fibra óptica, para la inyección de potencia sobre la guía, esto es para modificar el campo eléctrico que se propaga sobre la fibra, pudiéndose mejorar la cantidad de potencia que se refracta en la guía, eliminando un porcentaje de reflejo sobre la cara de la misma, ya que con la polarización del campo eléctrico se puede modificar el ángulo de la luz que incide en la guía de onda.

V.- REFERENCIAS

- [1] S.O.KASAP, "Optoelectronics and fotonics, Principles and practicies", PEARSON Prentice Hall, U.S.A., 2001.
- [2] RAYMOND A. SERWAY, JOHN W. JEWET, "Fisica: Texto basado en calculo", Vol. 2 Thomson, 3ª Ed., 2004.
- [3] HEINZ WILLEBRAND, BAKSHEESH S. GHUMAN, "Free-Space Optics: Enabling Optical Connectivity in Today`s Networks, SAMS Publishing, 2002.
- [4] EUGENE HECHT, "Optica" , Addison Wesley, 3/a. Ed. 2000.
- [5] LEON W. COUCH, "Sistemas de Comunicación digitales y analógicos", Prentice Hall, 2008.
- [6] ROY BLAKE, "Sistemas Electrónicos de Comunicaciones", Thomson, 2004.
- [7] BAHAA E. SALEH, MALVIN C. TEICH, "Fundamentals of Photonics", John Wiley & Sonc. Inc, U.S.A., 1991.
- [8] J.M. ALBELA MARTIN, J.M. MARTINEZ DUART, F. ANGULLO RUEDA "Fundamentos de microelectrónica, nanoelectronica y fotonica", Edit. PEARSON Prentice Hall, Madrid Esp. 2005.
- [9] JOSEPH T. VERDEYEN, "Laser Electronics, Ed. Prentice Hall., U.S.A., 1994.
- [10] ROSA CHAVEZ VELAZQUEZ, IGNACIO ZALDIVAR HUERTA, CLAUDIA REYES BETANZO, ALEJANDRO DIAZ SANCHEZ, "Fabricación de guías de onda ópticas de silicio utilizando oxido de silicio y nitruro de silicio", Sociedad Mexicana de Ciencia y Tecnología de Superficies y Materiales, Superficies y Vacío 18(4), pp. 21-23, Dic. 2005.
- [11] DENNIS DERICKSON, "Fiber Optic, Test and Measurement", Prentice Hall, 1998.
- [12] WAYNE TOMASI, "Sistemas de Comunicaciones Electrónicas", Pearson Educacion. 2/a. Ed.1996.
- [13] STUART M. WENWORTH. "Fundamentals of Electromagnetics with engineering applications", PEARSON Prentice Hall, USA., 2005.
- [14] DAVID OMAR QUIRINO PEÑA, MILKA DEL CARMEN ACOSTA ENRIQUEZ, ALICIA VERA MARQUINA, "Instrumentación de un sistema experimental para la caracterización de una guía de onda tipo ARROW", Congreso de Instrumentación SOMI XXIV, 14-16 Oct. 2009, Mérida Yuc.