

**Centro de Investigación Científica y de  
Educación Superior de Ensenada**



**MEDIDA DE LA EFICIENCIA DE PROPAGACION  
EN GUIAS DE ONDA OPTICAS EN VIDRIO**

**TESIS  
MAESTRIA EN CIENCIAS**

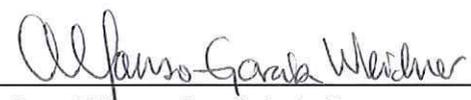
**JUAN ANTONIO VILLALOBOS ARMENDARIZ**

Ensenada, Baja California, Mexico. Marzo de 1998.

TESIS DEFENDIDA POR  
JUAN ANTONIO VILLALOBOS ARMENDÁRIZ

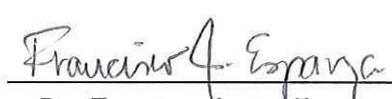
Y APROBADA POR EL SIGUIENTE COMITE

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Heriberto Márquez Becerra  
*Director del Comité*

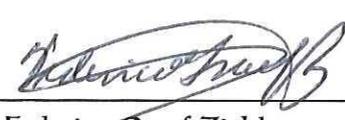
  
\_\_\_\_\_  
Dr. Alfonso García Weidner  
*Miembro del Comité*

  
\_\_\_\_\_  
M.C. David Salazar Miranda  
*Miembro del Comité*

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Anatolii Khomenko Filatova  
*Miembro del Comité*

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Francisco Javier Esparza Hernández  
*Miembro del Comité*

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Eugenio Rafael Méndez Méndez  
*Jefe del Departamento de Optica*

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Federico Graef Ziehl  
*Director de Estudios de Posgrado*

3 de marzo de 1998

***CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y  
DE EDUCACIÓN SUPERIOR DE ENSENADA***



**ÓPTICA**

*TÍTULO:*  
**MEDIDA DE LA EFICIENCIA DE PROPAGACIÓN EN  
GUÍAS DE ONDA ÓPTICAS EN VIDRIO**

*TESIS:*  
**MAESTRO EN CIENCIAS**

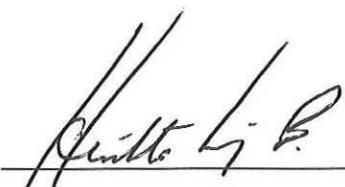
**JUAN ANTONIO VILLALOBOS ARMENDÁRIZ**

ENSENADA BAJA CALIFORNIA, MÉXICO. MARZO DE 1998

**RESUMEN de la Tesis de Juan Antonio Villalobos Armendáriz, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de MAESTRO EN CIENCIAS en ÓPTICA. Ensenada, B. Cfa., México. Febrero de 1998.**

**MEDIDA DE LA EFICIENCIA DE PROPAGACIÓN EN GUÍAS DE ONDA ÓPTICAS EN VIDRIO**

**Resumen aprobado por:**



**Dr. Heriberto Márquez Becerra**  
**Director de Tesis**

Este trabajo tiene como objetivo la medición del coeficiente de atenuación en guías de onda ópticas angostas, las cuales se obtuvieron por medio de la difusión de iones de cobre en sustratos de vidrio.

Las técnicas seleccionadas para la medida de las pérdidas fueron:

a) Método Interferométrico Fabry-Perot y b) el método de medición de la luz esparcida. El método interferométrico hace uso de la cualidad de que las guías pueden comportarse como un resonador óptico. Para lograr el efecto de resonancia óptica, los extremos de la guía deben cortarse paralelos, y tener sus caras pulidas ópticamente. El coeficiente de atenuación se obtiene a partir de la medida del contraste de la intensidad de salida, producido al variar las dimensiones de la cavidad resonante. Los cambios de dimensión de la cavidad son inducidos por variaciones en la temperatura de las mismas. Por otro lado, el método de medición de la luz esparcida, consiste en detectar el esparcimiento de la señal óptica a través de la guía de onda. Y la pendiente de las intensidades de la luz dispersada a lo largo de la guía permite estimar el coeficiente de atenuación que tiene esta señal.

Palabras claves: (pérdidas, coeficiente de atenuación, guías de onda)

**ABSTRACT of the thesis presented by Juan Antonio Villalobos Armendáriz, in order to obtain the MASTER DEGREE in OPTICS. Ensenada, B. Cfa., México. February, 1998.**

**LOSS MEASUREMENTS IN COPPER CHANNEL OPTICAL WAVEGUIDES**

**Abstract approved by:**

  
\_\_\_\_\_  
**Dr. Heriberto Márquez Becerra**  
**Thesis Advisor**

In this work is present an experimental procedure for determining the propagation losses in copper channel optical waveguides, fabricated by means of a solid state diffusion process on soda-lime glass substrates.

The techniques used for the measurements of the propagation losses were:

a) Fabry-Perot interferometer method and b) scattered-light measurement method. Fabry-Perot method, use the potential of the waveguides to form an optical resonator using the reflectance of the two end faces. The attenuation coefficients have been obtained from the measurements of the contrast variations at the output intensity. These intensity changes are due to variations of the dimensions of the resonant cavity produced by temperature variations. Moreover the scattered-light measurement method is based on detection of the scattering light from the optical signal traveling across the waveguide. The slope of the intensity of the scattering light along the waveguide permit to estimate the attenuation coefficient.

**Keywords:** (losses, coefficient, waveguide)

*DEDICATORIA*

*Para Nidia mi esposa y a mis hijos: Alex y Diana*

## AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Heriberto Márquez B. por sus sugerencias, comentarios y la dirección de esta tesis.

Al M. C. David Salazar M. por sus comentarios respecto a este trabajo, la motivación de seguir en el área de la óptica y por ser parte de mi comité de tesis..

A los Drs. Alfonso García W., Anatoli Khomenko y Francisco Esparza por ser parte de mi comité de tesis y por sus valiosos comentarios del trabajo.

Al Dr. Henri Porte, por sus valiosos comentarios y sugerencias para la realización de este trabajo.

Al Dr. Héctor Escamilla por ser una gran persona con toda la extensión de la palabra.

Al Dr. Diego Yankelevich por las sugerencias para preparar el “Nile Blue A”.

Al Dr. Eugenio Méndez por la ayuda brindada desde hace mucho tiempo.

Al Dr. Roger Cudney por su ayuda en la interpretación de algunos resultados.

Al Dr. Raul Rangel por ser parte del relajo y sus comentarios de la tesis.

Al Dr. Pedro Negrete por su ayuda en programación.

A la Dra. Nooshin Jamasbi por su amabilidad y por haber proporcionado el “Nile Blue A”.

A los Drs. Diana Tentori, Elena Tchaikina, Mehrdad Mohebi, Mijail Shlyagin y Serguei Miridonov por ser parte de mi formación académica.

Al Dr. Ricardo Nuñez por sus comentarios y sugerencias.

Al Dr. Arturo Velázquez por tener acceso libre a su laboratorio para preparar las muestras.

A los Drs. Roberto Machorro y Jesús M. Siqueiros por su valiosa cooperación en el uso de su laboratorio.

A Dr. Miguel Dávalos y Ing. Israel Gradilla por haber analizado unas muestras.

A los cuasidoctores (por fin ) Georgina Navarrete y Javier Camacho por su valiosa cooperación.

Al Lic. Juan Peralta por su valiosa ayuda y las invitaciones para ver los superbowl en su casa.

A los compañeros del grupo de películas delgadas M. C. Nestor, cuasidoctor Javo, Gladys, Alma, etc...

A Marcia Padilla y Miguel Farfán por el uso de equipo de laboratorio y otras cosas, que ayudaron para la realización de este trabajo.

Al Oc. Miguel A. García por sugerencias en programación.

Al Oc. Octavio Meillón por su ayuda en el area de fotografía.

Al cuasidoctor Rodolfo Cortez por ser parte del relajo y su gran ayuda.

A mis compañeros Ooorto, Carlitos, Juan Carlos, Omar (el chilango teutón de Apasco), Dr. Artuuuro y al Dr. Leyva (el simpatillas) por los gratos momentos que he pasado con ellos.

A todos mis compañeros de maestría con los que he convivido estos últimos dos años.

A las secretarias Doña O, Rosy y Caro, por toda su ayuda, en especial a Doña O.  
A todas las personas de computo que me ayudaron para escribir la tesis en especial a: el gran Famoso, Silvia Camacho, María Elena Zavala y Conchita Mendoza con respecto a las licencias de software.

A Javier Dávalos por su valiosa ayuda en el pulido de muestras y sus comentarios que fueron de gran ayuda.

A los muchachos del taller mecánico por su ayuda en la fabricación de partes mecánicas y el uso de su taller.

Al CONACYT, por el apoyo económico brindado, # de becario 94747.

Al proyecto de cooperación CNRS-CONACYT # E130.1918.

# ÍNDICE

Capítulo		Página
1	INTRODUCCIÓN	1
2	INTRODUCCIÓN A LA TEORÍA DE LAS GUÍAS DE ONDA ÓPTICAS DIELECTRICAS	3
	2.1 Introducción a las Guías de Onda	4
	2.2 Guías de Onda ópticas en Dos Dimensiones	8
	2.2.1 Guías de onda ópticas de índice gradiente 2-D	8
	2.2.2 Guías de onda ópticas de gradiente en 3-D	9
3	GUÍAS DE ONDA EN DOS Y TRES DIMENSIONES	13
	3.1 Tipos de Guías de Onda	13
	3.2 Guías de Onda de Tres Capas Dieléctricas ó Guías 2-D con Perfil de Escalón	15
	3.2.1 Dispersión de los modos guiados	18
	3.2.2 Ancho efectivo de la guía de onda	21
	3.2.3 Guías con pérdidas bajas	23
	3.3 Método de Aproximación de Rayos Para Guías de Onda Ópticas de Perfil Gradiente en 2-D	25
	3.3.1 Método WKB para guías con índice gradiente en 2-D	30
	3.4 Guías de Onda en Tres Dimensiones	34
	3.4.1 Método Marcatili	35
	3.4.2 Método del índice efectivo	38
	3.4.3 Diseño de guías de onda monomodales 3-D de índice gradiente	40
4	MÉTODOS DE MEDICIÓN DE PÉRDIDAS, PROCESOS DE FABRICACIÓN Y PREPARACIÓN DE MUESTRAS	44
	4.1 Métodos Para Medir las Pérdidas en Guías de Onda	44

## ÍNDICE (continuación)

Capítulo		Página
	4.1.1 Interferómetro Fabry-Perot	45
	4.1.2 Método por esparcimiento	46
	4.1.3 Método acoplamiento por prismas	47
	4.1.4 Método por reducción	47
	4.1.5 Método deflexión fototérmica	48
	4.2 Fabricación de Guías de Onda Angostas	49
	4.2.1 Proceso de difusión	51
	4.3 Corte y Pulido	54
	4.3.1 Corte de guías	54
	4.3.2 Esmerilado y pulido de guías	54
	4.4 Proceso de Depósito del "Nile Blue A"	55
5	RESULTADOS: ANÁLISIS DE PÉRDIDAS A PARTIR DE UNA CAVIDAD RESONANTE	58
	5.1 Cavidad resonante	59
	5.2 Coeficiente de Atenuación	60
	5.2.1 Reflectancia a partir del índice efectivo de la guía	62
	5.3 Medida de Pérdidas	63
6	RESULTADOS: ANÁLISIS DE PÉRDIDAS POR MEDIO DE FLOURESCENCIA	67
	6.1 Análisis de Pérdidas por Medio de Flourescencia	68
	6.1.1 Arreglo experimental y adquisición de datos	68
	6.1.2 Observación de la luz propagándose dentro de la guía	71
	6.1.3 Análisis de Resultados de las Pérdidas por Flourescencia	71
7	CONCLUSIONES Y DISCUSIONES	87

## ÍNDICE (continuación)

Capítulo		Página
	REFERENCIAS	91
	APENDICE A	95
	APENDICE B	107

## LISTA DE FIGURAS

Figura		Página
1	En esta figura se muestra una guía de onda óptica, que está fabricada por una película delgada que tiene un índice de refracción más grande que el sustrato donde está depositada. La luz es confinada dentro de esta película.	5
2	En esta figura se muestra dos diseños de circuitos de óptica integrada: a) formado por rectas solamente y b) acoplador 1:2, formado por rectas y curvas.	6
3	En esta figura se muestra la forma típica que presenta una guía de onda utilizando: a) la técnica de difusión de iones y b) la técnica fotoelástica.	7
4	Se muestra la interfase entre tres medios dieléctricos diferentes con índices de refracción $n_c$ , $n_p$ y $n_s$ que forman una guía de onda dieléctrica.	9
5	Se muestra la distribución del índice de refracción para una función a) de error y b) una función Gaussiana.	11
6	Se muestra la distribución del índice de refracción para las guías de onda típicas, fabricadas por difusión de iones de Cobre sobre un sustrato de vidrio (Salazar et al., 1997).	12
7	Estructura de: a) guía de onda óptica 2-D, b) y c) diferentes perfiles de índice	14
8	Se esquematiza una onda en zig-zag de los modos de propagación: a) modo de radiación del sustrato, b) modo del sustrato y c) modo guiado.	16
9	Diagrama del vector de onda	17

## LISTA DE FIGURAS (continuación)

<b>Figura</b>		<b>Página</b>
10	Curva del índice efectivo en función de la profundidad efectiva, para guías de onda planas con perfil de índice de escalón.	20
11	Se muestra la propagación de una onda, tomando en consideración la penetración del campo evanescente dentro de los materiales de índices de refracción bajos.	22
12	Modelo analítico del método de aproximación de rayos	27
13	Perfil de índice de una guía de onda con índice gradiente simétrico.	30
14	Soluciones de la ecuación de onda utilizando el método WKB.	32
15	Vista de un corte transversal de una guía de onda de escalón en 3-D, que se utiliza para hacer el análisis del método Marcattili.	35
16	Distribución de campo para modos simétricos y antisimétricos en guías de 3-D.	38
17	a) Se muestra una guía de onda en 3-D, b) vista transversal en el plano y-z de la guía y c) vista transversal en el plano z-x de la guía.	39
18	a) Se muestra un perfil de índice de refracción Gaussiano simétrico en la dirección x, para una guía de onda en 3-D, b) La distribución que tiene el perfil de a) hacia dentro de la guía y c) la distribución del perfil de índice de refracción en la dirección y de la guía.	41
19	Proceso de fabricación de guías de onda angostas por difusión.	53

## LISTA DE FIGURAS (continuación)

Figura		Página
20	Se muestra la forma que se le depositó el perclorato de "Nile Blue A" a las guías de onda: A) Sistema de centrifugación de la muestra. B) Guías de onda con la capa de perclorato de "Nile Blue A".	56
21	Se presenta el arreglo experimental utilizado para medir la intensidad de salida en guías de onda angostas	63
22	En esta figura se muestra la variación típica de la intensidad una vez calentada la muestra en función del tiempo; se observa variaciones periódicas y no igualmente espaciadas en el tiempo	65
23	En esta gráfica se muestra la salida de la intensidad de la luz en función del tiempo para una guía de onda angosta de 4 micrómetros de ancho.	65
24	Se presenta el arreglo experimental utilizado para medir el esparcimiento de la luz en la guía de onda, por medio de la fluorescencia y cámara CCD	70
25	a) Luz propagándose dentro de una guía de 4 micras de ancho. b) acoplamiento guía-guía debida a imperfecciones físicas de la guía	71
26	Se muestra unas de las primeras imágenes que se obtuvieron de la guía, esta imagen corresponde a una sección de una guía de 4 micrómetros de ancho	73
27	En esta imagen se muestran los resultados que se obtuvieron al analizar la imagen de la figura 26. El valor del coeficiente atenuación que se obtuvo para este caso fue de 16.4 dB/cm.	73
28	Se muestra la imagen de una parte de una guía que tiene aproximadamente 375 micrómetros de longitud, esta imagen corresponde a una guía de 10 micrómetros de ancho aproximadamente.	74

## LISTA DE FIGURAS (continuación)

Figura		Página
37	En esta imagen se muestran los resultados que se obtuvieron al analizar la imagen de la figura 36. El valor del coeficiente atenuación que se obtuvo para este caso fue de 3.3 dB/cm.	78
38	Se muestra la imagen de una parte de una guía que tiene aproximadamente 375 micrómetros de longitud, esta imagen corresponde a una guía de 4 micrómetros de ancho aproximadamente.	79
39	En esta imagen se muestran los resultados que se obtuvieron al analizar la imagen de la figura 38. El valor del coeficiente atenuación que se obtuvo para este caso fue de 1.4 dB/cm.	79
40	Se muestra la imagen de una parte de una guía que tiene aproximadamente 375 micrómetros de longitud, esta imagen corresponde a una guía de 4 micrómetros de ancho aproximadamente.	80
41	En esta imagen se muestran los resultados que se obtuvieron al analizar la imagen de la figura 40. El valor del coeficiente atenuación que se obtuvo para este caso fue de 1.1 dB/cm.	80
42	Se muestran unas fotos tomadas por el CCD para ser analizadas y obtener el coeficiente de atenuación a partir de las imágenes.	82
43	Se muestra el perfil de intensidad (ln) de dos imágenes consecutivas, se ve claramente que existe una región en común, la cual es traslapada.	83
44	En esta figura se muestra el perfil de intensidad (ln) en la guía y una regresión lineal que se realizó para obtener el decaimiento de la intensidad en la guía. La figura representa una longitud de la guía de 0.199 cm	84
A. 1	Reflexión y refracción de una onda plana incidiendo sobre una interface de dos dieléctricos.	102

---

# MEDIDA DE LA EFICIENCIA DE PROPAGACIÓN EN GUÍAS DE ONDA ÓPTICAS EN VIDRIO

## *CAPÍTULO 1* INTRODUCCIÓN

---

Las guías de onda son los elementos básicos de los circuitos de la óptica integrada. En los últimos años se han desarrollado diferentes procesos para la fabricación de estos elementos, y el proceso del intercambio iónico es el más utilizado para la fabricación de guías de onda de índice gradiente en vidrio. En trabajos anteriores (Márquez et al., 1973; Salazar et al., 1997) se ha utilizado el proceso de difusión para la fabricación de guías de onda en vidrio utilizando la técnica del intercambio iónico Na-Cu. Hemos elaborado guías de onda ópticas planas y angostas, mostrando que el Cobre es un material adecuado para la óptica integrada. La calidad de las guías de onda esta limitada por la atenuación de la luz a lo largo del camino óptico, por lo que es necesario evaluar la propagación de la luz en las guías de onda ópticas para cuantificar las pérdidas por propagación.

En este trabajo se reportan las medidas de pérdidas por propagación en guías de onda angostas fabricadas por difusión de Cu en vidrio. Existen diferentes técnicas para determinar las pérdidas en las guías (Webber et al., 1973; Jackel y Veselka, 1984; Hickernell

---

## INTRODUCCIÓN

---

et al., 1988), algunas técnicas utilizan medidas de la luz esparcida o transmitida. Las guías con las que se trabajó tienen las caras de entrada y de salida pulidas y semiparalelas.

En este trabajo se presentan dos técnicas para determinar el coeficiente de atenuación. La primera técnica toma en cuenta la intensidad de la luz transmitida, si se considera a la guía como una cavidad resonante de baja finesa tipo Fabry-Perot, la intensidad de salida es función de la longitud del resonador, que puede variarse cambiando la temperatura del resonador; a partir de esta información es posible calcular el coeficiente de atenuación. La segunda técnica utilizada toma en cuenta el fenómeno de esparcimiento. En guías de onda existe una relación directa entre la luz que se propaga dentro de la guía y la que se pierde por esparcimiento, por lo que, si podemos medir el decaimiento de la luz esparcida en función de la distancia, se puede determinar el coeficiente de atenuación. Para medir esta luz esparcida es necesario hacer resaltar este efecto, para lo cuál a las guías se les deposita una película fluorescente en la superficie, y por medio de un detector se mide la intensidad de la luz en función de la posición, con estos datos se calcula el coeficiente de atenuación.

---

---

## *CAPÍTULO 2* INTRODUCCIÓN A LA TEORÍA DE LAS GUÍAS DE ONDA ÓPTICAS DIELÉCTRICAS

En este capítulo se hará una introducción a los tipos de guías de onda ópticas, las que se clasifican en guías de onda bidimensionales (2-D) y tridimensionales (3-D), que son utilizadas en la óptica integrada.

---

## INTRODUCCIÓN A LA TEORÍA DE LAS GUÍAS DE ONDA ÓPTICAS

---

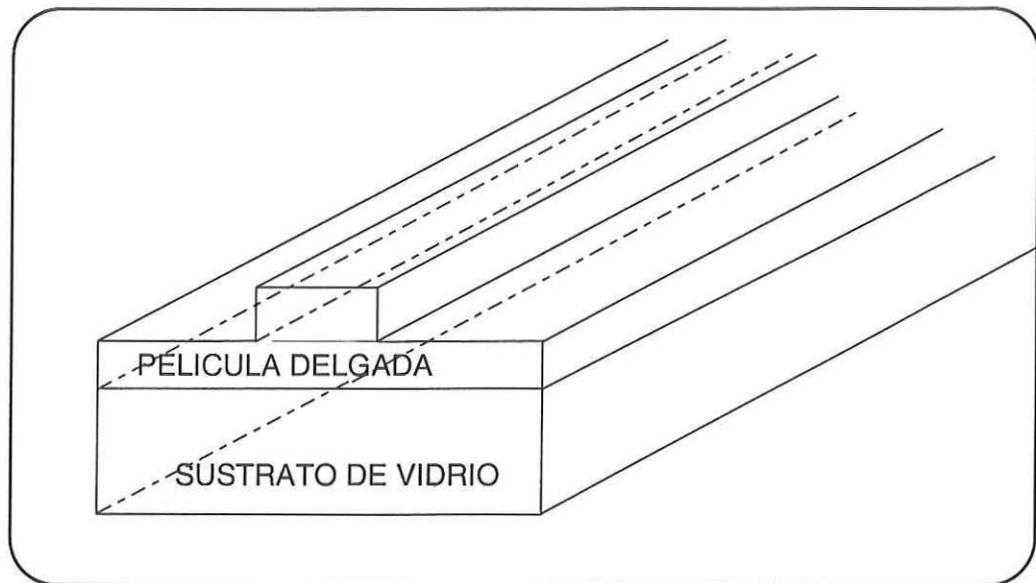
### 2.1 Introducción a las Guías de Onda

---

Las guías de onda ópticas, las cuales atrapan la luz localmente y la guían a través de ella en una dirección específica, pueden ser clasificadas burdamente en guías de onda que son utilizadas en la óptica integrada y las que se utilizan para fibras ópticas.

Para la banda de microondas, los campos electromagnéticos son distribuidos generalmente dentro de una área finita rodeada por conductores, como en las guías de onda metálicas y líneas coaxiales. Por otro lado, se tiene que es muy difícil construir guías de onda de metal para la banda del visible, y esto se debe a que el metal se comporta como una sustancia que tiene una permitividad compleja con un valor absoluto grande. Es por esta razón que las guías de onda ópticas se construyen combinando dieléctricos apropiados.

Si se deposita una película delgada con un índice de refracción alto sobre un sustrato de vidrio, la luz puede ser guiada dentro de ésta película. Si el espesor de la película se incrementa, el índice de refracción efectivo (índice efectivo) visto por la luz también se incrementa. En una guía de onda típica, como se muestra en la figura 1, se tiene que la distribución del campo electromagnético se encuentra sobre una área finita, y la luz es acoplada sobre el área central dentro de la película delgada, resultando su propagación a lo largo de esta área central, donde la potencia de la luz es concentrada en cierta parte de la sección transversal de la guía.

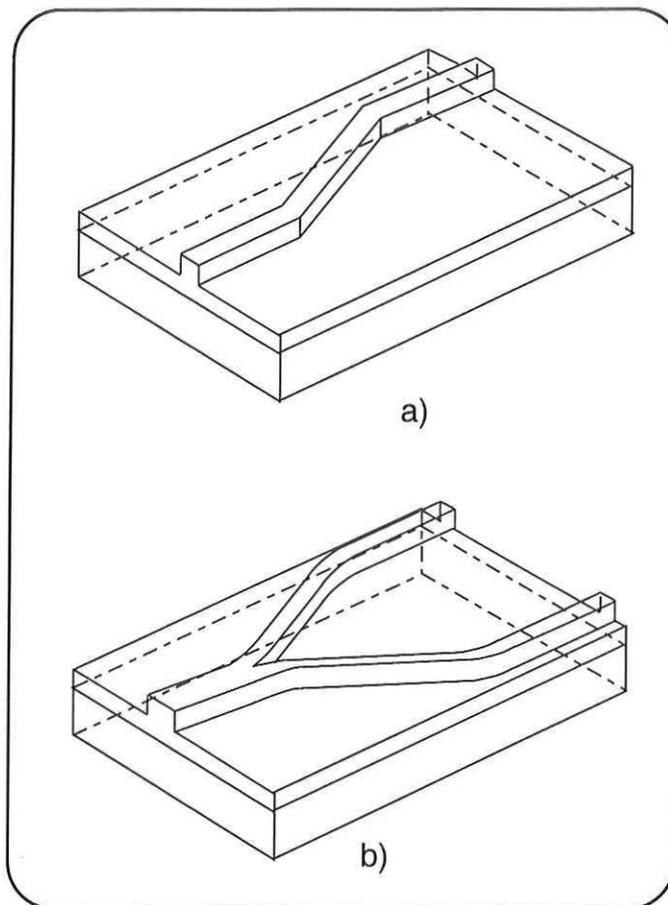


---

**FIGURA 1** En esta figura se muestra una guía de onda óptica, que está formada por una película delgada y tiene un índice de refracción más grande que el sustrato donde está depositada. La luz es confinada dentro de esta película.

En la figura 2 se muestran algunos ejemplos de diseños de guías de onda que actualmente son utilizadas en óptica integrada.

## INTRODUCCIÓN A LA TEORÍA DE LAS GUÍAS DE ONDA ÓPTICAS



**FIGURA 2** En esta figura se muestra dos diseños de circuitos de óptica integrada: a) formado por rectas solamente y b) acoplador 1:2, formado por rectas y curvas.

Las guías de onda en la cual el índice de refracción cambia en etapas, son llamadas guías de onda con índice de escalón, cuando los cambios en el índice de refracción es gradual son llamadas guías de índice gradiente. Las guías de onda de índice gradiente son las que más se utilizan en óptica integrada, ya que comparadas con las de películas delgadas,

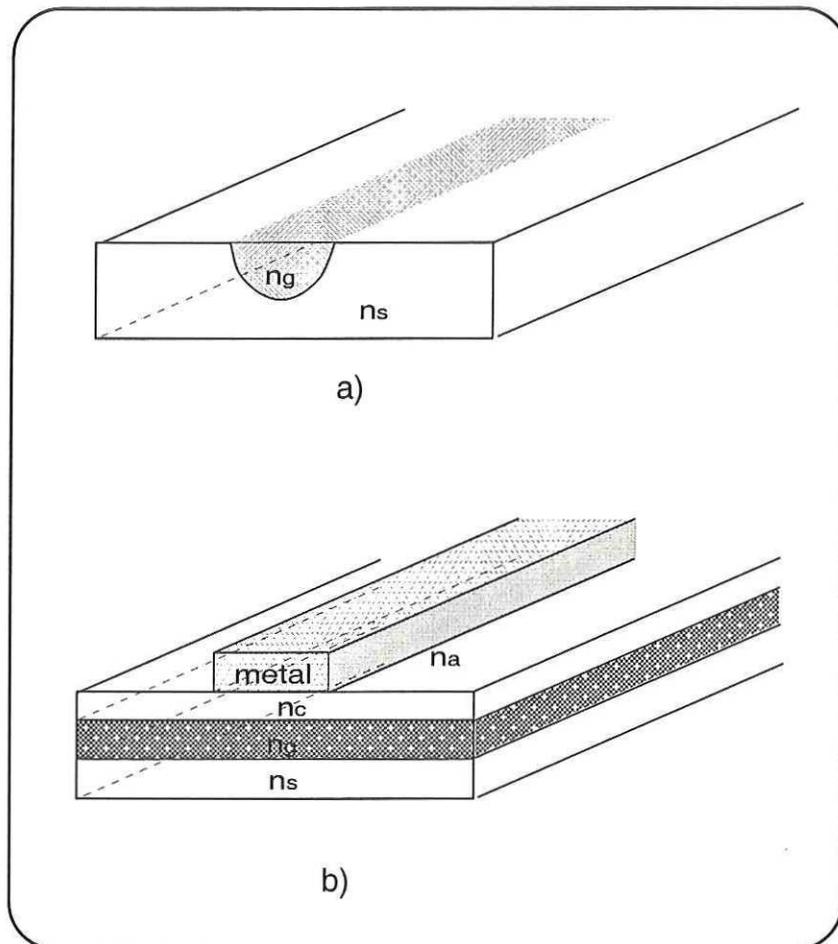
---

**Introducción a las Guías de Onda**

---

tienen propiedades mecánicas mejores y esto se debe principalmente a las técnicas que se utilizan para su fabricación.

Entre las técnicas de fabricación de guías de onda se encuentran la de difusión de iones, oxidación y la fotoelástica. En la figura 3 se muestran las estructuras de un corte transversal de guías de onda utilizando las diferentes técnicas.

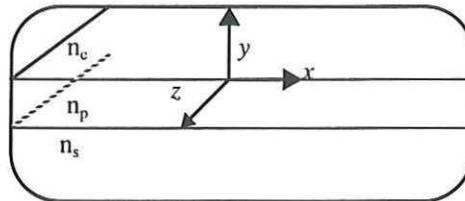


**FIGURA 3** En esta figura se muestra la forma típica que presenta una guía de onda utilizando: a) la técnica de difusión de iones y b) la técnica fotoelástica.

## 2.2 Guías de Onda Ópticas en Dos Dimensiones 2-D

Las guías de onda que confinan la luz, solo en la dirección del espesor de la película, se le llaman guías de onda ópticas 2-D o guías de onda ópticas planas.

Una estructura básica de una guía de onda plana se ilustra en la figura 4 en la que  $n_p$ ,  $n_s$  y  $n_c$ , representan los índices de refracción de la película, del sustrato y de la cubierta respectivamente. A esta guía de onda se le llama guía de onda óptica dieléctrica de tres capas o guía de onda óptica plana asimétrica. Los índices de refracción deben de cumplir con la relación  $n_c < n_s < n_p$  para que la luz quede atrapada dentro de la película.



**FIGURA 4** Se muestra la interfase entre tres medios dieléctricos diferentes con índices de refracción  $n_c$ ,  $n_p$  y  $n_s$  que forman una guía de onda dieléctrica plana.

### 2.2.1 Guías de onda ópticas de Índice gradiente 2-D

Para la fabricación de guías de onda ópticas de índice gradiente, se utiliza la técnica de estado sólido térmica con o sin un campo eléctrico externo. Esta técnica consiste en depositar la fuente de iones de estado sólido (por lo regular metales) sobre un sustrato de

---

### Guías de Onda Ópticas en Dos Dimensiones 2-D

---

vidrio e incrementando la temperatura (200 - 400 ° C ) se lleva a cabo la difusión de iones hacia el sustrato. Este proceso puede acelerarse al aplicarle un campo eléctrico externo (50-100 VDC). Debido a que el índice de refracción cambia gradualmente en la dirección de la difusión, el perfil del índice de refracción,  $n(y)$ , puede ser obtenido de la siguiente forma:

$$n(y) = n_s + \Delta n \cdot g(y) \quad (1)$$

en donde  $n_s$  es el índice de refracción del sustrato,  $\Delta n$  es el cambio máximo en el índice de refracción y  $g(y)$  describe la función del índice de refracción en la dirección  $y$ , esta distribución tiene valores que se encuentran en el intervalo de 0 a 1.

Por lo regular la distribución del índice de refracción gradiente en guías de onda, fabricadas por difusión toman la forma de la función Gaussiana, de error complementaria o una combinación de las dos.

#### 2.2.2 Guías de onda ópticas de gradiente en 3-D

Si la luz puede ser confinada dentro del espesor  $y$ , y además en la dirección horizontal  $x$ , se dice que son guías de onda ópticas en tres dimensiones 3-D. Para la fabricación de guías de onda en 3-D se requiere que la fuente de iones sea depositada sobre el sustrato cumpliendo ciertas dimensiones como son: ancho, largo y espesor. El depósito de la fuente de iones se lleva a cabo utilizando mascarillas que contienen un grupo de líneas de un ancho determinado (4-20 micras), separada cada línea por una distancia de 50 - 100 micras. Esta mascarilla se fabrica de algún material que no afecte el proceso de difusión. Sobre esta

---

 INTRODUCCIÓN A LA TEORÍA DE LAS GUÍAS DE ONDA ÓPTICAS
 

---

mascarilla se deposita la fuente de iones y después se lleva el proceso de la difusión descrito en la subsección anterior 2.2.1.

Si tomamos una guía de onda óptica dieléctrica 3-D en la que el índice de refracción cambia gradualmente tanto en la dirección  $x$ , como en la dirección  $y$ , la distribución del índice de refracción  $n(x, y)$  se obtiene de la siguiente forma:

$$n(x, y) = n_s + \Delta n \cdot f(x) g(y) \quad (2)$$

De nuevo tenemos que  $g(y)$  es la función de distribución para la dirección  $y$ , mientras que  $f(x)$  es para la dirección  $x$ , si se utiliza la función de error para  $f(x)$  se obtiene:

$$f(x) = \frac{\operatorname{erf}\left[\frac{(x + W_0/2)}{d_x}\right] - \operatorname{erf}\left[\frac{(x - W_0/2)}{d_x}\right]}{2\operatorname{erf}\left(\frac{W_0}{2d_x}\right)} \quad (3)$$

y si se utiliza la función Gaussiana se obtiene:

$$f(x) = e^{(-x^2/d_x^2)} \quad (4)$$

en donde  $W_0$  es el ancho de la mascarilla antes de la difusión y  $d_x$  es la profundidad de la difusión en la dirección  $x$  y la función de error se define como:

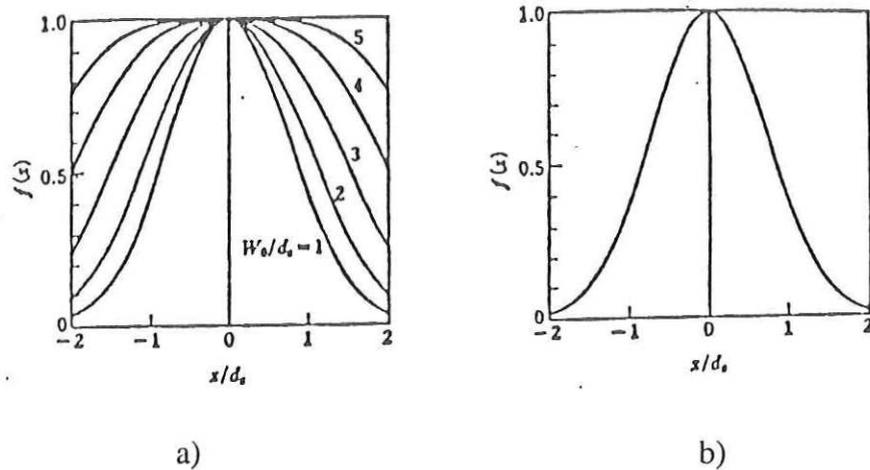
$$\operatorname{erf}(u) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^u e^{-v^2} dv = 1 - \operatorname{erfc}(u) \quad (5)$$

este tipo de funciones se muestran en la figura 5.

---

 Guías de Onda Ópticas en Dos Dimensiones 2-D
 

---



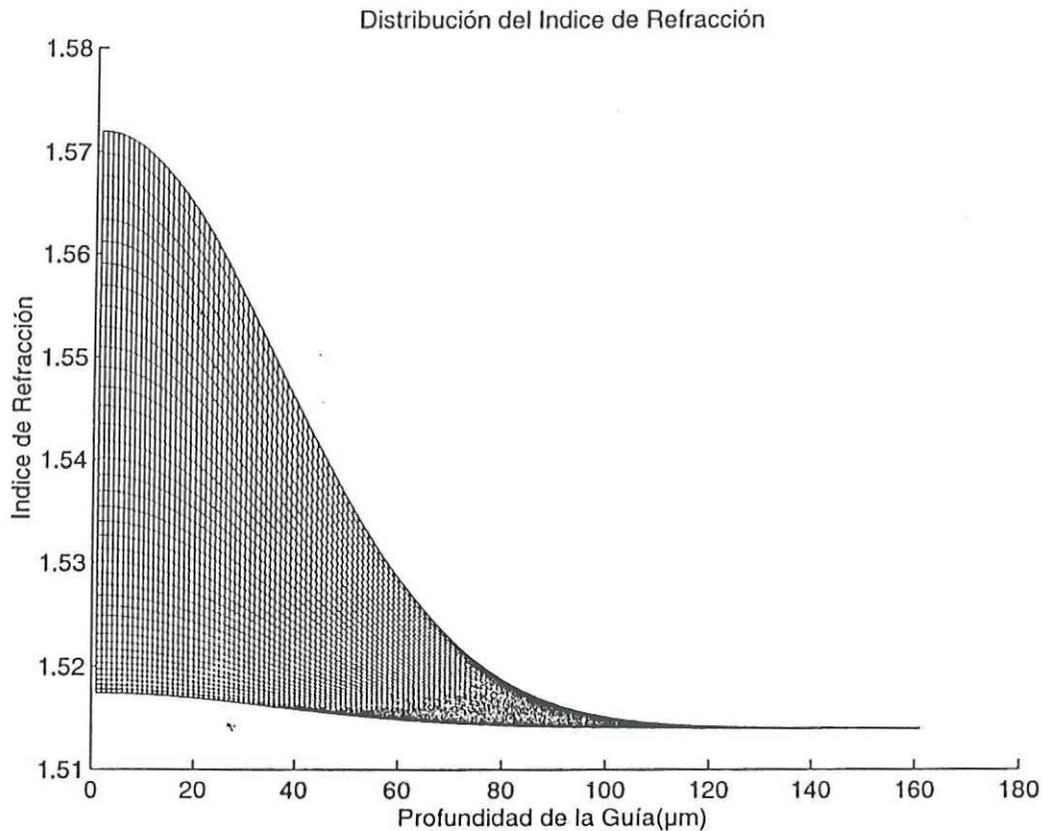
**FIGURA 5** Se muestra la distribución del índice de refracción para una función a) de error y b) una función Gaussiana.

Como resultado del trabajo experimental realizado durante varios años en el laboratorio de películas delgadas del CICESE, se ha podido determinar el perfil del índice de refracción de las guías fabricadas por difusión de iones de Cu en vidrio (Salazar et al., 1997), el perfil teórico que se obtiene involucra dos efectos: el primero se debe a la difusión y el segundo es a causa de la migración que ocasiona la corriente eléctrica que fluye a través del sustrato. Un perfil típico del índice de refracción para guías de onda que han sido fabricadas en el laboratorio de películas delgadas del CICESE, se muestra en la figura 6.

---

 INTRODUCCIÓN A LA TEORÍA DE LAS GUÍAS DE ONDA ÓPTICAS
 

---



**FIGURA 6** Se muestra la distribución del índice de refracción para las guías de onda típicas, fabricadas por difusión de iones de Cobre sobre un sustrato de vidrio (Salazar et. al, 1997).

La solución de la ecuación utilizada en la gráfica 6 es un caso particular, cuando la movilidad de los iones que entran y los desplazados son iguales.

En este capítulo se hizo una breve introducción a las guías de onda ópticas, que son utilizadas en la óptica integrada. Las guías se clasifican en guías de onda bidimensionales y tridimensionales; estas guías pueden ser fabricadas por difusión de iones, las cuales tienen un perfil de índice gradiente y por depósito de películas delgadas de dieléctricos sobre un sustrato de vidrio, las que poseen perfil de índice de escalón.

# *CAPÍTULO 3*    **GUÍAS DE ONDA EN DOS Y TRES DIMENSIONES**

En este capítulo se discutirá sobre las guías de onda planas 2-D con perfiles de índice de escalón y las de perfil de índice gradiente; también se tratarán las guías de onda angostas 3-D que pueden tener un perfil tipo escalón o gradiente.

## **3.1    Tipos de Guías de Onda**

---

Una estructura básica de una guía de onda consiste en una película delgada de alto índice de refracción depositada sobre un sustrato dieléctrico transparente. Una estruc-

## GUÍAS DE ONDA EN DOS Y TRES DIMENSIONES

tura básica para una guía de onda se muestra en la figura 7; con los tipos de perfiles de índice de refracción que puede tener.

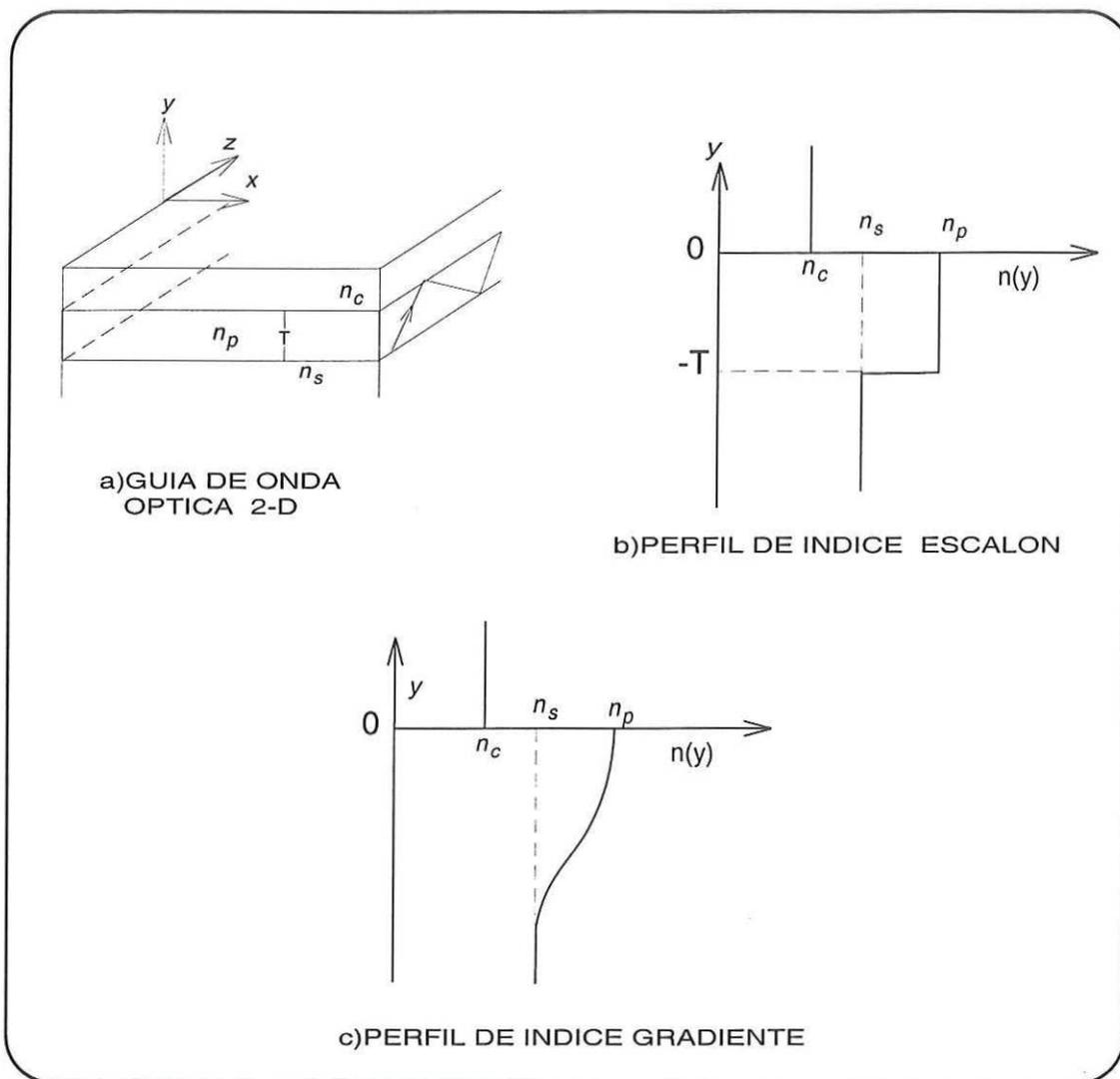


FIGURA 7 Estructura de: a) guía de onda óptica 2-D, b) y c) diferentes perfiles de índice.

---

### Guías de Onda de Tres Capas Dieléctricas ó Guías 2-D con Perfil de

---

Si se cumplen las condiciones de los índices de refracción que se mencionaron en la sección 2.2, para un espesor dado, la luz puede viajar dentro de la estructura. La guía de onda en la figura 7a se llama guía de onda en dos dimensiones 2-D o guía de onda plana, debido a que el confinamiento de la luz se dá solamente en la dirección  $y$ . El perfil de índice de refracción de una guía de onda plana puede ser de escalón, como el mostrado en la fig. 7b debido a que el índice de refracción cambia abruptamente a lo largo de la profundidad y de índice gradiente, como se muestra en la fig. 7c ya que el índice de refracción varía gradualmente a lo largo de la profundidad.

### 3.2 Guías de Onda de Tres Capas Dieléctricas ó Guías 2-D con Perfil de Escalón

---

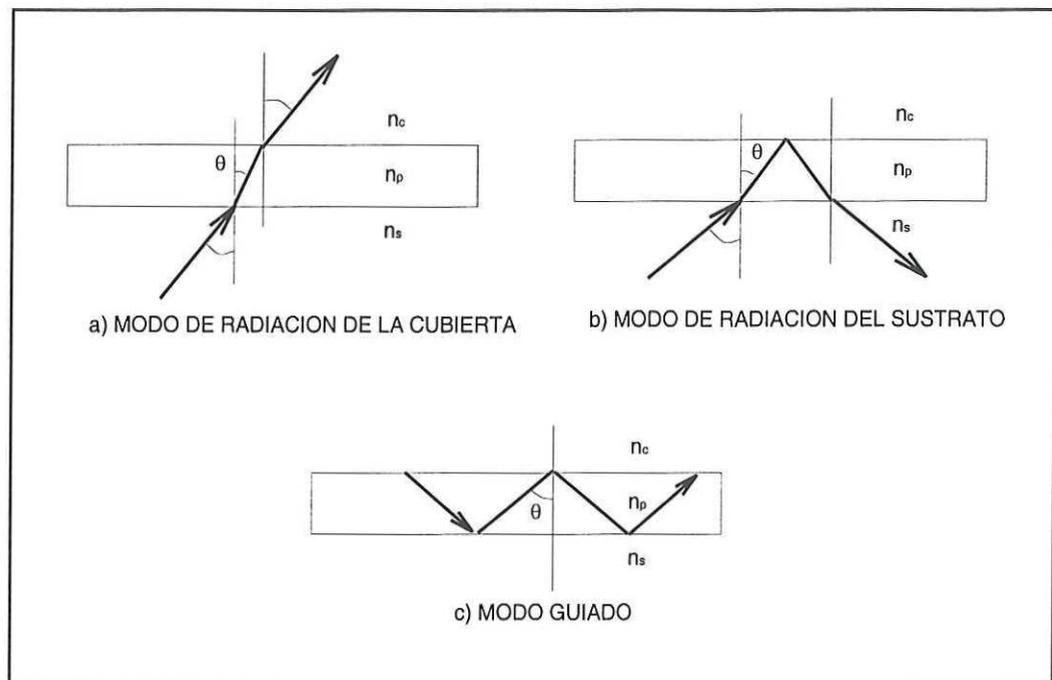
Si ahora consideramos una guía de onda plana (asimétrica) como la que se muestra en la figura 8, la cuál tiene una película homogénea de índice de refracción  $n_p$  en medio de dos índices de refracción menores  $n_s$  y  $n_c$  que son del sustrato y la cubierta respectivamente donde  $n_p > n_s > n_c$ , por lo tanto se tiene un ángulo crítico  $\theta_s = \text{asin}(n_s/n_p)$  debido a la interfase película-sustrato y otro ángulo crítico  $\theta_c < \theta_s$  con  $\theta_c = \text{asin}(n_c/n_p)$  debido a la interfase película-cubierta. Si examinamos que pasa cuando el ángulo incidente  $\theta$  es incrementado, se encuentran tres casos los cuales se muestran en la figura 8. Para valores pequeños de  $\theta$  la luz incidente del lado del sustrato es refractada de acuerdo a la ley de Snell y escapa por la cubierta como se muestra en el fig. 8a, el cuál es llamado modo de radiación de la cubierta. Cuando  $\theta$  es incrementado tal que  $\theta_c > \theta > \theta_s$  tenemos la situación de la fig. 8b, donde la luz incidente en el sustrato es refractada en la interfase sustrato-película y totalmente reflejada en la interfase película-cubierta, luego se

---

**GUÍAS DE ONDA EN DOS Y TRES DIMENSIONES**


---

refracta en la interfase película-sustrato y escapa de la estructura, la luz no es confinada y este es el modo de radiación del sustrato. Finalmente tenemos el caso de la fig. 8c cuando  $\theta > \theta_c$ ; en este caso hay una reflexión total en ambas interfaces y la luz es atrapada y confinada en la película propagándose en zig-zag, este es el caso del modo guiado de propagación.



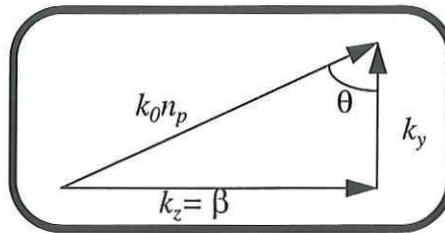
**FIGURA 8** Se esquematiza una onda en zig-zag de los modos de propagación: a) modo de radiación del sustrato, b) modo del sustrato y c) modo guiado.

En las ondas ópticas, los modos son caracterizados regularmente por las constantes de propagación y estas se clasifican por el ángulo de incidencia  $\theta$ . La constante de propagación de la onda se define como  $k_0 n_p$  como se muestra en la figura 9, donde

$k_0 = 2\pi/\lambda$  y  $\lambda$  es la longitud de la luz en espacio libre. La relación entre el ángulo incidente  $\theta$  y las componentes de las constantes de propagación en la dirección  $y$  y  $z$  son:

$$k_y = k_0 n_p \cos \theta \quad (6)$$

$$k_z = k_0 n_p \text{sen} \theta \quad (7)$$




---

**FIGURA 9** Diagrama del vector de onda

Para guías de onda con pérdidas bajas  $k_z = \beta$ , que es equivalente a la constante de propagación para una onda plana en un medio con índice de refracción  $n_p \text{sen} \theta$ . Por lo tanto el índice efectivo para los modos se define como:

$$k_0 N = \beta \quad \text{o} \quad N = n_p \text{sen} \theta \quad (8)$$

el modo guiado a lo largo del eje  $z$  ve el índice  $N$ . Los modos guiados se encuentran en el intervalo  $\theta_s < \theta < \pi/2$ , por lo que el índice efectivo  $N$  se encuentra en el intervalo

$$n_s < N < n_p \quad (9)$$

por lo tanto los modos de radiación existen en el intervalo de  $N < n_s$ .

---

**GUÍAS DE ONDA EN DOS Y TRES DIMENSIONES**


---

**3.2.1 Dispersión de los modos guiados**

La distribución del campo eléctrico TE, en la dirección  $x$  se expresa en las siguientes tres ecuaciones:

$$E_x = E_c \exp(-\gamma_c y) \quad \text{para } y < 0 \quad (10)$$

$$E_x = E_p \cos(k_y y + \phi_c) \quad \text{para } -T < y < 0 \quad (11)$$

$$E_x = E_s \exp(\gamma_s (y + T)) \quad \text{para } y < -T \quad (12)$$

donde  $y$  es la dirección de difusión de la guía. El campo eléctrico decae en forma exponencial fuera de la guía (ecuaciones 10 y 12) y dentro de la guía el campo varía en forma cosenoidal (ecuación 11).

Las constantes de propagación están expresadas en términos del índice efectivo  $N$ .

$$\gamma_c = k_0 \sqrt{N^2 - n_c^2}, \quad k_y = k_0 \sqrt{n_p^2 - N^2}, \quad \gamma_s = k_0 \sqrt{n_c^2 - N^2} \quad (13)$$

Con las condiciones de frontera de los campos  $E_x$  y  $H_z$  que deben de ser continuos en la interfase  $y = 0$  da:

$$E_c = E_p \cos \phi_c, \quad \tan \phi_c = \gamma_c / k_y \quad (14)$$

lo mismo sucede para  $y = -T$

$$E_s = E_p \cos(Tk_y - \phi_c), \quad \tan(Tk_y - \phi_c) = \gamma_s / k_y \quad (15)$$

de las dos ecuaciones anteriores (14 y 15) se obtiene la ecuación:

$$k_y T = (m + 1) \pi + \text{atan}(\gamma_s / k_y) + \text{atan}(\gamma_c / k_y) \quad (16)$$

donde  $m = 0, 1, 2, \dots$  indica el *número de modo*. Cuando se conocen los índices de refracción  $n$  y el espesor  $T$ ,  $k_y$  puede ser obtenida a partir de la ecuación 16.

Cuando se conocen los índices de refracción de la guía, la ecuación 16 se resuelve numéricamente. Para evaluar las características de dispersión de los modos guiados, que se aplica a cualquier guía de onda 2-D con índice de escalón, se toman en cuenta las siguientes normalizaciones: *Frecuencia normalizada*  $V$  e *Índice de la guía normalizado*  $b$ ,

$$V = k_0 T \sqrt{n_p^2 - n_s^2}, \quad b_E = (N^2 - n_s^2) / (n_p^2 - n_s^2). \quad (17)$$

La medida de la simetría de la guía de onda se define como:

$$a_E = (n_s^2 - n_c^2) / (n_p^2 - n_s^2). \quad (18)$$

Utilizando las ecuaciones 17 y 18, la ecuación 16 puede escribirse como:

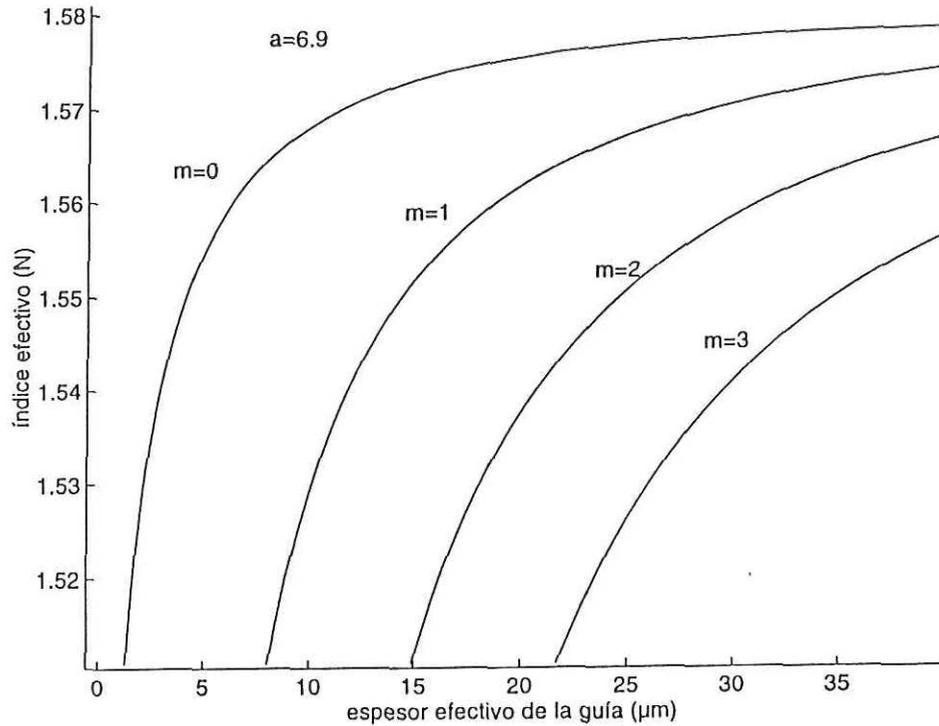
$$V \sqrt{1 - b_E} = (m + 1) \pi + \text{atan} \sqrt{\frac{b_E}{1 - b_E}} + \text{atan} \sqrt{\frac{b_E + a_E}{1 - b_E}}. \quad (19)$$

De la ecuación 19 se obtiene la gráfica del índice efectivo de la guía en función de la profundidad efectiva, como se muestra en figura 10. Cuando los parámetros de la guía se conocen, el índice efectivo se puede obtener de esta gráfica (figura 10).

---

 GUÍAS DE ONDA EN DOS Y TRES DIMENSIONES
 

---



**FIGURA 10** Curvas del índice efectivo en función de la profundidad efectiva, para guías de onda planas con perfil de índice de escalón.

Los parámetros de las guías de onda se determinan por lo regular en base a la frecuencia de corte de los modos guiados. Cuando  $n_s = N$ , la ecuación 19 queda:

$$V_m = V_0 + m\pi, \quad V_0 = a \tan \sqrt{a_E} \quad (20)$$

donde  $V_0$  es la frecuencia de corte para el modo fundamental.

Si se hace el mismo procedimiento anterior, se obtiene la ecuación 19 para los modos TM, para este caso  $E_z$  y  $H_x$  son continuos en las interfases. El resultado final es una relación que incluye los índices de refracción, y está dada por:

$$k_y T = (m + 1) \pi + \operatorname{atan} \left( \frac{n_s^2}{n_p^2} \right) (\gamma_s / k_y) + \operatorname{atan} \left( \frac{n_c^2}{n_p^2} \right) (\gamma_c / k_y) \quad (21)$$

donde  $m = 0, 1, 2, \dots$ . Los parámetros de la normalización son los siguientes:

$$b_M = \frac{(N^2 - n_s^2)}{(n_p^2 - n_s^2)} \left( \frac{n_p}{n_s q_s} \right)^2, \quad q_s = \frac{N^2}{n_p^2} + \frac{N^2}{n_s^2} - 1 \quad (22)$$

$$a_E = \left( \frac{n_p}{n_c} \right)^4 \frac{(n_s^2 - n_c^2)}{(n_p^2 - n_s^2)} \quad (23)$$

Introduciendo las ecuaciones 22 y 23 en la ecuación 21, y reescribiendo esta queda como:

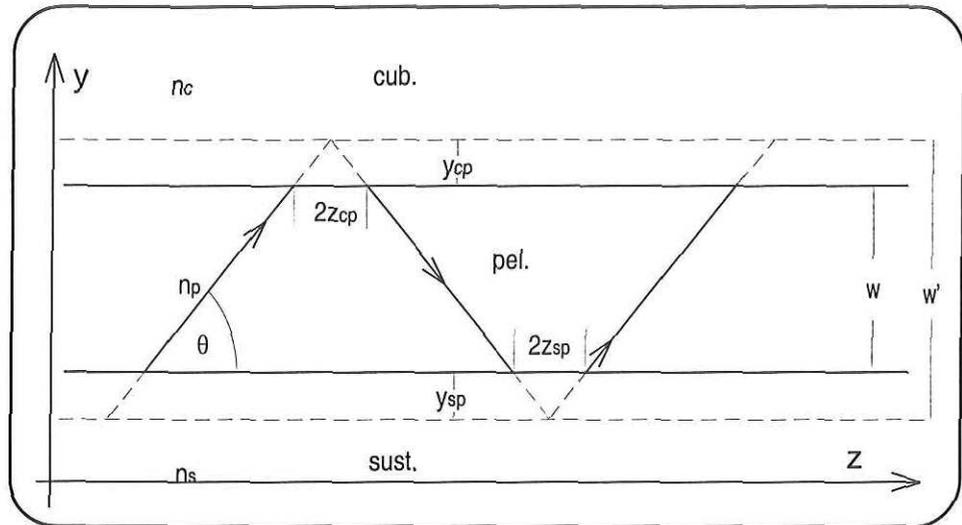
$$V \sqrt{q_s} \frac{n_p}{n_s} \sqrt{1 - b_M} = (m + 1) \pi - \operatorname{atan} \sqrt{\frac{1 - b_M}{b_M}} - \operatorname{atan} \sqrt{\frac{1 - b_M}{b_M + (1 - b_M d) a_M}} \quad (24)$$

en donde  $d \equiv (1 - n_s^2/n_p^2) (1 - n_c^2/n_p^2)$ .

### 3.2.2 Ancho efectivo de la guía de onda

Si consideramos que en las interfases de la guía de onda se forma un campo evanescente que penetra en el material de índice de refracción bajo (Kohelnik y Weber, 1974). En la figura 11 se puede apreciar la penetración y el desplazamiento lateral del haz  $2z_{sp}$ .

## GUÍAS DE ONDA EN DOS Y TRES DIMENSIONES



**FIGURA 11** Se muestra la propagación de una onda, tomando en consideración la penetración del campo evanescente dentro de los materiales de índices de refracción bajos.

Si definimos a la penetración del haz en la cubierta como  $y_{cp}$  y a la penetración del mismo haz en el sustrato como  $y_{sp}$ , el haz en zig-zag propagándose en la guía ve a esta con un ancho efectivo  $w'$  dado por:

$$w' = w + y_{cp} + y_{sp} \quad (25)$$

La aparente penetración del haz hacia la cubierta y el sustrato cambian dependiendo de la polarización que se utiliza, ya sea **s** o **p**. Para la polarización **s** la ecuación 25 es:

$$w_s = w + 1/\alpha_s + 1/\alpha_c \quad (26)$$

lo mismo sucede para la polarización  $\mathbf{p}$ , teniendo que el ancho efectivo de la guía es:

$$\begin{aligned}
 w' &= w + \frac{1}{\alpha_s \left( \frac{\beta^2}{n_p^2 k_0^2} + \frac{\beta^2}{n_s^2 k_0^2} - 1 \right)} + \frac{1}{\alpha_c \left( \frac{\beta^2}{n_p^2 k_0^2} + \frac{\beta^2}{n_c^2 k_0^2} - 1 \right)} \\
 &= w + \frac{n_p^2 n_s^2 (\alpha_s^2 + k_p^2)}{\alpha_s (\alpha_s^2 n_p^4 + k_p^2 n_s^4)} + \frac{n_p^2 n_c^2 (\alpha_c^2 + k_p^2)}{\alpha_c (\alpha_c^2 n_p^4 + k_p^2 n_c^4)} \quad (27)
 \end{aligned}$$

donde  $\alpha_s$ ,  $\alpha_c$  y  $k_p$  estan dadas por las ecuaciones

$$k_p = \sqrt{k_0^2 n_p^2 - \beta^2} \quad (28)$$

$$\alpha_s = \sqrt{\beta^2 - k_0^2 n_s^2} \quad (29)$$

$$\alpha_c = \sqrt{\beta^2 - k_0^2 n_c^2} \quad (30)$$

### 3.2.3 Guías con pérdidas bajas

Si consideramos una guía de onda plana compuesta por un medio con pérdidas, la permitividad del medio es compleja y  $n$ , es expresada sumando a la parte real del índice de refracción la componente imaginaria:

$$n_i + jK_i \quad (31)$$

el subíndice  $i$  se refiere al medio sustrato, cubierta o película ( $s$ ,  $c$  y  $p$ ) y el término  $K_j$  es llamado coeficiente de extinción y está relacionado con el coeficiente de atenuación por unidad de longitud  $\Gamma_i$  como:

---

 GUÍAS DE ONDA EN DOS Y TRES DIMENSIONES
 

---

$$\Gamma_i = -2K_i k \quad (32)$$

donde  $k$  es el número de onda.

Considerando una guía de onda plana con pérdidas relativamente bajas tenemos que  $K_j \ll n_j$  donde  $j = p, s$  y  $c$ , por tal motivo la acción de guiar está dominada por el efecto de la parte real del índice de refracción; para esta situación la ley de Snell es:  $\frac{\sin\theta_i}{\sin\theta_t} = \frac{n_1}{n_2} = \sqrt{\frac{\epsilon_1}{\epsilon_2}}$ , de la que se obtiene:

$$(n_2 + jK_2) \cos\theta_t \cong j\sqrt{n_1^2 \sin^2\theta_i - n_2^2} + \frac{n_2 K_2 - n_1 K_1 \sin^2\theta_i}{\sqrt{n_1^2 \sin^2\theta_i - n_2^2}} \quad (33)$$

Utilizando la ecuación A.61 del apéndice A y la relación que existe entre la onda incidente y la reflejada para una polarización  $s$ , se obtienen los siguientes resultados para el coeficiente de reflexión de potencia en terminos del ángulo de incidencia  $\theta$  (Snyder y Love, 1975), para la interfase película-sustrato.

$$R_{psS} \cong 1 - \frac{4n_p n_s^2 \sin\theta (K_s/n_s - K_p/n_p)}{(n_p^2 - n_s^2) \sqrt{n_p^2 \cos^2\theta - n_s^2}} \quad (34)$$

utilizando la ecuación A.63 del apéndice A se obtiene el correspondiente coeficiente para la polarización  $p$  que es:

$$R_{psP} \cong 1 - \frac{4n_p n_s^2 \sin\theta (K_s/n_s - K_p/n_p) (2n_p^2 \cos^2\theta - n_s^2)}{(n_p^2 - n_s^2) \sqrt{n_p^2 \cos^2\theta - n_s^2} (n_p^2 \cos^2\theta - n_s^2 \sin^2\theta)} \quad (35)$$

para obtener las ecuaciones 34 y 35 se tomó en cuenta que:  $K_s/n_s - K_p/n_p \ll n_p^2 \cos^2\theta - n_s^2$ , y sólo se tienen los términos de la parte lineal de  $K_{s,p}$ . Los resultados del coeficiente de la

---

**Método de Aproximación de Rayos Para Guías de Onda Ópticas de**

---

reflectancia para la interfase película-cubierta, se obtiene sustituyendo el subíndice  $s$  por  $c$ , en las ecuaciones 34 y 35. Las ecuaciones para la atenuación de los modos son ahora sencillas; si utilizamos estos coeficientes de reflexión junto con los obtenidos para los anchos efectivos de la guía ecuaciones 26 y 27, considerando un plano dieléctrico que guía debilmente, se obtiene el coeficiente de atenuación. Por el término debilmente guiado (Glode, 1971) se dice que los índices de refracción no son muy diferentes  $(n_p - n_{s,c}) \ll n_p$ , por lo tanto el coeficiente de atenuación es:

$$\alpha \cong \frac{\frac{2\alpha_s^2 (\Gamma_s - \Gamma_p)}{\alpha_s (\alpha_s^2 + k_p^2)} + \frac{2\alpha_s^2 (\Gamma_c - \Gamma_p)}{\alpha_c (\alpha_c^2 + k_p^2)}}{\left(h + \frac{1}{\alpha_s} + \frac{1}{\alpha_c}\right)} + \Gamma_p$$

$$= \frac{\left(h + \frac{\alpha_c}{\alpha_c^2 + k_p^2} + \frac{\alpha_s}{\alpha_s^2 + k_p^2}\right)\Gamma_p + \left(\frac{\alpha_s^2}{\alpha_s (\alpha_s^2 + k_p^2)}\right)\Gamma_s + \left(\frac{\alpha_s^2}{\alpha_c (\alpha_c^2 + k_p^2)}\right)\Gamma_c}{h + \frac{1}{\alpha_s} + \frac{1}{\alpha_c}} \quad (36)$$

### 3.3 Método de Aproximación de Rayos Para Guías de Onda Ópticas de Perfil Gradiente en 2-D

---

Partiendo de la ecuación de onda:

$$\frac{\partial^2 \vec{E}_x}{\partial y^2} + (k_0^2 n^2(y) - \beta^2) \vec{E}_x = 0 \quad (37)$$

---

**GUÍAS DE ONDA EN DOS Y TRES DIMENSIONES**


---

si el perfil de índice de refracción cambia gradualmente ecuación (1), la solución sólo puede ser obtenida si el cambio en el índice de refracción es exponencial con  $y$  (Walker, 1985). Además esta distribución del índice de refracción se resuelve utilizando diferentes análisis de aproximación como: aproximación de multicapas (Suematsu y Furuya, 1972), aproximación lineal en segmentos (Marcuse, 1973), método de aproximación de rayos (Hocker y Burns, 1975) y el método WKB (Shiff, 1968; Kawakami, 1980).

En la figura 12a, se observa que  $g(y)$  tiene su valor máximo en la superficie de la guía  $n_s + \Delta n$  en  $y = 0$ , considerando que  $g(y)$  es una función que sus valores están entre 0 y 1. La profundidad de la difusión que se denota por  $d$  el valor de  $g(y)$  es igual a  $1/e$ .

Si la trayectoria del haz propagándose en la guía, como se muestra en la figura 12b se divide en segmentos infinitesimales  $\Delta z$ . Si la dirección de propagación del haz cambia gradualmente figura 12c, el ángulo  $\pi/2 - \theta_i$  que el haz tiene con respecto a la dirección de la guía  $z$ , varía de acuerdo a la ecuación:

$$\pi/2 - \theta_i = \text{acos}(N/n(y_i)) \quad (38)$$

donde  $N$  es el índice efectivo del modo guiado. La profundidad del segmento  $i$  está dado por:

$$\Delta y_i = \Delta \tan \theta_i \quad (39)$$

Si  $\theta_i = \pi/2$  en la ecuación 38 se tiene que:

$$N = n(y_t) \quad (40)$$

## Método de Aproximación de Rayos Para Guías de Onda Ópticas de

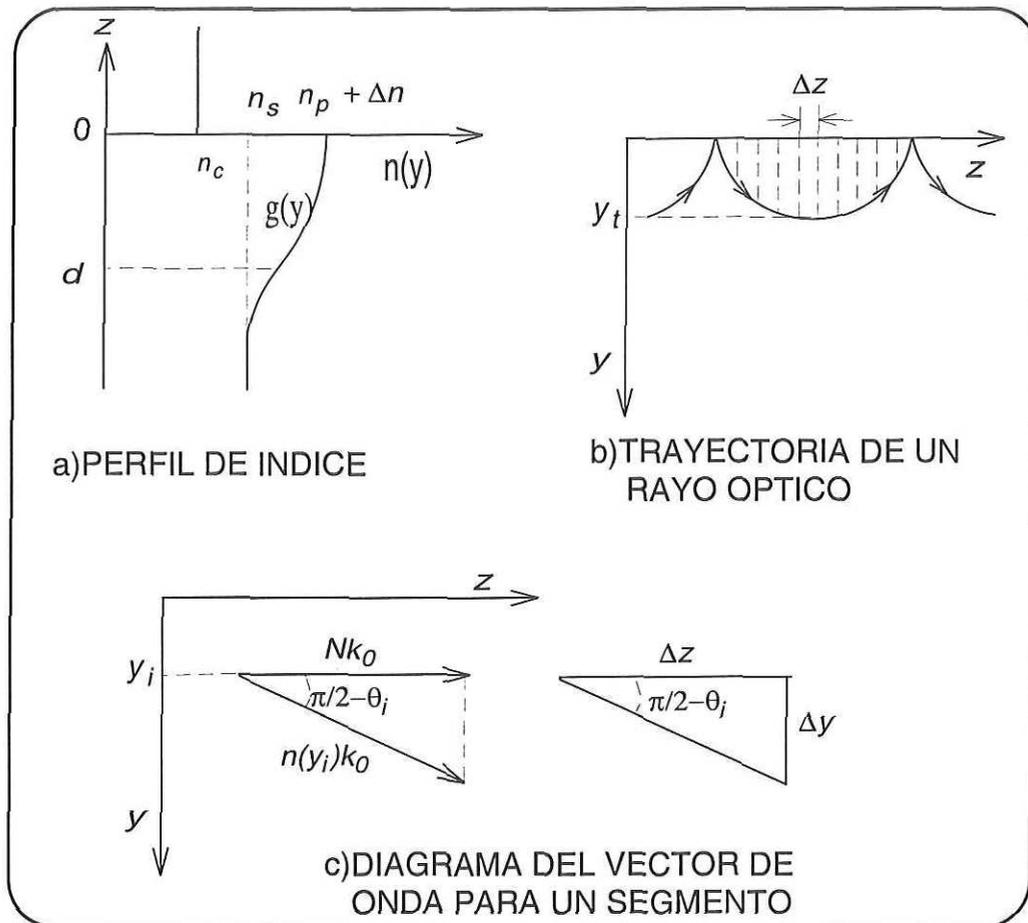


FIGURA 12 Modelo analítico del método de aproximación de rayos

La ecuación 40 da el punto de la penetración máxima  $y_t$  de la onda en la guía, en este punto la onda se regresa hacia la superficie; a este punto se le llama *punto de regreso* y  $y_t$  se relaciona con el espesor efectivo de la guía de onda. El incremento del cambio de la fase a lo largo de la sección transversal  $\Delta y_t$  es:

---

 GUÍAS DE ONDA EN DOS Y TRES DIMENSIONES
 

---

$$\phi_i = k_0 n(y_i) \operatorname{sen}(\theta_i) \cdot \Delta y_i = k_0 \sqrt{n(y_i)^2 - N^2} \cdot \Delta y_i \quad (41)$$

además se le suma el cambio de la fase de la reflexión total interna en la superficie de la guía. La reflexión de la onda plana en la interfase entre dos dieléctricos diferentes se obtienen utilizando las ecuaciones de Fresnel. Si se considera que  $\Delta n \ll n_s$  que por lo regular se cumple para guías de onda hechas por difusión, las ecuaciones de Fresnel dan los cambios de fase

$$2\Phi_t = \pi/2 \quad \text{en } y = y_t$$

$$2\Phi_0 = \pi \quad \text{en } y = 0 \quad (42)$$

Para que existan modos guiados se requiere que cumpla el principio de auto-consistencia, es decir que el cambio de fase total transversal para una vuelta completa en la guía sea múltiplo entero de  $2\pi$ , de esta condición se tiene:

$$\sum_i \phi_i - \Phi_0 - \Phi_t = 2m\pi \quad (43)$$

en donde  $m = 0, 1, 2, \dots$  es el número de modo. Utilizando el primer término del lado izquierdo de la ecuación 43 que está dado por:

$$\sum_i \phi_i = 2k_0 \int_0^{y_t} \sqrt{(n(y_i))^2 - N^2} dy. \quad (44)$$

Considerando de nuevo que  $\Delta n \ll n_s$ , la ecuación 1 es:

$$n(y) \cong n_s + (n_p^2 - n_s^2) g(y) \quad (45)$$

---

**Método de Aproximación de Rayos Para Guías de Onda Ópticas de**

---

donde el índice de refracción máximo de la guía de onda es  $n_p = \Delta n + n_s$ . Como  $d$  corresponde al espesor de la guía, la profundidad de la difusión normalizada se puede definir por:

$$V_d = k_0 d \sqrt{n_p^2 - n_s^2}. \quad (46)$$

Utilizando las ecuaciones 42, 44-46 y la frecuencia normalizada  $V_d$ , la ecuación 44 puede ser reescrita como:

$$2V_d \int_0^{\zeta_t} \sqrt{f(\zeta) - b} d\zeta = (2m + \frac{3}{2}) \pi, \quad (47)$$

en donde  $\zeta = y/d$ ,  $\zeta_t = y_t/d$  y  $f(\zeta_t) = b$ . La función anterior se resuelve numéricamente si se conoce la función de distribución del índice  $f(\zeta)$ . Si se considera que en guías de onda por difusión, la distribución del índice es Gaussiano, es decir  $f(\zeta) = \exp(-\zeta^2)$ . De la ecuación 47 se obtiene la frecuencia de corte para un modo guiado, si  $b = 0$ , si se considera que en los puntos de corte  $y_t \rightarrow \infty$ , la ecuación 47 es:

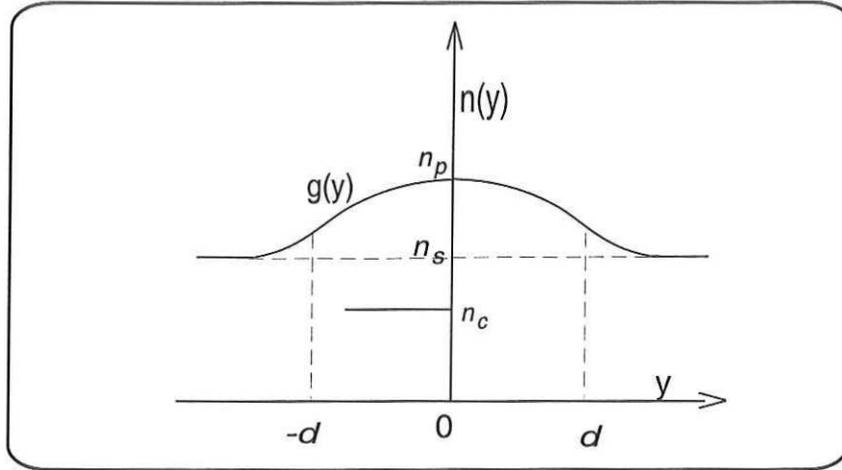
$$V_{dm} = (2m + \frac{3}{4}) \sqrt{2\pi} \quad (48)$$

Por otro lado se puede obtener una guía de onda de índice gradiente con perfil de índice Gaussiano con una distribución simétrica como se observa en la figura 13, para este caso la guía tiene dos puntos de retorno  $x = x_p, -x_t$ ;

---

 GUÍAS DE ONDA EN DOS Y TRES DIMENSIONES
 

---



**FIGURA 13** Perfil de índice de una guía de onda con índice gradiente simétrico.

en estos puntos la onda guiada es totalmente reflejada. Las ecuaciones 34, 47 y 48 se pueden reescribir como:

$$2m\pi = \left( \sum_i \phi_i - 2\Phi_l \right) \quad (49)$$

$$2V_d \int_0^{\zeta_l} \sqrt{f(\zeta) - b} d\zeta = \left( m + \frac{1}{2} \right) \pi \quad (50)$$

$$V_{dm} = \left( m + \frac{1}{2} \right) \sqrt{\frac{\pi}{2}} \quad (51)$$

### 3.3.1 Método WKB para guías con índice gradiente en 2-D

El método WKB da soluciones aproximadas para la ecuación de onda y es descrito a continuación. Si se definen a:

---

**Método de Aproximación de Rayos Para Guías de Onda Ópticas de**

---

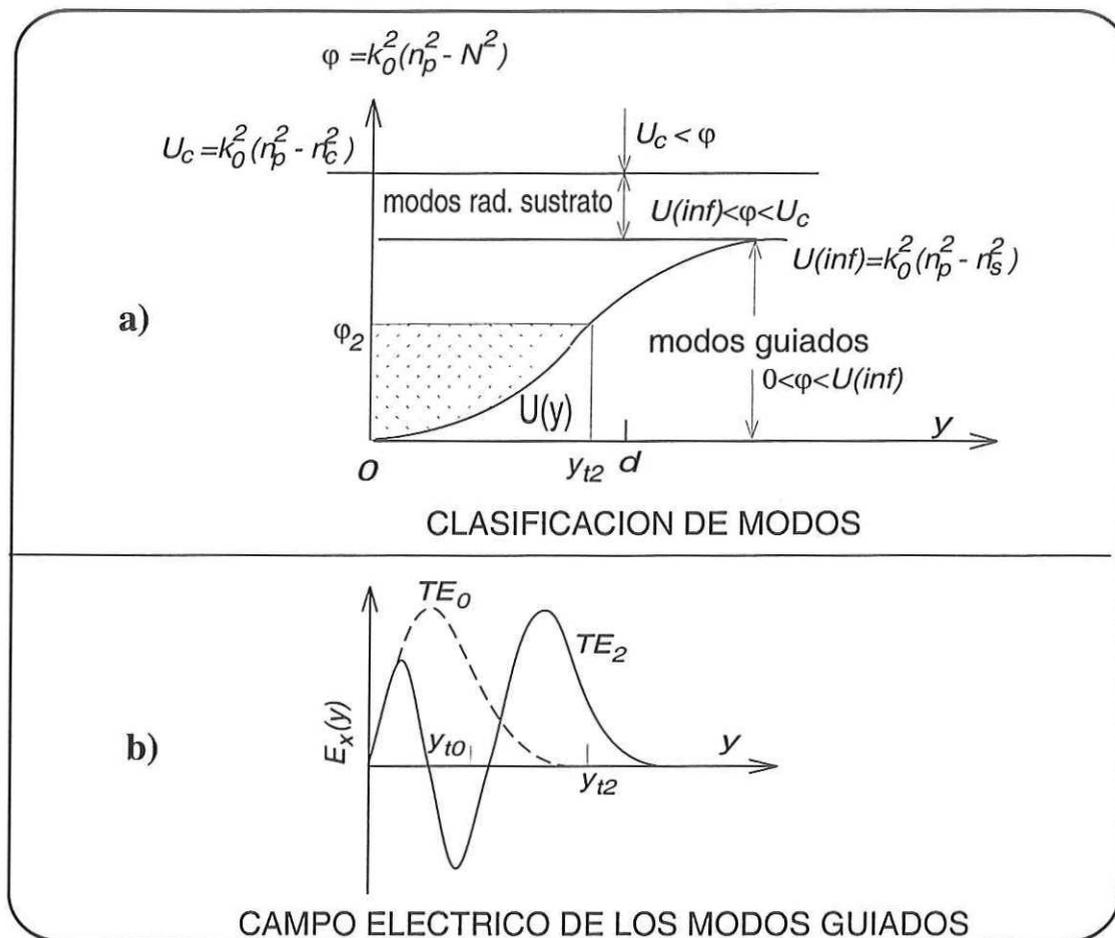
$$\varphi = k_0^2 (n_p^2 - N^2), \text{ y } U(y) = k_0^2 (n_p^2 - n(y)^2) \quad (52)$$

y reescribiendo la ecuación de onda ecuación 37 en forma de la ecuación de Schrödinger

$$\frac{\partial^2 \vec{E}_x}{\partial y^2} + (\varphi - U(y)) \vec{E}_x = 0 \quad (53)$$

la cual se puede relacionar a un problema cuántico:  $\varphi$  depende del índice del modo efectivo,  $N$ , y puede interpretarse como la energía de un electrón ligado a un potencial  $U(y)$ . Los modos de la guía de onda de índice gradiente pueden ser clasificados dependiendo del nivel de energía del electrón, como se muestra en la figura 14a.

## GUÍAS DE ONDA EN DOS Y TRES DIMENSIONES



**FIGURA 14** Soluciones de la ecuación de onda utilizando el método WKB.

Los modos guiados se encuentran en el rango de energías de:  $0 < \varphi < U(\infty)$ . De lo contrario, electrones con energías superiores a  $U(\infty)$  no se encuentran ligados, los cuales corresponden a los modos de radiación.

Los puntos de regreso  $y = y_t$ , se obtienen de  $U(y_t) = \varphi$ , la cual es equivalente a la ecuación 41. Los modos son confinados en el rango de  $0 < y < y_t$ , figura 14b. El

---

**Método de Aproximación de Rayos Para Guías de Onda Ópticas de**

---

campo eléctrico  $E_x(y)$ , es una función oscilatoria para  $0 < y < y_t$ , donde  $0 < \varphi < U(\infty)$ . Por otro lado  $E_x(y)$  decrece exponencialmente dentro de  $y > y_t$ , donde  $\varphi > U(\infty)$ . Con estas consideraciones y la variación de  $U(y)$  sobre una longitud de onda pequeña, se obtiene una solución aproximada de la ecuación de onda. Esta solución posee una discontinuidad en la vecindad del punto de regreso  $y = y_t$ , para evitarla, se considera que el índice de refracción  $n(y)$  cambia linealmente en esta vecindad. La solución aproximada dentro de esta vecindad se expresa en términos de las funciones de Bessel de orden  $-1/3$ . Por lo tanto, la solución aproximada del campo  $E_x(y)$  se puede expresar de la siguiente manera, en la que se incluye el campo sobre la cubierta:

$$\begin{aligned}
 E_x &= A \exp(\gamma_c y) & y < 0 \\
 E_x &= B \frac{1}{\sqrt{k(y)}} \cos\left(\frac{\pi}{4} - k(y)\right) & 0 < y < y_t \\
 E_x &= \frac{B}{2} \frac{\sqrt{2\pi K(y)}}{\sqrt{3\pi k(y)}} \{J_{1/3}K(y) + J_{-1/3}K(y)\} & y \leq y_t \\
 E_x &= \frac{B}{2} \frac{\sqrt{2\pi \Gamma_s(y)}}{\sqrt{3\pi \gamma_s(y)}} \{I_{1/3}\Gamma_s(y) + J_{-1/3}\Gamma_s(y)\} & (y \geq y_t) \\
 E_x &= \frac{B \exp(-\Gamma_s(y))}{2 \sqrt{\gamma_s(y)}} & y > y_t
 \end{aligned} \tag{54}$$

en donde  $k(y) = \sqrt{k_0^2 n^2(y) - \beta^2}$ ,  $\gamma(y) = \sqrt{\beta^2 - k_0^2 n^2(y)}$ ,  $K(y) = \int_y^{y_t} k(y) dy$  y  $\Gamma_s(y) = \int_{y_t}^y \gamma_s(y) dy$ .

---

## GUÍAS DE ONDA EN DOS Y TRES DIMENSIONES

---

La distribución típica del perfil de campo eléctrico se muestra en la figura 14b. Cuando el número de modos se incrementa, la profundidad efectiva de la guía  $y_t$  se incrementa considerablemente, dando como resultado un incremento del campo eléctrico cuya dirección apunta hacia el sustrato.

### 3.4 Guías de Onda en Tres Dimensiones

---

Si la luz puede ser confinada dentro del espesor  $y$ , y además en la dirección horizontal  $x$ , se dice que son guías de onda ópticas en tres dimensiones (**3-D**), lo cuál nos facilita la construcción de circuitos de óptica integrada o para guías de onda angostas.

Los dispositivos de guías de onda óptica tienen como función la de modular y seleccionar la luz, por lo tanto se requieren guías de 3-D, en las cuales la luz es confinada transversalmente además del confinamiento a lo largo de la profundidad. En guías de 3-D o guías de canal el modo guiado es controlado sin que exista pérdida de la luz debido a la difracción en la superficie de la guía.

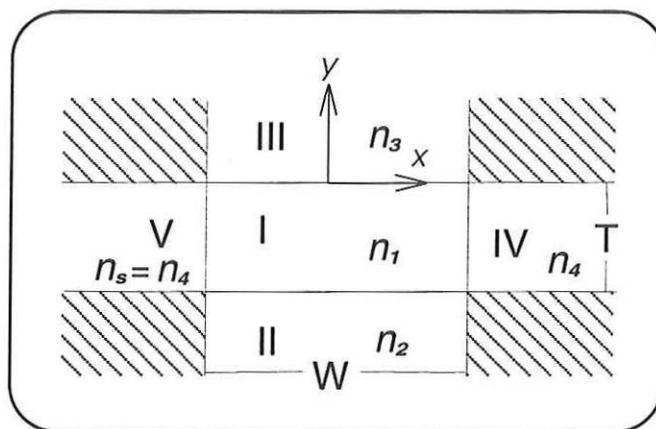
En guías de onda rectangulares para microondas, las cuales tienen paredes de un conductor metálico, pueden soportar modos puros ya sea TE o TM; sin embargo en guías de onda ópticas las cuales están rodeadas por diferentes dieléctricos, no soportan modos puros de TE y TM, sino una combinación de estos que son llamados modos híbridos. Los modos híbridos son esencialmente modos TEM polarizados a lo largo de una dirección  $x$  o  $y$ . El modo que tiene el campo eléctrico en  $E_y$  es llamado modo  $E_{p,q}^y$  (modo TM), los sub-índices  $p$  y  $q$  denotan el número de nodos del campo eléctrico  $E_y$  en las direcciones  $x$  y  $y$ .

respectivamente. Lo mismo sucede para el modo  $E_{p,q}^x$  (TE) que tiene su componente del campo eléctrico a lo largo de  $E_x$ .

La solución de la ecuación de onda de las guías de onda de 3-D con índice de escalón, es un problema de condiciones de la frontera principalmente, que puede ser solucionado correctamente con el uso de métodos computacionales. Sin embargo para su solución se utilizan métodos aproximados. Los métodos mas utilizados son dos: método Marcatili y el método de índice efectivo.

### 3.4.1 Método Marcatili

El análisis de aproximación utilizando el método de Marcatili, dice que la guía de onda en forma de escalón de 3-D, está rodeada por materiales dieléctricos de diferente índice de refracción como se muestra en la figura 15.



**FIGURA 15** Vista de un corte transversal de una guía de onda de escalón en 3-D, que se utiliza para hacer el análisis del método Marcatili.

---

**GUÍAS DE ONDA EN DOS Y TRES DIMENSIONES**


---

Bajo la condición de que exista un modo guiado dentro de la guía, la mayoría de la energía óptica se confina en la región I de la figura 15, y sólo una pequeña cantidad de energía viaja en las otras regiones en donde el campo electromagnético decae exponencialmente; en las regiones sombreadas, la energía que se propaga es mucho menor, por lo tanto para el análisis, estas energías son muy pequeñas y no contribuyen considerablemente al total de la energía que viaja en la guía. Considerando al modo  $E_{p,q}^y$  cuyas componentes de campo eléctrico son  $E_y$  y  $H_x$ , de las ecuaciones de Maxwell se obtiene que  $H_x = 0$  para este modo híbrido. Utilizando separación de variables, la ecuación de onda para  $H_x(x, y)$  puede ser resuelta con las condiciones de frontera:  $H_x$  es continua en las interfases  $y = 0$  y  $y = -T$  y  $E_y$  es continua en las interfases  $y = \frac{W}{2}$  y en  $y = -\frac{W}{2}$  la distribución de campo eléctrico  $H_x(x, y)$  que se obtiene es como sigue:

$$\begin{aligned}
 H_I \cos(k_y T + \phi_1) \cos(k_x x + \phi_2) & \quad \text{Región I} \\
 H_I \cos(k_y T - \phi_1) \cos(k_x x + \phi_2) \exp(\gamma_{y2}(y + T)) & \quad \text{Región II} \\
 H_I \cos \phi_1 \cos(k_x x + \phi_2) \exp(-\gamma_{y3} y) & \quad \text{Región III} \\
 H_I \cos(k_x W/2 + \phi_2) \cos(k_x y + \phi_1) \exp(-\gamma_{x4} - W/2) & \quad \text{Región IV} \\
 H_I \cos(k_x W/2 + \phi_2) \cos(k_y y + \phi_1) \exp(\gamma_{x4}(y + W/2)) & \quad \text{Región V} \quad (55)
 \end{aligned}$$

Se tomó en cuenta que la guía de onda es simétrica con respecto a  $x$ , es decir  $n_4 = n_5$ , como se muestra en la figura 15. Si la fase es  $\phi_2 = 0$  para las siguientes expresiones, se tiene que los modos son simétricos y los campos varían como  $\cos(k_x x)$ . Por otro lado se

---

**Guías de Onda en Tres Dimensiones**


---

tienen los modos antisimétricos cuando la fase es  $\phi_2 = \pi/2$  y el campo varía como  $\text{sen}(k_x x)$ . Las relaciones de las constantes de propagación de la ecuación 55 son:

$$\beta^2 = k_0^2 n_1^2 - k_x^2 - k_y^2 \quad \gamma_{yi}^2 = \beta^2 + k_x^2 - k_0^2 n_i^2 \quad (56)$$

donde  $i = 1, 2, 3, 4$ . La continuidad de  $E_z$  en  $y = 0$  y  $y = -T$  da los cambios de fase

$$\phi_1 = \frac{\pi}{2} - \text{atan}\left(\frac{n_3}{n_1}\right)^2 \left(\frac{k_y}{\gamma_{y2}}\right) \quad (57)$$

y la ecuación para  $k_y$  es:

$$k_y T = (p + 1)\pi - \text{atan}\left(\frac{n_3}{n_1}\right)^2 \left(\frac{k_y}{\gamma_{y3}}\right) - \text{atan}\left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 \left(\frac{k_y}{\gamma_{y2}}\right) \quad (58)$$

donde  $p = 1, 2, 3, \dots$ , además si se considera que  $H_z$  es continua en las interfases  $y = \frac{W}{2}$  y en  $y = -\frac{W}{2}$  se tiene:

$$k_x W = (q + 1)\pi - 2 \text{atan}\left(\frac{k_x}{\gamma_{x4}}\right) \quad (59)$$

donde  $q = 2, 4, 6, \dots$  y  $q = 1, 3, 5, \dots$  corresponden a los modos simétricos y antisimétricos respectivamente. Las soluciones de las ecuaciones 54 y 55 dan la constante de propagación  $\beta$  de los modos híbridos. La distribución del campo  $H_z(x, y)$  para el modo fundamental  $E_{00}^y$  y el del primer orden  $E_{01}^y$  se muestran en la figura 15 denotado por la línea sólida y punteada respectivamente.

---

 GUÍAS DE ONDA EN DOS Y TRES DIMENSIONES
 

---

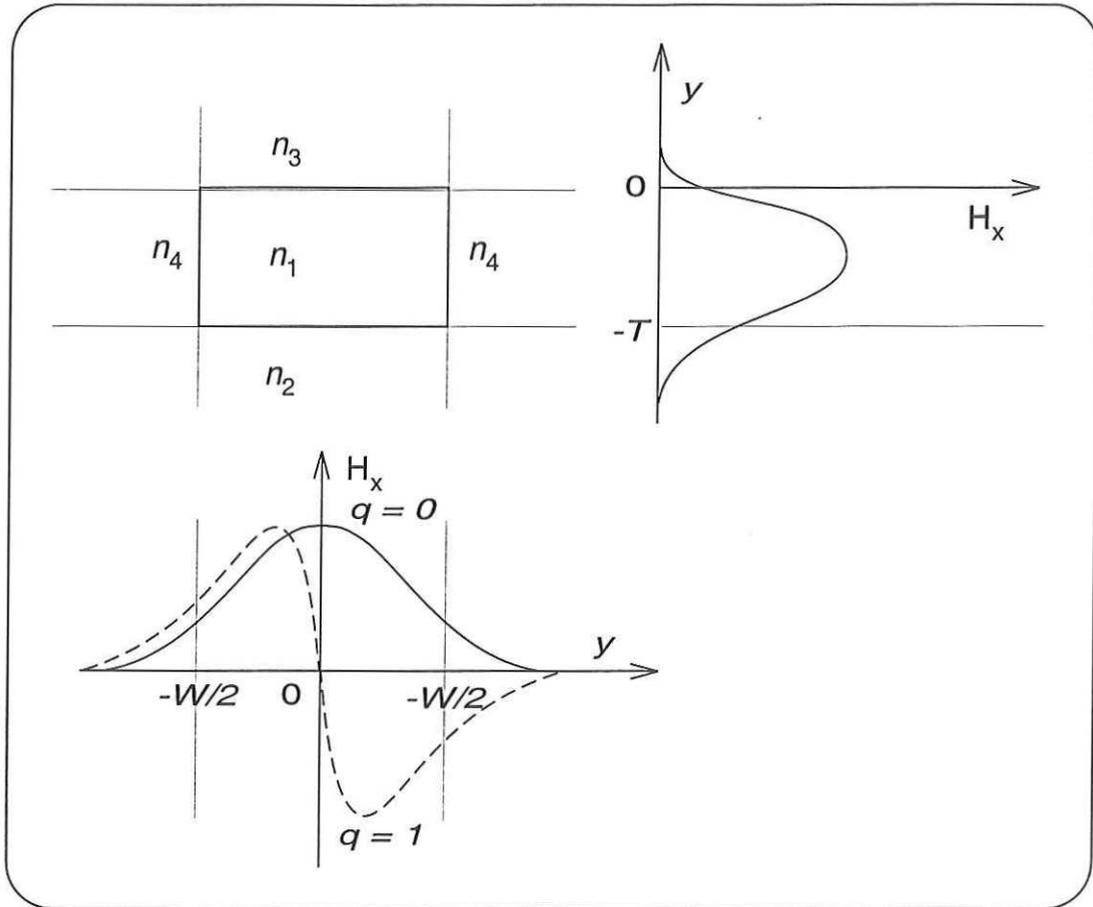


FIGURA 16 Distribución de campo para modos simétricos y antisimétricos en guías de 3-D.

### 3.4.2 Método del índice efectivo

Para el análisis este método de aproximación se basa en el concepto del índice efectivo del modo guiado. Como ejemplo de una guía de onda de 3-D se muestra en la figura 17, donde  $n_p - n_s \ll 1$ . Con este método la guía de 3-D se divide en dos guías de 2-D, una

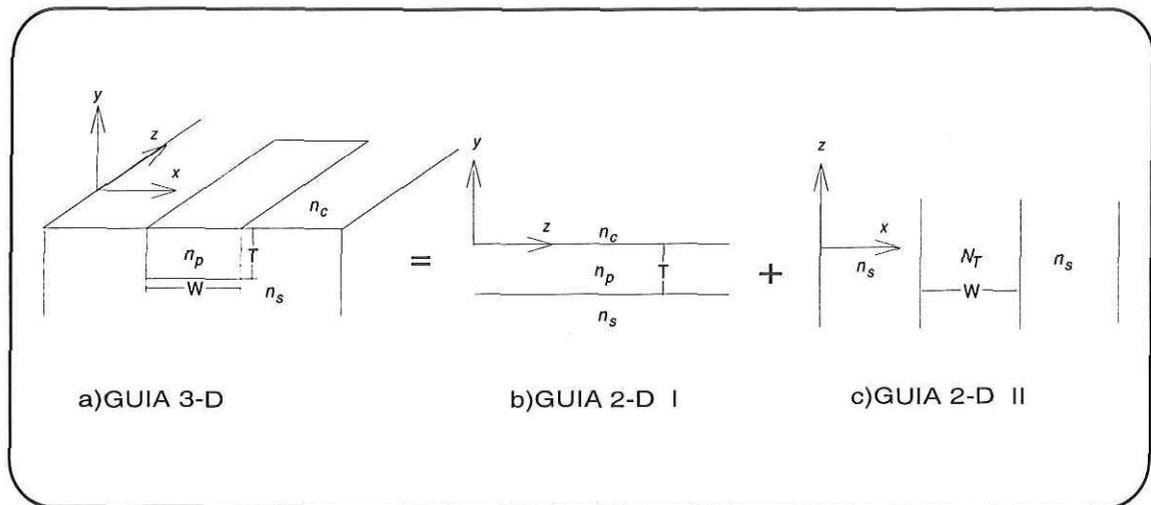
---

 Guías de Onda en Tres Dimensiones
 

---

tiene un confinamiento de la luz en la dirección  $x$  fig.17c y la otra en la dirección  $y$  figura 17b. Para el modo  $E_{p,q}^y$  de la guía I figura 17b cuyas componentes del campo son  $H_x$  y  $E_y$ , y con la ecuación de dispersión 24 se obtiene el índice efectivo  $N_I$  para el modo TM con las componentes de campo  $E_y$ ,  $H_x$  y  $E_z$ . También se puede obtener el valor del índice normalizado de la guía  $b_I$ , utilizando la gráfica de la figura 10. Entonces:

$$N_I = \sqrt{n_s^2 + b_I(n_p^2 - n_s^2)}. \quad (60)$$



**FIGURA 17** a) Se muestra una guía de onda en 3-D, b) vista transversal en el plano  $y$ - $z$  de la guía y c) vista transversal en el plano  $z$ - $x$  de la guía.

La guía II 2-D figura 17c, es simétrica ya que se encuentra rodeada por el sustrato ( $n_s$ ), en la cual el modo guiado ve el índice efectivo  $N_I$ . El modo guiado de interés es el TE en la guía II cuyas componentes de campo son:  $H_x$ ,  $E_y$ , y  $E_z$ , debido a que está pola-

---

**GUÍAS DE ONDA EN DOS Y TRES DIMENSIONES**


---

rizado a lo largo de  $y$ . Para un modo TE de una guía simétrica se obtiene utilizando la ecuación 27:

$$V_{II}\sqrt{1-b_{II}} = (q+1)\pi - 2\operatorname{atan}\sqrt{\frac{1-b_{II}}{b_{II}}} \quad (61)$$

donde la frecuencia normalizada  $V_{II}$  y el índice de la guía  $b_{II}$  son:

$$V_{II} = k_0 W \sqrt{N_I^2 - n_s^2} \text{ y } b_{II} = (N^2 - n_s^2) / (N_I^2 - n_s^2). \quad (62)$$

Utilizando la curva de la gráfica 10, se obtiene la constante de propagación  $\beta = k_0 N$ . La frecuencia de corte para la guía de onda II es cuando  $b_{II} = 0$ , y de la ecuación 61 se obtiene que  $V_{II} = q\pi + \frac{\pi}{2}$ .

El método del índice efectivo es utilizado en guías de onda 3-D para obtener la constante de propagación  $\beta$  de los modos híbridos utilizando la ecuación 47 y de las curvas mostradas en la fig. 10. La ventaja de este método es que las constantes se obtienen fácilmente, pero si se requiere precisión en los resultados se recomienda utilizar el método de Marcatili.

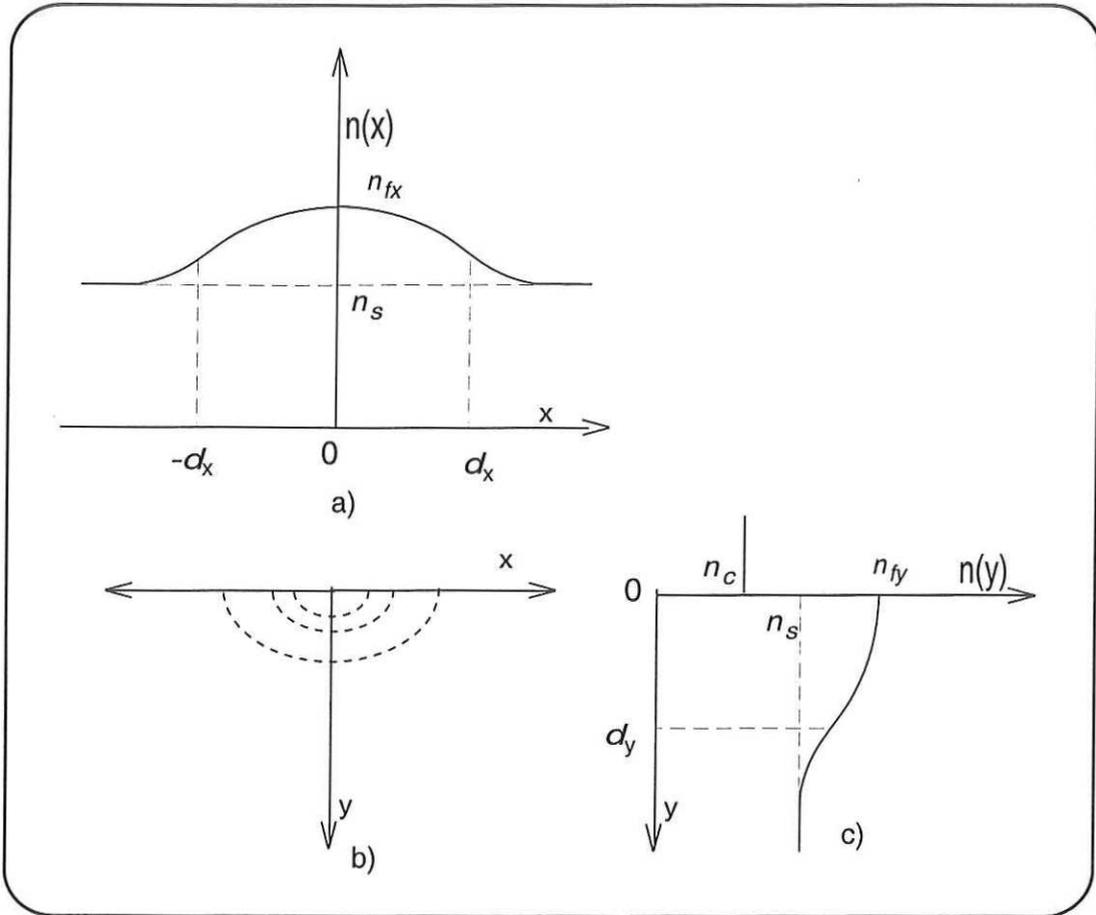
### 3.4.3 Diseño de guías de onda monomodales 3-D de índice gradiente

Para guías de onda fabricadas por difusión de iones el perfil de índice típico que presentan es el Gaussiano en la dirección  $x$  y  $y$ . Este tipo de distribución de índices se presentan en la figura 18, donde  $d_x$  y  $d_y$  se refieren a las profundidades de difusión.

---

 Guías de Onda en Tres Dimensiones
 

---



**FIGURA 18** a) Se muestra un perfil de índice de refracción Gaussiano simétrico en la dirección  $x$  para una guía de onda en 3-D, b) La distribución que tiene el perfil de a) hacia dentro de la guía y c) la distribución del perfil de índice de refracción en la dirección  $y$  de la guía.

donde  $n(y) = n_s - \Delta n_y \exp(-y^2/d_y^2)$  y  $n(x) = n_s - \Delta n_x \exp(-x^2/d_x^2)$ . Este tipo de guías son analizadas por el método del índice efectivo, dividiendo a la guía en dos guías de 2-D con perfil Gaussiano, una simétrica figura 18a y la otra asimétrica figura 18c. De las

---

**GUÍAS DE ONDA EN DOS Y TRES DIMENSIONES**


---

ecuaciones 47 y 51 para guías de onda planas se obtienen las condiciones de corte. Para la guía asimétrica en 2-D figura 18c, de la ecuación 47 se obtiene el rango de la frecuencia de corte para la propagación del modo fundamental y es:

$$\frac{3\sqrt{2}}{4}\sqrt{\pi} < V_{dI} \leq \frac{7\sqrt{2}}{4}\sqrt{\pi} \quad (63)$$

donde

$$V_{dI} = k_0 d_y \sqrt{n_{fx}^2 - n_s^2}. \quad (64)$$

El índice efectivo se obtiene de la ecuación 60 independientemente del tipo de perfil.

Si se considera una guía de onda simétrica figura 18a, con un perfil de índice gradiente tipo Gaussiano, en donde el índice máximo se encuentra en  $x = 0$  y es  $N_t$  con una distancia de difusión  $d_x$ . Por lo tanto la frecuencia normalizada  $V_{dII}$  es:

$$V_{dII} = k_0 d_x \sqrt{N_t^2 - n_s^2} \quad (65)$$

De la ecuación 51 se obtiene el rango de la frecuencia  $V_{dII}$  que soporta el modo fundamental.

$$\frac{1}{2}\sqrt{\frac{\pi}{2}} < V_{dII} \leq \frac{3}{2}\sqrt{\frac{\pi}{2}} \quad (66)$$

Utilizando las ecuaciones 64 y 65, la ecuación 66 se escribe como:

$$\frac{\sqrt{\pi/2}}{V_{dI}\sqrt{b_I}} < \frac{2d_x}{d_y} \leq 3 \frac{\sqrt{\pi/2}}{V_{dI}\sqrt{b_I}} \quad (67)$$

---

**Guías de Onda en Tres Dimensiones**

---

la cual presenta una relación  $2d_x/d_y$  para un modo de propagación.

En este capítulo se trató de los modos de radiación sustrato, modo de radiación cubierta y del modo guiado, que existen en las guías de onda. Se trató sobre la dispersión de los modos guiados, el ancho efectivo de las guías de onda. Se consideraron diferentes métodos de aproximación del perfil de índice de refracción para guías en dos y tres dimensiones.

# *CAPÍTULO 4* MÉTODOS DE MEDICIÓN DE PÉRDIDAS, PROCESOS DE FABRICACIÓN Y PREPARACIÓN DE MUES- TRAS

---

## **4.1 Métodos Para Medir las Pérdidas en Guías de Onda**

---

Las pérdidas en las guías de onda ópticas pueden ser a causa de: absorción, esparcimiento, radiación y efectos no-lineales. El coeficiente de atenuación  $\alpha$ , que describe las pérdidas en las guías de onda se define como:

---

**Métodos Para Medir las Pérdidas en Guías de Onda**


---

$$\alpha = \frac{10 \log (p_0/p_1)}{z_1 - z_0} [dB/cm] \quad (68)$$

en donde  $p_0$  y  $p_1$  son las potencias ópticas en las posiciones  $z_0$  y  $z_1$  de las guías de onda respectivamente.

Las técnicas que son utilizadas para la medida del coeficiente de atenuación involucran medidas de la luz transmitida o esparcida en función de la distancia de propagación. Los métodos mas utilizados para obtener el coeficiente de atenuación son: acoplamiento por prisma móvil (Weber et al., 1973; Won et al., 1980; Li, 1989), de reducción (Hunsperger, 1978), interferómetro Fabry-Perot (Walker, 1985), medida de la luz esparcida (Okamura et al., 1986; Haegele; Ulrich, 1979) y deflección fototérmica (Hickernell et al., 1988).

#### 4.1.1 Interferómetro Fabry-Perot

Este método consiste en poder fabricar un etalón con las caras de la guía que deben de ser paralelas entre sí y pulidas sus superficies. Esta cavidad formada, se hace variar ya sea incrementando la longitud de esta o variando la longitud de la luz que se acopla. La señal óptica es acoplada en la guía por una de sus caras y en la otra cara se coloca un detector. Haciendo variar la longitud de la cavidad produce un cambio en la fase y esto da como resultado una variación de la intensidad de salida. Se grafica la intensidad de salida en función de la longitud de la cavidad. De la medida de los máximos y mínimos de intensidad se obtiene el contraste, a partir de la medida del contraste y la reflectancia de las caras se obtiene el coeficiente de atenuación.

---

## MÉTODOS DE MEDICIÓN DE PÉRDIDAS, PROCESOS DE FABRICACIÓN

---

Este método es no destructivo, sencillo de utilizar y rápido de aplicar. La resolución de este método se incrementa cuando la pérdidas son menores. La desventaja es que solo se debe de acoplar en la guía un modo, para que no existan superposiciones de estos a la salida y también se debe de conocer con precisión la reflectancia de las caras de la guía.

### 4.1.2 Método por esparcimiento

En guías de onda ópticas, un modo guiado tiene pérdidas de la potencia transmitida por el efecto de esparcimiento. Esta pérdida por esparcimiento es proporcional a la potencia de la señal que se guía. Si la potencia esparcida decrece con la distancia de propagación, este decremento de la potencia es proporcional a las pérdidas de la potencia transmitida. Para llevar a cabo esta técnica en guías de onda angostas, lo que se hace es: acoplar la señal en la guía y detectar la luz esparcida a lo largo de la superficie de la guía, la detección puede efectuarse de diferentes técnicas, ya sea por medio de la punta de una fibra óptica o la visualización directa de la superficie, etc.... Para obtener el coeficiente de atenuación se grafica el logaritmo de la señal en función de la posición a lo largo de la guía, a estos datos se le ajusta una recta y de la pendiente de esta recta se obtiene el coeficiente de atenuación.

Este método también es, no destructivo y fácil de llevar a cabo, la desventaja que se tiene es, que la resolución de este método no es muy buena y que para guías de onda con esparcimiento débil se dificulta la medida y la heterogeneidad aleatoria de la guía afectan considerablemente los resultados de esparcimiento.

### **4.1.3 Método acoplamiento por prismas**

Para medir las pérdidas por este método es necesario acoplar y extraer la señal óptica por medio de prismas de alto índice de refracción. El acoplamiento de la señal a la guía se realiza poniendo en contacto óptico al prisma con la guía y hacer incidir la luz, en una de las caras del prisma a un ángulo determinado por las características de la guía y del prisma. Una vez acoplada la señal en la guía, ésta se extrae de la misma forma en que fue acoplada, el prisma que se utiliza para extraer la señal se desplaza en dos posiciones diferentes de la guía, para obtener el coeficiente de atenuación se requieren los datos de la potencia de salida y la posición. Para el buen funcionamiento de este método es necesario que las condiciones de acoplamiento prisma-guía sean las mismas para los dos puntos considerados.

Este método es utilizado para medir las pérdidas en guías de onda planas y no es muy recomendable para guías de onda angostas. Esto se debe a lo difícil que es acoplar y extraer la señal óptica en las guías de onda angostas por medio de los prismas.

### **4.1.4 Método por reducción**

Este método es destructivo y se utilizó originalmente para medir las pérdidas en fibras ópticas, el método consiste en medir la potencia de la señal transmitida para diferentes longitudes de la fibra, tratando de que las condiciones de corte sean las mismas, para todas las mediciones. Para adaptar este método a las guías de onda se requiere, guías de onda de diferentes longitudes, todas fabricadas con las mismas condiciones, además de que sus caras sean pulidas. La luz es acoplada en las guías y se miden las potencias transmitidas de cada una de ellas, los datos de la longitud de las guías y los logaritmos de las potencias

---

## MÉTODOS DE MEDICIÓN DE PÉRDIDAS, PROCESOS DE FABRICACIÓN

---

transmitidas son graficadas. El coeficiente de atenuación se obtiene de la pendiente de una recta que se ajusta a estos datos. Cuando se utiliza este método es muy importante mantener las mismas condiciones de acoplamiento para todas las guías.

Como se ve, este método, su aplicación en fibras ópticas es sencilla, en cambio para guías de onda la realización es muy laboriosa, debido al corte y pulido que se tiene que llevar a cabo, cada vez que se mida la transmitancia de las guías.

### 4.1.5 Método deflección fototérmica

El método de deflección fototérmica es un método no destructivo que es utilizado para medir las pérdidas en las guías de onda óptica. Está basado en el efecto de deflección fototérmica. El arreglo experimental que se utiliza para medir este efecto en las guías de onda, consiste en acoplar un haz de bombeo en la guía; otro haz de prueba se hace incidir normalmente a el sustrato y debe de estar enfocado en la superficie de la guía. Cuando la energía del haz de bombeo se absorbe en la región de cruce de los dos haces, esto produce un gradiente térmico, el cual induce un gradiente en el índice de refracción en esta región. El efecto de deflección fototérmica involucra la refracción del haz de prueba debido al gradiente que se produce en la región de prueba. Para obtener el coeficiente de atenuación es necesario obtener este efecto de deflección en varios puntos de la guía. Los datos de la posición y el logaritmo del efecto de deflección son graficados, a estos datos se les ajusta una recta, de la pendiente de la recta se obtiene el coeficiente de atenuación.

---

## Fabricación de Guías de Onda Angostas

---

La ventaja de este método es que los centros de esparcimiento y la luz que no se propaga en la guía, no afectan directamente a las medidas. La desventaja de este método es que la superficie de la guía debe de estar pulida y los sustratos deben ser transparentes al haz de prueba.

### 4.2 Fabricación de Guías de Onda Angostas

---

Para la fabricación de guías de onda se siguieron los siguientes pasos: limpieza, evaporación, depósito de fotoresist, exposición, revelado, decapado y difusión de iones.

Primero se seleccionan sustratos de vidrio (Corning 2947), con un mínimo de imperfecciones superficiales (poro, rayas e inclusiones), por inspección visual, con auxilio de una lámpara de luz blanca condensada. Posteriormente se realiza el siguiente proceso de limpieza:

- a) Lavado con acetona, para eliminar grasas.
- b) Aplicación de una capa de crema limpiadora Balzers #2 y secado durante 30 a 45 minutos.
- c) Eliminación de la crema limpiadora por medio de acetona y papel anticon-taminante.
- d) Se limpian los sustratos con agua destilada a una temperatura 40-60°C.

---

**MÉTODOS DE MEDICIÓN DE PÉRDIDAS, PROCESOS DE FABRICACIÓN**

---

e) Limpieza final antes de colocarlos dentro de la campana de evaporación por medio de cotonetes, acetona y aire comprimido.

Escogiendo el mejor lado del sustrato, se deposita una película delgada de aluminio (99.9% de pureza), de aproximadamente 250 nanómetros, utilizando evaporación térmica al alto vacío, en una evaporadora EDWARDS mod. 360.

Utilizando un cuarto limpio, se procede a traspasar una mascarilla que contiene líneas de diferentes anchos sobre la película de aluminio por medio de los siguientes pasos:

a) Se deposita una capa de fotoresist Shipley 3443, utilizando un sistema de centrifugado, 5000RPM, durante 20 segundos.

b) Una vez depositado la fotoresist se hornea por 5min. a 120°C.

c) Sobre el sustrato que tiene fotoresist, se coloca la mascarilla que contiene los grupos de líneas (25 por grupo). Las líneas son de 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 15, 20 y 25 micrómetros de ancho, separada cada línea por 50 micrómetros y cada grupo por 100 micras. Todas las líneas tienen 5 centímetros de largo. Después se ilumina con luz UV durante 2 minutos para grabar las líneas sobre el fotoresist.

d) Grabadas las líneas, se revela el fotoresist utilizando revelador Shipley diluido en una proporción de 2:1 con agua destilada, por un tiempo de 30 segundos, después se enjuaga con agua destilada.

---

### Fabricación de Guías de Onda Angostas

---

e) Horneado secundario por 5 minutos a 120°C para endurecer el fotoresist.

f) Se decapa el aluminio utilizando ácido nítrico con glicerina en una proporción de 1:1, introduciendo el sustrato en la solución hasta que el aluminio es eliminado. Después se enjuaga con agua destilada; una vez seco el sustrato se elimina el fotoresist con acetona.

g) Hecha la mascarilla de aluminio, que contiene los canales sobre estos se deposita una película de cobre (99.9% de pureza) la cual es utilizada como fuente de iones para la difusión, con espesor de aproximadamente 1 micrómetro.

Sobre las caras del sustrato se deposita oro (99.99% de pureza), con un espesor de 300 micrómetros, estas películas de oro son utilizadas como protección de las líneas cuando se hace la difusión.

#### 4.2.1 Proceso de difusión

Utilizando una mufla con un control de temperatura, una fuente de voltaje y un multímetro con memoria se realiza la difusión de la siguiente manera:

a) Se introduce el sustrato con las películas dentro de dos placas de metal a las cuales va conectada la fuente de poder y el multímetro digital; este arreglo se coloca dentro de la mufla.

---

**MÉTODOS DE MEDICIÓN DE PÉRDIDAS, PROCESOS DE FABRICACIÓN**

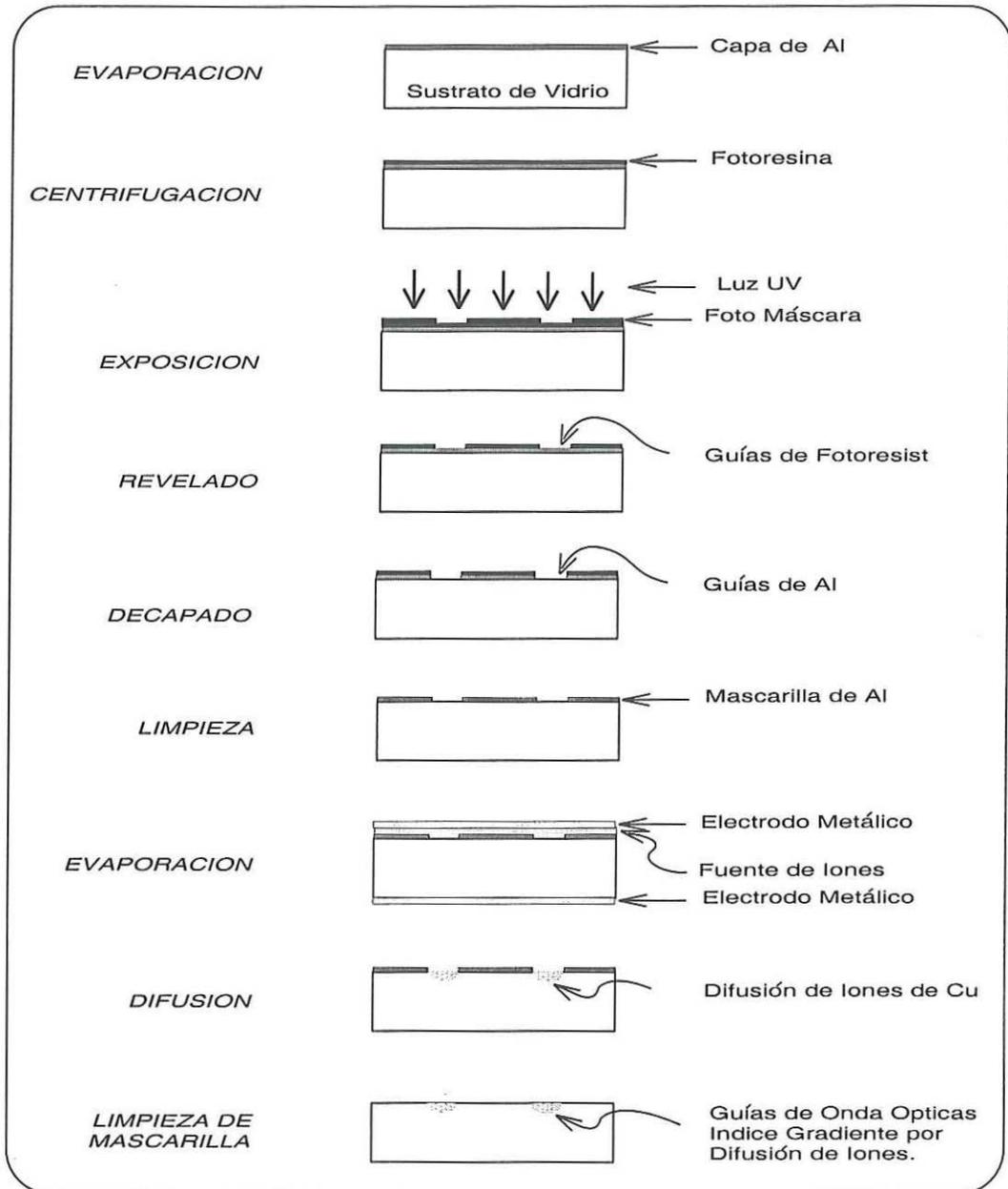
---

b) Se selecciona la temperatura (250-400°C), a la cual se va a realizar la difusión. Es necesario estabilizar la temperatura dentro de la mufla antes de iniciar el proceso de difusión asistido por campo eléctrico.

c) Con la temperatura estable, se aplica un voltaje 30-60 VCD durante 45-120 minutos; los datos de la corriente son sensados por el multímetro, pasados este tiempo se elimina la corriente y se deja enfriar la muestra lentamente.

d) Una vez enfriadas las muestras, los restos de cobre son removidos con ácido cúprico.

### Fabricación de Guías de Onda Angostas



**FIGURA 19** Proceso de fabricación de guías de onda angosta por difusión.

### **4.3 Corte y Pulido**

---

Para efectuar las pruebas de funcionamiento óptico de las guías de onda es necesario acoplar la luz en las guías. Se ha seleccionado la técnica acoplamiento óptico terminal (“end-fire”) y se requiere de un pulido de la sección transversal de la guía, por lo cual fue necesario realizar el procedimiento que se describe en los siguientes puntos.

#### **4.3.1 Corte de guías**

Una vez fabricadas las guías sobre el vidrio, se procede a examinar las muestras por medio del microscopio óptico, para ver la calidad de las guías. Ya seleccionada el área de menos defectos de las guías, se cortan los extremos de estas en una cortadora de disco, las guías deben de tener una longitud de 3 centímetros aproximadamente ya que la montura donde se colocan para pulirse requiere que tengan esta longitud.

#### **4.3.2 Esmerilado y pulido de guías**

Una vez cortadas las guías se pasan al área de pulido, haciendo lo siguiente:

a) Las muestras se colocan dentro de una montura diseñada especialmente para pulir las caras de las guías de onda; esta montura consiste en dos bloques de acrílico de 3 centímetros de alto los cuales se unen utilizando cuatro tornillos. Para montar las guías dentro de estos bloques se hace lo siguiente: con dos sustratos cortados de la misma longitud de las guías se hace un emparedado colocando las guías en medio, este emparedado se introduce dentro los bloques, sobre las caras de los bloques y perpendicular a las guías se pegan sustratos de vidrio sobre los bloques.

---

#### Proceso de Deposito del "Nile Blue A"

---

b) Colocadas las muestras en la montura se esmerilan las caras de las guías utilizando un plano giratorio con la siguiente secuencia de abrasivos de alúmina, de tamaños de granos de 30, 12, 9, 6 y 3 micrómetros. Al pasar de un tamaño de grano de abrasivo a otro menor se inspecciona al microscopio que el poro de la parte esmerilada sea uniforme y del tamaño del abrasivo utilizado.

c) Cuando se termina el proceso de esmerilado, se inicia el proceso de pulido. Este proceso se realiza con un agente pulidor de óxido de Cerio con la siguiente secuencia de tamaños de granos de 1.7, 0.7 y 0.3 micrómetros. Hasta que el poro de las caras de las guías sea del orden de 0.3 micrómetros aproximadamente, se considera que las muestras están pulidas y listas para realizar las pruebas de medición.

#### **4.4 Proceso de Deposito del "Nile Blue A"**

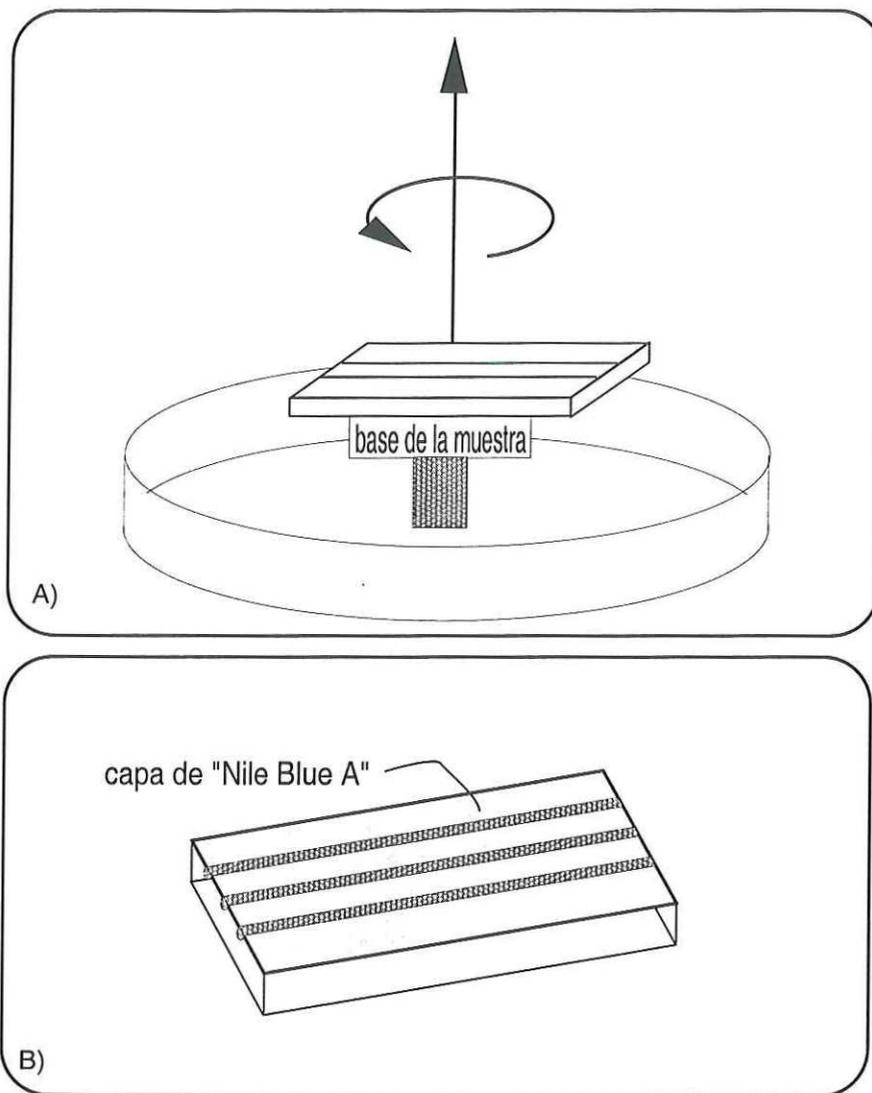
---

Cuando se requiere hacer mediciones de las pérdidas por propagación en las guías utilizando la técnica de esparcimiento, es necesario utilizar un material fluorescente sobre las guías para hacer resaltar este efecto, para ello se utiliza perclorato de "Nile Blue A" este material se encuentra en polvo por lo que es necesario diluirlo en un polímero para su fácil depósito sobre las guías.

El perclorato de "Nile Blue A" se disuelve en ciclohexanona (por varios días) para que los gromulos del "Nile Blue A" se disuelvan y así obtener una sustancia líquida con buena adherencia al vidrio y secado rápido. Preparado el "Nile Blue A" se deposita una capa

## MÉTODOS DE MEDICIÓN DE PÉRDIDAS, PROCESOS DE FABRICACIÓN

delgada sobre las guías de este compuesto, por medio de centrifugación, como se muestra en la figura 20.



**FIGURA 20** Se muestra la forma que se le depositó el perclorato de "Nile Blue A" a las guías de onda: A) Sistema de centrifugación de la muestra. B) Guías de onda con la capa de perclorato de "Nile Blue A".

---

### Proceso de Deposito del "Nile Blue A"

---

En este capítulo se trató sobre la manera en que se fabricaron las guías de onda ópticas angostas. La técnica utilizada para la fabricación de las guías, fue utilizando el proceso de difusión térmica de iones provenientes de una fuente de estado sólido sobre un sustrato de vidrio, asistido por un campo eléctrico externo; también se explica la forma en que las guías de onda fueron procesadas para realizar mediciones.

# *CAPÍTULO 5* RESULTADOS: ANÁLISIS DE PÉRDIDAS A PARTIR DE UNA CAVIDAD RESONANTE

Muchos descubrimientos en la tecnología para la fabricación de guías de onda surgen por la necesidad de reducir las pérdidas en las guías. Como un valor de referencia para fibras ópticas de vidrio se tienen pérdidas menores que  $1.0\text{dB}/\text{km} = 10^{-5}\text{dB}/\text{cm}$ , mientras que las pérdidas para las guías de onda ópticas son mucho mayores a este valor. Para las guías de onda ópticas no se requieren pérdidas tan bajas como en las fibras ópticas y

---

### Cavidad Resonante

---

esto se debe al tamaño físico que tienen los circuitos de óptica integrada (aproximadamente 1 centímetro de longitud). Una pérdida de  $3.0\text{dB}/\text{cm}$  significa que la mitad de la intensidad de la luz transmitida se pierde después de viajar 1 centímetro a lo largo de la guía, para aplicaciones dentro de la óptica integrada esta longitud es considerablemente grande.

En la actualidad las pérdidas están siendo reducidas por la implementación de nuevas tecnologías. Estas tecnologías han dado como resultado la disponibilidad de bajos defectos, reduciendo la rugosidad de las paredes (Deri y Kapon, 1991) en las guías. Cuando las guías de onda son enterradas dentro del sustrato, las pérdidas se reducen considerablemente.

#### 5.1 Cavidad Resonante

---

En este capítulo se describe la técnica interferométrica Fabry-Perot utilizada para medir las pérdidas en guías de forma de canal. Para realizar esta técnica se requiere que la guía de onda sea una cavidad resonante dimensionalmente variable (Puscas et al., 1996). La variación de la cavidad puede generarse por incremento del tamaño de la guía ó variando la longitud de onda de la luz acoplada (Walker, 1985), y esto da como resultado una diferencia de camino óptico (DCO). Una vez obtenidos los incrementos del camino óptico se mide la intensidad de salida de la guía, esta intensidad varía en función de la diferencia de camino óptico. Los cambios en el CO hacen que la intensidad de salida varíe en forma periódica. La manera en que esta variación puede llegar a darse es induciendo cambios en el índice de refracción de la guía o en su longitud física, y esto se puede lograr variando la longitud de onda la luz acoplada, aplicando un campo eléctrico o expandiendo térmicamente la guía. La

---

**RESULTADOS: ANÁLISIS DE PÉRDIDAS A PARTIR DE UNA CAVIDAD**


---

forma en que se incrementó la cavidad para este trabajo fue expandiendo térmicamente la muestra. Para obtener los valores de las pérdidas esta técnica solo requiere la medida del contraste ocasionado por las variaciones de intensidad de salida, la longitud de la cavidad y la reflectancia de las caras de la cavidad.

---

**5.2 Coeficiente de Atenuación**


---

La intensidad de salida de una guía de onda está dada por (Zappe, 1995):

$$I_T = \frac{T^2 e^{(-\alpha L)}}{(1 - \tilde{R})^2 + 4\tilde{R} \text{sen}^2(\phi/2)} I_0 \eta \quad (69)$$

donde  $I_0$  es la intensidad de luz justo antes del acoplamiento en la guía,  $\eta$  es el coeficiente de acoplamiento de la guía,  $\phi$  es la fase interna,  $T$  es la transmitancia de la cavidad,  $L$  la longitud de la guía y

$$\tilde{R} = R e^{(-\alpha L)} \quad (70)$$

donde  $R$  es la reflectancia de las caras de la guía.

El coeficiente de atenuación  $\alpha$  puede ser evaluado midiendo los valores absolutos de las intensidades de salida máximas y mínimas de la cavidad resonante (Regener y Sohler, 1985). La intensidad transmitida tiene dos puntos muy importantes, y estos son cuando se obtienen las condiciones de resonancia y antiresonancia. Para el primer caso la intensidad transmitida tiene un máximo  $I_{Tmax}$  (cuando la diferencia de camino óptico de la

---

**Coefficiente de Atenuación**

---

luz produce un múltiplo impar de  $\pi$  en la fase y para el segundo caso  $I_{Tmin}$  (cuando la fase es un múltiplo entero par de  $\pi$ ).  $I_{Tmax}$  e  $I_{Tmin}$  están dados por las siguientes ecuaciones:

$$I_{Tmax} = \frac{T^2 \exp(-\alpha L)}{(1 - \tilde{R})^2} I_0 \eta \quad (71)$$

$$I_{Tmin} = \frac{T^2 \exp(-\alpha L)}{(1 + \tilde{R})^2} I_0 \eta. \quad (72)$$

Por otro lado tenemos que el contraste para una cavidad resonante tipo Fabry-Perot está dada por:

$$K = \frac{I_{Tmax} - I_{Tmin}}{I_{Tmax} + I_{Tmin}} \quad (73)$$

sustituyendo las ecuaciones 71 y 72 en la ecuación 73 se llega a:

$$K = \frac{2\tilde{R}}{1 + \tilde{R}^2} \quad (74)$$

la ecuación 74 es independiente de la intensidad de entrada y del coeficiente de acoplamiento y solo depende del factor de pérdidas por reflexión  $\tilde{R}$ . Para valores pequeños de  $\tilde{R}$ ,  $K$  se puede aproximar a  $K \approx 2\tilde{R}$ , resolviendo la ecuación 74 para  $\alpha$  se obtiene la ecuación siguiente

$$\alpha \approx \frac{4.3429}{L} (\ln R + \ln 2 - \ln K) \quad (75)$$

---

**RESULTADOS: ANÁLISIS DE PÉRDIDAS A PARTIR DE UNA CAVIDAD**


---

este coeficiente solo depende de tres parámetros que son, la reflectancia  $R$  en las caras de la guía, la longitud  $L$  de la guía y el contraste  $K$  ocasionado por la variación del CO de luz en la guía al calentarse ésta. El error determinado por la técnica del resonador está dado por:

$$|\Delta\alpha| = \frac{4.3429}{L} \left( \frac{|\Delta K|}{K} - \frac{|\Delta R|}{R} \right) \quad (76)$$

en la que no se consideró las variaciones que se pudieran tener al medir la longitud de la guía. La ecuación 76 sólo depende de la precisión de las medidas del contraste y de la reflectancia de las caras de la guía.

### 5.2.1 Reflectancia a partir del índice efectivo de la guía

Para medir las pérdidas de propagación a partir del contraste de una cavidad resonante que varía en su longitud, un parámetro que se necesita conocer es la reflectancia de las caras de las guías y este se puede obtener a partir de las mediciones del índice efectivo de la guía (Davies y Walpole, 1976), la reflectancia  $R$  puede ser aproximada para estructuras que guían débilmente por medio de la ecuación

$$R = \left( \frac{n_{efec} - 1}{n_{efec} + 1} \right)^2 \quad (77)$$

en donde  $n_{efec}$  es el índice efectivo del modo fundamental para 632.8 nanómetros, el valor obtenido fué de  $n_{efec} = 1.5667$  (Salazar et al., 1997), para lo cuál se obtuvo una reflectancia de  $R = 0.04875$ . Conociendo la reflectancia de las caras de la cavidad, lo que sigue es variar la longitud de esta para determinar el contraste, para ello armó el arreglo experimental que se muestra en la siguiente sección.

---

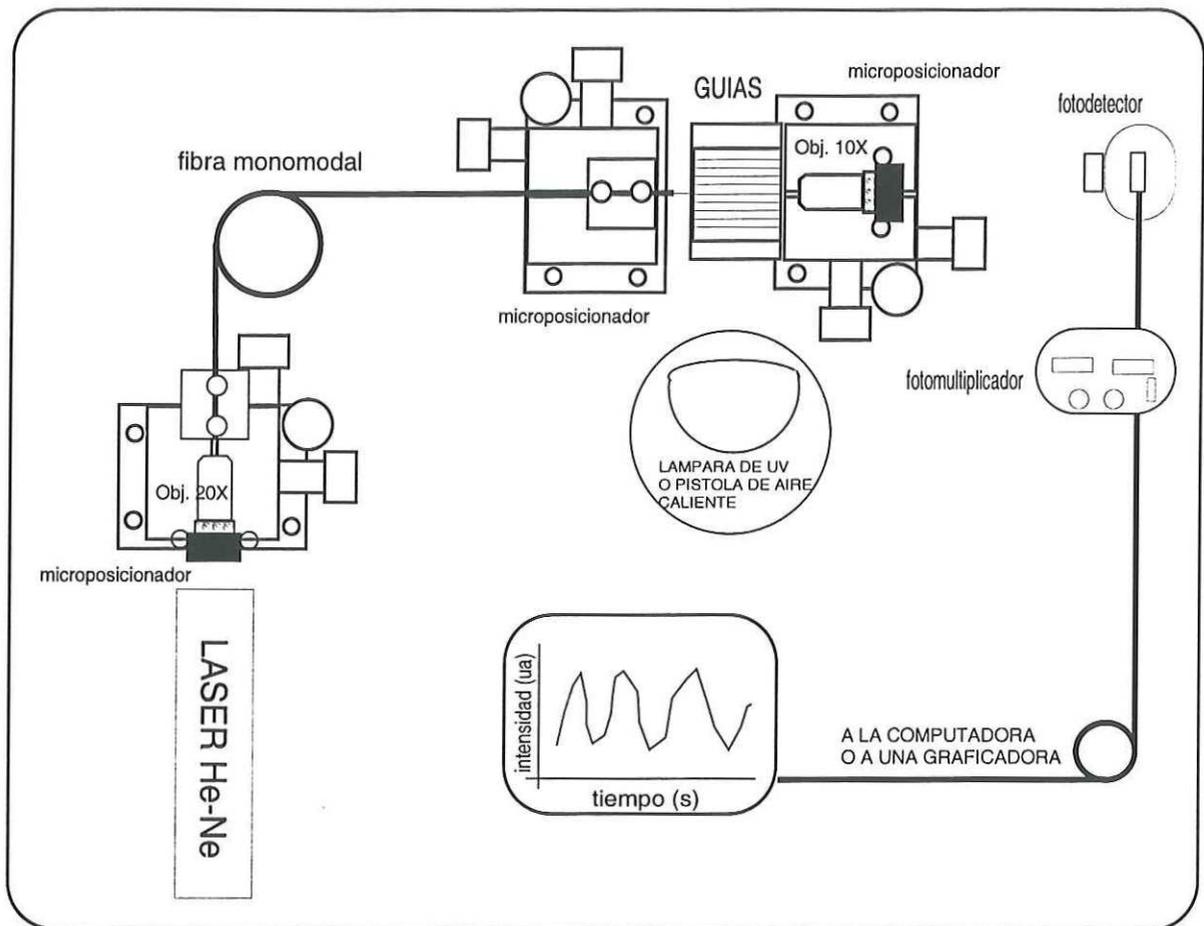
 Medida de Pérdidas
 

---

 5.3 Medida de Pérdidas
 

---

Una vez preparadas las guías de onda con sus caras de salida y entrada paralelas entre sí y pulidas, pueden ser tratadas como una cavidad resonante óptica de baja reflectividad. Utilizando el arreglo experimental que se muestra en la figura 21 se midieron las variaciones de intensidad de salida en la guía de onda óptica angosta.



**FIGURA 21** Se presenta el arreglo experimental utilizado para medir la intensidad de salida en guías de onda angostas.

---

**RESULTADOS: ANÁLISIS DE PÉRDIDAS A PARTIR DE UNA CAVIDAD**

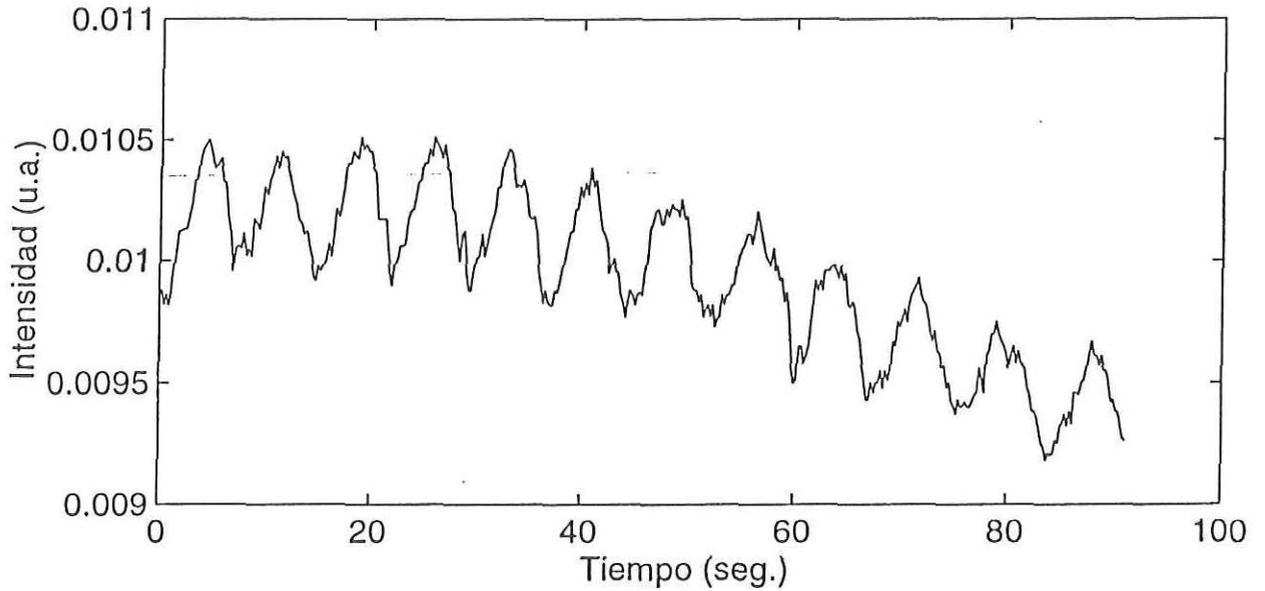
---

Los datos de intensidad de salida de la guía fueron registrados a través de un fotodetector de la marca ORIEL modelo 7070 conectado a una graficadora LINEAR modelo LR92525 o a un computador. La longitud de las guías se hizo variar calentando la muestra aproximadamente  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  sobre la temperatura ambiente por medio de una lámpara de luz de alta intensidad ó una pistola de aire caliente. Cuando la longitud de la guía cambia debido al incremento de la temperatura, la DCO varía y da como resultado las condiciones de resonancia y antiresonancia que se mencionaron en la sección 5.2. Las gráficas de intensidad de salida en función del tiempo (temperatura) que se obtuvieron se muestran en la figuras 22 y 23, para estos casos se tienen diferentes guías de onda de 4 micrómetros de ancho. La gráfica de la figura 22 corresponde a una muestra que fue calentada alrededor de  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$  sobre la temperatura ambiente y la gráfica de la figura 23 es una guía de onda de 4 micrómetros de espesor, en la que, la temperatura fué incrementada alrededor de  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  sobre la temperatura ambiente.

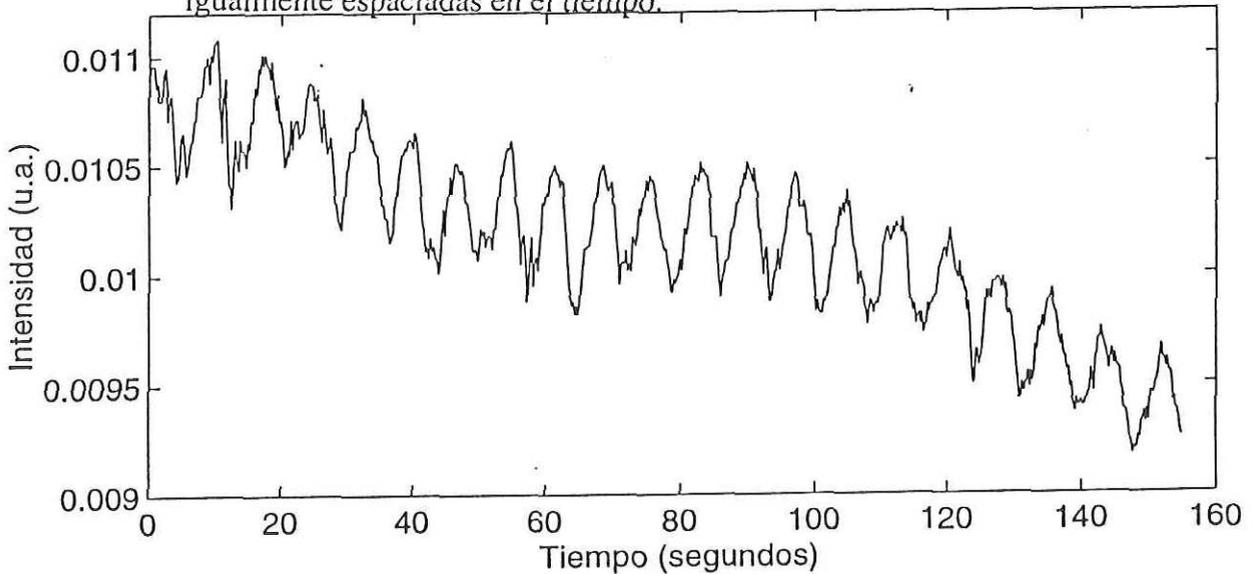
---

 Medida de Pérdidas
 

---



**FIGURA 22** En esta figura se muestra la variación típica de la intensidad una vez calentada la muestra en función del tiempo, se observan variaciones periódicas y no igualmente espaciadas en el tiempo.



**FIGURA 23** En esta gráfica se muestra la salida de la intensidad de la luz en función del tiempo para una guía de onda angosta de 4 micrómetros de ancho.

---

**RESULTADOS: ANÁLISIS DE PÉRDIDAS A PARTIR DE UNA CAVIDAD**

---

La forma periódica que tiene la intensidad de la luz en la salida se debe a la variación de la longitud de la cavidad (guía de onda) lo que da como resultado una DCO, tomando los valores máximos y mínimos de esta intensidad de salida de la señal, y utilizando la ecuación 73 se obtiene el coeficiente de contraste  $K$ , con el dato que se obtuvo del índice efectivo para guías de onda (Salazar et al. 1997) este se sustituye en la ecuación 77 y se obtiene el valor de la reflectancia  $R$  en las caras de la guía. Utilizando los valores de la longitud de la guía  $L$ , el contraste  $K$  y la reflectancia  $R$ , estos se sustituyen en la ecuación 75 para obtener el coeficiente de atenuación, analizando los resultados de las gráficas de la intensidad de salida para las diferentes guías de onda angostas de 4 micrómetros de ancho que fueron analizadas, se obtuvo que en promedio estas guías presentaron un coeficiente de atenuación de  $\alpha=1.1 \pm 0.1\text{dB/cm}$ .

## *CAPÍTULO 6*    RESULTADOS: ANÁLISIS DE PÉRDIDAS POR MEDIO DE FLOURESCENCIA

Aquí se presentan los resultados de la medida del coeficiente de atenuación utilizando la técnica de fluorescencia en guías de onda angostas, además se presenta la luz propagándose dentro de la guía. Para utilizar esta técnica se toman medidas de la luz esparcida a lo largo de la guía de onda.

---

**6.1 Análisis de Pérdidas por Medio de Fluorescencia**

---

El principio para la medición de pérdidas de propagación de guías de onda ópticas por medio de la técnica de fluorescencia es simple y está basado en la medición del decaimiento de la intensidad de la luz esparcida en dos puntos diferentes a lo largo de la guía de onda. La intensidad de la luz esparcida sobre la superficie de la guía es proporcional a la intensidad de la luz que viaja dentro de esta (Najafi, 1992), si se puede medir las variaciones la intensidad de la luz que se esparce a lo largo de la guía y utilizando la ecuación (68) se podrá determinar el coeficiente de atenuación. El coeficiente de atenuación se deriva de la pendiente de la intensidad de la región central del canal. Utilizando una cámara de CCD se puede captar una imagen de la luz que se escapa sobre la superficie de la guía de onda. A partir de la imagen que se obtiene por medio del CCD se grafica el perfil de la intensidad en función de la posición de la guía. Para las guías de onda fabricadas por difusión de Cobre en vidrio, el esparcimiento es débil, por lo que es necesario utilizar la fluorescencia que presenta el perclorato de "Nile Blue A" (Yasoyuki et al., 1986), para poder visualizar y detectar la señal óptica propagándose en la guía de onda.

**6.1.1 Arreglo experimental y adquisición de datos**

Para realizar la adquisición de datos es necesario hacer que la luz se propague dentro de la guía, para esto se armó un arreglo experimental que nos permite el acoplamiento láser-guía. Este arreglo experimental se muestra en la figura 23, el arreglo está constituido por: Láser de He-Ne de 5 miliwatts de salida, un pedazo de fibra monomodal para el espectro del visible, objetivos de microscopio de 20X, 16X y 10X, nanoposiciona-

---

### Análisis de Pérdidas por Medio de Fluorescencia

---

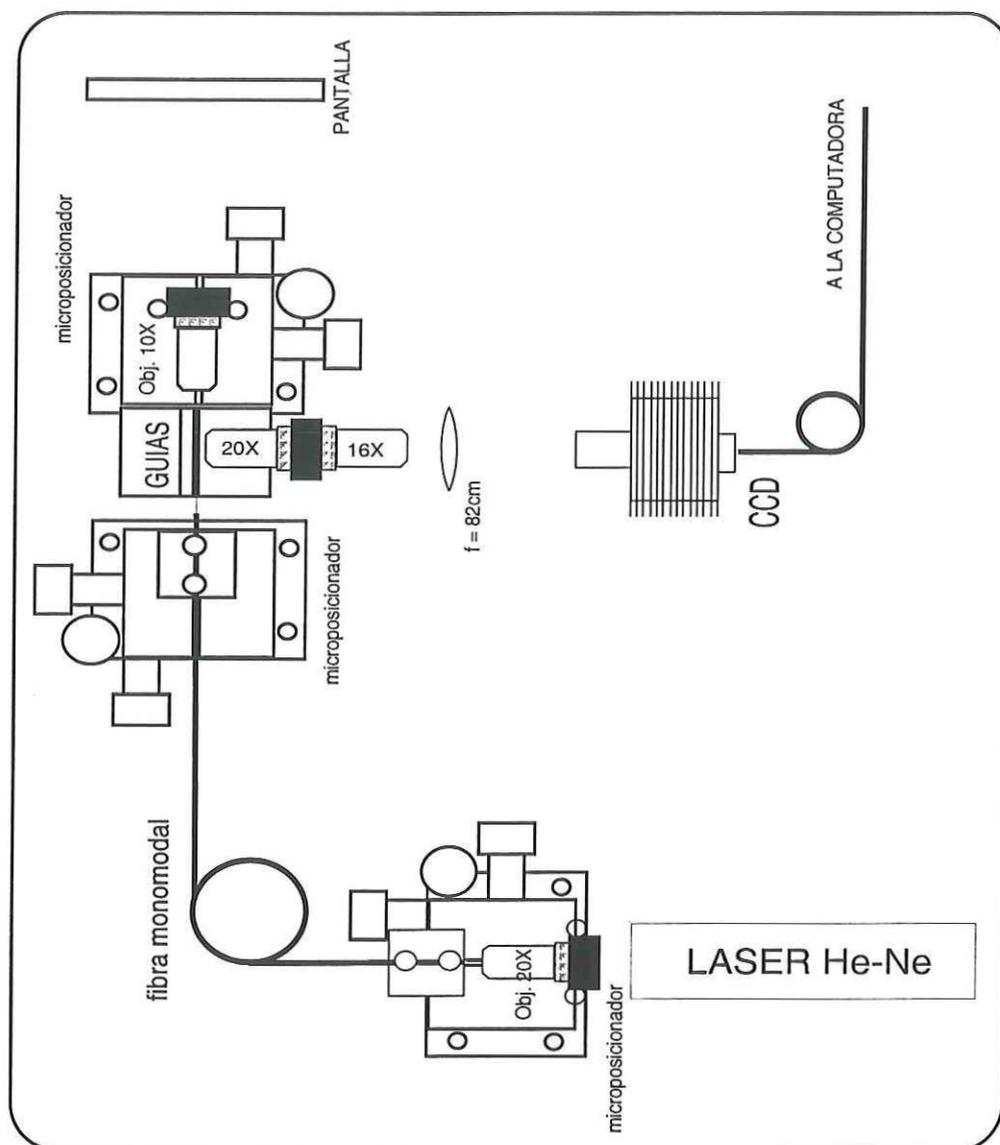
dores, una lente de 82 centímetros de distancia focal, una cámara CCD y una computadora personal (PC). La guía se coloca sobre uno de los microposicionadores con el vector normal del plano que contiene las guías paralelo al plano del microposicionador. Por medio de un microscopio formado por los objetivos 16X, 20X y la lente, se observa la luz esparcida a lo largo de la guía de onda. En la salida de la guía se coloca otro objetivo de microscopio que proyecta la señal de salida sobre una pantalla o un CCD.

La adquisición de datos se hace una vez acoplada la luz láser dentro de una de las guías, la imagen de la propagación de la luz en la guía es desplegada sobre el arreglo del CCD por medio del microscopio formado por los objetivos de 20X, 16X y la lente. Una vez obtenida la imagen, el microscopio y la cámara son desplazados a lo largo de la guía para tomar la siguiente imagen. El campo visual de la cámara para este caso fue de aproximadamente 375 x 242 micras, por lo que fue necesario tomar un número considerable de imágenes para obtener la señal a lo largo de aproximadamente 2 milímetros de la guía.

---

 RESULTADOS: ANÁLISIS DE PÉRDIDAS POR MEDIO DE
 

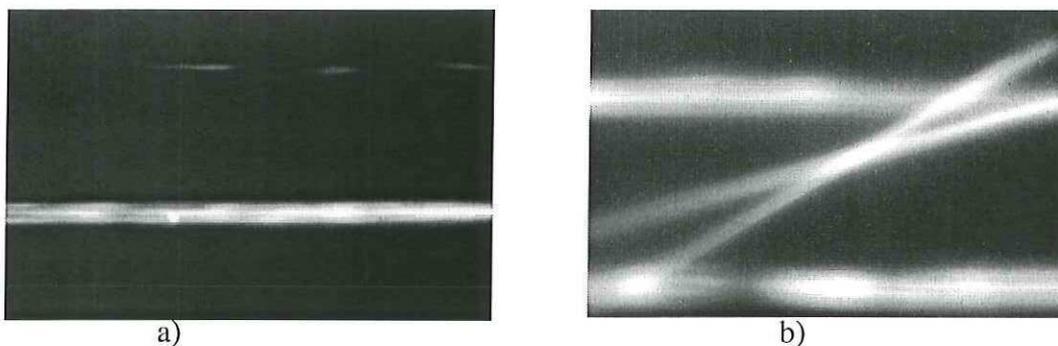
---



**FIGURA 24** Se presenta el arreglo experimental utilizado para medir el esparcimiento de la luz en la guía de onda, utilizando una cámara CCD.

### 6.1.2 Observación de la luz propagándose dentro de la guía

Una vez realizado el arreglo experimental se procedió a tomar una serie de imágenes de las cuales se pudo observar la forma en que la luz se propaga dentro de la guía, unas de estas imágenes se muestran en la figura 24. En la figura 24a se observa claramente una serie de lóbulos que se repiten a lo largo de la imagen, que se deben principalmente a la no uniformidad de la película del “Nile Blue A” sobre la guía. En la figura 24b, se muestra un acoplamiento que ocurre cuando en la guía que inicialmente se acopló la luz tiene una serie de defectos físicos que hacen que parte de esta luz se escape y se acople en una guía vecina.



**FIGURA 25** a) Luz propagándose dentro de una guía de 4 micrómetros de ancho. b) acoplamiento guía-guía debida a imperfecciones físicas de la guía.

### 6.1.3 Análisis de Resultados de las Pérdidas por Fluorescencia

De las imágenes obtenidas por medio del CCD son procesadas con la ayuda de un programa de computación en MatLab el cual se muestra en el apéndice B. La función del programa es la de extraer los datos de una línea recta que pase por el centro de la guía, estos

---

**RESULTADOS: ANÁLISIS DE PÉRDIDAS POR MEDIO DE**

---

datos nos proporciona un perfil de intensidad en función de la posición de la guía, esta línea es trazada a lo largo de la guía; los datos que se obtienen, son graficados en función de su posición. Una vez graficados los datos se ajusta una línea recta por el método de mínimos cuadrados, el dato de la pendiente de la recta es sustituido en la ecuación 60 para obtener el valor del coeficiente de atenuación  $\alpha$ . La forma en que el programa lleva a cabo esto es como sigue:

a) La imagen de la guía es desplegada en la pantalla de la computadora, como se muestra en la figura 26.

b) Con el ratón de computadora se traza una línea recta a lo largo de la guía, el programa grafica los datos que se encontraron sobre la línea recta en función de la posición, a los datos que se obtuvieron se le ajusta una línea recta por el método de mínimos cuadrados, como se muestra en la figura 27, para después obtener el coeficiente de atenuación.

En esta parte del trabajo experimental se obtuvieron imágenes de diferentes secciones de la guía y de diferentes guías de onda, los primeros resultados que se obtuvieron se muestran a continuación.

En la figura 26 se muestra la imagen de una guía de onda de 4 micrómetros de ancho, esta sección de la guía tiene aproximadamente 375 micrómetros de longitud, en la figura 27 se muestra los resultados que se obtuvieron al analizar esta imagen.

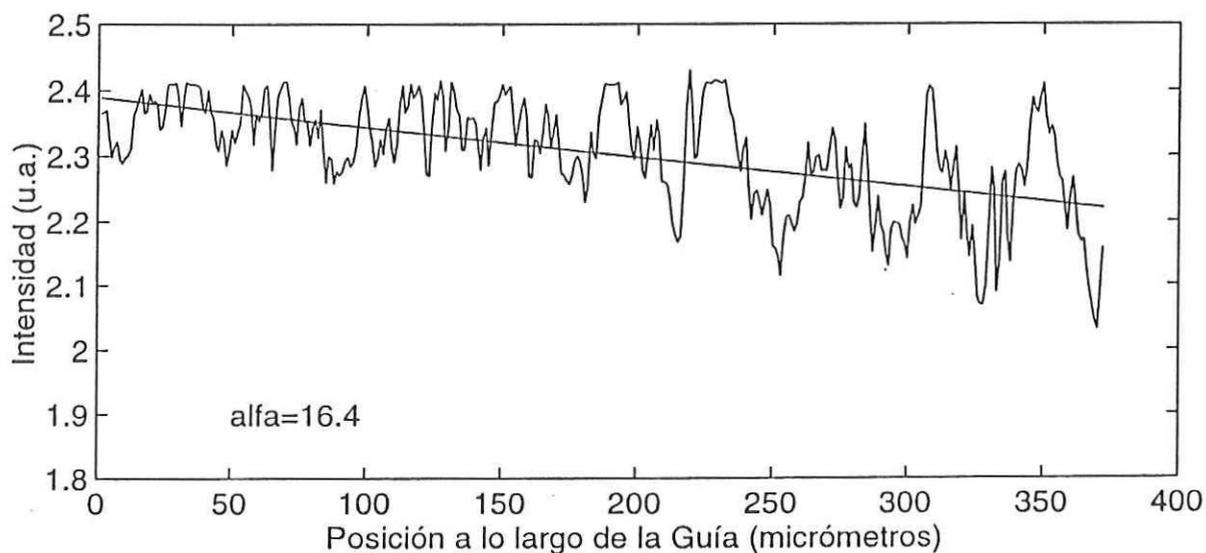
---

**Análisis de Pérdidas por Medio de Flourescencia**

---



**FIGURA 26** Se muestra unas de las primeras imagenes que se obtuvieron de la guía, estas imagen corresponde a una sección de una guía de 4 micrómetros de ancho.



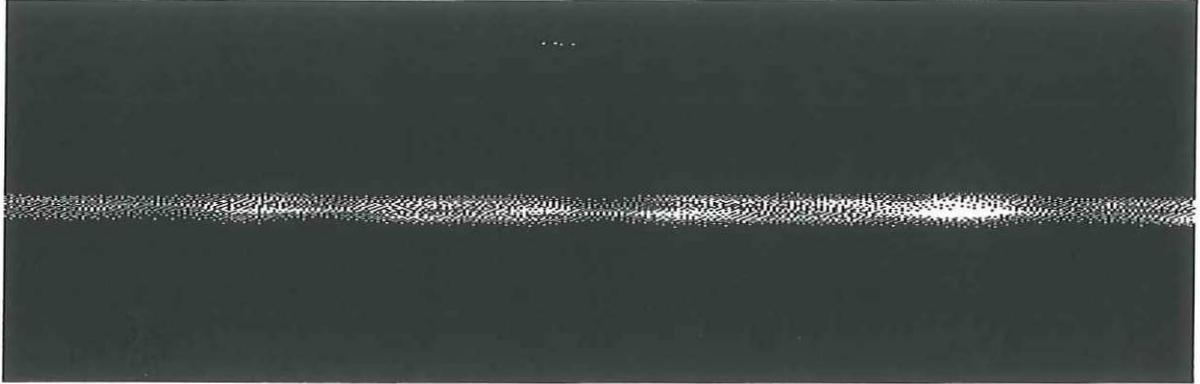
**FIGURA 27** En esta imagen se muestran los resultados que se obtuvieron al analizar la imagen de la figura 26. El valor del coeficiente atenuación que se obtuvo para este caso fue de 16.4 dB/cm.

Otras imagenes que se analizaron se muestran a continuación:

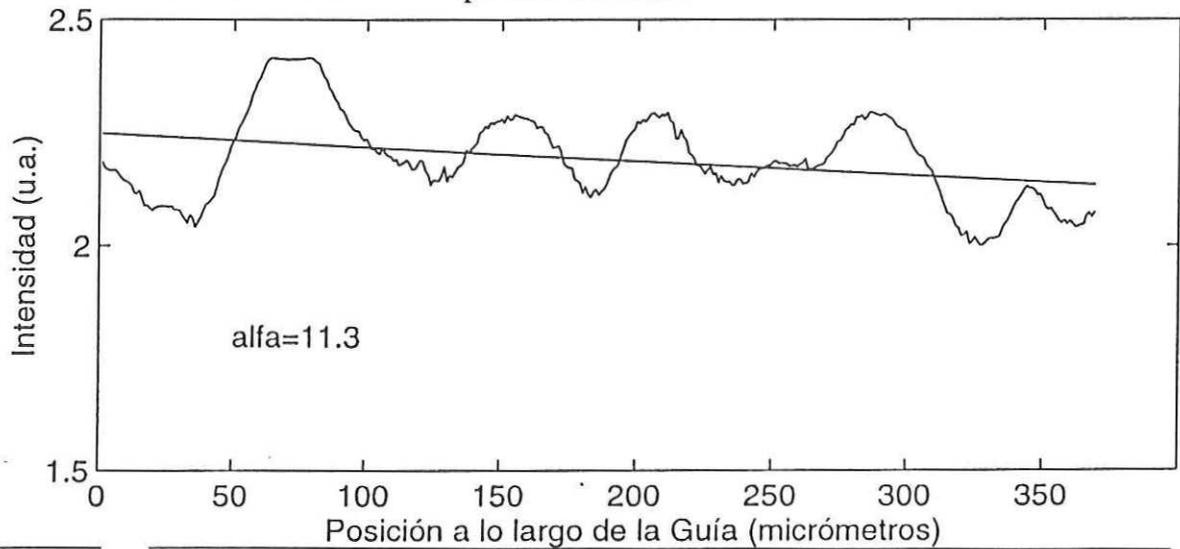
---

 RESULTADOS: ANÁLISIS DE PÉRDIDAS POR MEDIO DE
 

---



**FIGURA 28** Se muestra la imagen de una parte de una guía que tiene aproximadamente 375 micrómetros de longitud, esta imagen corresponde a una guía de 10 micrómetros de ancho aproximadamente.

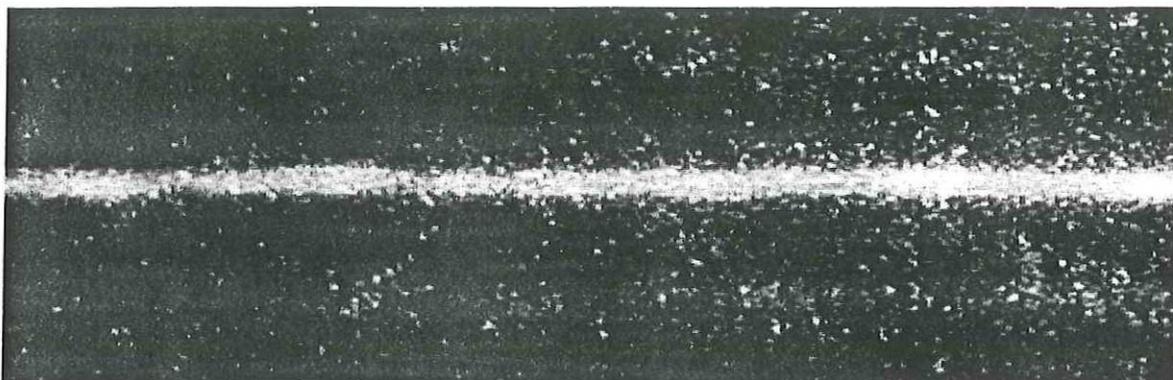


**FIGURA 29** En esta imagen se muestran los resultados que se obtuvieron al analizar la imagen de la figura 28. El valor del coeficiente atenuación que se obtuvo para este caso fue de 11.3 dB/cm.

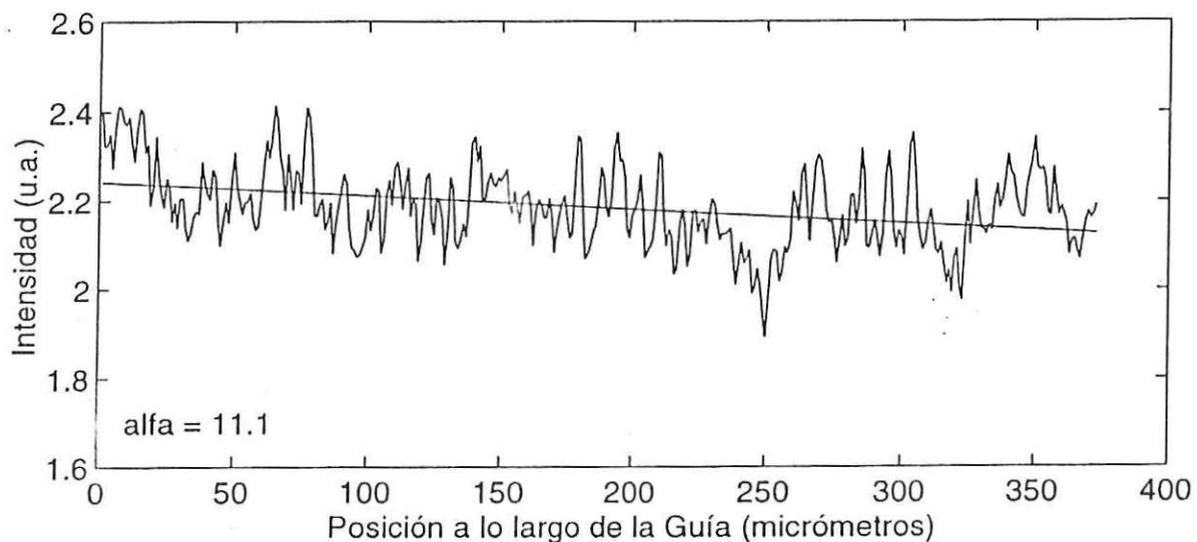
---

**Análisis de Pérdidas por Medio de Fluorescencia**

---



**FIGURA 30** Se muestra la imagen de una parte de una guía que tiene aproximadamente 375 micrómetros de longitud, esta imagen corresponde a una guía de 4 micrómetros de ancho aproximadamente.

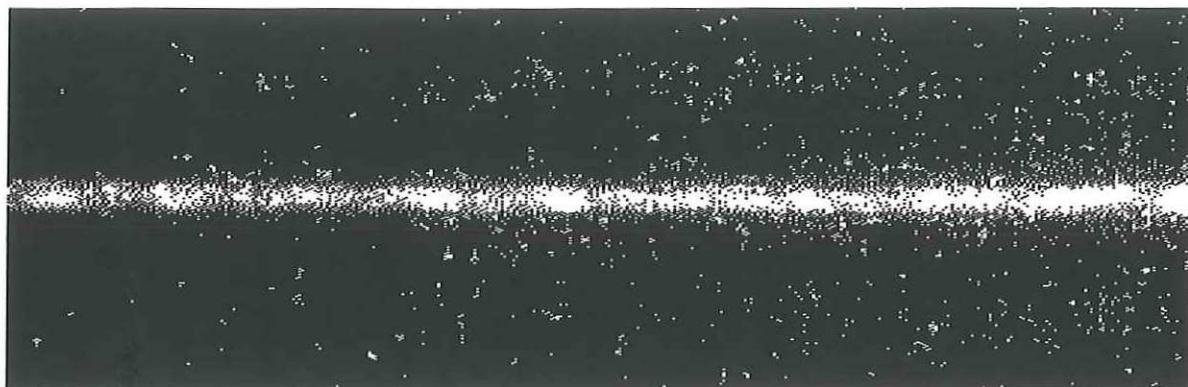


**FIGURA 31** En esta imagen se muestran los resultados que se obtuvieron al analizar la imagen de la figura 30. El valor del coeficiente atenuación que se obtuvo para este caso fue de 11.1 dB/cm.

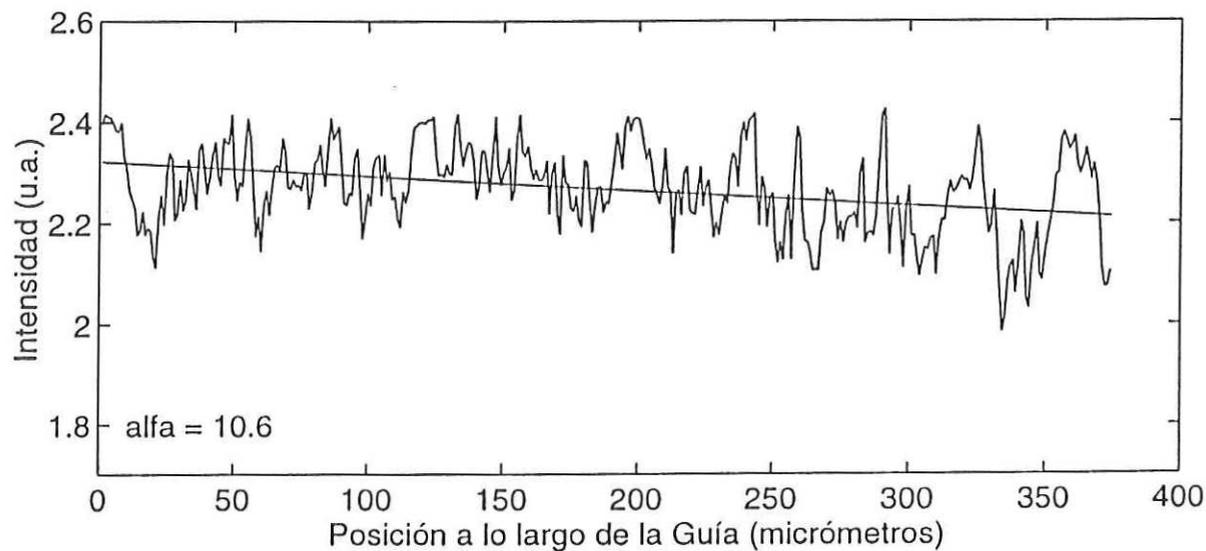
---

**RESULTADOS: ANÁLISIS DE PÉRDIDAS POR MEDIO DE**

---



**FIGURA 32** Se muestra la imagen de una parte de una guía que tiene aproximadamente 375 micrómetros de longitud, esta imagen corresponde a una guía de 4 micrómetros de ancho aproximadamente.

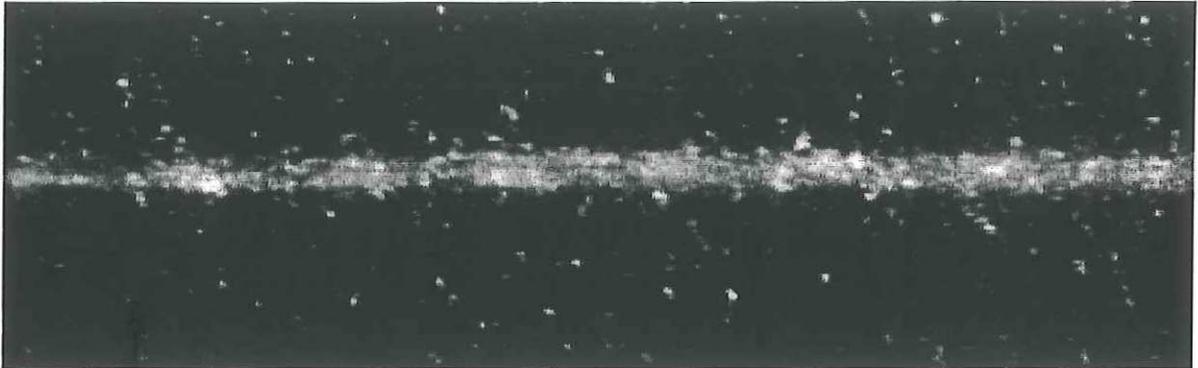


**FIGURA 33** En esta imagen se muestran los resultados que se obtuvieron al analizar la imagen de la figura 32. El valor del coeficiente atenuación que se obtuvo para este caso fue de 10.6 dB/cm.

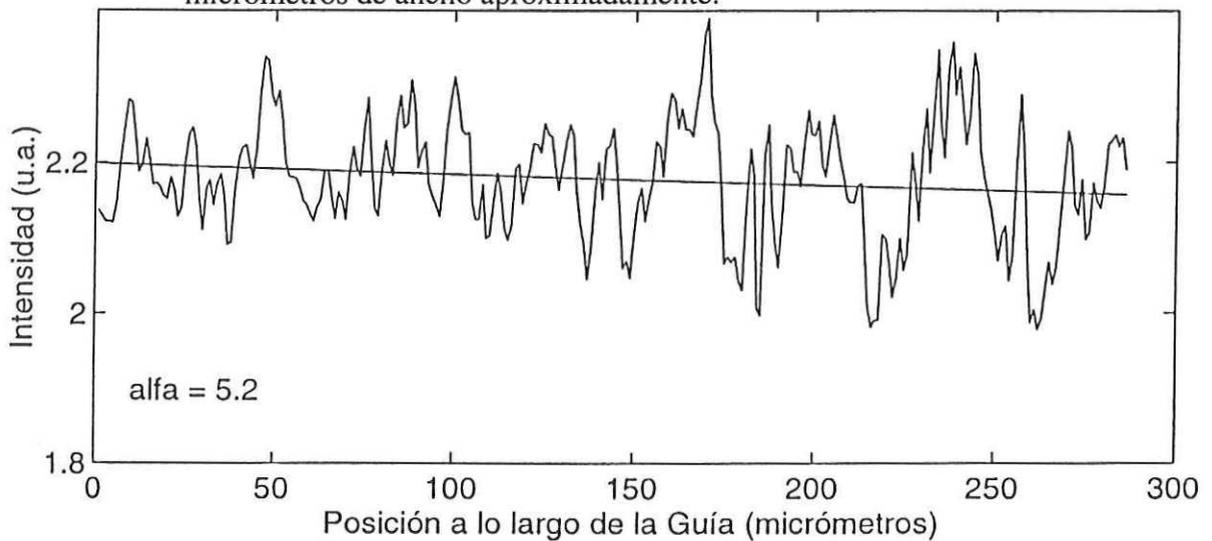
---

**Análisis de Pérdidas por Medio de Fluorescencia**

---



**FIGURA 34** Se muestra la imagen de una parte de una guía que tiene aproximadamente 375 micrómetros de longitud, esta imagen corresponde a una guía de 4 micrómetros de ancho aproximadamente.



**FIGURA 35** En esta imagen se muestran los resultados que se obtuvieron al analizar la imagen de la figura 34. El valor del coeficiente atenuación que se obtuvo para este caso fue de 5.2 dB/cm.

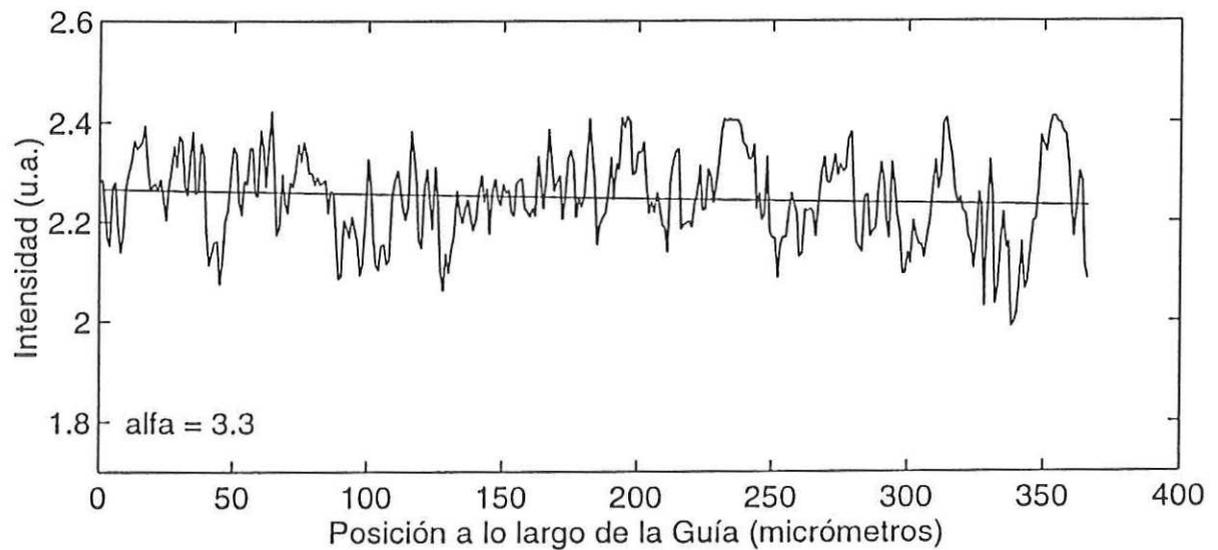
---

**RESULTADOS: ANÁLISIS DE PÉRDIDAS POR MEDIO DE**

---



**FIGURA 36** Se muestra la imagen de una parte de una guía que tiene aproximadamente 375 micrómetros de longitud, esta imagen corresponde a una guía de 4 micrómetros de ancho aproximadamente.

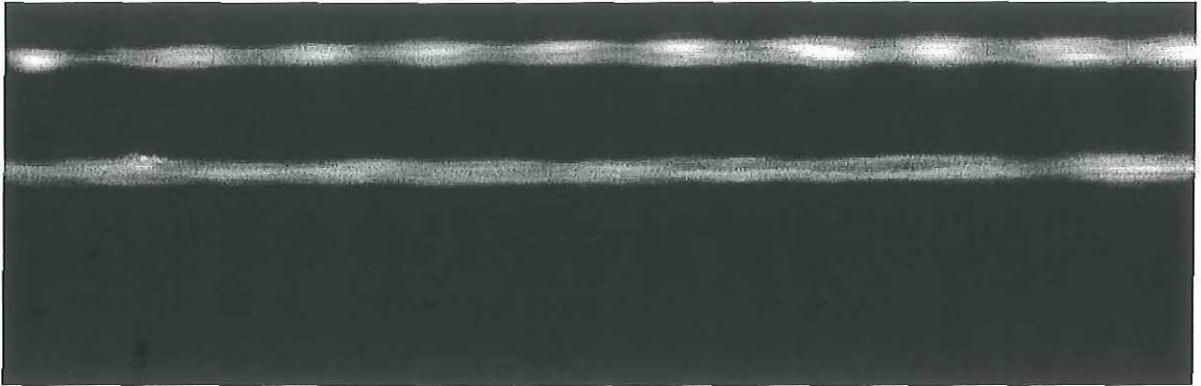


**FIGURA 37** En esta imagen se muestran los resultados que se obtuvieron al analizar la imagen de la figura 36. El valor del coeficiente atenuación que se obtuvo para este caso fue de 3.3 dB/cm.

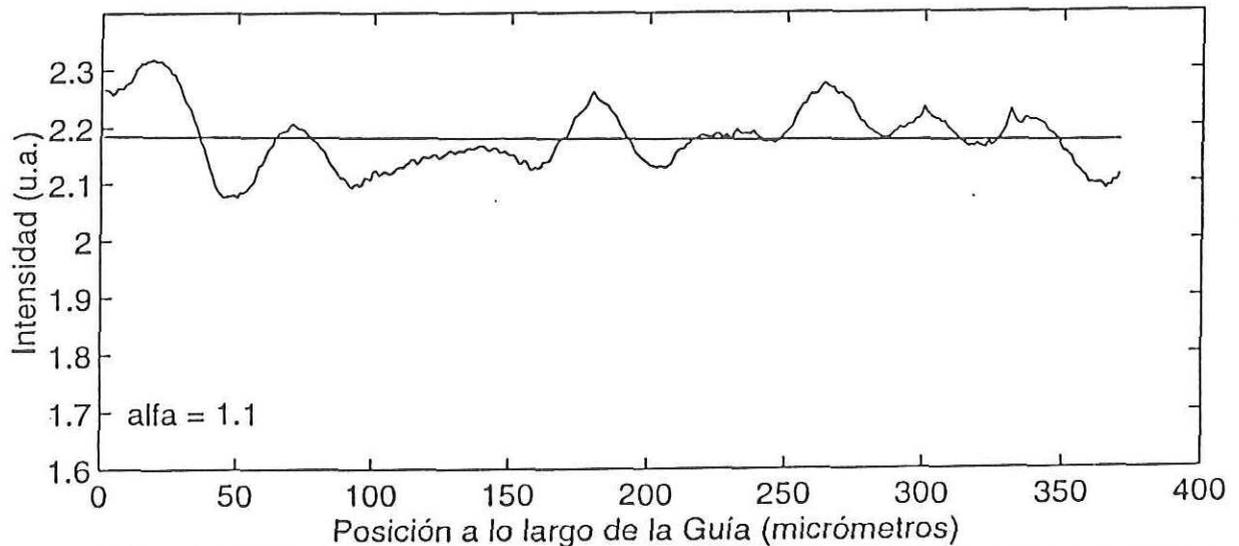
---

**RESULTADOS: ANÁLISIS DE PÉRDIDAS POR MEDIO DE**


---



**FIGURA 40** Se muestra la imagen de una parte de una guía que tiene aproximadamente 375 micrómetros de longitud, esta imagen corresponde a una guía de 4 micrómetros de ancho aproximadamente.



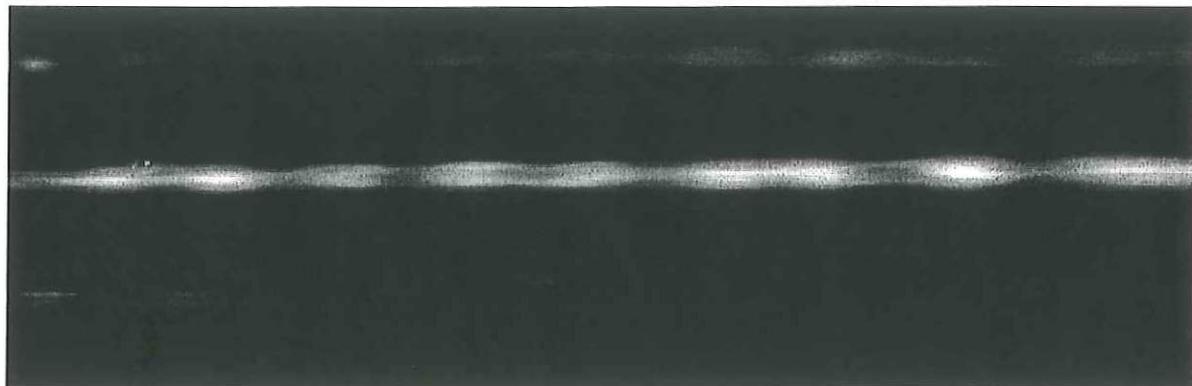
**FIGURA 41** En esta imagen se muestran los resultados que se obtuvieron al analizar la imagen de la figura 40. El valor del coeficiente atenuación que se obtuvo para este caso fue de 1.1 dB/cm.

En la figura 40 se muestra la imagen de dos guías, la guía a la que se realizó el análisis figura 41 es la inferior.

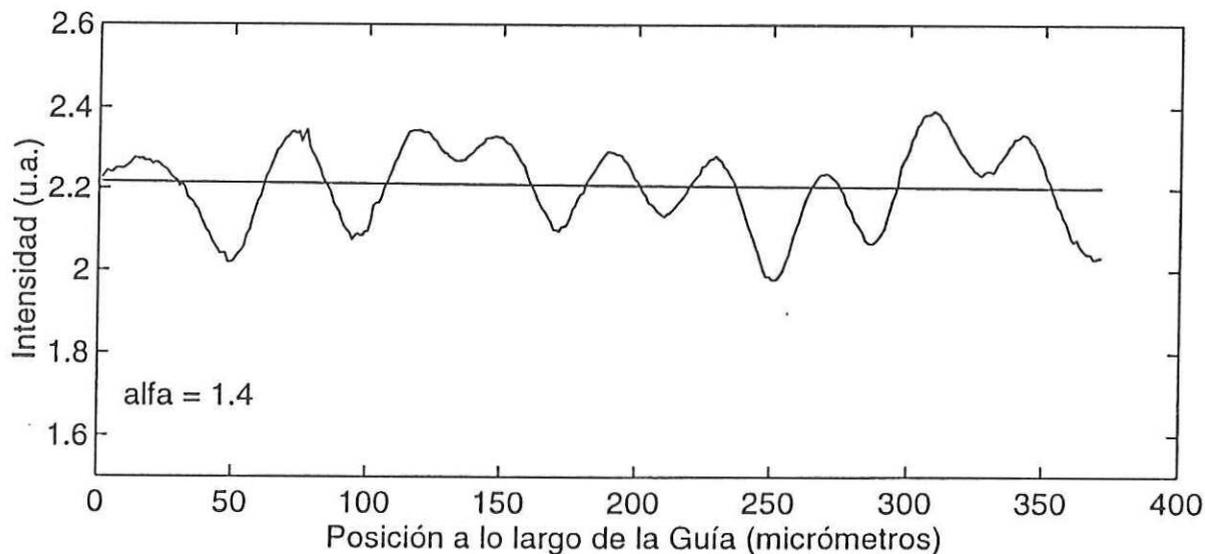
---

**Análisis de Pérdidas por Medio de Fluorescencia**


---



**FIGURA 38** Se muestra la imagen de una parte de una guía que tiene aproximadamente 375 micrómetros de longitud, esta imagen corresponde a una guía de 4 micrómetros de ancho aproximadamente.



**FIGURA 39** En esta imagen se muestran los resultados que se obtuvieron al analizar la imagen de la figura 38. El valor del coeficiente atenuación que se obtuvo para este caso fue de 1.4 dB/cm.

En la imagen de la figura 38 se observan dos guías de onda a los lados de esta, la separación entre cada guía es de aproximadamente 50 micrómetros.

---

### Análisis de Pérdidas por Medio de Fluorescencia

---

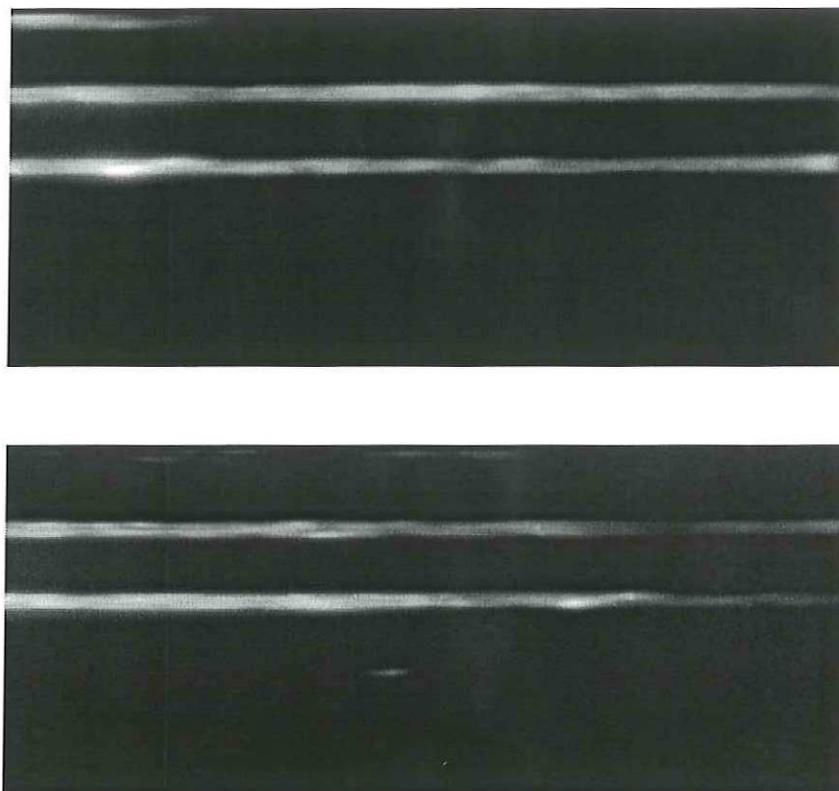
Como se observa, los resultados obtenidos de las imágenes anteriores figuras (26-41) varían de una forma considerable, entre dos imágenes diferentes de una misma guía. El análisis que se realizó a las imágenes anteriores figuras (26-41) tienen en promedio una longitud de aproximadamente 375 micrómetros, por lo tanto se consideró analizar una región más larga de la guía.

Para medir el coeficiente de atenuación en esta sección de la guía se procedió a hacer lo siguiente: se tomaron una serie de imágenes a lo largo de la guía, tratando de que para cada imagen tomada se tuvieran las mismas condiciones y que todas las imágenes tomadas tuvieran parte de la información de la imagen anterior, para después poder traslapar los perfiles de intensidad de todas ellas; esto se llevó a cabo a lo largo de 0.20 centímetros de la guía, por lo que fue necesario captar alrededor de 20 imágenes para cada guía que se analizó. Una vez tomada la serie de imágenes figura 42, se obtiene a partir de cada imagen el perfil de intensidad como se describió anteriormente figura 43.

---

**RESULTADOS: ANÁLISIS DE PÉRDIDAS POR MEDIO DE**

---



---

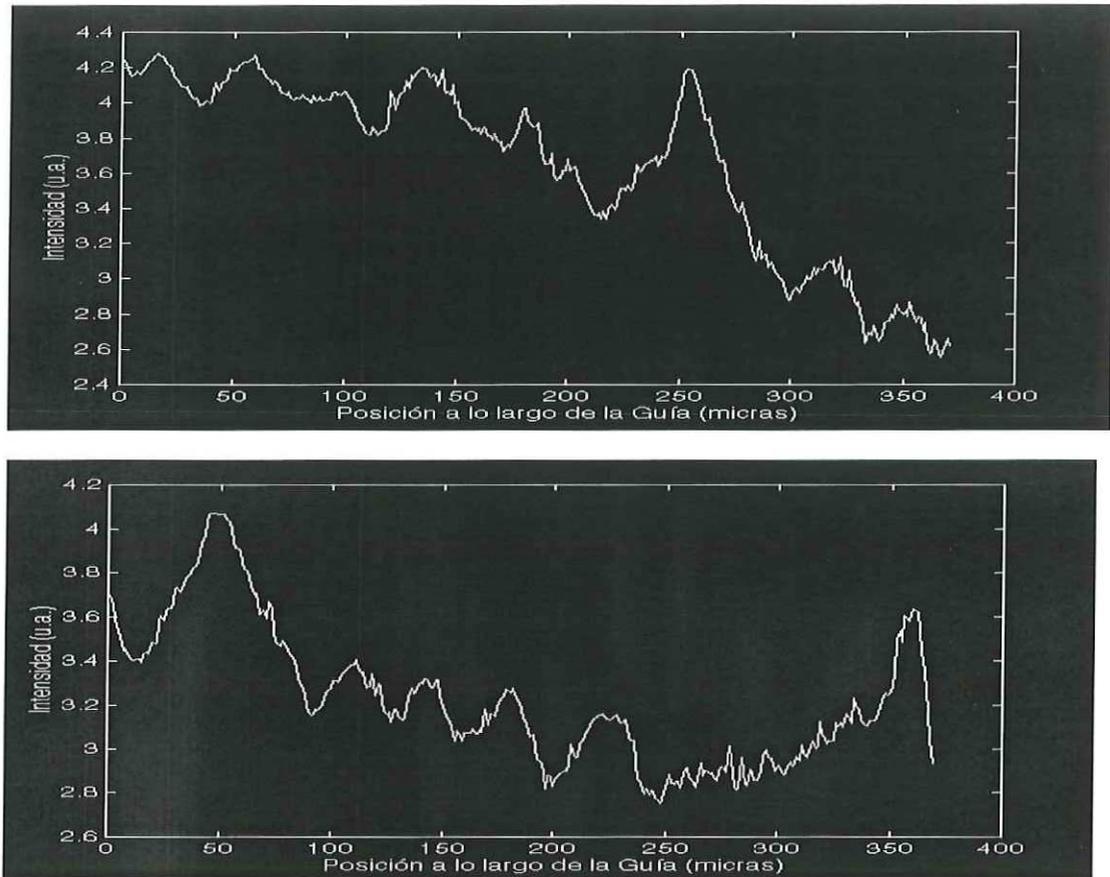
**FIGURA 42** Se muestran unas fotos tomadas por el CCD para ser analizadas y obtener el coeficiente de atenuación a partir de las imágenes.

Una vez obtenidos los datos que contiene la información de la intensidad a lo largo de la guía se procede a unir o traslapar estos datos, ya que las imágenes tomadas todas tienen parte de la información de la imagen siguiente, por lo tanto datos de dos imágenes vecinas tienen información en común, como se muestra en la figura 43.

---

**Análisis de Pérdidas por Medio de Fluorescencia**

---



**FIGURA 43** Se muestra el perfil de intensidad ( $I_n$ ) de dos imágenes consecutivas, se ve claramente que existe una región en común, la cual es traslapada.

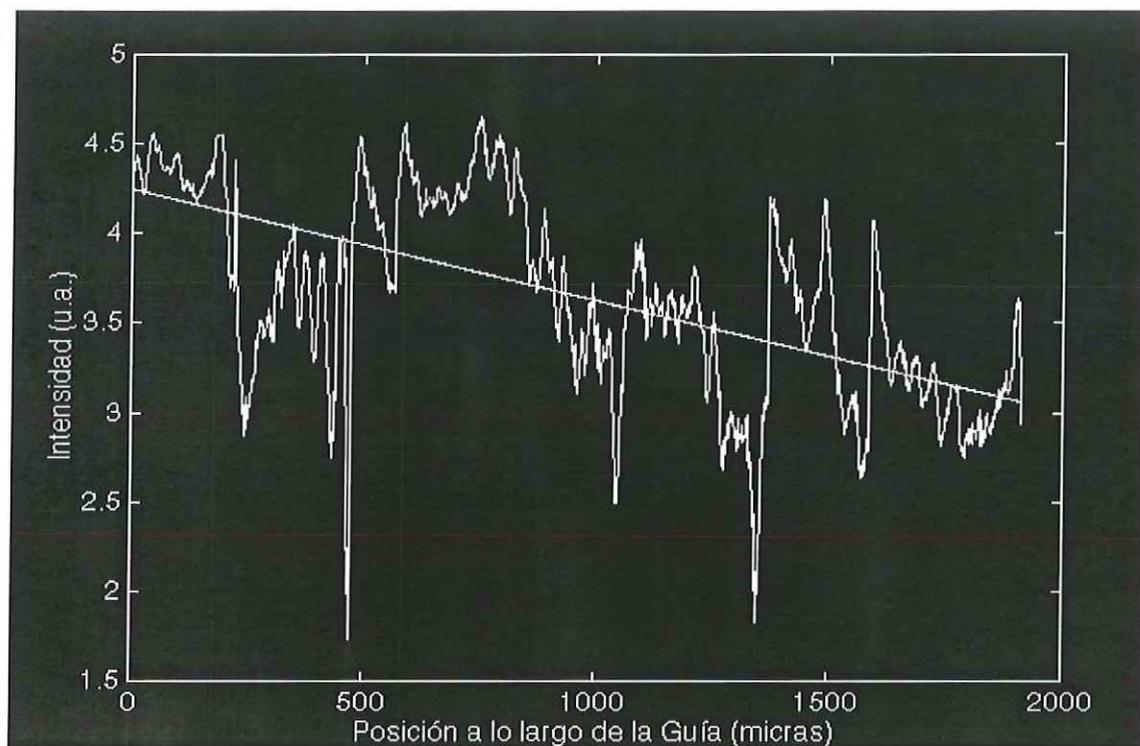
Cortando y uniendo todos los datos de intensidad de la región central de la guía, se obtuvieron los datos de intensidad a lo largo de aproximadamente 0.20 centímetros de guía. Los resultados del perfil de intensidad de una de las guías analizadas se muestran en la figura 44, a esta serie de datos de intensidad se le ajustó una recta por el método de míni-

---

**RESULTADOS: ANÁLISIS DE PÉRDIDAS POR MEDIO DE**

---

mos cuadrados, para poder determinar la variación de la intensidad de la luz en los extremos de la gráfica.



**FIGURA 44** En esta figura se muestra el perfil de intensidad ( $I_n$ ) en la guía y una línea recta que se ajustó a estos datos, de esta recta obtuvo el decaimiento de la intensidad en la guía; la figura representa una longitud de la guía de 0.199 cm.

De la pendiente de la recta se obtiene el decaimiento de la intensidad a lo largo de la guía. El valor del coeficiente de atenuación se obtiene a partir de la pendiente, que tiene esta recta, utilizando la ecuación 60 se obtiene el coeficiente de atenuación. El valor del coeficiente de atenuación que se obtuvo haciendo el traslape de todas las imágenes para esta guía fue de 18.7 dB/cm.

---

### Análisis de Pérdidas por Medio de Fluorescencia

---

De la apariencia física de las guías se observa que no hay indicios para decir que estas tengan un coeficiente de atenuación tan elevado, esto se debe a que de la observación directa de la luz propagándose dentro de la guía sin “Nile Blue A” es difícil de apreciar que la luz sea esparcida por los defectos físicos de la guía, por lo cual podemos deducir que las pérdidas no son tan altas, además estas guías no presentan centros de color, estos centros de color pueden ocasionar pérdidas por absorción (Márquez et al., 1986). Por lo que se decidió analizar de nuevo esta guía, los valores del coeficiente de atenuación para cada segmento de la misma guía se encontraron en un intervalo de 2 a 12 dB/cm, de la colección de todos los segmentos consecutivos, se obtuvo una variación de la luz esparcida a lo largo de 0.20 centímetros, dando como resultado un coeficiente de atenuación de 6.2 dB/cm. La inconsistencia de este resultado 6.2 dB/cm y el obtenido anteriormente de 18.7 dB/cm para la misma sección de la guía que se analizó se debe principalmente a error que se tiene al extraer los datos de la intensidad de la imagen de la guía, cuando la línea recta que extrae los datos de intensidad, de la imagen desplegada en la pantalla de la computadora, se desplazada en uno de los extremos aproximadamente 1 milímetro de la región central, se obtiene una variación considerable (0.5 a 3 dB/cm).

La variación tan grande del coeficiente de atenuación para los segmentos se debe principalmente a:

i) La no uniformidad de la película del “Nile Blue A” lo que da como resultado una no uniformidad de la intensidad de la señal esparcida.

---

**RESULTADOS: ANÁLISIS DE PÉRDIDAS POR MEDIO DE**

---

- ii) A un problema mecánico en la adquisición de datos (errores de alineamiento de la cámara CCD cuando es desplazada).
  
- iii) A errores cuando se extraen los datos de intensidad de la imagen en región central de la guía, debido a un desplazamiento lateral de la región central de la guía da como resultado una baja considerable de la intensidad en uno de los extremos.
  
- iv) Otra posible causa fue que el depósito de la película de “Nile Blue A” modificó la estructura original de la guía de onda.

# *CAPÍTULO 7* CONCLUSIONES Y DISCUSIONES

En este capítulo se presentarán las conclusiones y discusiones del trabajo de tesis realizado.

Las conclusiones obtenidas fueron:

1) Se implementaron técnicas para la medición de pérdidas en guías de onda angostas con perfil de índice gradiente, que se fabricaron por difusión de iones de Cobre en un sustrato de vidrio. Las medidas de las pérdidas fueron hechas utilizando la técnica de esparcimiento y a través de una cavidad resonante tipo Fabry-Perot.

---

## CONCLUSIONES Y DISCUSIONES

---

2) El origen de la atenuación en las guías de onda angostas se debe principalmente a:

“Defectos de orilla y superficiales (esparcimiento)”.

3) Para medir las pérdidas dentro de la cavidad resonante, que se forma debido a la reflectancia que tienen las caras de salida de las guías una vez que se pulieron, es necesario que la finesa de esta cavidad sea baja, y además, que solamente se propague un modo para que a la salida no se tenga una superposición de los modos acoplados, ya que las medidas se complican. Esta técnica requiere que exista una variación del camino óptico de la luz, para medir la intensidad en dos puntos diferentes. La variación en el camino óptico se realizó incrementando la temperatura de la guía; la intensidad de salida varía en función de la diferencia del camino óptico DCO. Midiendo esta variación en la intensidad en función de la temperatura de la guía se puede calcular el coeficiente de atenuación. El resultado que se obtuvo para el coeficiente de atenuación es de  $1.1 \pm 0.1$  dB/cm para una guía de 4 micras de ancho por 2.9 cm de longitud.

El coeficiente de atenuación que se obtuvo, nos dice que las guías fabricadas por difusión de cobre son buenas, algunos artículos que reportan medidas de pérdidas en guías que tienen coeficientes de atenuación mayores y menores al valor que se obtuvo en este trabajo. Las técnicas y materiales que los artículos reportan son diferentes al que se utilizó para este trabajo, ya que son muy escasos los grupos de investigación que están trabajando con la difusión de cobre para fabricar guías de onda.

---

### Análisis de Pérdidas por Medio de Fluorescencia

---

4) Para la utilización de la técnica por esparcimiento es necesario visualizar la distribución de la intensidad propagándose a lo largo de la guía de onda, y a partir de esta distribución medir el decaimiento que sufre dicha intensidad; la visualización o detección directa de esta intensidad es muy débil, por lo que fue necesario hacer resaltar esta intensidad, depositando sobre la guía un material fluorescente que hiciera resaltar el efecto de esparcimiento de la intensidad de la luz que se propaga. Las mediciones obtenidas por esta técnica dieron como resultado un coeficiente de atenuación de 1 a 16 dB/cm para guías de 4 micrómetros de ancho y 375 micrómetros de largo. Por otro lado se obtuvo el coeficiente de atenuación de 18.69 dB/cm para guías del mismo ancho y en una sección de 0.199 centímetros de longitud de la guía, la cual se obtuvo al unir una serie de imágenes consecutivas tomadas de esta sección, después se obtuvo el coeficiente de atenuación para cada una de las imágenes de la misma guía, dando como resultado que el coeficiente de atenuación se encontrara en un intervalo de 2 a 12 dB/cm para la misma guía y al unir todos estos coeficientes a lo largo de aproximadamente los 2 milímetros, al integrar sobre todos estos segmentos se obtuvo un coeficiente de 6.2 dB/cm.

Las causas principales por la que este resultado sea tan grande y que varíe tanto se deben principalmente a:

- a) La no uniformidad de la película del "Nile Blue A" lo que da como resultado una no uniformidad de la intensidad de la señal esparcida.
- b) A un problema mecánico en la adquisición de datos (errores de alineamiento de la cámara CCD cuando es desplazada).

---

## CONCLUSIONES Y DISCUSIONES

---

d) A errores cuando se extraen los datos de intensidad de la imagen en región central de la guía, debido a un desplazamiento lateral de la región central de la guía que da como resultado una baja considerable de la intensidad en uno de los extremos.

e) A que la película de “Nile Blue A” modificó la estructura original de la guía.

f) Defectos de fabricación, imperfecciones de las guías de onda y además a las partículas de polvo que se alojaron sobre la guía cuando se hizo el depósito del material fluorescente.

g) Que la luz no fué acoplada correctamente en la guía de onda, sino en la película de “Nile Blue A”, lo que dió como resultado que el coeficiente de atenuación que se obtuvo fuera el de este material.

Como conclusión sobre de las dos técnicas que se utilizaron para determinar el coeficiente de atenuación en guías de onda angostas se puede decir que: Las dos técnicas son no destructivas y fáciles de implementar; la técnica por esparcimiento y por naturaleza de la misma tiene una incertidumbre comparada al orden de las pérdidas que presentan estas guías, por otro lado la técnica interferométrica es mucho mas sencilla que la anterior y además involucra menos parámetros para obtener el coeficiente de atenuación, otro punto que es muy importante es que cuando se tiene un coeficiente de atenuación menor, la incertidumbre del resultado disminuye. Por lo cual considero que la técnica interferométrica se podrá utilizar con frecuencia para medir el coeficiente de atenuación en guías de onda angostas.

---

## • Referencias

Márquez H., D. Salazar, A. Villalobos, G. Páez and J. M. Rincón (1995). "Experimental study of Cu-Na exchanged glass waveguides", *Appl. Opt.*, 34 (25) pp 5817-5822.

Salazar D, H. Porte and H. Márquez (on press dec. 1997) "Optical channel waveguides by copper ion-exchanged in glass", *Appl. Opt.*, 36 (34)

Webber H. P., F. A. Dunn and W. N. Leibot (1973). "Loss measurement in thin films optical waveguides", *Appl. Opt.*, Vol. 12 No. 4, pp 755-757.

Jackel J. L. and J. J. Veselka (1984). "Measurement losses in optical waveguides: a new method", *Appl. Opt.*, Vol. 23, No. 2, pp 197-199.

Hickernell, R. K., D. R. Larson, R. J. Phelan, Jr. ... and L. E. Larson (1988). "Waveguides loss measurements using photothermal deflection", *Appl. Opt.*, Vol. 27, No. 13, pp 2636-2638.

Vettiger, P. et al. (1991) "Full-Wafer Technology--A New Approach to Large-Scale Laser Fabrication and Integration", *IEEE Journal of Quantum Electronics*, Vol. 27, pp 1319-1331.

Kohelnik, H. and H. P. Weber (1974). "Rays, stored energy, and power flow in dielectric waveguides", *J. Opt. Soc. Am.*, 64, pp 174-185.

---

---

Snyder, A. W. , and J. D. Love (1975). "Reflection at curved dielectric interfase-electromagnetic tunneling." IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques, MTT-23, 134-141.

Glode, D. (1971). "Weakly guiding fibers" Applied Optics, 10, 2252-2258.

Walker, R. G. (1985), "Simple and Accurate Loss Measurement Technique for Semiconductor Waveguides", Electronics Letters, Vol. 21, pp 581-583.

Suematsu Y. and K. Furuya (1972), "Propagation mode and scattering loss of a two dimensional dielectric waveguide with gradual distribution of refractive index", IEEE Trans. Microwave Theory Tech., Vol. MTT-20, No. 8, pp 524-530

Marcuse D. (1973). "TE modes of graded-index slab waveguides", IEEE J. Quantum Electron. Vol. QE-9, No. 10, pp. 1000-1006.

Hocker G. B. and W. K. Burns (1975), "Modes in diffused optical waveguides of arbitrary index profile", IEEE J. Quantum Electron., Vol. QE-11, No. 6, pp. 270-276.

Shiff L. I. (1968), "Quantum mechanics", McGraw-Hill, pp. 268-279.

Kawakami S. (1980), "Optical waveguide: Appendix C", Asakura Book Co., pp. 262-267.

Won, Y. H., P. C. Jaussaud, and G. H. Chartier, (1980), "Three-Prism loss measurement of optical waveguides", Appl. Phys. Lett. Vol. 37, No. 3, pp 269-271.

Li, M. J. "Doctoral Thesis", (1978), University of Nice.

Hunsperger, R. G. (1978), "Integrated optics", University of Delaware.

---

---

Okamura, Y. A. Miki and S. Yamamoto, (1986), "Observation of wave propagation in integrated optical circuits", *App. Opt.* Vol. 25, No. 19, pp 3405-3408.

Hickernell, R. K., et al., (1988) "Waveguide loss measurement using photothermal deflection" *App. Opt.*, Vol. 27, No. 13, pp 2636-2638.

Walker, R. G. and C. D. W. Wilkinson, (1983), "Integrated optical ring resonators made by silver ion-exchange in glass", *App. Opt.* Vol. 22, No. 7, pp 1029-1035.

Deri, R. J., and E. Kapon (1991) "Low-Loss III-V Semiconductor Optical Waveguides", *IEEE Journal of Quantum Electronics*, Vol. 27, pp 626-640.

Najafi, S. I. *Introduction to Glass Integrated Optics*, (1992) Norwood, MA: Artech House Chapter 5.5

Yasoyuki Okamura, Atsushi Miki and Sadahito Yamamoto (1986). "Observation of wave propagation in integrated optical circuits", *Appl. Opt.* Vol. 25, No. 19 pp 3405-3408.

Walker, R. G., (1985) "Simple and Accurate Loss Measurement Technique for Semiconductor Waveguides", *Electronics Lett.*, Vol. 21, pp 581-583.

Puscas N., M. Guldi, D. Scarano, G. Perone and I. Montrosset (1996). "Characterization of Er<sup>3+</sup>-doped Ti:LiNbO<sub>3</sub> waveguides: losses, absorption spectra, and near field measurements", *Opt., Eng.*, 35 (5) pp 1311-1318.

Zappe, H. P. (1995) "Introduction to Semiconductor Integrated Optics", Artech House, Inc., pp 202-204.

---

---

Regener R. and W. Sohler (1985). "Loss in low-finesse Ti:LiNbO<sub>3</sub> optical waveguide resonator", *Appl. Phys. B*, 36 pp 143-147.

Davies R. W., J. N. Walpole (1976) *IEEE J. QE-12*, pp 291.

Lee C. E., and H. F. Taylor (1991). "Fiber-optic Fabry-Perot temperature sensors using a low coherence light source", *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 9, pp 129-134.

Wolthuis R. A., G. L. Mitchell, E. Saaki, J. C. Hartl and M. A. Afromowitz (1991). "Development of medical pressure and temperature employing optical spectrum modulation", *IEEE Trans. On Biomedical Eng.*, Vol. 38 pp 974-980.

---

---

---

## APENDICE A

# TEORÍA DE ONDAS ELECTROMANÉTICAS

### *Ecuaciones de Maxwell*

La luz se puede ser tratada como una onda electromagnética, cuyos vectores de campos electromagnéticos son funciones de la posición  $r [m]$  y del tiempo  $t [s]$ , estos vectores son: campo eléctrico  $\vec{E}$  [V/m], campo magnético  $\vec{H}$  [A/m], densidad de flujo eléctrico  $\vec{D}$  [C/m<sup>2</sup>] y la densidad de flujo magnético  $\vec{B}$  [Wb/m<sup>2</sup>], y existe una relación de estos vectores los que se presentana a continuación.

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{A.1})$$

$$\nabla \times \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{j} \quad (\text{A.2})$$

en donde  $\vec{j}$  [A/m<sup>2</sup>] es la densidad de corriente eléctrica, por la ecuación de continuidad de la corriente de  $\vec{j}$  y la densidad de carga  $\rho$  [C/m<sup>3</sup>] se tiene:

---

---



---


$$\nabla \cdot \vec{J} = \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (\text{A.3})$$

de las ecuaciones 1 -3 se tiene:

$$\nabla \cdot \nabla \times \vec{E} = 0 \quad (\text{A.4})$$

$$\nabla \cdot \nabla \times \vec{H} = 0 \quad (\text{A.5})$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (\text{A.6})$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = 0 \quad (\text{A.7})$$

Las ecuaciones 1 y 2 Maxwell las dedujo a partir de la ley de Ampere y Faraday respectivamente, y las ecuaciones 6 y 7 las dedujo a partir de la ley Gauss las que se refieren al campo eléctrico y magnético respectivamente. Las ecuaciones (1, 2, 6 y 7) se conocen como las ecuaciones de Maxwell.

La ecuación 1 dice: La densidad de energía transportada por campo electromagnético es expresada por el vector de Poynting  $\vec{S}$  [W/m<sup>2</sup>] definido como:  $\vec{E} \times \vec{H} = \vec{S}$ .

Si la polarización generada por la luz transmitida sobre un medio es  $\vec{P}$  [C/m<sup>2</sup>] y la magnetización es  $\vec{M}$  [A/m], la densidad de flujo magnético y eléctrico se representan de la siguiente manera:

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P} \quad (\text{A.8})$$

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{P}) \quad (\text{A.9})$$


---

---

en donde  $\epsilon_0 [F/m]$  y  $\mu_0 [H/m]$  son la permitividad y permeabilidad del espacio libre respectivamente. Si el medio es isotrópico, lineal y no dispersivo se tiene que:

$$\vec{P} = \epsilon_0 \chi_e \vec{E} \quad (\text{A.10})$$

$$\vec{M} = \chi_m \vec{H} \quad (\text{A.11})$$

en la que  $\chi_{e,m}$  son la susceptibilidad eléctrica y magnética; sustituyendo las ecuaciones (10 y 11) en las ecuaciones (8 y 9) y definiendo  $1 + \chi_e = \epsilon_r$  y  $1 + \chi_m = \mu_r$  como la permitividad y permeabilidad relativas, si además definimos a  $\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$  y a  $\mu = \mu_r \mu_0$  como la permitividad y permeabilidad respectivamente, se llega a:

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (\text{A.12})$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (\text{A.13})$$

### ***Condiciones de frontera y las ecuaciones de onda.***

Las condiciones de frontera son aquellas que se presentan en la superficies de contacto entre dos medios diferentes. Si se define al vector normal unitario  $\hat{e}_n$  que va del medio  $u$  al medio  $d$ ,  $\vec{J} = 0$ , y  $\rho = 0$ , las condiciones de frontera para este caso son: que las componentes tangencial del campo eléctrico y magnético deben de ser continuas, la componente normal de la densidad del flujo eléctrico y magnético también son continuas,

$$\hat{e}_n \times (\vec{E}_u - \vec{E}_d) = 0 \quad (\text{A.14})$$

$$\hat{e}_n \times (\vec{H}_u - \vec{H}_d) = 0 \quad (\text{A.15})$$


---

---



---


$$\hat{e}_n \cdot (D_u - D_d) = 0 \quad (\text{A.16})$$

$$\hat{e}_n \cdot (B_u - B_d) = 0. \quad (\text{A.17})$$

Si se tiene un medio isotrópico con pérdidas bajas y con permeabilidad uniforme  $\mu = \mu_0$  se obtienen las siguientes ecuaciones:

$$\nabla^2 \vec{E} - \epsilon \mu_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} + \nabla \left( \frac{\nabla \epsilon}{\epsilon} \cdot \vec{E} \right) = 0 \quad (\text{A.18})$$

$$\nabla^2 \vec{H} - \epsilon \mu_0 \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} + \frac{\nabla \epsilon}{\epsilon} \times (\nabla \times \vec{H}) = 0 \quad (\text{A.19})$$

si la permitividad es uniforme para  $\vec{E}$  y  $\vec{H}$  estas satisfacen las siguientes ecuaciones:

$$\nabla^2 \vec{E} + \epsilon \mu_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0 \quad (\text{A.20})$$

$$\nabla^2 \vec{H} - \epsilon \mu_0 \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} = 0 \quad (\text{A.21})$$

Si asumimos que es una onda electromagnética con frecuencia angular  $\omega$  [rad/s] e introducimos los fasores para los campos magnéticos y eléctricos, así como la densidad de flujo eléctrico y magnético:

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \text{Re} [\tilde{E}(\vec{r}) e^{j\omega t}] \quad (\text{A.22})$$

$$\vec{H}(\vec{r}, t) = \text{Re} [\tilde{H}(\vec{r}) e^{j\omega t}] \quad (\text{A.23})$$

$$\vec{D}(\vec{r}, t) = \text{Re} [\tilde{D}(\vec{r}) e^{j\omega t}] \quad (\text{A.24})$$

$$\vec{B}(\vec{r}, t) = \text{Re} [\tilde{B}(\vec{r}) e^{j\omega t}] \quad (\text{A.25})$$


---

---

reescribiendo las ecuaciones de Maxwell y las ecuaciones de onda (20 y 21), tenemos:

$$\nabla \times \vec{E} = -j\omega\mu_0\vec{H} \quad (\text{A.26})$$

$$\nabla \times \vec{H} = j\omega\epsilon\vec{E} \quad (\text{A.27})$$

$$\nabla^2 \vec{E} + k^2 \vec{E} + \nabla \left( \frac{\nabla \epsilon}{\epsilon} \cdot \vec{E} \right) = 0 \quad (\text{A.28})$$

$$\nabla^2 \vec{H} + k^2 \vec{H} + \frac{\nabla \epsilon}{\epsilon} \times (\nabla \times \vec{H}) = 0 \quad (\text{A.29})$$

donde  $k$  [rad/m] es  $k = \omega\sqrt{\epsilon\mu_0}$  que es llamado el número de onda, si  $\epsilon = \epsilon_0$ ; el número de onda para el espacio libre  $k_0$  es:  $k_0 = \omega\sqrt{\epsilon_0\mu_0}$  de la que se obtiene  $k_0 = k/n$ . Si la permitividad es constante se obtiene:

$$\nabla^2 \vec{E} + k^2 \vec{E} = 0 \quad (\text{A.30})$$

$$\nabla^2 \vec{H} + k^2 \vec{H} = 0 \quad (\text{A.31})$$

### *Onda plana*

De las ecuaciones (30 y 31) escogemos una de las componentes en coordenadas rectangulares que satisface la ecuación de onda como sigue:

$$\nabla^2 E_x + k_x^2 E_x = 0 \quad (\text{A.32})$$

es llamada la ecuación de Helmholtz. Si ahora se considera una onda plana con un vector de onda  $\vec{k}$ . Si el vector de onda y el vector de posición  $\vec{r}$  son expresados en términos de las coordenadas de dirección.

---

---



---


$$\vec{k} = [k_x \ k_y \ k_z]^T \quad (\text{A.33})$$

$$\vec{r} = [x \ y \ z]^T \quad (\text{A.34})$$

en donde T representa la transpuesta y A la amplitud de la onda. La onda plana puede ser expresada como sigue:

$$E = A e^{-j(\vec{k} \cdot \vec{r})} = A e^{-j[k_x x + k_y y + k_z z]} \quad (\text{A.35})$$

Haciendo una serie de sustituciones se llega a  $|\vec{k}| = \sqrt{k_x^2 + k_y^2 + k_z^2}$  siempre y cuando  $|\vec{k}| = k = \omega \sqrt{\epsilon \mu_0}$ .

La velocidad de propagación de la onda en movimiento es llamada la velocidad de fase, para una onda plana la velocidad de fase  $v_f [m/s]$  va en la dirección de propagación y está dada por la siguiente relación:

$$v_f = \omega / |\vec{k}| = \omega / k = 1 / \sqrt{\epsilon \mu_0} = c/n \quad (\text{A.36})$$

en donde  $c [m/s]$  representa la velocidad de la luz en el vacío  $c = 1 / \sqrt{\epsilon_0 \mu_0}$ .

La velocidad de propagación de la energía en una onda electromagnética, es llamada velocidad de grupo, para una onda plana se representa como sigue:

$$v_g = \left[ \frac{d}{d\omega} |\vec{k}| \right]^{-1} \quad (\text{A.37})$$

La distancia en la que la fase cambia  $2\pi$  en la dirección de propagación de la onda en movimiento es llamada longitud de onda. Si la frecuencia es  $f [Hertz]$  la longitud de onda  $\lambda_0 [m]$  para una onda plana en el vacío es:

---

---



---


$$\lambda_0 = 2\pi/k_0 = 2\pi/\omega\sqrt{\epsilon_0\mu_0} = c/f \quad (\text{A.38})$$

La longitud de onda de una onda plana en un medio con índice de refracción  $n$  es:  $\lambda = v_f/f = \lambda_0/n$ .

Si esta onda, se atenúa al interactuar con el medio, la constante de fase es un número complejo, este número complejo  $\gamma'$  tiene parte real  $\beta$  [rad/m] e imaginaria  $\alpha$  [rad/m] el cual se representa como:

$$\gamma' = \beta - j\alpha \quad (\text{A.39})$$

en donde  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\gamma'$  son las constantes de atenuación, de fase y de propagación respectivamente.

### ***Reflexión y refracción***

Si consideramos una onda plana incidiendo a un ángulo dado sobre una interface de dos dieléctricos de diferentes índices de refracción, como se muestra en la figura 1, y están en contacto en  $y = 0$ , los ángulos formados por el haz incidente, reflejado y transmitido con la perpendicular al plano de la frontera son:  $\theta_i$ ,  $\theta_r$  y  $\theta_t$  respectivamente. Los vectores de onda para los tres haces anteriores son los siguientes:

$$\vec{k}_i = \begin{bmatrix} 0 & k_0 n_1 \cos\theta_i & k_0 n_1 \sin\theta_i \end{bmatrix}^T \quad (\text{A.40})$$

$$\vec{k}_r = \begin{bmatrix} 0 & -k_0 n_1 \cos\theta_r & k_0 n_1 \sin\theta_r \end{bmatrix}^T \quad (\text{A.41})$$

$$\vec{k}_t = \begin{bmatrix} 0 & k_0 n_2 \cos\theta_t & k_0 n_2 \sin\theta_t \end{bmatrix}^T \quad (\text{A.42})$$


---

Cuando todos los vectores de onda se encuentran sobre el plano  $yz$  solamente se pueden escribir las siguientes relaciones:

$$\partial E_x / \partial z = -j\omega\mu_0 H_y \quad (\text{A.43})$$

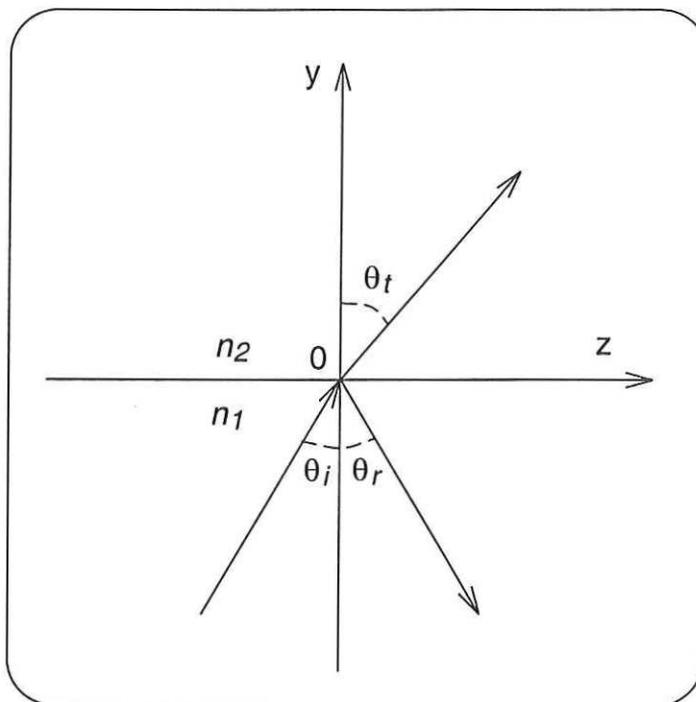
$$\partial E_x / \partial y = j\omega\mu_0 H_z \quad (\text{A.44})$$

$$\partial H_z / \partial y - \partial H_y / \partial z = j\omega\epsilon_0 n^2 E_x \quad (\text{A.45})$$

$$\partial H_x / \partial z = j\omega\epsilon_0 n^2 E_x \quad (\text{A.46})$$

$$\partial H_x / \partial y = -j\omega\epsilon_0 n^2 E_z \quad (\text{A.47})$$

$$\partial E_z / \partial y - \partial E_y / \partial z = -j\omega\mu_0 E_x \quad (\text{A.48})$$



**FIGURA A 1** Reflexión y refracción de una onda plana incidiendo sobre una interface de dos dieléctricos.

---

La onda plana, cuya componente del campo eléctrico es perpendicular al plano de incidencia y la onda plana, cuya componente del campo eléctrico es paralela al plano de incidencia; se le llaman polarización **s** y **p** de la luz, además estas dos componentes son ortogonales entre si.

De las ecuaciones (43-45) se obtiene que la componente del campo electromagnético para la polarización **s** en el medio 1 es:

$$E_{x1} = A_{s1} e^{-j\vec{k}_i \cdot \vec{r}} + B_{s1} e^{-j\vec{k}_r \cdot \vec{r}} \quad (\text{A.49})$$

$$H_{y1} = [A_{s1} n_1 \sin \theta_i e^{-j\vec{k}_i \cdot \vec{r}} + B_{s1} n_1 \sin \theta_r e^{-j\vec{k}_r \cdot \vec{r}}] / Z_0 \quad (\text{A.50})$$

$$H_{z1} = [-A_{s1} n_1 \cos \theta_i e^{-j\vec{k}_i \cdot \vec{r}} + B_{s1} n_1 \cos \theta_r e^{-j\vec{k}_r \cdot \vec{r}}] / Z_0 \quad (\text{A.51})$$

en la que  $Z_0$  es la impedancia para el vacío,  $Z_0 = \sqrt{\mu_0 / \epsilon_0}$ . Para el medio 2 se tiene:

$$E_{x2} = A_{s2} e^{-j\vec{k}_i \cdot \vec{r}} \quad (\text{A.52})$$

$$H_{y2} = [A_{s2} n_2 \sin \theta_i e^{-j\vec{k}_i \cdot \vec{r}}] / Z_0 \quad (\text{A.53})$$

$$H_{z2} = [-A_{s2} n_2 \cos \theta_i e^{-j\vec{k}_i \cdot \vec{r}}] / Z_0 \quad (\text{A.54})$$

De las ecuaciones (46-48) se obtienen los campos electromagnéticos para la polarización **p** en el medio 1 y son:

$$H_{x1} = [A_{p1} n_1 e^{-j\vec{k}_i \cdot \vec{r}} - B_{p1} n_1 e^{-j\vec{k}_r \cdot \vec{r}}] / Z_0 \quad (\text{A.55})$$


---

Si se hace lo mismo para las ecuaciones (55 - 60) de la polarización **p**, con las condiciones de frontera adecuadas en la interface  $y = 0$  y la ley de Snell, se llegan a los coeficientes de reflexión  $R_p$  y de transmisión  $T_p$  siguientes:

$$R_p = \frac{B_{p1}}{A_{p1}} = \frac{-n_2^2 \cos \theta_i + n_1 \sqrt{n_2^2 - n_1^2 (\sin \theta_i)^2}}{n_2^2 \cos \theta_i + n_1 \sqrt{n_2^2 - n_1^2 (\sin \theta_i)^2}} \quad (\text{A.63})$$

$$T_s = \frac{A_{p2}}{A_{p1}} = \frac{2n_2 \cos \theta_i}{n_2^2/n_1 \cos \theta_i + \sqrt{n_2^2 - n_1^2 (\sin \theta_i)^2}} \quad (\text{A.64})$$

Las ecuaciones (61 - 64) son llamadas fórmulas de Fresnell y  $R_s$ ,  $R_p$ ,  $T_p$  y  $T_s$  son los llamados coeficientes de Fresnel.

Se le llama ángulo crítico  $\theta_c$ ,

$$\sin \theta_c = n_2/n_1 \quad (\text{A.65})$$

donde  $n_1 > n_2$ , al ángulo al cual ya no existe densidad de flujo transmitido. Si el ángulo incidente es  $\theta_i > \theta_c$  se tiene que toda la luz es reflejada, y esto llamado como reflexión total. Si  $k_0 n_1 \cos \theta_i$  es la constante de fase en la dirección  $z$  representada por  $\beta$ , los coeficientes de reflexión para **p** y **s** son como sigue:

$$R_s = e^{j2\phi_s} \quad (\text{A.66})$$

$$\phi_s = \text{atan} \left[ \frac{\sqrt{\sin^2 \theta_i - (n_2/n_1)^2}}{\cos \theta_i} \right] = \text{atan} \left[ \frac{\sqrt{\beta^2 - k_0^2 n_2^2}}{\sqrt{k_0^2 n_1^2 - \beta^2}} \right] \quad (\text{A.67})$$

---

```
graf2=detrend(graf1);           %de la linea, se obtiene la pendiente de la
                                %recta.

ajuste=graf1-graf2;

plot(ajuste);                   %se grafica la recta

hold off;

figure(2);

plot(ajuste,'w');

todali06=ajuste;

save todali06;                   %se salva en disco
```

---