

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE SAN LUIS POTOSI

FACULTAD DE CIENCIAS



**FABRICACIÓN DE GUÍAS DE ONDA MEDIANTE
INTERCAMBIOS IÓNICOS POR DIFERENTES
MÉTODOS**

**TESIS PROFESIONAL
PARA OBTENER EL TÍTULO DE**

**MAESTRO EN CIENCIAS APLICADAS
OPCIÓN:
FOTÓNICA**

PRESENTA:

PAOLA BARRIOS MARTÍNEZ

SAN LUIS POTOSI, S. L. P., MAYO DE 2005



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ
FACULTAD DE CIENCIAS



**FABRICACIÓN DE GUÍAS DE ONDA MEDIANTE
INTERCAMBIOS IÓNICOS POR DIFERENTES
MÉTODOS**

TESIS PROFESIONAL
PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS APLICADAS
OPCIÓN:
FOTÓNICA

PRESENTA

PAOLA BARRIOS MARTÍNEZ

ASESORES DE TESIS:

DRA. AMPARO RODRÍGUEZ COBOS
DR. SALVADOR GUEL SANDOVAL

SAN LUIS POTOSÍ, S. L. P. MAYO DE 2005



UNIVERSIDAD AUTONOMA DE SAN LUIS POTOSI

FACULTAD DE CIENCIAS



**FABRICACIÓN DE GUÍAS DE ONDA
MEDIANTE INTERCAMBIOS IÓNICOS POR DIFERENTES
MÉTODOS**

Dra. Amparo Rodríguez Cobos

Dr. Salvador Guel Sandoval

Dr. Francisco Javier De Anda Salazar

Dr. Gustavo Ramírez Flores

SAN LUIS POTOSI, S. L. P. Mayo 2005

A MIS PADRES...

*"A work as this is never finished; one must simply declare
it finished when one has, within limits of time and
circumstances, done what is possible."*

Johann Wolfgang von Goethe

AGRADECIMIENTOS:

Agradezco a mis padres, cuyo apoyo brindado durante la maestría fue invaluable.

Le agradezco a mi tía la Lic. Lourdes Barrios Leija por su apoyo incondicional.

Expreso mi agradecimiento al Dr. Alfonso Lastras Martínez por las facilidades otorgadas para realizar los estudios de maestría así como el uso de los laboratorios durante mi estancia en el Instituto de Investigación en Comunicación Óptica (IICO).

Deseo agradecer a la Dra. Amparo Rodríguez Cobos y al Dr. Salvador Guel Sandoval, por sus concejos y dirección de tesis, prescindibles para la realización de este trabajo.

Le agradezco al Doctor Francisco Javier De Anda Salazar por haber proporcionado el aluminio utilizado en este trabajo de Tesis.

Se agradece el apoyo brindado por el Ing. Fís. Mario Echenique Lima y del M.C. Ismael Lara Vázquez, por su valiosa asesoría para la evaporación de metales (aluminio) sobre substratos de vidrio y en el laboratorio de fotolitografía.

Agradezco al Concejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca número 182180, otorgada para realizar los estudios de maestría en ciencias aplicadas.

Agradezco a la Quim. Blanca Torres por su asesoría en el manejo de químicos para este trabajo de tesis.

Le agradezco a M.C. José Nieto Navarro por sus concejos y apoyo brindado en los distintos laboratorios del instituto.

Deseo expresar mi más sincero agradecimiento a mis compañeros y amigos por sus concejos y asesoría, durante la maestría.

CONTENIDO

CAPÍTULO 1.- INTRODUCCION...	4
CAPÍTULO 2.- TEORIA BASICA DE GUIAS DE ONDA	
2.1.- La Óptica Integrada de Vidrio.	9
2.1.1.- El Vidrio	
2.2.- El Intercambio Iónico.	10
2.2.1.- Variación del índice de refracción y el stress de los intercambios de guías.	12
2.2.2.- Las Opciones de Vidrio y iones dopantes.....	12
2.2.3.-El Intercambio de Potasio Na /K´	13
2.3.- Teoría de Difusión.....	14
2.4.- Definición de Guía de Onda.	18
2.4.1.- Bases de la Propagación Guiada..	20
2.4.2.-Modos TE y TM en una Guía Plana Asimétrica.	24
2.4.3.-Las guías de ancho limitado o guías canal.....	26
2.4.4.-Método del índice efectivo.	26
2.5.- Teoría geométrica de las guías de onda.	28

CAPÍTULO 3.- ASPECTO EXPERIMENTAL

3.1.- Introducción.	33
3.2.- Proceso de Fabricación Convencional de guías de onda por intercambio iónico.	34
3.2.1.- Limpieza del sustrato.	35
3.2.2.- Depósito del material de barrera.	35
3.2.3.- Proceso de Fotolitografía.	38
A.- Depósito de la resina	
B.- Exposición	
C.- Revelado de la resina	
D.- Grabado del material (ataque del material de barrera)	
3.2.4.- Intercambio iónico.	42
3.2.5.- Eliminación del material de barrera, corte y pulido.	42
3.3.- Proceso de Fabricación de guías de onda mediante métodos Interferométricos.	42

CAPÍTULO 4.- DISCUSION DE RESULTADOS

4.1.- Resultados para el proceso convencional.	46
4.1.1.- Limpieza del material de barrera.	46
4.1.2.- Evaporación del Aluminio.	49
4.1.3.- Proceso de Fotolitografía.	62
A.- Máquina Alineadora de Rayos UV	62

B.- Exposición de Muestras.	63
4.1.4.- Intercambio Iónico de Sales.	69
4.1.5.- Eliminación del material de barrera, corte y pulido.	70
4.1.6.- Caracterización de Campo Cercano.	78
4.2.- Resultados para Proceso Interferométrico (Adaptación para IICO).	80
4.2.1.- Interferómetro Holográfico.	80
4.2.2.- Interferómetro de Usos Múltiples.	88
4.3.- Contraposición de ambos Procesos.	93
4.4.- Conclusiones Parciales Experimentales.	95
CAPÍTULO 5.- CONCLUSIONES GENERALES.	98
5.1.- Perspectivas.	99
REFERENCIAS.	101

CAPITULO 1

INTRODUCCION

Desde la antigüedad las técnicas de comunicación óptica se han utilizado para transmitir información a larga distancia. En el año de 480 a.C. los cartagineses tuvieron éxito en la conquista de Sicilia, la cual fue poblada por los griegos debido a que usaron técnicas de comunicación óptica para ordenar sus reservas provenientes del continente africano. Las señales ópticas que fueron utilizadas por los griegos consistían en comunicar mensajes mediante fuegos durante la noche y reflejos de espejos y humo (al estilo de los indios americanos) durante el día. Mientras que los romanos dispusieron de torres para telegrafía óptica por medio de antorchas que situaron a distancias regulares en sus calzadas por todo el imperio. Durante siglos se siguió utilizando la telegrafía óptica con sus limitaciones e inconvenientes, pues solo permitía comunicar hasta el límite permitido por la vista. [1].

Con el descubrimiento del láser de gas en 1960, su potencial de utilización como fuente coherente para comunicación óptica ha sido objeto de un amplio rango de actividades de investigación. Para el uso efectivo de láseres semiconductores y fibras ópticas, la necesidad de componentes tales como transmisores, receptores, moduladores, fue cada vez más obvia. El término de óptica integrada, fue introducido en 1969 cuando S.E. Miller propuso el concepto de circuitos de óptica integrada que deberían integrarse en un solo sustrato. Algunos conceptos teóricos relacionados con guías de onda, acopladores codireccionales y otros dispositivos, se pueden citar de la teoría de las microondas, la cual se había establecido 15 años antes [2].

La mayoría de las actividades en los días pioneros de la óptica integrada, en los años setenta y principios de los ochenta, fueron enfocadas en desarrollar dispositivos, demostrando que fueran compatibles con las tecnologías de la óptica integrada. El láser DFB (distributed feedback) demostrado por Kogelnik y Shank en 1972 representa un muy prominente hallazgo. Una gran variedad de componentes pasivos tales como acopladores direccionales, guías de onda, rejillas de Bragg, rejillas de transmisión, filtros acusto-ópticos, switches ópticos y moduladores fueron descubiertos por primera vez.

En paralelo con estos desarrollos, el plano teórico de la óptica integrada se estableció. El logro más espectacular en este campo fué la aplicación del método de propagación del haz (BMP) a problemas de óptica integrada por Feit y Fleco en 1978.

El siguiente periodo se caracterizó por la consolidación sucesiva de la óptica integrada, por ejemplo, debido a una estabilización de la tecnología, un incremento en el campo de la fabricación y además de las predicciones cuantitativas del comportamiento de los dispositivos. Por otro lado, estos esfuerzos fueron dirigidos en el desarrollo de circuitos ópticos más sofisticados, por ejemplo, circuitos que requirieran un incremento en el área del chip o en el número de pasos de fabricación. Ejemplos prominentes de circuitos de óptica integrada y dispositivos altamente complejos realizados durante este periodo por diferentes grupos, fueron [2]:

- 8x8 Switching Matrix (Ericsson, HHI, NTT)
- Bidirectional Transceiver (AT&T, GMMT, Siemens)
- DWDM Receiver (dense wavelength division multiplex), (Bellcore, Phillips, Siemens)
- DWDM Transmitter (AT&T)
- Coherent Receiver (AT&T, NTT, HHI)
- Laser + Optical Amplifier (AT&T)
- Laser + Modulator (AT&T)
- Disc Pickup (University of Osaka)
- Tunable 128- Channel Filter (NTT)

Bajo el apelativo de óptica integrada se engloban los sistemas formados por dispositivos ópticos construidos e interconectados mediante guías de onda ópticas, diseñados para sustituir a los dispositivos eléctricos convencionales en la transmisión y procesado de señales.

Los dispositivos de Óptica Integrada son ahora considerados para aplicaciones de comunicación óptica, (por ejemplo sensores, computadoras ópticas, etc.). Una guía de onda

forma la base para dispositivos de óptica integrada. Diferentes tecnologías se han empleado para la fabricación de guías de onda en varios materiales. Los dispositivos hechos en estos materiales se pueden dividir en cuatro grupos: ópticos pasivos, electro-ópticos, optoelectrónicos, ópticos no lineales [3].

Los dispositivos de óptica integrada pasivos solamente guían la luz y dividen señales en dos o más partes y las dirigen en direcciones deseadas. El vidrio ha sido el material más popular para hacer componentes pasivos. La técnica del intercambio de iones ha sido utilizada extensivamente para la fabricación de guías de onda en vidrio [3].

Los dispositivos integrados electro-ópticos son fabricados en materiales dieléctricos con coeficientes electro-ópticos grandes. La operación de estos dispositivos es controlada mediante un campo eléctrico que es aplicado con el fin de modificar el índice de refracción de la guía de onda. La tecnología más desarrollada para los dispositivos electro-ópticos utiliza substratos de LiNbO_3 . Las guías de onda son formadas por difusión de Titanio (Ti) o por intercambio iónico de sales de Fósforo (P) [3].

Los dispositivos integrados opto-electrónicos son fabricados de un material semiconductor y ofrecen una gran versatilidad para cualquier componente integrado óptico. La meta más ambiciosa de la investigación en dispositivos optoelectrónicos integrados es desarrollar una tecnología práctica que puede integrar circuitos eléctricos y ópticos en un mismo chip [3].

En todos los dispositivos ópticos no lineales, una interacción óptica no lineal es empleada para controlar las funciones, ejemplo de ello son los moduladores y "switches". Este campo ha crecido dramáticamente en paralelo al entendimiento de las propiedades de semiconductores basados en microestructuras tales como pozos cuánticos y super redes. La mayoría de los dispositivos ópticos de interés común, son basados en el principio fundamental de los efectos ópticos dinámicos no lineales, por lo cual es posible alterar las propiedades del material (coeficiente de absorción y el índice de refracción) mediante la absorción de fotones cerca de las resonancias del sistema [3].

El vidrio es un sustrato interesante para la óptica integrada debido a su bajo costo, su resistencia, excelente transparencia y su rigidez mecánica. Además, los sustratos de vidrio son amorfos, esto permite fabricar componentes en vidrio insensibles a la polarización. Por otro lado, el índice de refracción del vidrio utilizado en óptica integrada es cercano al índice de refracción de las fibras ópticas, lo que permite tener bajas pérdidas de acoplamiento entre guías de onda hechas en vidrio y las fibras ópticas [2]

El potencial de las guías de onda fabricadas en vidrio es su compatibilidad con las fibras ópticas, las pocas pérdidas de propagación y su facilidad de integración en los sistemas. Entre los procesos que son utilizados en la fabricación de guías de onda en vidrio, la técnica de intercambio de iones es una de las tecnologías más extendidas. Es una tecnología simple de bajo costo que consiste en reemplazar un ión del vidrio por otro ión de gran tamaño y/o con polarizabilidad electrónica más importante [3].

Las guías de onda fabricadas mediante intercambios iónicos tienen una configuración plana, cuyas propiedades se usan en tecnologías híbridas. Se pueden usar en la producción de dispositivos con otros materiales tales como polímeros no lineales [2]. A su vez, las guías de onda canal son la base de múltiples dispositivos pasivos y activos de óptica integrada. acopladores direccionales, controladores de polarización, filtros, etc.

El trabajo que se presenta en esta tesis involucra precisamente desarrollar y optimizar un proceso de fabricación de guías de onda canal utilizando los laboratorios y el equipo con el que se cuenta en el Instituto de Investigación en Comunicación Óptica (IICO). Se pretende fabricar guías de onda confinadas monomodo con anchos de canal de alrededor de $2\mu\text{m}$. Desarrollando, de esta forma, un proceso de bajo costo para la realización de algunos circuitos de óptica Integrada.

Este trabajo de tesis está organizado de la siguiente manera:

- El Capítulo 1 corresponde a una introducción general al tema de la Óptica Integrada
- El Capítulo 2 corresponde a la Teoría Básica de Guías de Onda, el Intercambio Iónico, y la Teoría de Difusión.
- En el Capítulo 3 se plantea el desarrollo experimental del proyecto, que consta de dos partes.
 - 1) Fabricación Convencional de Guías de Onda Canal por intercambio iónico.
 - 2) Fabricación de Guías de Onda Canal mediante métodos interferométricos.
- El Capítulo 4 presenta los resultados obtenidos del desarrollo experimental de los dos procesos de fabricación de guías de onda
- El Capítulo 5 corresponde a las conclusiones obtenidas del trabajo de Tesis.

CAPITULO 2

TEORIA BÁSICA DE GUÍAS DE ONDA

2.1 La Óptica Integrada en substratos de Vidrio

El vidrio es un sustrato interesante para la fabricación de dispositivos en óptica integrada, debido a su bajo costo, su resistencia, su rigidez mecánica y su buena transparencia para las longitudes de onda de las telecomunicaciones. Además, es amorfo lo que nos permite fabricar componentes en vidrio insensibles a la polarización de la luz. Tenemos también que el índice de refracción del vidrio usado en óptica integrada, es cercano al índice de refracción de las fibras ópticas, lo cual nos permite disminuir las pérdidas por el acoplado entre guías de onda y fibras ópticas [3].

2.1.1- El Vidrio

El vidrio es un producto mineral obtenido por fusión. Como los líquidos, el vidrio presenta una estructura desordenada que lo hace isotrópico. A diferencia de los cristales, el vidrio no tiene punto de fusión. Su viscosidad disminuye continuamente con un incremento de la temperatura.

El estado del vidrio es determinado por tres temperaturas particulares:

- La temperatura de la transición vítrea (T_g) en la que el vidrio comienza a perder su constitución sólida.
- La temperatura de Littleton (T_s) en la que el vidrio es suave y puede soplarse (soplado de vidrio).
- La temperatura de fusión (T_f) en la que el vidrio puede fundirse.

La mayoría de los vidrios son constituidos de óxidos que pueden ser clasificados en tres categorías para relacionar la energía de los enlaces entre los cationes y átomos de oxígeno [4]:

- 1) Los óxidos formados de enlaces (SiO_2 , B_2O_3 , GeO_2 , P_2O_5 , Al_2O_3 ,...), que tienen una energía de enlace suficiente (335 kJ/mol) para asegurar tener estructura vítrea.
- 2) Los óxidos intermediarios (ZnO , PbO ,...), que poseen las energías más débiles. Éstos no pueden formar el vidrio por ellos solos, pero contribuyen a la formación de la red.
- 3) Los óxidos modificadores de red (Na_2O , K_2O , CaO ,...), que tienen una energía de enlace muy débil del orden de 240 kJ/mol, que los hace móviles y relativamente débiles a temperaturas de alrededor de 200°C .

2.2.- El Intercambio Iónico.

En un proceso de intercambio iónico, un ión en vidrio (usualmente Na^+) es reemplazado por un ión de mayor tamaño o de más alta polarizabilidad, tal como plata (Ag^+), potasio (K^+), Cesio (Cs^+), Talio (Tl^+). Por consiguiente, el índice de refracción del vidrio se incrementa localmente. El proceso del intercambio iónico en guías de onda se produce térmicamente o por el intercambio de iones mediante asistencia de campo eléctrico.

Las sales más comunes en este proceso de intercambio de iones son las sales de potasio tales como el nitrato de potasio (KNO_3) debido a que estas producen el más alto esfuerzo de compresión en la superficie del vidrio cuando el ión de potasio substituye el ión de sodio de la matriz del vidrio. El ión de potasio produce solo un pequeño incremento en el índice de refracción de alrededor de 0.01 en vidrios que contienen sodio [5].

El intercambio iónico se realiza a temperaturas T_g (temperatura de la transición vítrea) del vidrio, en donde los iones de los óxidos modificadores de la red, son móviles. Cuando el vidrio está en contacto con una fuente de iones, los modificadores pueden intercambiarse con los iones de esta fuente. Como se considera que un sustrato de vidrio contiene iones A^+ (vidrio) que son sumergidos en un baño de sales fundidas que contiene iones B^+ (sales).

La interfase vidrio-sales no está en equilibrio termodinámico en la distribución de iones de A^+ y B^+ . Así la agitación térmica de la interfase produce colisiones aleatorias en las cuales

el ión A^- (sal) reemplaza un ión B^+ de la matriz del vidrio, un gradiente de concentraciones establece la difusión generada de los iones B^- hacia los iones A^+ en el vidrio. En la figura 13, se muestra el modelo esquemático del proceso de intercambio iónico de sales, por ejemplo el intercambio entre el ión de sodio (Na^+) contenido en el vidrio (ión A^+) y el ión genérico de potasio (K^+) dado por la sal de nitrato derretida (KNO_3) [5]

Así, cuando el vidrio que contiene un ión A^+ es puesto en contacto con la fuente del ión B^+ que se va a difundir, es llevado dentro del vidrio por un gradiente concentración y para mantener la neutralidad de las cargas, el ión es cedido a las sales, esto es [5]

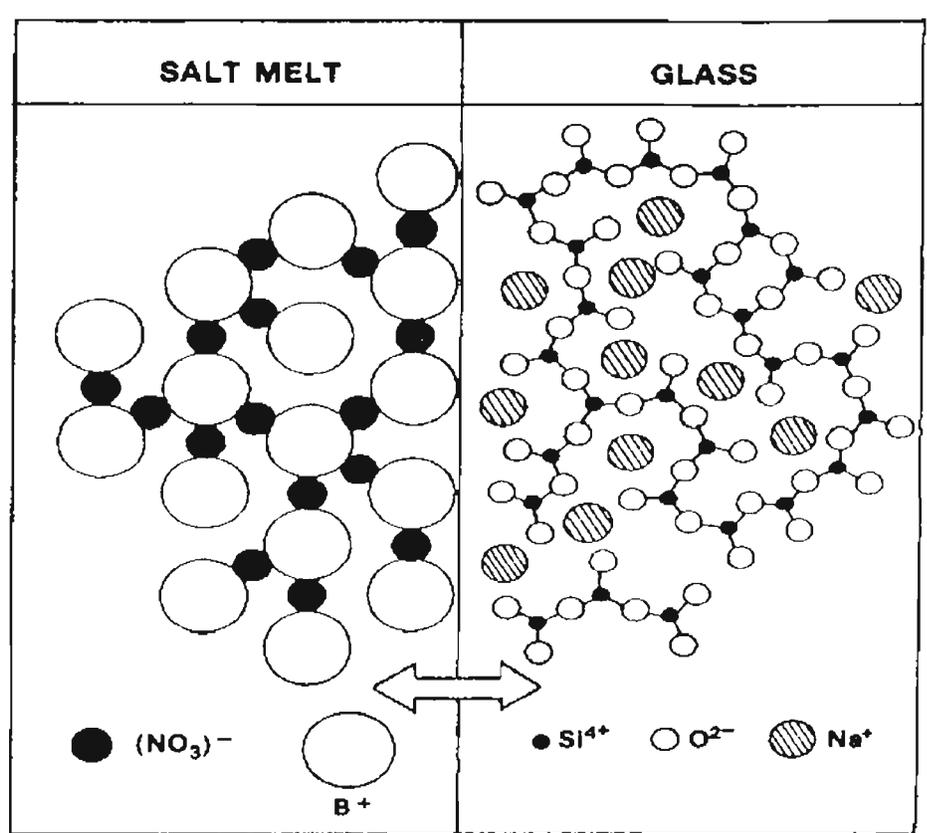
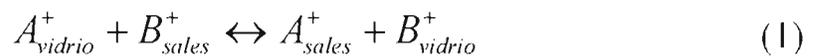


Figura 1.- Diagrama de interfase de vidrio-sales (aquí $A^+ = Na^+$) [5].

2.2.1.- Variación del índice de refracción y el esfuerzo de los intercambios de guías.

Después del intercambio iónico las propiedades ópticas y mecánicas (índice de refracción) son modificadas. La variación del índice de refracción es producida por la diferencia de polarizaciones y el tamaño entre los iones A' y B'. La diferencia de tamaño atómico de los iones conduce a una modificación del volumen de la zona intercambiada. Esta variación de volumen genera esfuerzos mecánicos produciendo una variación de índice isotrópico. De aquí que, las guías resultantes serán birrefringentes. Tal es el caso de guías intercambiadas por potasio Na⁺/K⁺ [6].

La presencia de esfuerzos en el vidrio origina una variación de índice por efecto elasto-óptico. En el caso de una guía plana el vidrio es libre de dilatarse o compactarse según la dirección normal al sustrato. Así que las tensiones en esta dirección son despreciables.

Por otro lado las tensiones de las dos direcciones en paralelo a la guía plana, son iguales en cada una de las dos direcciones [7].

2.2.2.- Las Opciones de Vidrio y iones dopantes

El proceso de intercambio de iones depende significativamente de la composición del vidrio y varios vidrios han sido especialmente diseñados, en particular para optimizar la fabricación de los componentes comerciales y dispositivos. El primer requisito es el alto contenido de un ión alcalino (usualmente Na⁺ o K⁺), para permitir que el intercambio de iones sea fácil y rápido de realizar

En la mayoría de los casos, los iones de sodio (Na⁺) inicialmente presentes en el vidrio son intercambiados por los cationes siguientes: Li⁺, K⁺, Na⁺, Rb⁺, Cs⁺, Tl⁺ y Ag⁺. Según las propiedades buscadas para las guías de onda intercambiadas, es necesario encontrar el vidrio así como el par de iones a participar en el intercambio iónico.

En la Tabla 1 se presentan diferentes parámetros tales como la polarizabilidad electrónica y el radio iónico de los iones de difusión más comunes [5].

A continuación se presentarán las características del intercambio Na⁺/K⁺, ya que fue el intercambio que se utilizó en este proyecto para fabricar las guías de onda canal confinadas

2.2.3.-El Intercambio de Potasio Na⁺/K⁺

Es un intercambio realizado en un baño de sales de nitrato de potasio KNO³. Si se usa un substrato de vidrio Menzel (soda-lime), se pueden obtener variaciones del índice, el de la superficie del vidrio, del orden de $\Delta n_{\text{surface}} \approx 0.01$. Las guías fabricadas con este intercambio tienen un confinamiento débil. Las guías presentan una birrefringencia del orden de 10^{-3} debido a la tensión (stress) producida por la diferencia del tamaño atómico de los iones [8].

TABLE 1. Relevant parameters of monovalent ions for ion-exchange in glass

ION	Electronic polarizability Å ³	Ionic radius Å	Salt	Melting point °C	Decomposition point °C	Lethal dose LD50 mg/Kg -salt
Na ⁺	0.41	0.95	NaNO ₃	307	380	1955 NaNO ₃
Li ⁺	0.03	0.65	LiNO ₃	264	600	710 LiCO ₃
Ag ⁺	2.4	1.26	AgNO ₃	212	444	2820 Ag ₂ O
K ⁺	1.33	1.33	KNO ₃	334	400	1894 KNO ₃
Rb ⁺	1.98	1.49	RbNO ₃	310	-	1200 RbCl
Tl ⁺	5.2	1.49	TlNO ₃	206	430	25 Tl ₂ SO ₄
Cs ⁺	3.34	1.65	CsNO ₃	414	-	1200 CsNO ₃

Tabla 1.- Tabla de parámetros relevantes de iones monovalentes para intercambio de iones en vidrio [5].

2.3.-Teoría de Difusión

En esta sección se especificarán diferentes modelos de difusión estudiados extensivamente por diferentes autores [3], [9].

Cuando un intercambio iónico se realiza entre un substrato de vidrio conteniendo iones A^+ y un baño de sales fundidas de iones de B^+ , el intercambio entre los iones se produce hasta que se tiene el equilibrio termodinámico entre la interfaz de vidrio-sal. Esto se mostró en la ecuación 1 de la sección 2.2 (Intercambio Iónico) [10].

Esta difusión depende de la diferencia de la movilidad de los iones A^+ y B^+ . Los dos iones A^+ y B^+ no tienen la misma velocidad de difusión, una carga de espacio aparece en el vidrio. Entonces, una componente eléctrica interna E_{int} debe ser adherida a la relación del flujo de los iones.

Los flujos de cada uno de los iones son acompañados de un gradiente de concentración dado por la primera ley de Fick

$$\overline{J}_{1i} = -D_i \overline{\nabla} C_i \quad i = A, B \quad (2)$$

Teniendo D_i como el coeficiente de difusión del tipo i . Suponiendo que es independiente de la concentración C_i del ión i del vidrio (mol/m^3). La presencia de un campo eléctrico debido a la carga espacial tanto interior (E_{int}) como exterior (E_{ext}) genera un flujo dado por:

$$\overline{J}_{2i} = \mu_i C_i \overline{E} \quad i = A, B \quad (3)$$

μ_i es la movilidad iónica del tipo i , $\overline{E} = \overline{E}_{int} + \overline{E}_{ext}$ es el campo eléctrico total. La movilidad y el coeficiente de difusión están vinculados por la relación de Nerst-Einstein.

$$D_i = H \frac{kT}{q} \mu_i \quad i = A, B \quad (4)$$

Siendo k la constante de Boltzman, q la carga del ion, T la temperatura y H es la relación de Haven que permite relacionar la movilidad de los iones con el coeficiente de difusión. Este parámetro depende de la naturaleza del vidrio y varía entre 0.2 y 1

A partir de las ecuaciones (2) y (3) el flujo total para cada uno de los iones se expresa

$$\vec{J}_i = \vec{J}_{i_1} + \vec{J}_{i_2} = -D_i \left(\vec{\nabla} C_i - \frac{q}{kT} C_i \vec{E} \right) \quad (5)$$

La conservación de los flujos (segunda ley de Fick) relacionada con la neutralidad eléctrica se escribe:

$$\frac{\partial (C_A + C_B)}{\partial t} = -\vec{\nabla} \cdot (\vec{J}_A + \vec{J}_B) = 0 \quad (6)$$

Omitiendo el efecto de la carga espacial la condición de neutralidad del vidrio se expresa

$$C_A + C_B = C_{B0} \quad (7)$$

Siendo C_{B0} la concentración inicial de iones B' en el vidrio. A partir de esta relación y de las ecuaciones anteriores, se puede determinar la ecuación de evolución de la concentración normalizada del ión B después de un intercambio térmico sin campo eléctrico:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{D_A}{1 - \alpha c} \left(\nabla^2 c - \frac{q}{kT} \vec{E} \cdot \vec{\nabla} c \right) \quad (8)$$

Donde $\alpha = \frac{C_A}{(C_A + C_B)}$, es la concentración normalizada a la superficie del vidrio del ion A

y el parámetro α es el coeficiente de Stewart, está definido como: $\alpha = \frac{(D_B - D_A)}{D_B}$

La expresión para el campo eléctrico interno \bar{E}_{int} está dada por:

$$\bar{E}_{int} = \frac{kT}{e} \left(\frac{1 - \alpha N_A}{\alpha} \right) \bar{\nabla}c \quad (9)$$

Entonces la variación de la concentración normalizada en el vidrio resultante del intercambio iónico con los iones B⁺ obedece la ecuación siguiente:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{D_A}{1 - \alpha c} \left[\nabla^2 c + \frac{\alpha}{1 - \alpha c} (\bar{\nabla}c)^2 - \frac{q}{kT} E_{ext} (\bar{\nabla}c) \right] \quad (10)$$

Esta ecuación no tiene una solución analítica y es necesario usar métodos numéricos para resolverla. Uno puede usar algunos casos donde la ecuación se simplifica. Por esto, se va a estudiar el modelo en una dimensión de una guía plana. La evolución de la concentración sólo se hace en la dirección x correspondiente a la profundidad. En el caso donde se considera el intercambio térmico, se no se aplica un campo eléctrico externo, se puede volver a escribir la ecuación (10) de la forma:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{D_B (\partial c / \partial x)}{1 - \alpha c} \right] - \frac{(1 - \alpha c) J_0 (\partial c / \partial x)}{(1 - \alpha c)^2} \quad (11)$$

Suponiendo que los dos iones o más tienen la misma movilidad $D_B \approx D_A$ (por ejemplo $\alpha = 0$). Se obtiene entonces la siguiente relación:

$$\frac{\partial c(x,t)}{\partial t} = D_A \frac{\partial^2 c(x,t)}{\partial x^2} \quad (13)$$

Tomando las condiciones iniciales: $c(x,0) = 0$, $c(0,t) = c_{surface}$ y $c(+\infty,t) = 0$, se obtiene una solución de la forma

$$c(x,t) = c_{surface} \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_e t}} \right) \quad (14)$$

$c_{surface}$ es la concentración de iones A que tiene la superficie, erfc es la función error complementaria definida por $\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\pi} \int_x^\infty e^{-t^2} dt$, y la profundidad $d_{eff} = 2\sqrt{D_e t}$ es llamada la profundidad efectiva de difusión.

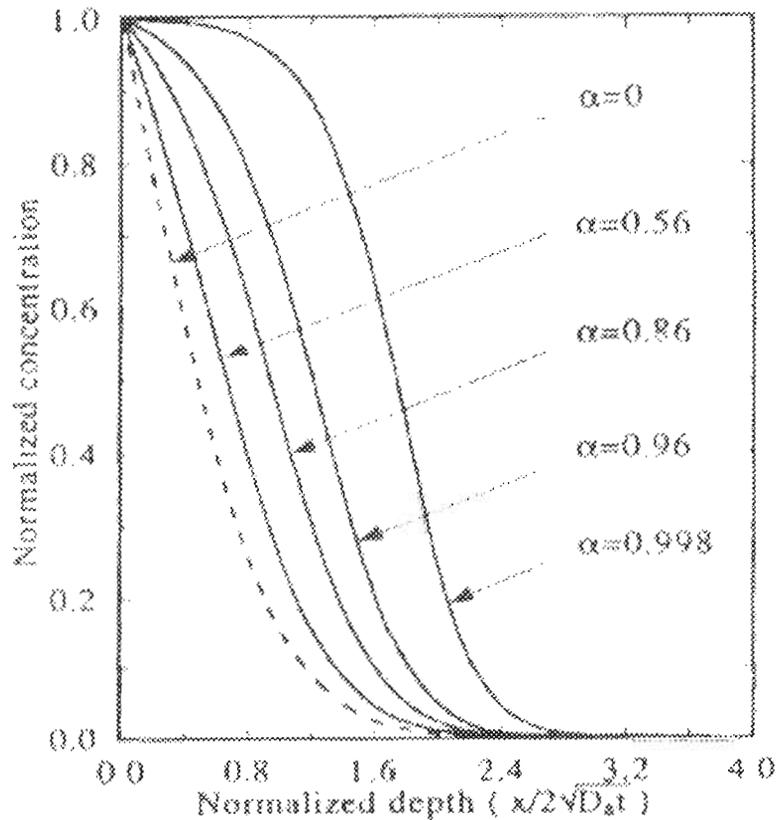


Figura 2.- Influencia del parámetro α en la forma del perfil de índice 1-D [3]

En el caso general, los coeficientes de difusión son diferentes y la fuente no siempre se diluye. La creación de cargas espaciales del vidrio tienden a modificar las velocidades

de los iones A^+ y B^+ . Suponiendo que generalmente la variación del índice es proporcional a la concentración de los iones de la difusión.

Una hipótesis razonable es el caso de que aparezcan pocas tensiones (stress) en el vidrio después del intercambio. En este caso una medida experimental del perfil de índice permite determinar el coeficiente de difusión.

Se puede ver la variación de estos perfiles según el valor del coeficiente de Stewart α , en la figura 2. Este coeficiente está entre 0 y 1. Cuando los coeficientes de difusión de los iones A^+ y B^+ están cercanos ($\alpha = 0$), se recupera aproximadamente una función de error complementaria. Mientras que para D_B/D_A se acerca a una función de Heaviside ($\alpha = 1$) [4].

2.4.-Definición de Guía de Onda.

Una guía de onda es una estructura que nos permite guiar una onda óptica haciendo uso de la reflexión total interna de dos o más superficies. En la más simple configuración, la luz es guiada a través de dos placas paralelas, una estructura conocida como guía de onda canal, donde la luz es confinada a un canal de material entre placas. Cuando una guía canal es formada, esto representa un alambre óptico verdadero, ejemplificado por fibras ópticas y guías de onda de tiras de semiconductor. La función de una guía de onda es conducir la luz guiada a algún lado, preferiblemente a un dispositivo útil mientras se mantiene la densidad de potencia a lo largo de la guía de onda [11], ver figura 3

La clave para entender como trabajan las guías de onda es conociendo que le pasa a una onda en una interfase. Los parámetros de los campos eléctricos y magnéticos, en una guía de onda importantes. Para describir la propagación de luz en las guías de onda se usan dos modelos distintos, el modelo del rayo óptico y el modelo electromagnético. La representación del rayo óptico nos permite visualizar rayos de luz que se reflejan en los límites de la guía de onda y nos proporciona una representación matemática para entender porque las guías de onda tienen diferentes modos de propagación y como se comportan. En

el modelo electromagnético se requiere resolver la ecuación de onda, lo que nos proporciona expresiones para los campos eléctrico y magnético en la guía de onda. El modelo del rayo óptico es útil cuando se quiere determinar el número y tipos de modos presentes en una estructura particular, así como las constantes de propagación y los índices efectivos. Si necesitamos conocer las distribuciones de campo e intensidad, las cuales son importantes para determinar los modos de interacción con las estructuras fuera de las guías de onda o para calcular la forma del campo para acoplar otra estructura óptica, entonces el tratamiento electromagnético debe ser utilizado [11].

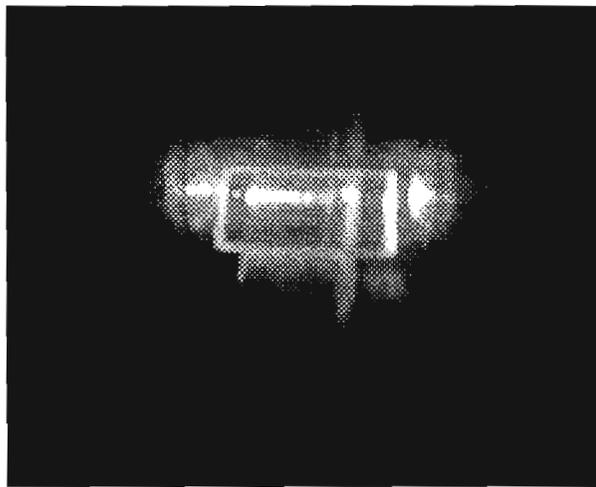
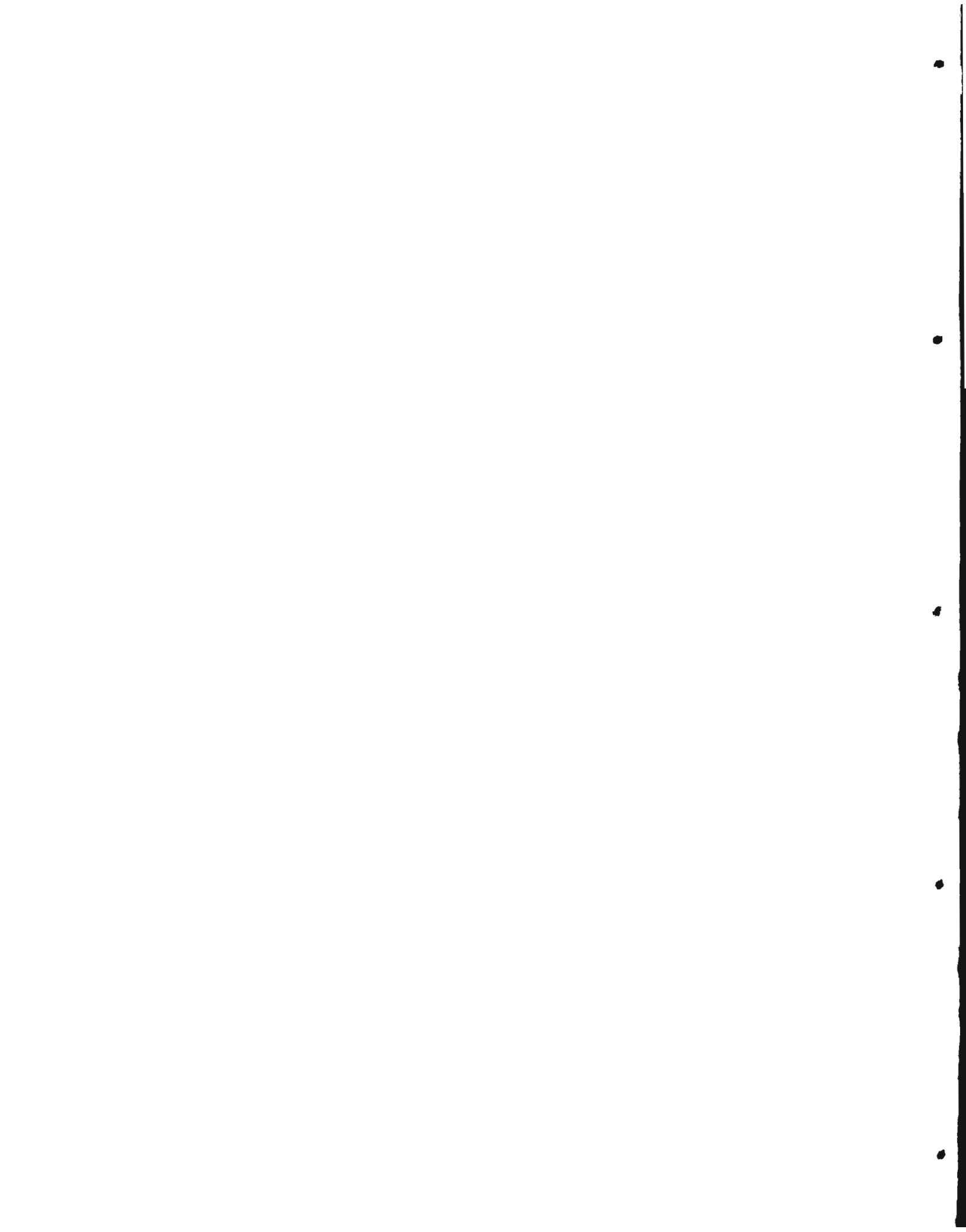


Figura 3.- Guía de Onda

Al fabricar guías de onda se necesita, determinar varios parámetros, tales como el número de modos permitidos, las dimensiones y materiales que permiten un solo modo, las constantes de propagación efectivas y los índices de refracción efectivos en la guía de onda, las distribuciones del campo eléctrico y magnético de los modos propagados, y la penetración de esos campos en el material fuera de la guía de onda [11]

2.4.1.- Bases de la Propagación Guiada.



Una guía de onda es un conducto para la propagación de un campo electromagnético. Normalmente se define haciendo una región de índice de refracción más alto dentro de un medio dieléctrico. Esta se comporta como un pozo de potencial que confina la luz y da origen a la existencia de modos, tal como un pozo de potencial que confina electrones en un espacio limitado. La propagación de la onda de luz está gobernada por las ecuaciones de Maxwell, (propagación de una onda electromagnética) [12]

A continuación se enumeran las ecuaciones de Maxwell, para una onda electromagnética en cualquier medio [13]:

$$\begin{aligned}\nabla \times \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} & \nabla \cdot \vec{D} &= \rho \\ \nabla \times \vec{H} &= \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{J} & \nabla \cdot \vec{B} &= 0\end{aligned}\tag{15}$$

Donde \vec{E} y \vec{H} son los campos eléctrico y magnético, \vec{D} y \vec{B} son la inducción eléctrica y magnética, \vec{J} es la densidad de corriente, y ρ es la densidad de carga. Los campos y las inducciones son relacionados por las siguientes relaciones:

$$\begin{aligned}\vec{D} &= \epsilon \vec{E} = \epsilon_0 n^2 \vec{E} \\ \vec{B} &= \mu_0 \vec{H}\end{aligned}\tag{16}$$

Teniendo que $n = \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_0}\right)^{1/2}$ es el índice de refracción, ϵ es la permitividad en el medio, ϵ_0 es la permitividad en el vacío y μ_0 es la permeabilidad en el vacío.

Suponiendo que la dependencia temporal de los campos eléctrico y magnético es de la forma siguiente:

$$\vec{E}(x, y, z, t) = \vec{E}(x, y, z) e^{(-j\omega t)} \quad (17)$$

$$\vec{H}(x, y, z, t) = \vec{H}(x, y, z) e^{(-j\omega t)}$$

Donde ω es la frecuencia de la onda, con $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0} = \frac{\omega}{c}$, λ_0 es la longitud de onda en el vacío.

Considerando medios isotrópicos dieléctricos aislados de fuentes, las ecuaciones de Maxwell dadas por las relaciones (15), se vuelven:

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -j\omega\mu_0 \vec{H} \quad \vec{\nabla} \cdot (n^2 \vec{E}) = 0 \quad (18)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = j\omega\epsilon \vec{E} \quad \vec{\nabla} \cdot \vec{H} = 0$$

De las ecuaciones (18), se obtiene la ecuación de onda vectorial para los campos eléctrico y magnético:

$$\nabla^2 \vec{E} + k^2 n^2 \vec{E} = -\vec{\nabla} \left(\vec{E} \cdot \frac{\vec{\nabla} n^2}{n^2} \right) \quad (19)$$

$$\nabla^2 \vec{H} + k^2 n^2 \vec{H} = (\vec{\nabla} \times \vec{H}) \times \frac{\vec{\nabla} n^2}{n^2}$$

Estas dos ecuaciones son la base de todos los cálculos en las guías de onda dieléctricas.

Cuando el medio es homogéneo: $\frac{\vec{\nabla} n^2}{n^2} = 0$, la ecuación de onda se vuelve:

$$\nabla^2 \vec{\psi}(x, y) - (\beta^2 - k_n^2) \vec{\psi}(x, y) = 0 \quad (20)$$

Donde $\vec{\psi}(x, y)$ es la componente vectorial del campo eléctrico o del campo magnético, $k_n = nk_0$, es la constante de propagación en el medio con índice de refracción

óptico n , $\beta = k_0 n_{\text{eff}}$ es la constante de propagación y n_{eff} es el índice efectivo del modo guiado.

En el caso del plano guiado, que no hay variación del índice en la dirección Oy (ver figura 4). Las soluciones de la ecuación (20) son los modos TE y TM, los cuales existen separadamente [14]:

TE	TM
$\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} - (\beta^2 - k_n^2) E_y = 0$	$\frac{\partial^2 H_x}{\partial x^2} - (\beta^2 - k_n^2) H_x = 0$
$H_x = -\frac{\beta}{\omega\mu} E_y$	$E_x = \frac{\beta}{\varepsilon\omega} H_y$
$H_z = \frac{j}{\omega\mu} \frac{\partial E_y}{\partial x}$	$E_z = -\frac{j}{\omega\varepsilon} \frac{\partial H_y}{\partial x}$

(21)

A partir de las ecuaciones (19) y de las condiciones de frontera para las interfaces $x=0$ y $x=-d$ (ver figura 4), es posible determinar las características de los modos de propagación. Las ecuaciones de propagación para el modo TE y TM son de la forma

$\frac{\partial^2 \psi_y}{\partial x^2} + (k_{n_1} - \beta^2) \psi_y = 0$	$x < -d$
$\frac{\partial^2 \psi_y}{\partial x^2} + (k_{n_2} - \beta^2) \psi_y = 0$	$-d < x < 0$
$\frac{\partial^2 \psi_y}{\partial x^2} + (k_{n_3} - \beta^2) \psi_y = 0$	$x > 0$

(22)

Donde ψ_y corresponde a la componente E_y para uno de los modos guiados TE y tiene la componente H_y para uno de los modos guiados TM. La solución de las ecuaciones de la expresión (22), es diferente para cada uno de los dieléctricos (n_1, n_2, n_3). Estas soluciones dependen de la cantidad $k_m^2 - \beta^2$, que depende de los índices de refracción de los tres medios. Así, se puede encontrar una clasificación de los modos, los modos radiados hacia el substrato y los modos radiados hacia la última capa de la estructura [14].

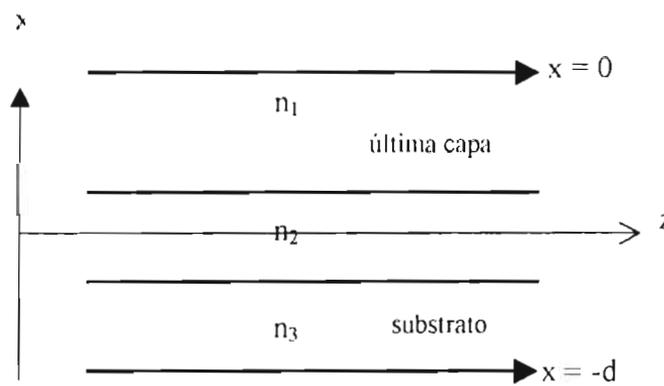


Figura 4.- Índices de refracción en una Guía de Onda Plana.

Donde una aplicación física de las soluciones de las ecuaciones de la expresión (22), es la modulación óptica en el guiado de ondas en películas delgadas.

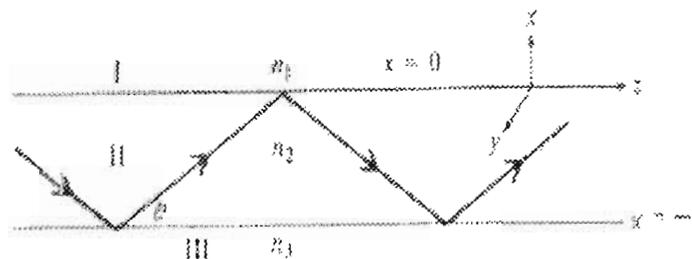


Figura 5.- Guía de Onda Dieléctrica $\left(\frac{\partial}{\partial y} = 0\right)$. [15].

El principio fundamental de la modulación electro-óptica en guías de onda dieléctricas (ver figura 5), se basa en la entrada y salida de los modos TE y TM respectivamente, producido por un campo aplicado de corriente directa (cd).

2.4.2.-Modos TE y TM en una Guía Plana Asimétrica:

Teniendo las soluciones de las ecuaciones de la expresión (22), limitándonos al caso de una guía plana asimétrica con un salto de índice que aparece en la figura 6. Considerando tres medios distintos de índices n_1 , n_2 y n_3 , en donde $n_3 \neq n_2$ y $n_2 > n_3 > n_1$. Se limitan las soluciones para los modos guiados con una constante de propagación β , tal que: $k_{n_3} < \beta < k_{n_2}$ [15].

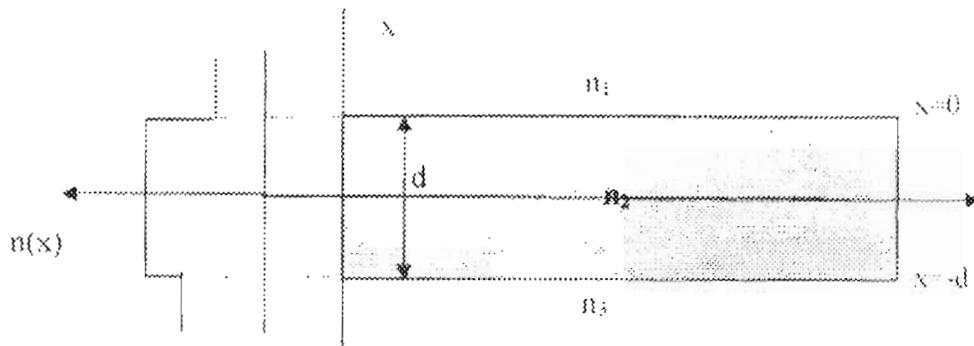


Figura 6.- Guía de Onda Plana Asimétrica con salto de índice, [4].

MODOS TE

$$E_y = \left\{ \begin{array}{l} C \exp(-qx) \\ C \left[\cos(hx) - \frac{q}{h} \sin(hx) \right] \\ C \left[\cos(ht) + \frac{q}{h} \sin(ht) \right] \exp[p(x+t)] \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} 0 \leq x \leq x \\ -d \leq x \leq 0 \\ -x \leq x \leq -d \end{array} \quad (23)$$

Teniendo: $h^2 = k_{n_2}^2 - \beta^2$, $q^2 = \beta^2 - k_{n_1}^2$ y $p^2 = \beta^2 - k_{n_3}^2$.

C es una constante arbitraria. Se escoge de manera que se tenga que la potencia media transportada a lo largo del eje z, por el modo m, por unidad de longitud siguiendo el eje es igual a 1 W/m (en el caso de una guía plana en la configuración TE):

$$P_m = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \int_{-\infty}^{+\infty} dx (E_m \times H_m \cdot \hat{z}) = \frac{\beta_m}{2\omega\mu_0} \int_{-\infty}^{+\infty} dx |E_{my}|^2 = 1 \quad (24)$$

Si se quiere conocer la potencia en la región de la guía, es necesario restringir el dominio de integración a la región dada. Se obtiene la expresión de C que se escribe entonces para el modo m:

$$C_m = 2h_m \left[\frac{\omega\mu_0}{|\beta_m| \left(d + \frac{1}{q_m} + \frac{1}{p_m} \right) (h_m^2 + q_m^2)} \right] \quad (25)$$

Considerando las relaciones de continuidad para las componentes tangenciales E_y y H_y en $x=0$ y $x=-d$, se puede encontrar la ecuación de dispersión:

$$k_0 d \sqrt{n_2^2 - n_{\text{eff}}^2} - \arctan \sqrt{\frac{n_{\text{eff}}^2 - n_1^2}{n_2^2 - n_{\text{eff}}^2}} - \arctan \sqrt{\frac{n_{\text{eff}}^2 - n_3^2}{n_2^2 - n_{\text{eff}}^2}} = m\pi \quad (26)$$

m es el orden del modo guiado con una constante de propagación: $\beta_m = k_0 n_{\text{eff}}$

MODOS TM

$$H_y = \left\{ \begin{array}{l} -C \left[\frac{h}{q} \cos(ht + \sin(ht)) \right] \exp[p(x+t)] \quad x \leq -d \\ C \left[-\frac{h}{q} \cos(hx) - \sin(hx) \right] \quad -d \leq x \leq 0 \\ -\frac{h}{q} C \exp(-qx) \quad -x \geq 0 \end{array} \right. \quad (27)$$

$$\text{Para } \bar{p} = \frac{n_2^2}{n_3^2} p, \quad \bar{q} = \frac{n_2^2}{n_1^2} q, \quad t_{\text{eff}} = \frac{\bar{q} + h^2}{\bar{q}} \left(\frac{t}{n_2^2} + \frac{q^2 + h^2}{\bar{q} + h^2} \frac{1}{n_1^2 q} + \frac{p^2 + h^2}{\bar{p} + h^2} \frac{1}{n_3^2 p} \right)$$

Para el modo guiado TM, la ecuación de dispersión está dada por

$$k_0 d \sqrt{n_2^2 - n_{\text{eff}}^2} - \arctan \left(\frac{-\sqrt{n_{\text{eff}}^2 - n_1^2}}{\bar{p} \sqrt{n_2^2 - n_{\text{eff}}^2}} \right) - \arctan \left(\frac{-\sqrt{n_{\text{eff}}^2 - n_3^2}}{\bar{q} \sqrt{n_2^2 - n_{\text{eff}}^2}} \right) = m\pi \quad (28)$$

m es el orden del modo guiado con una constante de propagación $\beta_m = k_0 n_{\text{eff}}$

2.4.3.-Las guías de ancho limitado ó guías canal.

Para una guía de onda plana, el confinamiento de la luz tiene lugar solo en el sentido de la profundidad. En el caso de guías de canal, el confinamiento se tiene en la profundidad y a lo ancho de la guía. El estudio de la propagación en guías de onda canal se hace a partir de las ecuaciones de Maxwell, pero es más complejo encontrar las soluciones analíticas. Por consiguiente, el estudio de la propagación en las guías canal, se hace mediante métodos analíticos aproximados. Los métodos numéricos del tipo de diferencias finitas ó elementos finitos consisten en transformar el problema de tres dimensiones a un problema de dos dimensiones. Estos tienen la ventaja de que son simples de usar. Uno de esos métodos es el método del índice efectivo que a continuación se presenta [4].

2.4.4.-Método del índice efectivo

Este método es relativamente simple y permite tener una rápida aproximación de la constante de propagación. Este consiste en separar el problema general de dos dimensiones a dos problemas en una dimensión. Primero se considera la guía rectangular como se

muestra en la figura 7. En esta figura se muestra una guía de salto de índice, de ancho l y profundidad d . Los índices del substrato y de la última capa de la superficie son respectivamente n_1 y n_2 .

Para determinar el índice efectivo del modo guiado, se supone que los campos del modo fundamental son de variables separables [14]:

$$\psi(x, y) = \psi_x(x)\psi_y(y) \quad (29)$$

En la condición del guiado débil, la ecuación de onda escalar, la expresión (20), se escribe:

$$\frac{d^2\psi_x}{dx^2} + (k^2 n_2^2 - \beta_1^2)\psi_x = 0 \quad (30)$$

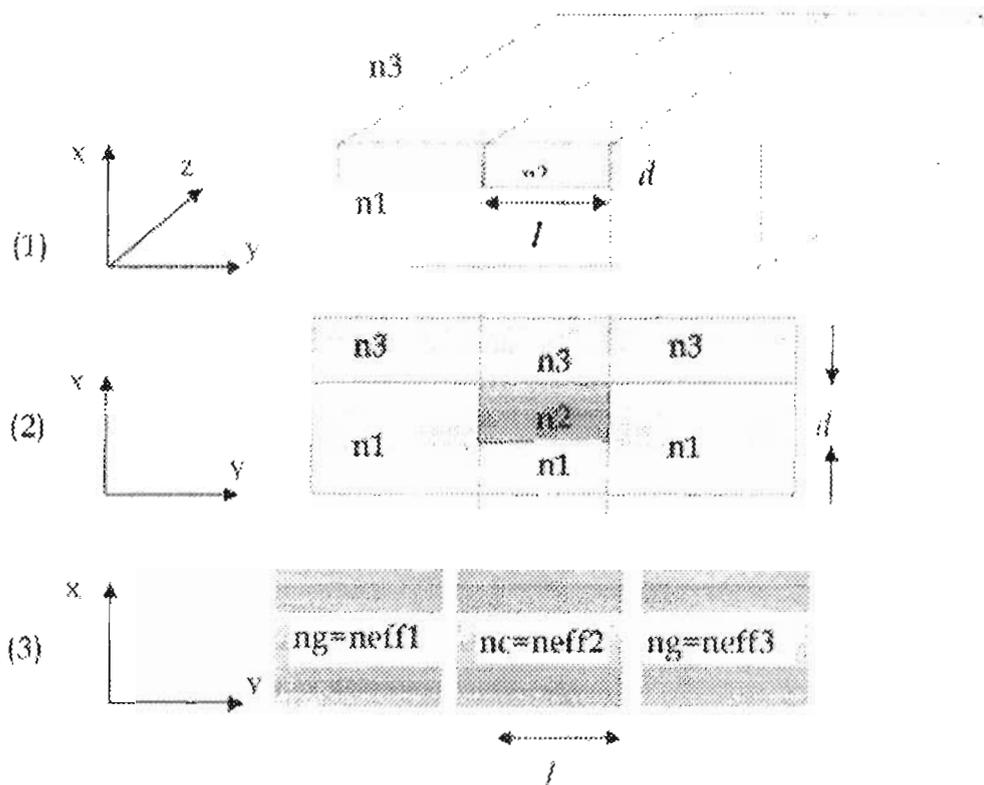


Figura 7.- Descripción del método del índice efectivo [4].

Se obtiene una constante de propagación β_1 y un índice efectivo relacionados por:

$$\beta_1 = kn_{eff1} \quad (31)$$

Resolviendo la ecuación de onda para una dimensión ψ_y :

$$\frac{d^2\psi_y}{dy^2} + (k^2 n_{eff1}^2 - \beta_1^2)\psi_y = 0 \quad (32)$$

La constante de propagación obtenida β_2 , es considerada como la constante de propagación del modo guiado confinado.

La figura 7 muestra los pasos a seguir para calcular el índice efectivo del modo guiado. La estructura (1) se descompone en dos guías planas ortogonales (2) y (3). Primeramente se calcula el índice efectivo según el eje x para cada una de las guías planas (n_{eff1} , n_{eff2} , n_{eff3}). Después, los índices efectivos calculados son los índices de la estructura plana siguiendo al eje y. Finalmente, de esta última estructura, se calcula el índice efectivo que corresponde al índice efectivo de la guía confinada. El experimento muestra que el método del índice efectivo produce bastantes resultados precisos en el cálculo de la constante de propagación del modo fundamental lejos del corte (cutoff) [16].

2.5.-Teoría geométrica de las guías de onda

La transmisión de la luz a lo largo de una superficie de un material transparente es por medio de la reflexión total interna. El principio de guiado de ondas puede ser ilustrado por el modelo bidimensional (correspondiente a una franja ancha), mostrado en la figura 8.

La franja tiene un espesor de 2^a y un índice de refracción μ_2 , y es sumergido en un medio de índice de refracción menor μ_1 . Una onda plana que incide dentro de la franja con un

ángulo \hat{l} al eje x, es reflejada completamente por la pared. Si \hat{l} es más grande que el ángulo crítico $\hat{l}_c = \sin^{-1}\left(\frac{\mu_1}{\mu_2}\right)$.

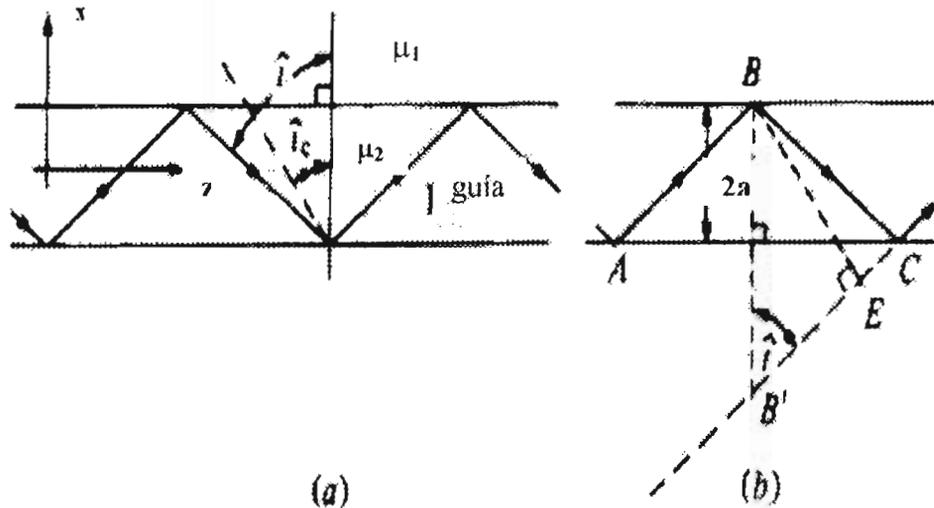


Figura 8. - Óptica Geométrica de la Propagación a lo largo de una guía de una dimensión. En (b) BE es el frente de onda común a los rayos AB y B'E [17].

Ya que los lados de la franja son paralelos, la onda es reflejada hacia adelante y hacia atrás con el mismo ángulo repetidamente, idealmente sin pérdidas. (figura 8(a)). De acuerdo con la óptica geométrica, cualquier rayo con $\hat{l} < \hat{l}_c$, se puede propagar de esta manera [17].

Sin embargo, la óptica física requiere observar la suma de todas las ondas viajando en la misma dirección, y asegurar que interfieran constructivamente. Si se calcula la diferencia de fase entre las ondas adyacentes viajando paralelamente entre sí, esto es [17]

$$\Delta\phi = \mu_2 k_0 (BC - EC) = \mu_2 k_0 B'E = 4\mu_2 k_0 a \cos \hat{l} \quad (33)$$

k_0 es 2π dividido por la longitud de onda en el espacio libre. El requisito para interferencia constructiva es entonces

$$\Delta\phi = 4\mu_2 k_0 a \cos \hat{l} = 2m\pi \quad (34)$$

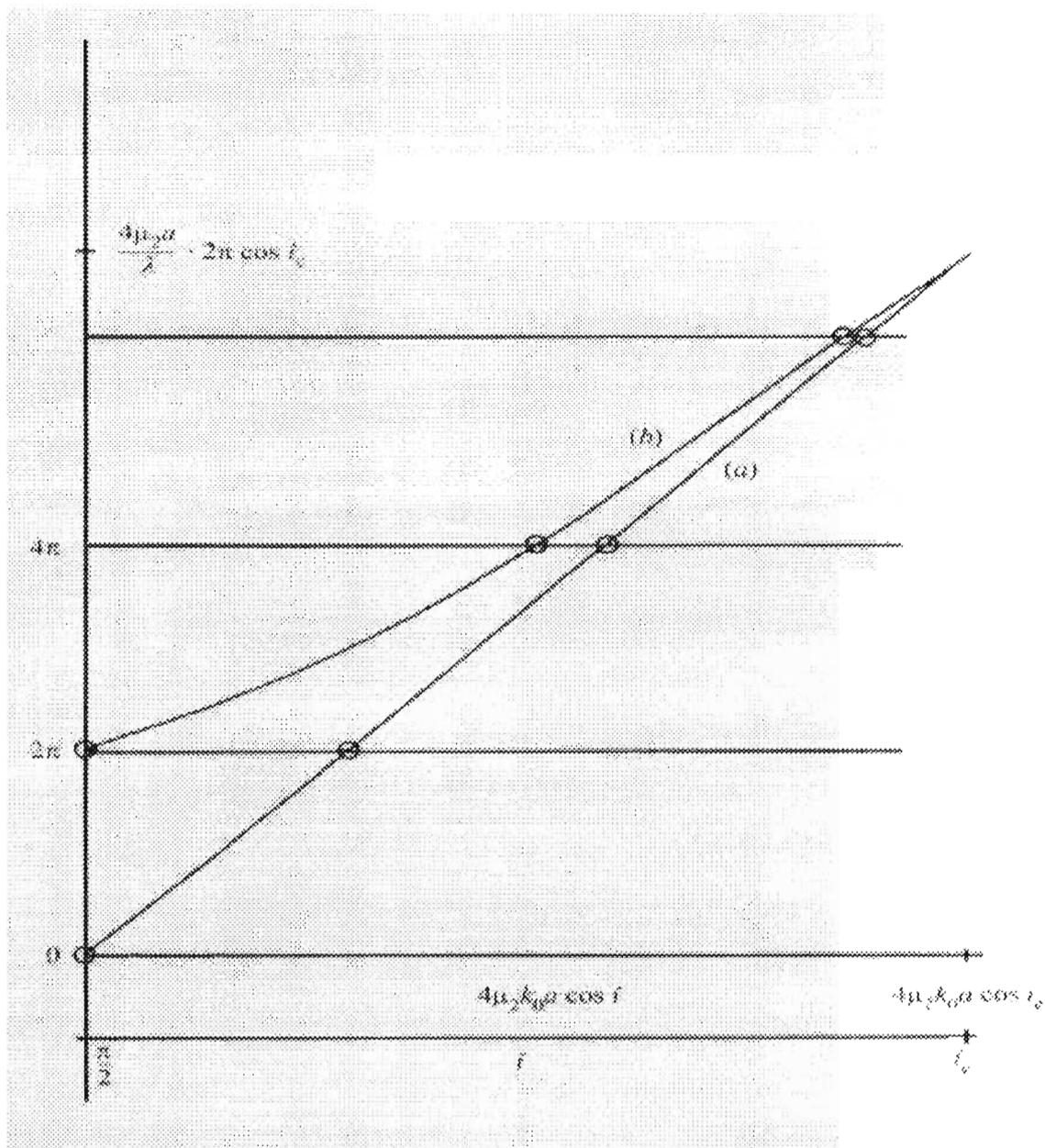
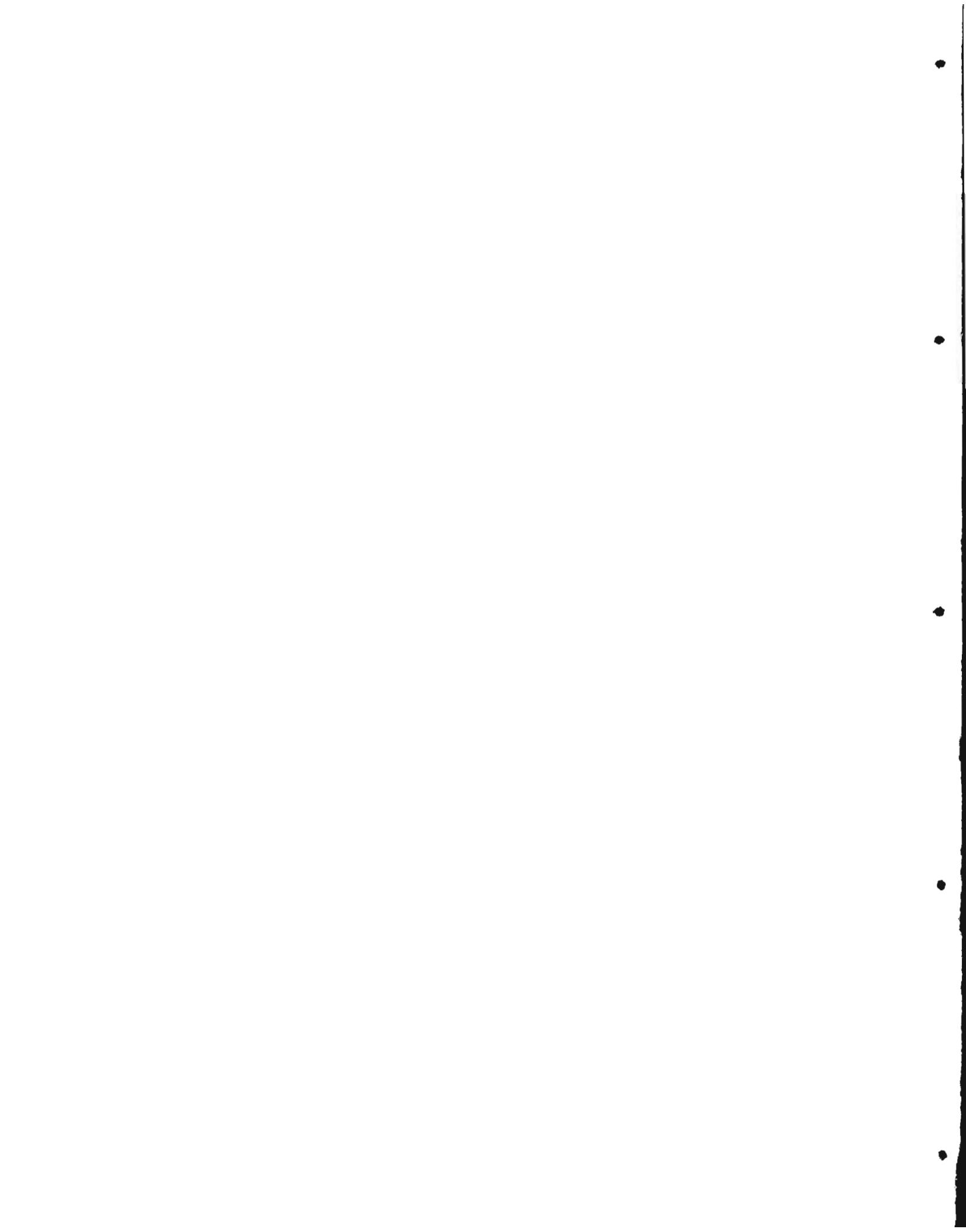


Figura 9.- Determinación gráfica del número de modos propagándose en una guía de onda canal [17]



Cada valor entero m , se define como el modo permitido de propagación. Siempre habrá al menos una solución a la ecuación (20), dada por $m = 0$, $\hat{l} = \frac{\pi}{2}$. Se puede observar en la figura 9 (a), el número de soluciones adicionales teniendo $\hat{l} > \hat{l}_c$ como la parte entera de:

$$\frac{2\mu_2 k_0 a}{\pi} \cos \hat{l}_c = \frac{2\mu_2 k_0 a}{\pi} \left(1 - \frac{\mu_1^2}{\mu_2^2}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (35)$$

Desafortunadamente el cálculo no es tan simple, porque se tiene olvidado el tomar en cuenta el cambio de fase $\alpha(\hat{l})$, el cual ocurre en reflexión de ángulos que exceden el ángulo crítico, se debe escribir en lugar de la ecuación (20), lo siguiente:

$$\Delta\phi = 4\mu_2 k_0 a \cos \hat{l} + 2\alpha(\hat{l}) = 2m\pi \quad (36)$$

La solución $m = 1$, $\hat{l} = \frac{\pi}{2}$ es ahora la primera solución porque $\alpha\left(\frac{\pi}{2}\right) = \pi$. Sin embargo, ya que $\alpha\left(\frac{\pi}{2}\right) = 0$, habrá usualmente un modo menos que el sugerido por la ecuación (35), como se muestra en la figura 9(b). Los modos de las dos polarizaciones principales no serán idénticas debido a la diferencia entre α_s y α_p . Los modos descritos anteriormente con $\hat{l} > \hat{l}_c$ son teóricamente modos sin pérdidas, y se pueden propagar a lo largo de una guía de onda ideal, tan lejos como el coeficiente de absorción del medio lo permita. Además hay modos dispersivos con $\hat{l} < \hat{l}_c$ los cuales se desvanecen fuera de la guía después de cierto número de reflexiones y son importantes solo para algunas guías de onda pequeñas (longitud corta) [17].

La aproximación geométrica descrita arriba da una figura de propagación en la guía, incluyendo en particular las características de los modos de propagación y las diferencias

entre las polarizaciones \perp y \parallel . Además es fácil observar que la onda entrante en la guía deberá inyectarse a un ángulo lo suficientemente cerrado al eje, para que la reflexión crítica ocurra. Esto significa una restricción en ángulos de incidencia posibles en el medio exterior y al final de la guía (ver figura 10), lo cual influye seriamente en la eficiencia con luz incoherente que puede ser alimentada dentro de la guía, particularmente cuando $\mu_2 - \mu_1 \ll \mu_1$ [17].

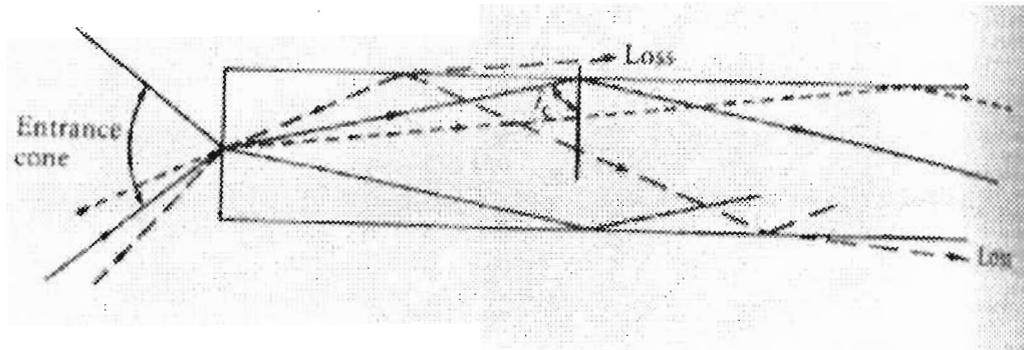


Figura 10.- Cono de ángulos que permiten luz entrante para propagación de modos [17].

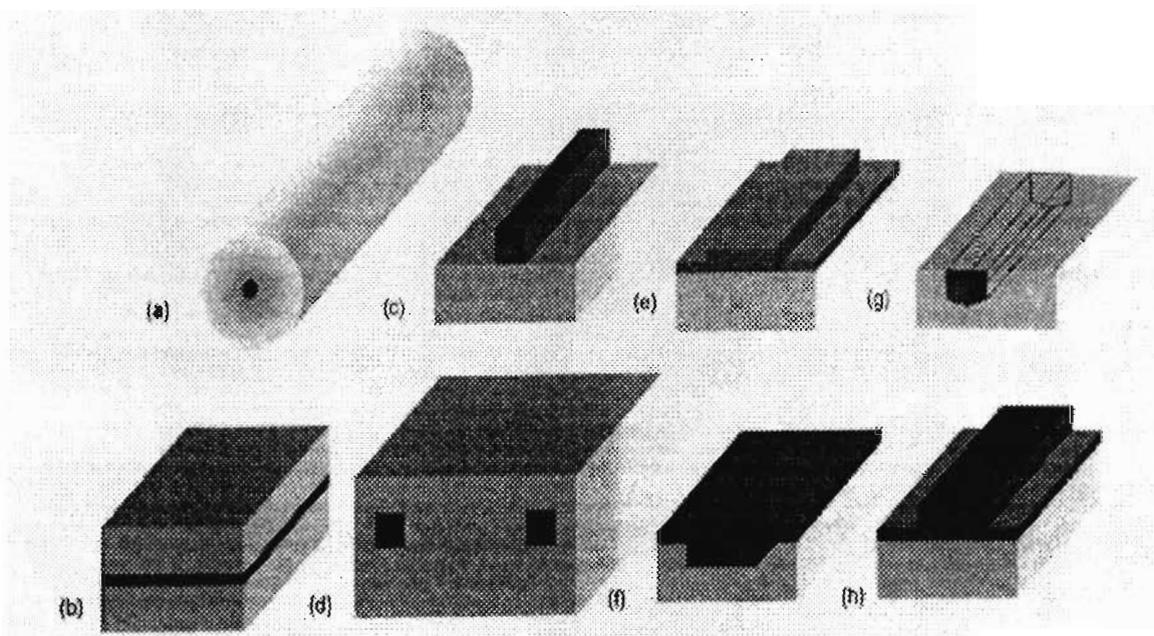


Figura 11.- Diferentes diseños de guías de onda, con el núcleo representado por las regiones oscuras. (a) fibra óptica. (b) guía de onda de placas. (c) guía de onda canal. (d) guías de onda canal incrustado con una capa de sobrevestimiento. (e) guía de onda transversal (rib). (f) transversal invertido (rib). (g) por difusión de iones. (h) cargado de franjas (strip loaded), compuesta de una franja de un diferente material de mayor índice (que sirve para confinar la luz) en una capa del núcleo [3].

CAPITULO 3

ASPECTO EXPERIMENTAL

3.1.- Introducción

El principal interés de este trabajo es fabricar guías de onda monomodo para longitudes de onda del cercano infrarrojo.

En este capítulo se describen los pasos y procesos para la fabricación de guías de onda canal confinadas mediante intercambio iónico de sales.

El Instituto (IICO), cuenta con laboratorios adecuados para fabricar guías de onda canal confinadas mediante un proceso convencional. En el proceso de fotolitografía se utiliza una alineadora de rayos UV, para grabar canales en un material fotosensible con la ayuda de una mascarilla. Los motivos impresos de la mascarilla varían desde 200, 100, 50, 20, 15 y 10 micras de ancho de canal [18]. Estos anchos solo permiten fabricar guías de onda canal multimodo para el cercano infrarrojo. Debido a que este tipo de mascarillas (para exposición) son de alto costo; se optó por utilizar un método alternativo de tipo óptico para obtener guías de ancho variable.

El proceso de fabricación de guías de onda confinadas alternativo, es de tipo óptico. Consiste en la implementación de un interferómetro para grabar los interferogramas sobre una muestra con material fotosensible con lo que se logra obtener anchos de canal variable. Se pretende de esta forma, obtener anchos de canal de 2 a 5 μm para fabricación de guías de onda canal monomodo.

Por lo expuesto anteriormente, el proyecto se divide en dos partes:

- Proceso Convencional: Fabricación de guías de onda confinadas mediante intercambios iónicos con anchos de canal mínimos de 10 μm .

- Proceso Interferométrico: Implementación del interferómetro que nos permitirá obtener un patrón de interferencia (franjas claras y oscuras) de anchos de canal variable y poder grabar las franjas sobre una muestra previamente depositada con resina fotosensible, donde el objetivo de este proceso es obtener guías de onda canal monomodo, es decir franjas de anchos de 2 a 5 μm .

3.2.- Proceso de Fabricación Convencional de guías de onda por intercambio iónico.

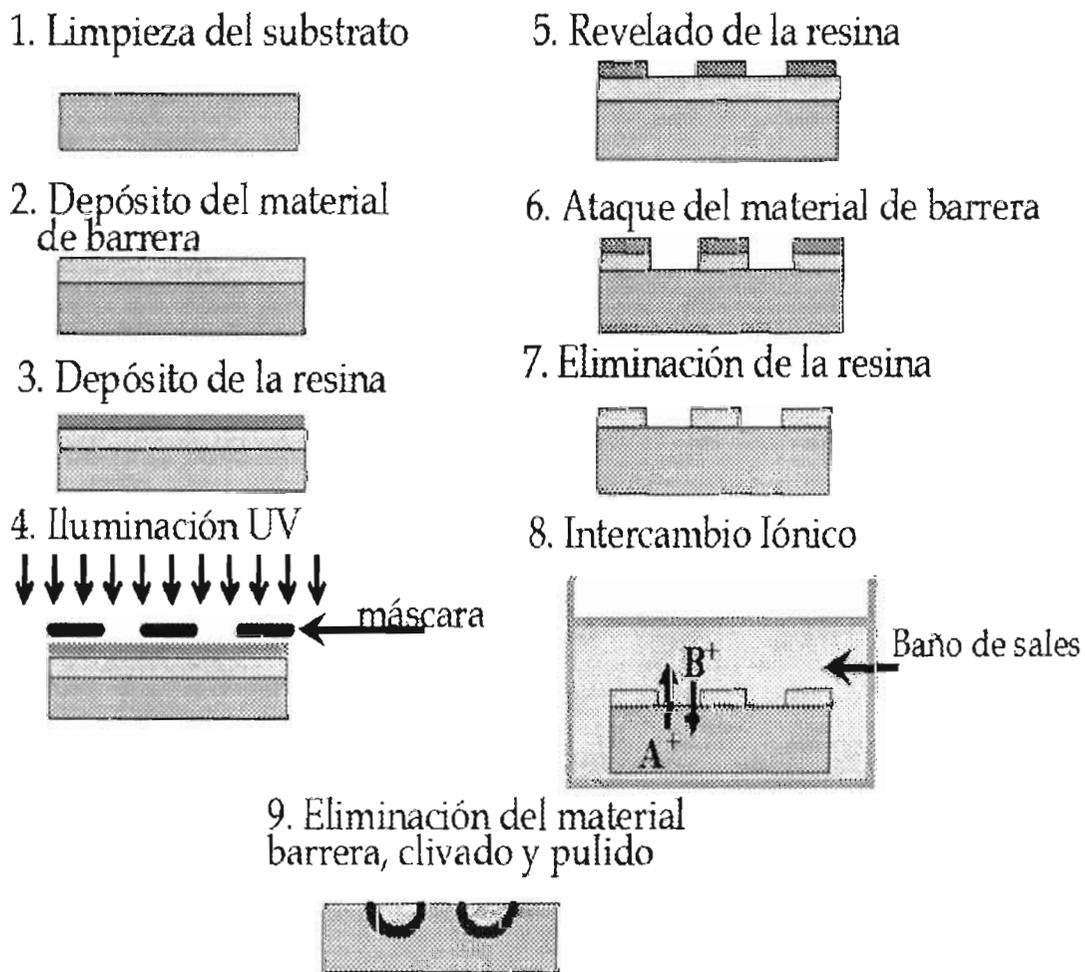


Figura 12.- Esquema de pasos de fabricación de tipo convencional para guías de onda.

En el proceso de fabricación convencional de guías de onda canal confinadas mediante intercambios iónicos de sales de potasio (KNO_3), fue necesario adaptar los parámetros involucrados tales como tiempo de exposición y revelado, temperaturas de químicos, temperatura y tiempo de horneado, entre otros. La figura 12 muestra un esquema de las etapas a seguir en este proceso y a continuación se describe cada una de ellas.

3.2.1.- Limpieza del sustrato:

Se necesita preparar el sustrato a utilizar con la finalidad de tener buena adherencia en la superficie de este, así como buenos resultados en proceso de fotolitografía, tal como el obtener franjas bien definidas que no se pierdan debido a la presencia de impurezas en la muestra.

La limpieza se realiza diluyendo al 5%, jabón en agua desionizada, se colocan los sustratos en esta solución y se calienta lentamente hasta alcanzar el punto de ebullición, se dejan los sustratos durante 10 minutos aproximadamente. Se enjuaga el sustrato por 10 minutos bajo el chorro de agua desionizada. Después se seca la muestra con aire comprimido (N_2) y por último se calienta la muestra para evaporar posibles residuos de agua [4].

3.2.2.- Depósito del material de barrera:

Las opciones del material a utilizar para material de barrera, dependen de sus propiedades, así como del intercambio iónico a realizar. Se necesita un material que satisfaga los siguientes puntos [19]

- Químicamente inerte tanto al sustrato como al baño de sales de nitrato de potasio, para que sirva de barrera en el intercambio iónico.

- Fácilmente maleable, para depositar una capa delgada en el sustrato de vidrio, a una temperatura inferior a la temperatura de transición vítrea del vidrio.
- Buena adherencia al vidrio, para evitar su desprendimiento durante el intercambio iónico.
- Fácilmente atacable por un material apropiado. Dicho material, generalmente un ácido, nos permitirá tanto grabar los canales como eliminar el material de barrera restante después de haber realizado el intercambio.

Se sabe que para realizar un intercambio iónico de potasio, el aluminio cumple los puntos anteriores, por lo que es el material que hemos utilizado en nuestros experimentos.

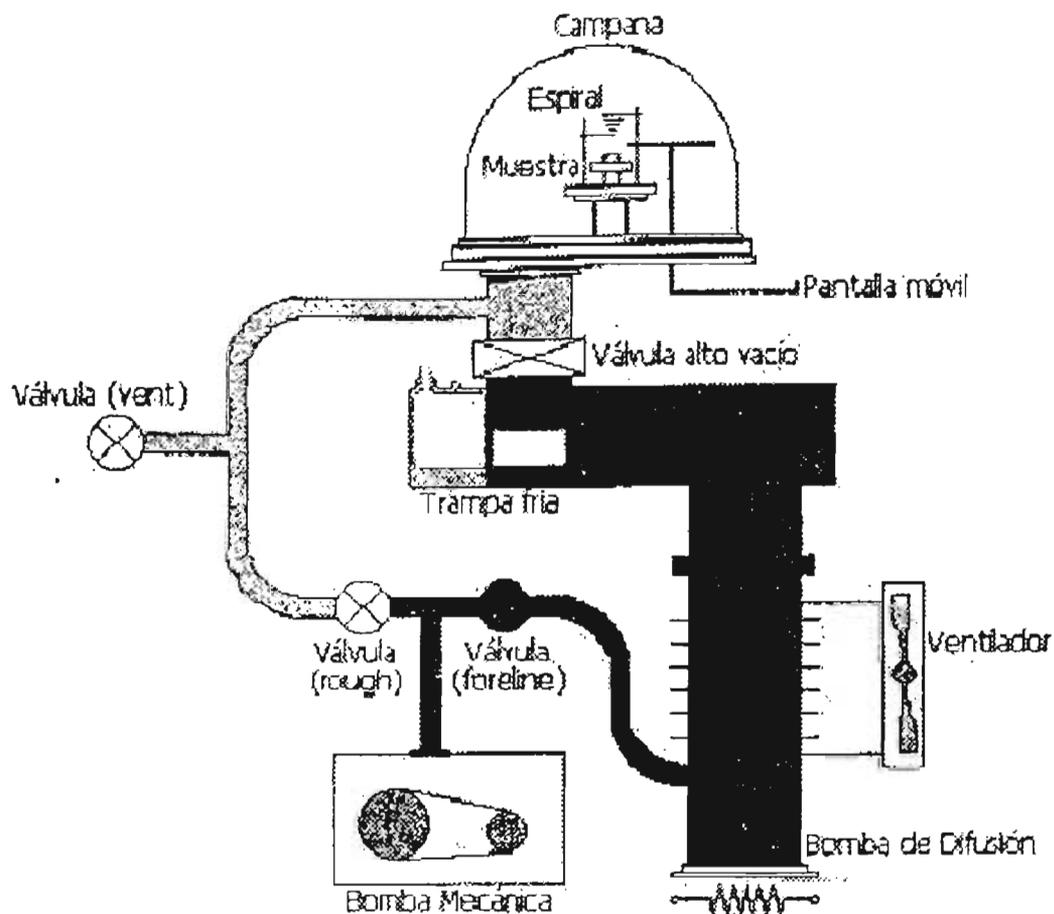


Figura 13.- Diagrama de Evaporadora de Metales VEECO V-300 [20].

El depósito del material de barrera (Al) se hace utilizando la evaporadora de metales VEECO V-300, que se muestra en la figura 13, la parte sombreada en negro es donde se forma el vacío. Esta evaporadora alcanza un vacío de 10^{-6} torrs [20]

Uno de los parámetros a determinar, es la cantidad de material a depositar sobre nuestro sustrato. Para los propósitos de este trabajo se requirió de un espesor (l) entre 300 y 400 nm aproximadamente.

Para calcular el espesor del Aluminio en términos de la distancia del filamento de tungsteno a la muestra, la masa y la densidad del material a depositar, se usó la fórmula para calcular el espesor a un punto R para una fuente puntual [21].

Fórmula para calcular espesor l a un punto R para una fuente puntual.

$$l = \frac{mH}{4\pi\rho(H^2 + L^2)^{\frac{3}{2}}} = \frac{m}{4\pi\rho} \left\{ \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{L}{H} \right)^2 \right]^{\frac{3}{2}}} \right\} \quad (37)$$

En donde l es el espesor deseado (300 a 400 nm), ρ la densidad del material de barrera, en el caso de aluminio $\rho = 2.6989 \text{ g/cm}^3$; como se observa en la figura 14, L es el radio de las muestras a evaporar (distancia desde el centro hacia una de las esquinas del arreglo de sustratos) y H es la altura del alambre de tungsteno al centro del arreglo de sustratos a evaporar [21].

En donde para calcular la masa (m) de Aluminio a evaporar, utilizamos la relación.

$$m = 4\pi\rho l H^2 \quad (38)$$

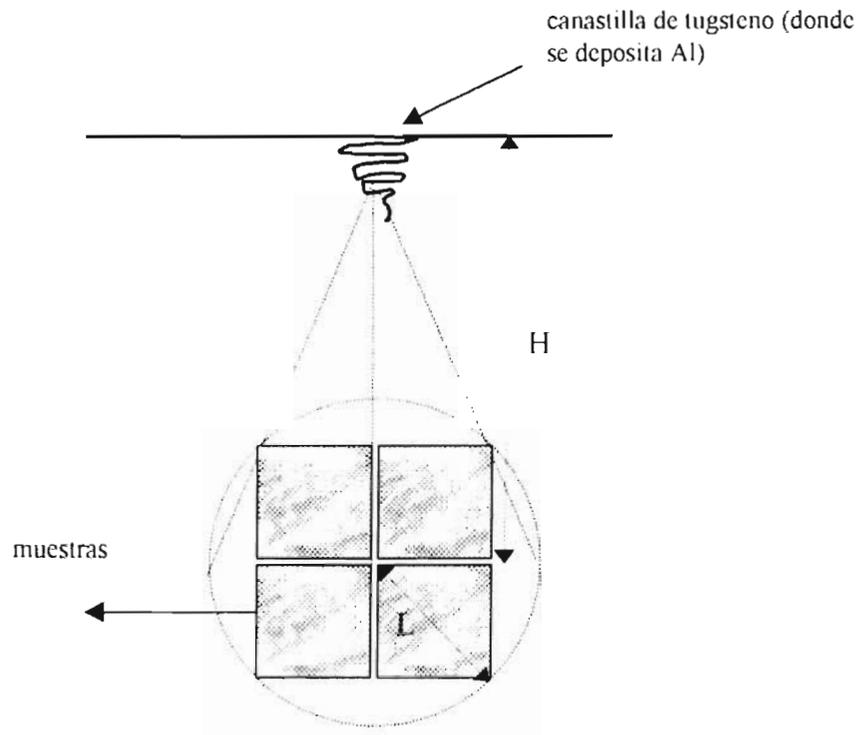


Figura 14.- Diagrama del lóbulo de evaporación.

En el siguiente capítulo se mostrarán resultados de los cálculos hechos para la evaporación de Al sobre sustratos de vidrio, así como las gráficas hechas para medir el espesor de los sustratos evaporados.

3.2.3.- Proceso de Fotolitografía:

El proceso de fotolitografía permite reproducir sobre el material de barrera depositado, el motivo (canal) de una mascarilla madre. Este proceso involucra diferentes etapas:

A.- Depósito de la resina:

La resina se deposita colocando el sustrato en la base de un spinner (plato girador) cuya velocidad es de 4250 rev/min. [18] En nuestro caso el tiempo de rotación es de 10 segundos. El sustrato es sostenido por vacío, el cual es realizado por una bomba conectada a nuestro sistema. Una vez colocado el sustrato se colocan de una a dos gotas de photoresist y se activa en seguida el spinner con la finalidad de obtener una película de photoresist uniforme sobre el sustrato.

Una vez depositada la resina sobre el sustrato, se hornea a una temperatura de 90 °C a 100°C por 30 minutos. Después, la muestra se expone a los rayos UV de la máquina alineadora.

Ahora bien, si se desea una mejor resistencia de la resina fotosensible sobre nuestro sustrato se recomienda un post-horneado después de la exposición a rayos UV, a temperaturas de entre 112 y 150 °C por un tiempo de 30 minutos.

La resina utilizada (AZ®5214 i-Line Photoresist) tiene la propiedad de ser positiva y de hacerse negativa. Controlando los tiempos de horneado así como la temperatura de la muestra previamente depositada con la resina fotosensible y dejando enfriar la muestra entre cada paso, es posible realizar el proceso de imagen reversible con el AZ®5214 i-Line Photoresist, usando el “postbake” después de la exposición de la muestra a rayos UV [22]

En nuestro caso se utilizaron dos tipos de resina fotosensible. La resina AZ®5214-E i-Line Photoresist cuyo pico de rango de absorción está de 365 a 405 nm y el Photoresist 1818 sp16 SHIPLEY 30, cuyo rango de absorción está de 350 a 450nm [23]

B.- Exposición

En el proceso de exposición de la resina, se necesita caracterizar los parámetros para los tiempos de exposición y revelado de la misma.

Para el método convencional, la exposición de la resina depositada en las muestras, se lleva a cabo mediante una alineadora de rayos UV (ver figura 15), la cual tiene una consola que contiene [24]:

- 1.- Módulo de Alineación
- 2.- Óptica de Alineación y Plataforma de Transporte
- 3.- Fuente de Luz
- 4.- Plataforma de Transporte de Módulo de Alineación
- 5.- Controlador de Intensidad Constante CIC (está separado de la consola)

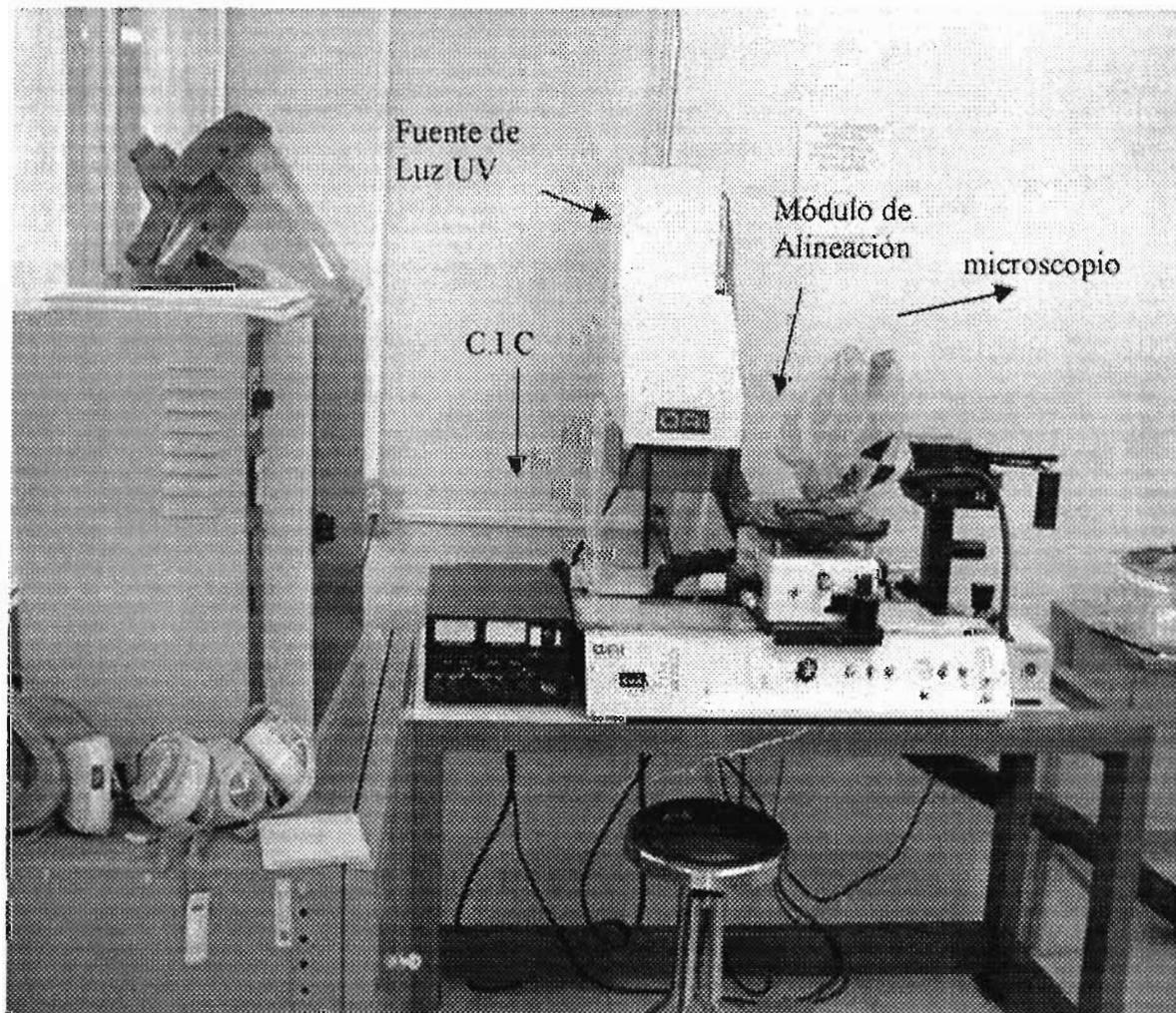


Figura 15.- Alineadora de Rayos UV

Se deben tomar en cuenta los parámetros fundamentales: el tiempo de exposición, la potencia aplicada a la fotoresina, así como el tiempo de revelado de la muestra. En el capítulo 4 (Discusión de Resultados) se presentan los parámetros caracterizados para la insolación y revelado de la muestra para el proceso de fabricación convencional de guías de onda por intercambio iónico.

C.- Revelado de la resina

Con el fin de revelar la resina insolada, la muestra se sumerge en un baño de revelador AZ400K al 1:3 (3 de H₂O) en agua desionizada a temperatura ambiente (25°C a 30°C) para obtener una mejor resolución de franjas, durante un tiempo que va de 10 a 20 segundos. Después la muestra debe enjuagarse con abundante agua y secarse con aire comprimido (N₂) [25].

Después de haber secado la muestra, ésta se verifica en el microscopio para observar los motivos grabados sobre la resina para saber si el tiempo, tanto de exposición como de revelado fueron suficientes y adecuados para lograr canales definidos en la resina depositada sobre la muestra.

D.- Grabado del material (ataque del material de barrera)

Ya que se tiene la definición deseada de los motivos en la resina (después del revelado), se prosigue a grabar el aluminio en las partes donde la resina fue revelada. Se usa un baño a base de ácido ortofosfórico. Los tiempos dependen del espesor de la máscara. Para el aluminio la temperatura del termostato es a 40°C. Los tiempos de grabado varían de 1 a 2 minutos para una capa de 300 nm. Una vez que los canales han sido grabados y verificados al microscopio, la resina restante se elimina con un baño de acetona-alcohol-agua.

3.2.4.- Intercambio iónico:

Como se vió en el capítulo 2, en la sección 2.2, el intercambio iónico de sales, se lleva a cabo sumergiendo la muestra (que previamente había sido atacada para grabar los motivos en el aluminio) en un baño de sales de nitrato de potasio (KNO_3) a una temperatura constante de $380^\circ C$ durante 6 horas aproximadamente [26].

Se utiliza un horno que cuya temperatura es controlada electrónicamente y permite que las sales de nitrato de potasio se derritan manteniendo la temperatura constante y como consecuencia se realiza el proceso de intercambio de iones.

En el capítulo 4, se detallará el proceso realizado de las muestras intercambiadas usando el equipo y los laboratorios del IICO, así como los resultados obtenidos.

3.2.5.- Eliminación del material de barrera, corte y pulido:

Una vez que se tienen las muestras intercambiadas es necesario caracterizarlas. Para ello, se necesita pulir de canto los dos extremos, en los cuales se va a acoplar la luz. Esto se realiza inclinando la muestra en un ángulo de 45° (ambos extremos) para acortar el área de pulido y se utilizan diferentes discos abrasivos.

Se usan unos discos abrasivos de $60\mu m$ y $20\mu m$. Después unos discos de grano de $12\mu m$, $3\mu m$, $0.3\mu m$ y $0.1\mu m$. Finalmente el aluminio se retira con ácido. La calidad del pulido se verifica con un microscopio de alta resolución ($\times 1000$).

3.3.- Proceso de Fabricación de guías de onda mediante métodos interferométricos

Como mencionamos, al principio de este capítulo, se necesita fabricar guías de onda con un ancho de canal del orden de 2 a 5 μm . Es por ello que una parte de este trabajo

estuvo enfocada en obtener los anchos de canal mencionados, mediante un método Interferométrico.

Se montó un Interferómetro Holográfico como se muestra en la figura 16, para hacer interferir dos haces de luz coherente y así formar un patrón de interferencia de franjas de separación del orden de $2 \mu\text{m}$ [27]

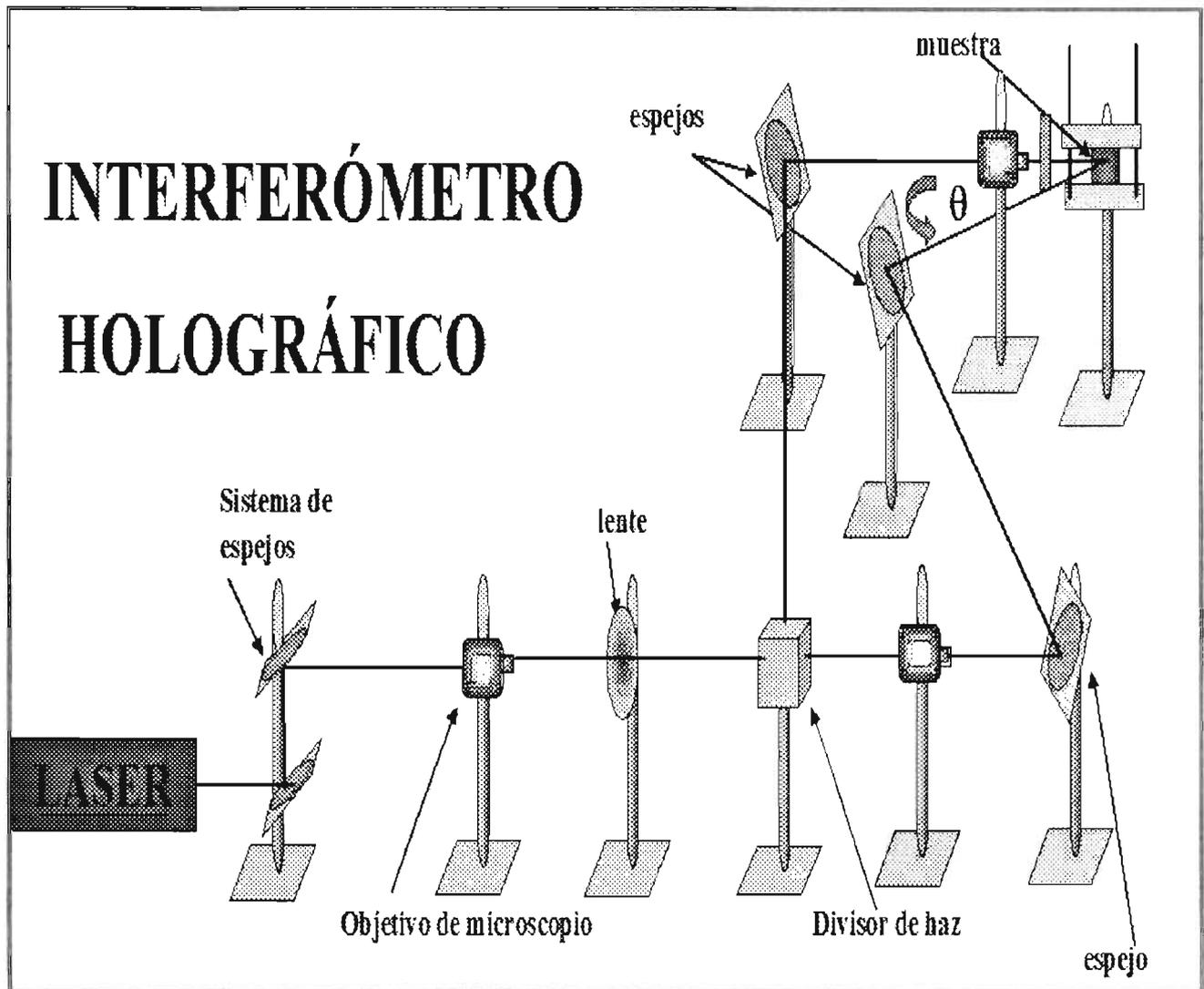
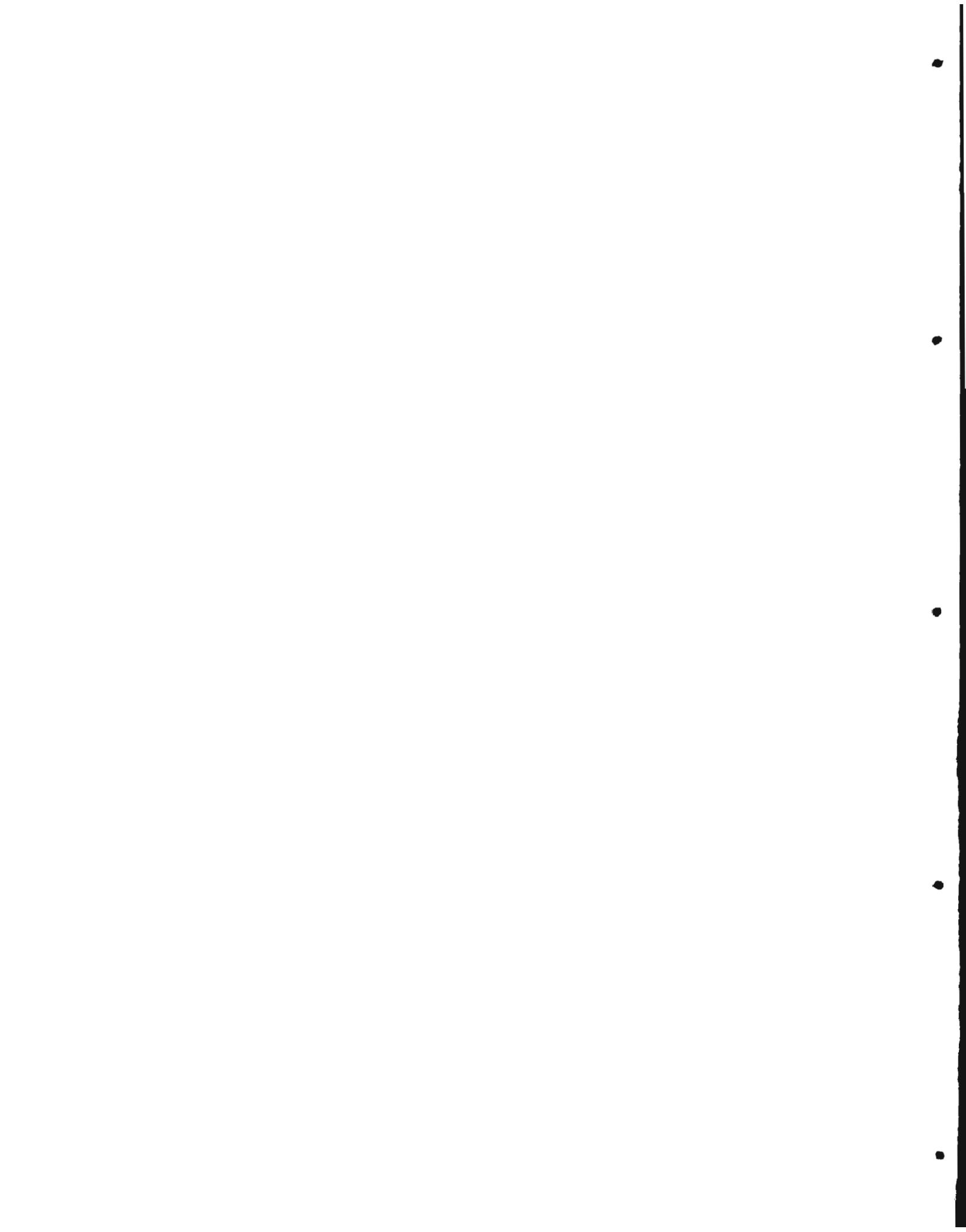


Figura 16.- Diagrama de un Interferómetro Holográfico



Se utilizó la relación básica para la interferencia de dos haces planos, para calcular, el ángulo entre los dos haces que interfieren entre sí, (θ = ángulo de incidencia), el cual permite controlar el ancho de franjas deseado [28]:

$$a \sin \theta = \lambda \quad (39)$$

Adaptando los siguientes parámetros al sistema óptico:

- a = ancho de canal que en el interferograma se traduce a tener franjas de periodo de $\approx 2\mu\text{m}$.
- λ = longitud de onda del láser = 514nm.

Se calculó que para lograr un ancho de $2\mu\text{m}$ de las franjas, se necesita un ángulo entre los haces (ángulo de incidencia) de $\theta \approx 15^\circ$.

Debido a que en el Interferómetro Holográfico, el ángulo entre los dos haces (ángulo de incidencia = θ) está restringido, debido a que los componentes ópticos utilizados (tales como espejos y lentes), se interponen entre sí en un ángulo entre haces límite ($\theta \approx 18^\circ$ a 20°).

Se decidió entonces, optar por un sistema óptico alternativo con mayor libertad de manipulación del ángulo entre los dos haces que nos permitiera tener mayor control del ancho entre franjas. Esto consistió en implementar un Interferómetro por división de frente de onda, como se observa en la figura 17, que nos permitía reducir al mínimo el ángulo de interferencia. [29].

Cabe mencionar, que en este proceso se utilizó la resina “AZ®5214-E i-Line Photoresist”, la cual no es lo suficientemente adecuada para lograr franjas bien definidas. Esto se debe a que el rango de absorción de este material es de 310 nm a 405 nm, cuyo pico máximo está en 365nm. y nosotros utilizamos un láser de Argón de longitud de onda sintonizable, con potencia máxima en $\lambda = 514\text{nm}$, por lo que se deben ajustar los parámetros necesarios para realizar este método de fabricación de guías de onda. También

se probó una nueva resina, la "1818 sp16 SHIPLEY" con un rango diferente de absorción de 350 a 450 nm cuyo pico máximo está en el 436 nm. Para optimizar resultados se escogió la longitud de onda mínima del láser ($\lambda = 455\text{nm}$), para acercarnos a los rangos de absorción de ambas resinas. Los resultados obtenidos con ambos sistemas, así como para ambas resinas, se muestran en el capítulo 4 (discusión de resultados).

INTERFERÓMETRO DE USOS MÚLTIPLES

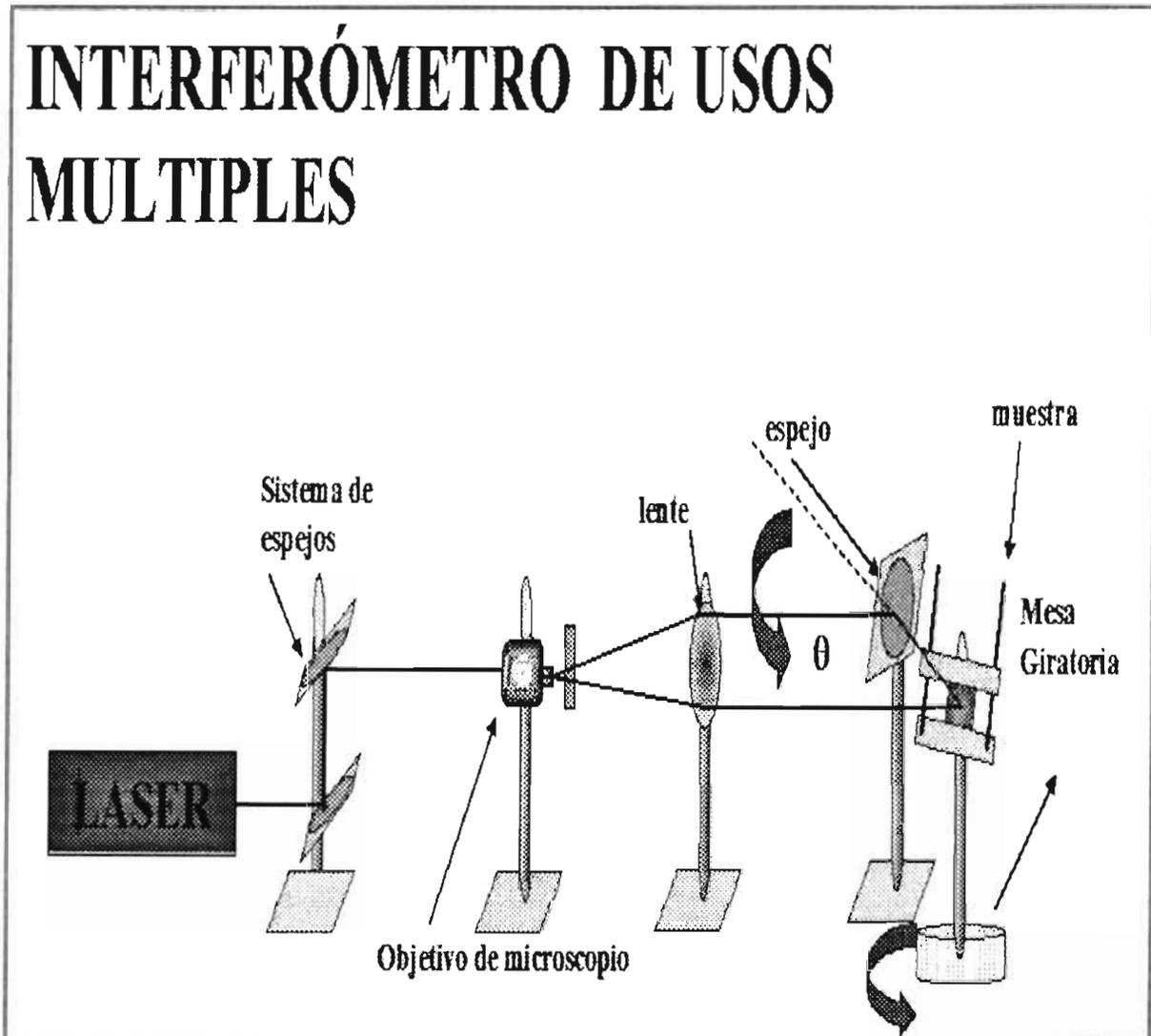


Figura 17.- Diagrama óptico de Interferómetro por División de Frente de Onda

CAPITULO 4

DISCUSION DE RESULTADOS

4.1 Resultados usando el Proceso Convencional.

En el capítulo anterior se detallaron los procesos seguidos en la fabricación de las guías de onda. En particular en la sección 3.2 se plantearon los pasos necesarios para realizar el proceso convencional de fabricación de guías de onda mediante intercambio iónico. A continuación se presentan los resultados experimentales obtenidos en dicho proceso.

4.1.1.- Limpieza del material de barrera.

Después de haber escogido como material de barrera el Aluminio por cumplir las características necesarias para el proceso de fabricación de guías de onda, como se vio en la sección 3.2.2 (Depósito del material de barrera), hubo la necesidad de establecer un método de limpieza del aluminio, ya que después de haber mandado laminar el material (para facilitar la manipulación de las pellets de Aluminio), las láminas de aluminio quedaron impregnadas de impurezas de la máquina laminadora.

La limpieza del material de barrera se realizó con el fin de obtener una buena adherencia sobre el substrato de vidrio a evaporar. Se probaron diferentes métodos de cuyos procedimientos y resultados experimentales fueron los siguientes:

Prueba 1.- Baño de solución jabonosa en ultrasónico.

Se siguieron los pasos de una práctica de laboratorio de Ingeniería Física de nombre: "Estudio de la Superficie del Aluminio", que consistía en realizar un baño ultrasónico con una solución jabonosa durante cinco minutos. En donde, no se menciona en el reporte el tipo de jabón utilizado en la limpieza del aluminio. En nuestro caso se utilizó

un detergente líquido preparado (para lavar material de laboratorio) diluido al 5% en agua desionizada. Se observó que la solución, al ser alcalina, ataca fácilmente el aluminio. En la muestra sometida a este procedimiento se observa (figura 18) corrosión y deterioro de la superficie. Es por ello que se buscaron otros métodos de limpieza.

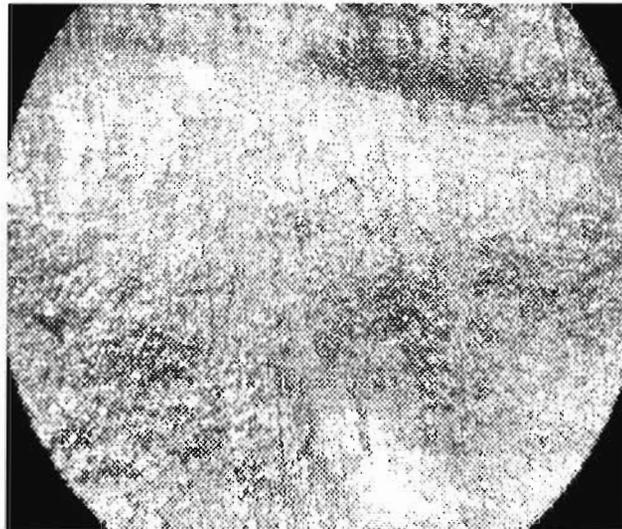


Figura 18.- Muestra de Al después de prueba 1

Prueba 2.- Desengrasado:

El desengrasado se aplicó sobre una muestra de aluminio. Consistió en un baño de tricloroetileno al punto de ebullición durante 10 min., para después darle un baño de ultrasónico en metanol durante 5 minutos. Se repite una vez más un baño en metanol utilizando un vaso de precipitado diferente durante 5 minutos. Finalmente, se termina el desengrasado con un baño de ultrasónico de agua desionizada por 5 minutos y se seca la muestra con aire comprimido (N_2) de alta pureza.

El resultado obtenido con este método, se muestra en la imagen de la figura 19. Podemos observar que la muestra no se dañó pero aun quedaron residuos de impurezas sobre la superficie. En base a estos resultados se decidió atacar químicamente las muestras de aluminio para eliminar por completo las impurezas.

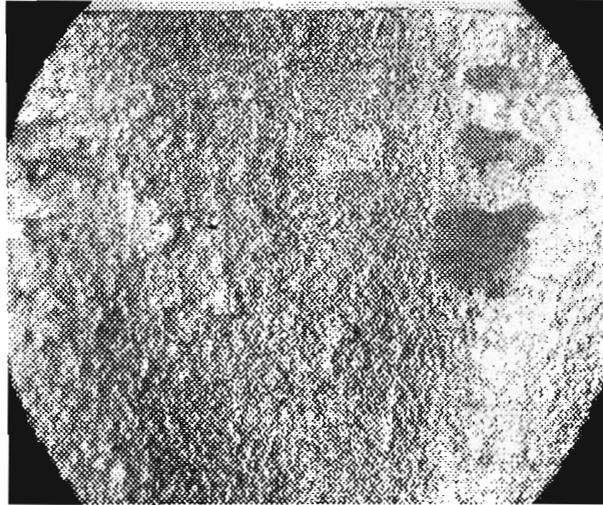


Figura 19.- Prueba de desengrasado sobre muestra de Al.

Prueba 3.- Pulido de superficie:

La superficie de una muestra de Aluminio se pulió con una lija del No 2000 (muy suave), y se le aplicó un desengrasado (como en la Prueba 2). Se observan aún partes con óxido e impurezas sobre la superficie de la muestra, como se muestra en la figura 20. Además de que este método no es muy cómodo debido a la difícil manipulación de la muestra al pulirla.

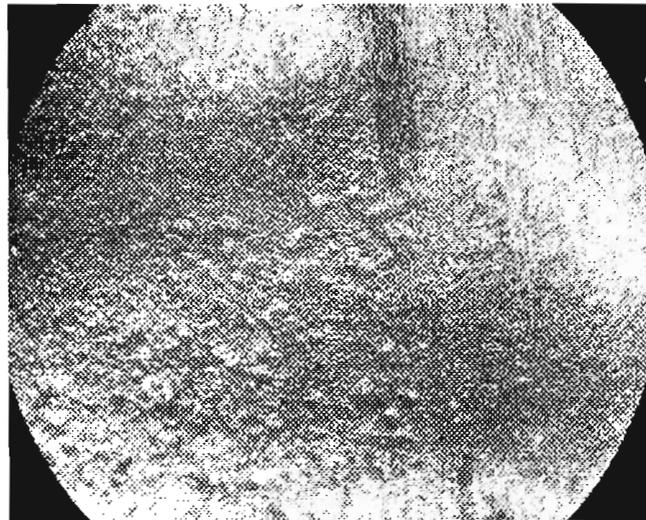


Figura 20.- Prueba de pulido sobre muestra de Aluminio

Prueba 4.- Ataque Químico:

Finalmente, se decidió atacar químicamente las muestras de aluminio. Después de limpiar de grasas la muestra con un desengrasado (como en la prueba 2), se hizo un ataque químico utilizando una solución de Ácido Nítrico al 20% (HNO_3) en agua desionizada, ya que el HNO_3 retira por completo los posibles óxidos formados en la muestra [30]. Se introdujo la muestra en la solución preparada en un baño ultrasónico por tres minutos. Después de haber secado la muestra se observó que la superficie se limpió por completo de impurezas y óxidos, sin haber daño sobre la superficie del aluminio (corrosiones de la superficie), como se muestra en la figura 21. Siendo este el método con el que obtuvimos mejores resultados, se adoptó como el procedimiento adecuado para realizar el proceso.

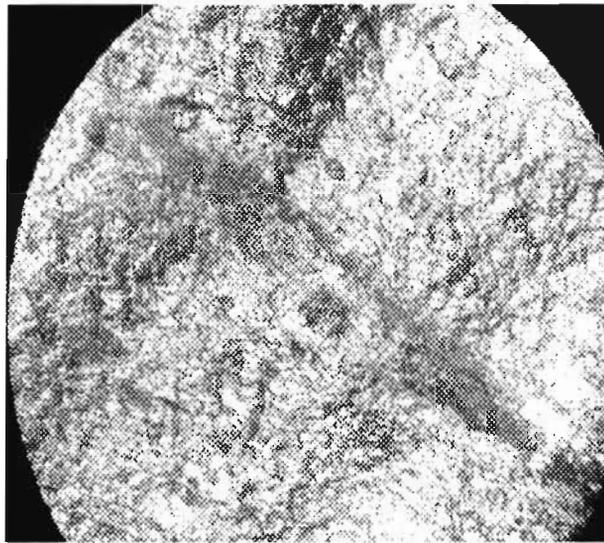


Figura 21.- Prueba 4. Ataque Químico sobre muestra de Al.

4.1.2.- Evaporación del Aluminio:

La evaporación del aluminio sobre los substratos de vidrio se lleva a cabo en base a los cálculos obtenidos con la fórmula de la ecuación (37) utilizada para calcular el espesor a

un punto R para una fuente puntual, tal como se planteó en el capítulo anterior en la sección 3.3.

Se calcularon las masas necesarias para evaporar Aluminio sobre los substratos de vidrio y obtener espesores de entre 300 a 500 nm. En total se realizaron cuatro evaporaciones, haciendo después de cada evaporación un barrido, dicho barrido se hizo sobre el portamuestras con el perfilómetro para medir el espesor obtenido en nuestras muestras.

En la figura 22 se muestra el portamuestras después de la primera evaporación, donde las partes sin aluminio son las zonas donde se colocaron los substratos de vidrio a evaporar, es por ello que el barrido se hizo sobre el portamuestras que nos permitió registrar los espesores obtenidos después de cada evaporación.

A continuación se muestran los resultados obtenidos en cada una de las evaporaciones efectuadas.

1 ERA EVAPORACIÓN:

En esta primera evaporación, se evaporó un conjunto de cuatro muestras de vidrio previamente preparadas para la evaporación (es decir después de haber realizado el proceso de limpieza del substrato). En base a la ecuación (37), se calculó una masa de 23.32 mg para un radio $L = 1.6\text{cm}$, una altura $H = 4\text{ cm}$ y con la densidad del aluminio es de $\rho = 2.6989\text{ g/cm}^3$, para un espesor $l \approx 340\text{ nm}$. El radio L fue calculado según la geometría del conjunto de los cuatro substratos a evaporar tal y como se muestra en la figura 23

En la gráfica 1 de la figura 24 se muestra la gráfica del espesor medido en función de la longitud de barrido (en micras) realizado. Se observa que el salto del barrido reporta un espesor obtenido de 251 nm, donde fue necesario barrer más zonas para verificar la homogeneidad de espesor en las muestras, los resultados se muestran en las gráficas de la figura 25.

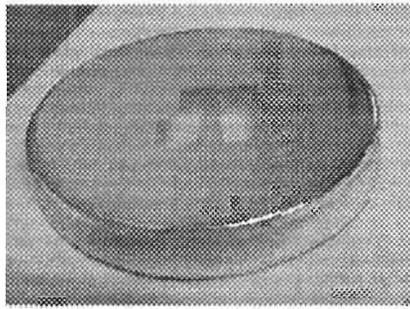


Figura 22.- Portamuestras después del proceso de evaporación.

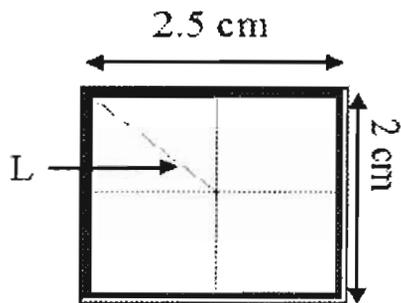


Figura 23.- Diagrama de muestras para evaporar

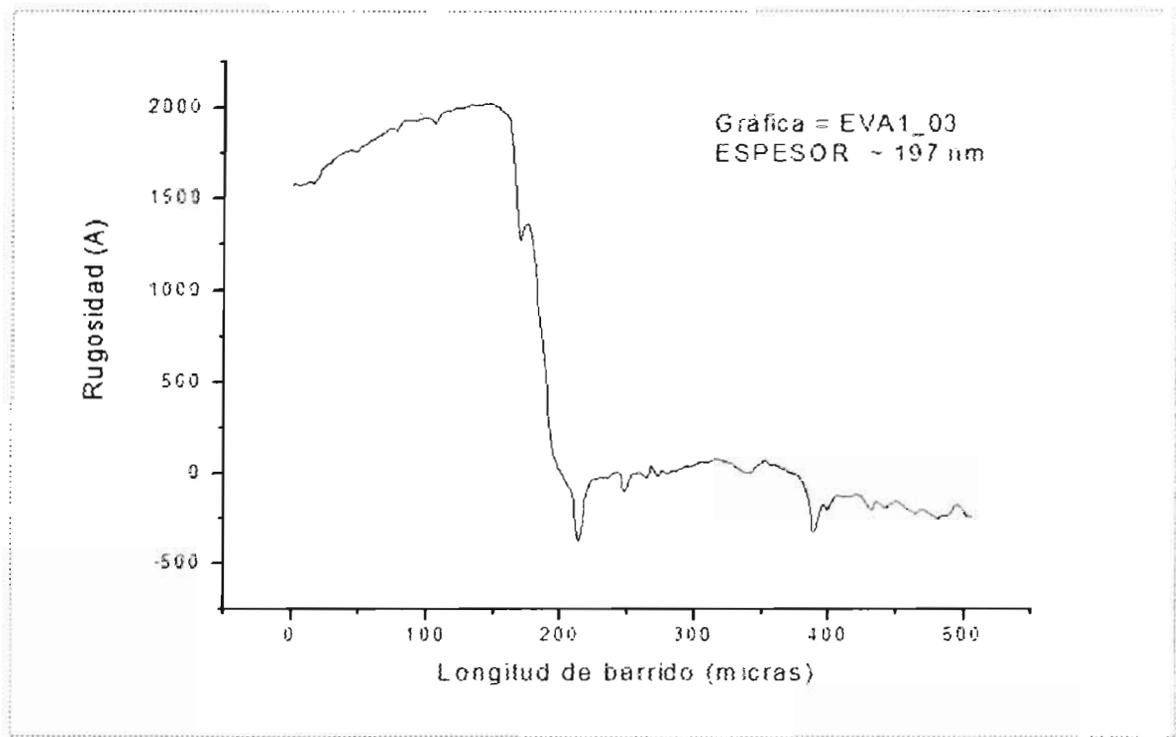
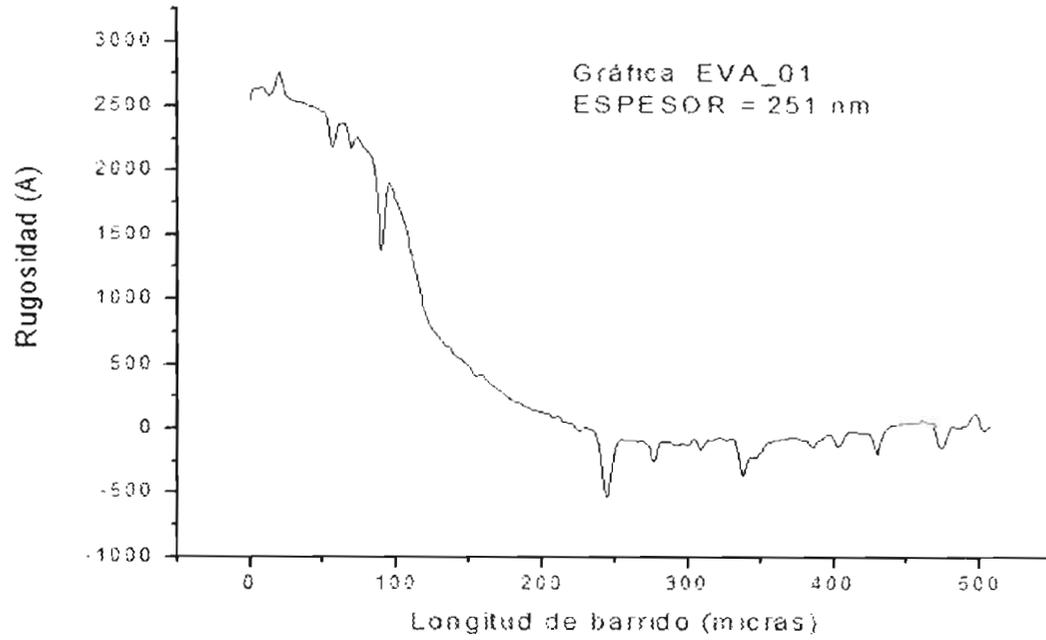
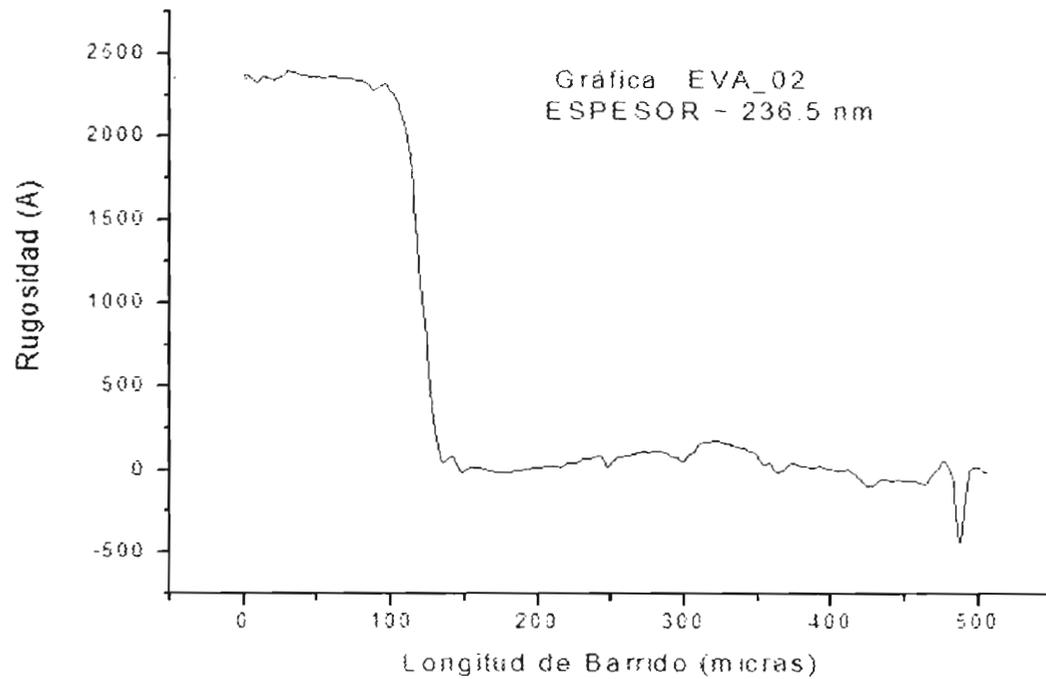


Figura24.- Gráfica 1, obtenida al medir espesor de muestra en la Evaporación 1

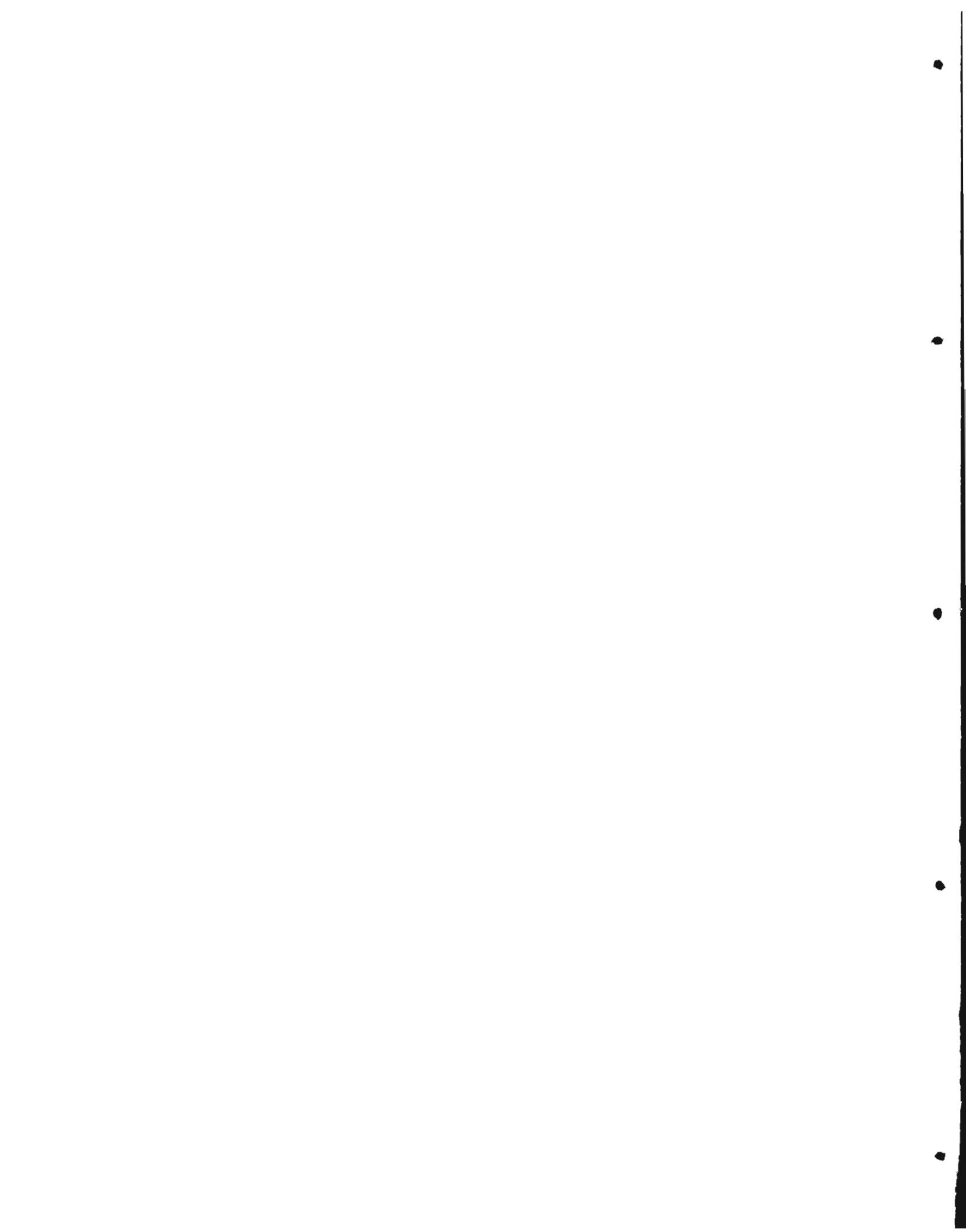


(a)



(b)

Figura 25.- Gráficas(a) y (b), obtenidas al medir espesor de muestra en la Evaporación I



En la figura 25 en la gráfica (a) el salto del barrido reporta un espesor obtenido de 236 nm y en la gráfica (b) el salto del barrido reporta un espesor de 197 nm. Las gráficas de la figura 24 y de la figura 25 (a) son más homogéneas ya que sus espesores tienen valores cercanos, esto es debido a que el barrido de ambas gráficas fue muy cercano al centro del radio de evaporación donde la superficie evaporada (espesor) es más homogénea. La gráfica de la figura 25 (b) reporta un espesor menos homogéneo en comparación a las gráficas de la figura 24 y de la figura 25 (a), ya que el barrido de esta gráfica fue en la orilla de las muestras (más alejado del centro de evaporación).

2DA EVAPORACIÓN:

En esta ocasión se evaporó el aluminio sobre ocho muestras de vidrio limpias, listas para la evaporación., como se muestra en la figura 26. Se cortaron y pulieron muestras más grandes para facilitar la manipulación de las muestras en el proceso de pulido. Para poder depositar un espesor de aluminio de aproximadamente 453nm, se calculó una masa de 34.3 mg. para un radio $L = 2$ cm, una altura $H = 4$ cm y la densidad del aluminio que es de $\rho = 2.6989$ g/cm³.

En las figuras 27 y 28 se muestran las gráficas de los espesores medidos en función de la longitud de barrido (en micras) realizado, se observa que el salto del barrido reporta para la gráfica (a) de la figura 27 un espesor de 470nm, para la gráfica (b) de la figura 27 un espesor de 298nm, para la gráfica de la figura 28 (a) un espesor de 160 nm y para la gráfica de la figura 28 (b) un espesor de 357nm. Entonces los espesores más altos medidos fueron los de las zonas barridas más cercanas al centro del radio de evaporación, teniendo que en las orillas los espesores no son muy homogéneos tal como se muestra en la gráfica de la figura 28(a).

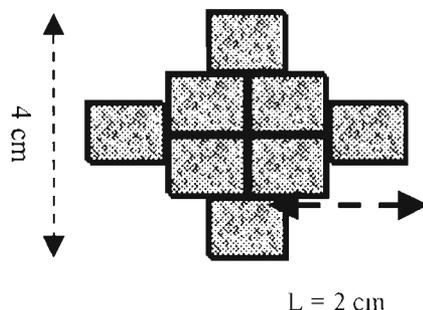


Figura 26.- Diagrama de arreglo de muestras para evaporación.

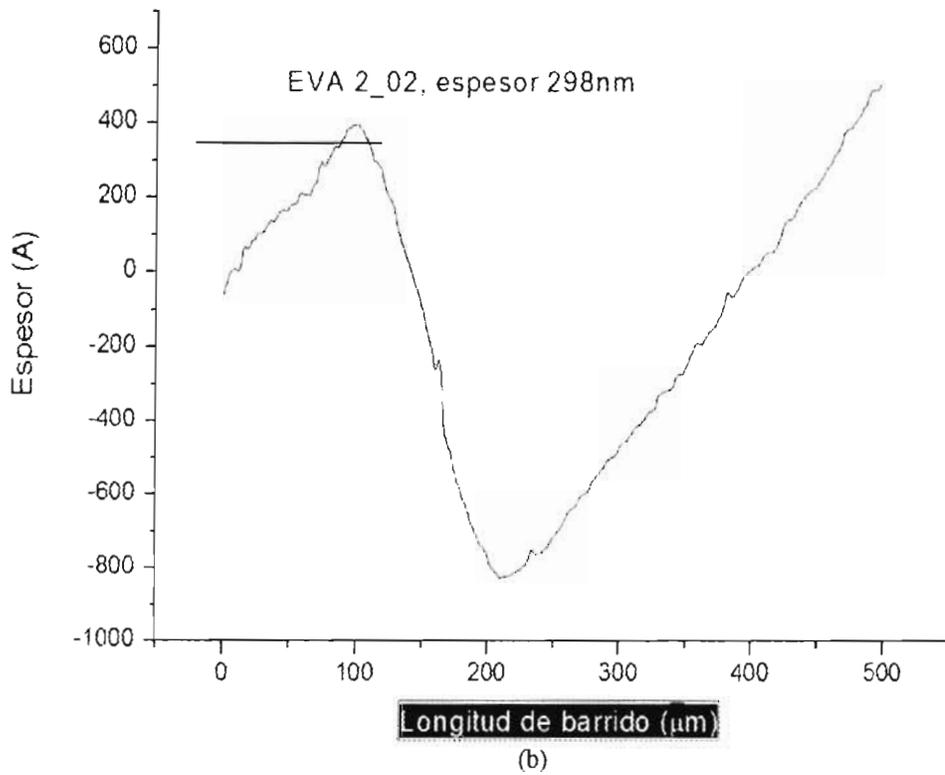
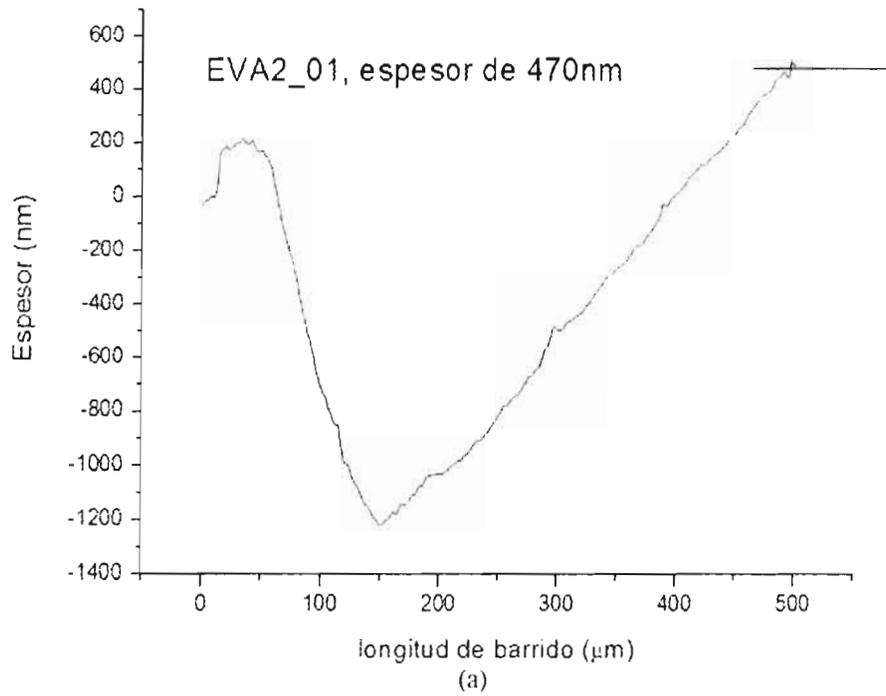


Figura 27.- Gráficas (a) y (b). obtenidas al medir espesor de muestra en la Evaporación 2

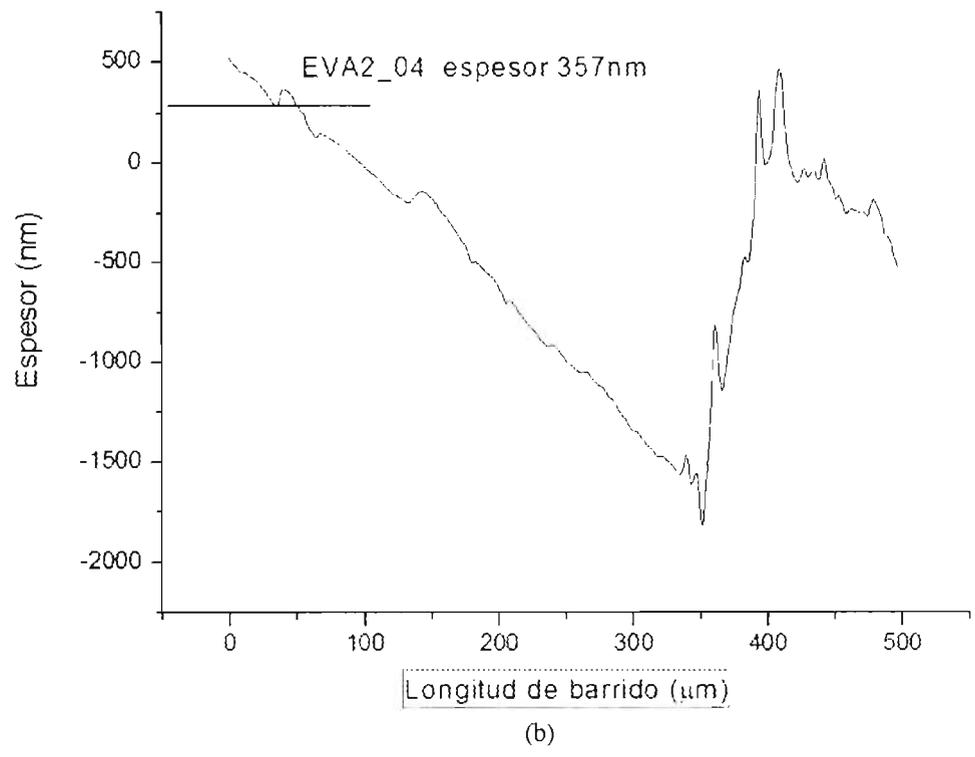
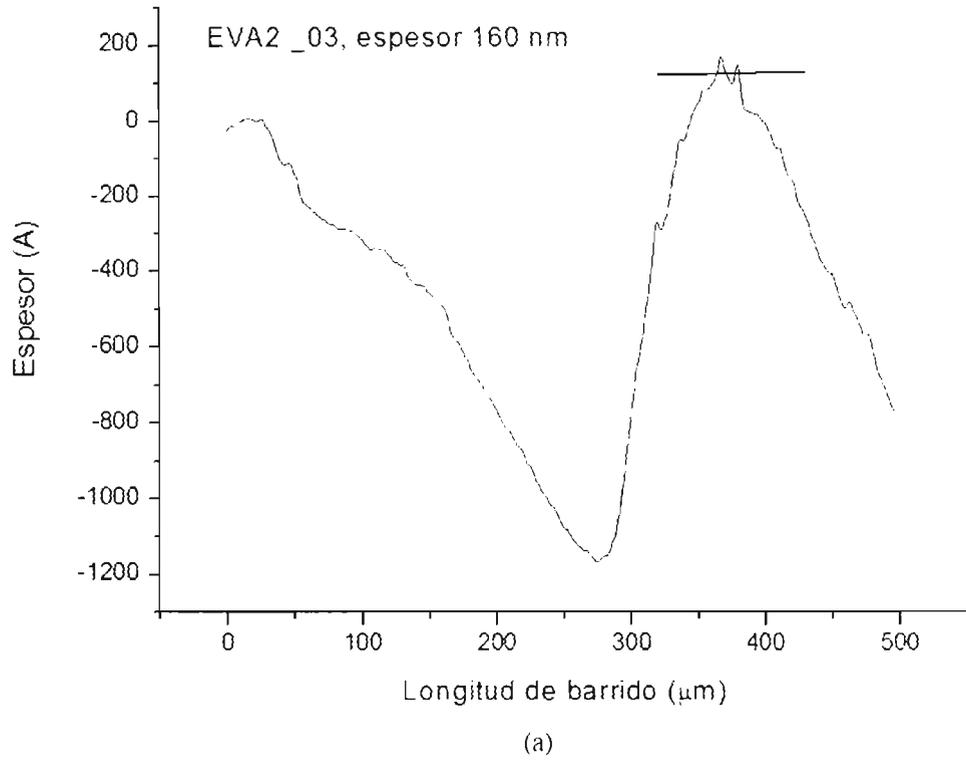
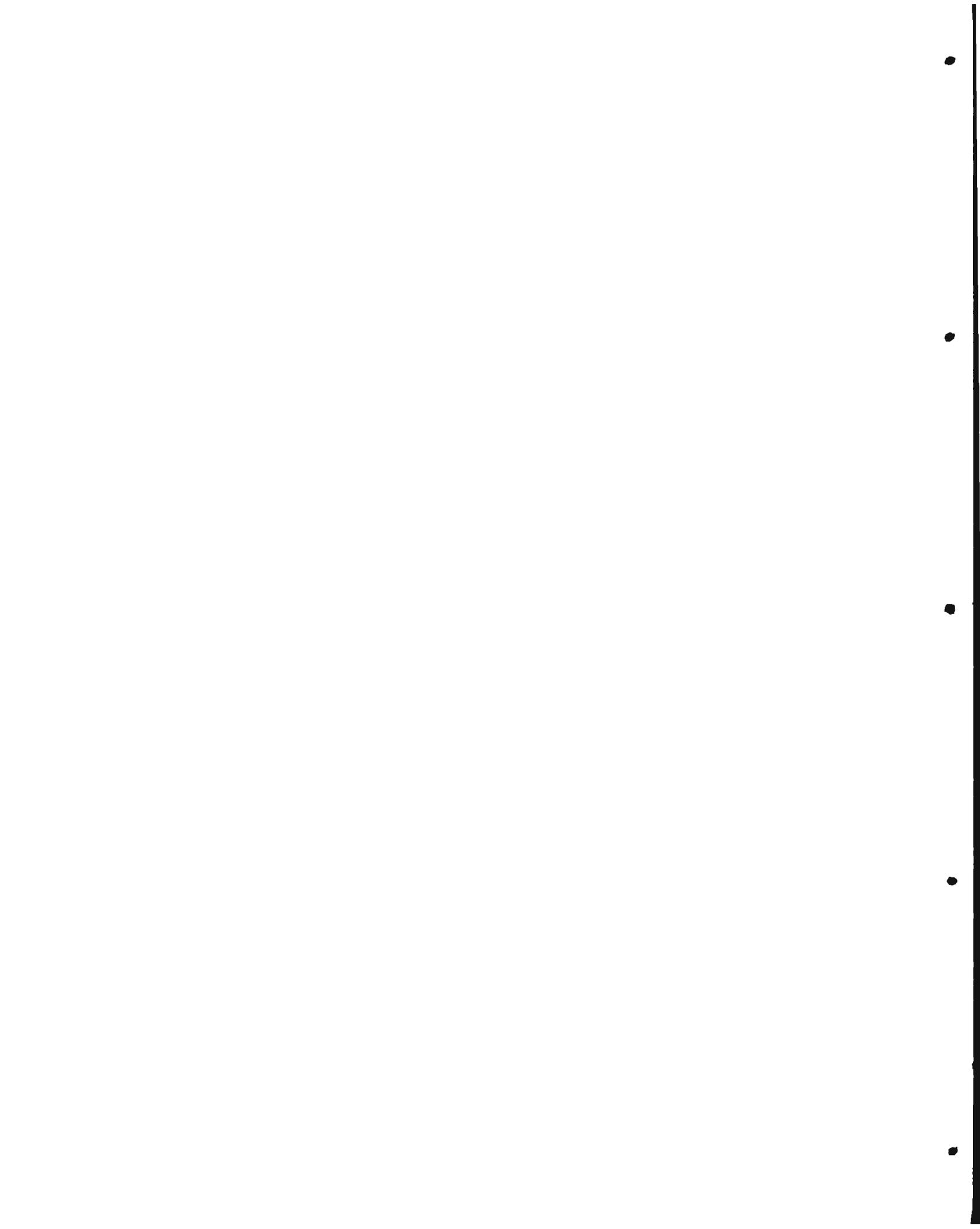


Figura 28.- Gráficas (a) y (b) obtenidas al medir espesor de muestra en la Evaporación 2



3ERA EVAPORACIÓN:

Una tercera evaporación se llevó a cabo sobre cuatro muestras de vidrio, tal como se muestra en el diagrama de la figura 29. Se calculó una masa de 36.4 mg para un radio $L = 3.2$ cm, una altura $H = 4$ cm y la densidad del aluminio que es de $\rho = 2.6989$ g/cm³, para obtener un espesor de 400 nm aproximadamente.

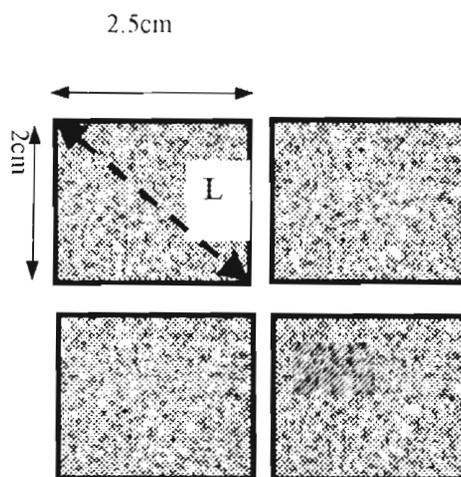


Figura 29.- Diagrama de arreglo de muestras para evaporación.

Las gráficas mostradas en las figuras 30 y 31 son de los espesores medidos en función de la longitud de barrido (en micras) realizado para la tercera evaporación. El salto del barrido reporta, que para la gráfica de la figura 30(a) se obtuvo un espesor de 544nm, para la gráfica de la figura 30(b), un espesor de 528nm, para la gráfica de la figura 31(a), un espesor de 325 nm y para la gráfica de la figura 31(b), un espesor de 355nm.

Debido al arreglo de muestras como se observa en la figura 29, el lado más cercano al centro del radio de evaporación, (el que estaba debajo de la canastilla de tungsteno que contenía el aluminio a evaporar) fue el que obtuvo un espesor de 528 a 544 nm, y teniendo el otro lado (el más alejado del radio de evaporación) un espesor de 325 a 355 nm. Por lo que se obtuvieron dos muestras con espesores homogéneos para cada uno de los lados donde se colocaron las muestras.

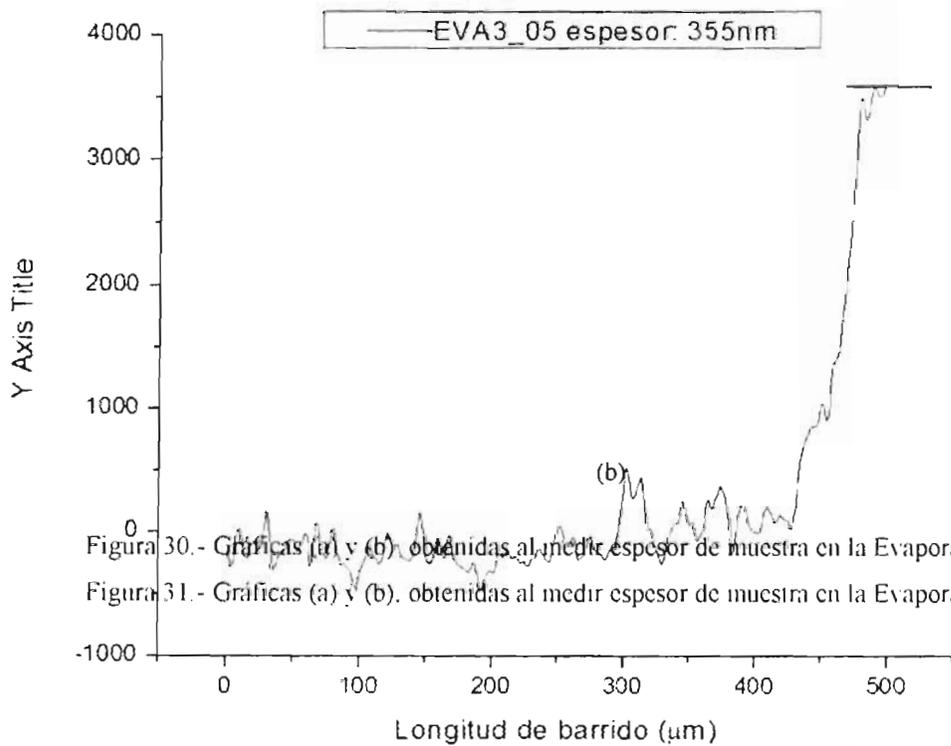
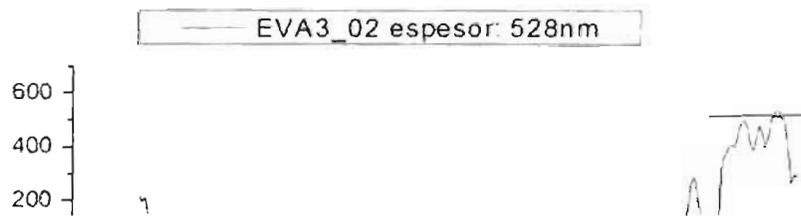
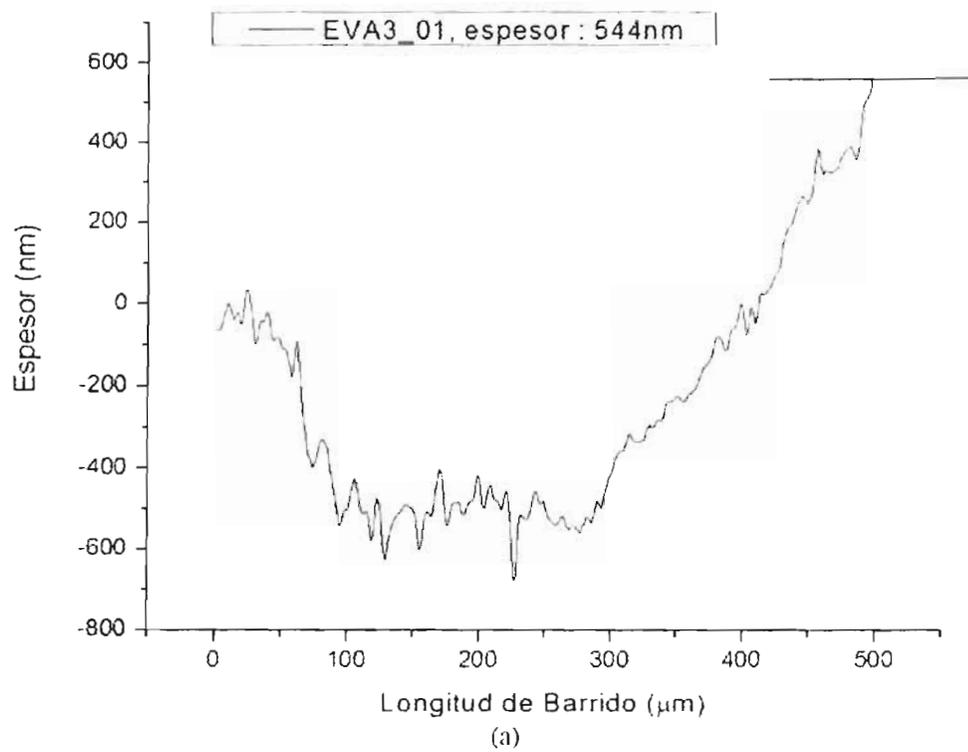


Figura 30.- Gráficas (a) y (b) obtenidas al medir espesor de muestra en la Evaporación 3

Figura 31.- Gráficas (a) y (b) obtenidas al medir espesor de muestra en la Evaporación 3

4TA EVAPORACIÓN:

Ahora bien, debido a que la caracterización de los parámetros del proceso requiere hacer varias pruebas experimentales, se realizó una cuarta evaporación con el principal objetivo de obtener el mayor número de muestras de vidrio con aluminio posible. Entonces esta vez, se evaporaron ocho muestras de vidrio. El arreglo obtenido sobre el portamuestras para la evaporación se observa en la figura 32. Estas muestras se hicieron con el fin de hacer pruebas, por ello no requeríamos de mucha homogeneidad en el espesor

Se calculó una masa de 37.8 mg., un radio $L \approx 3$ cm, una altura $H = 4$ cm y la densidad del aluminio que es de $\rho = 2.6989$ g/cm³, para obtener un espesor de 356 nm aproximadamente.

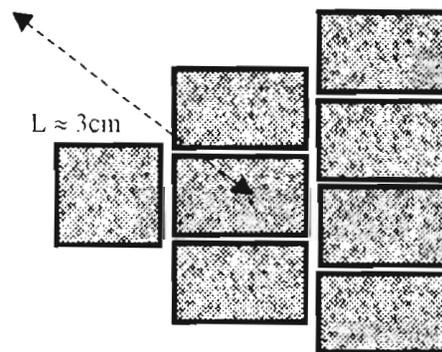
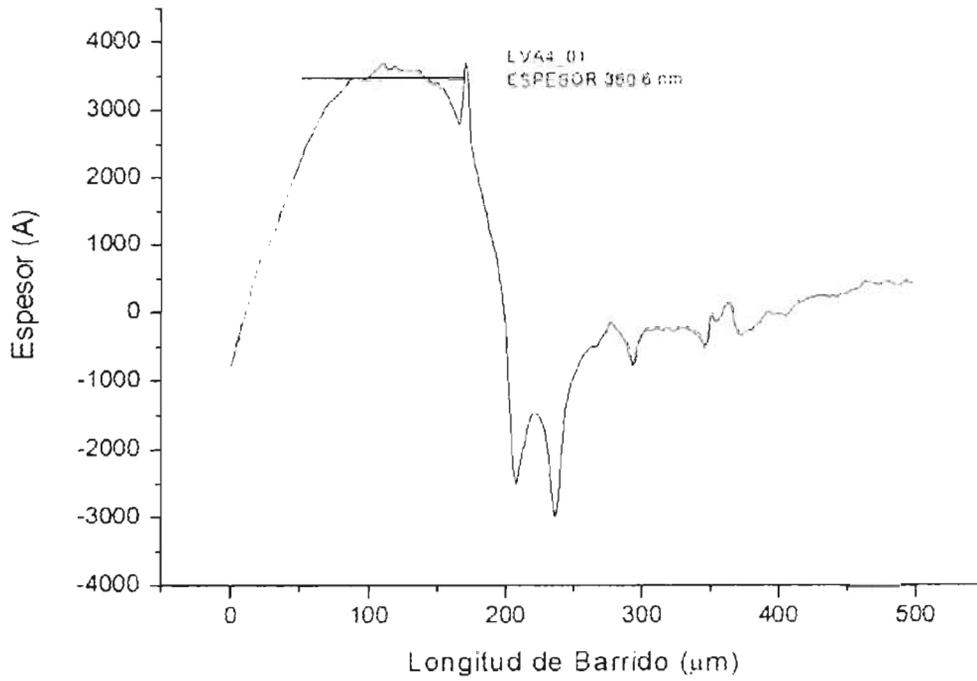
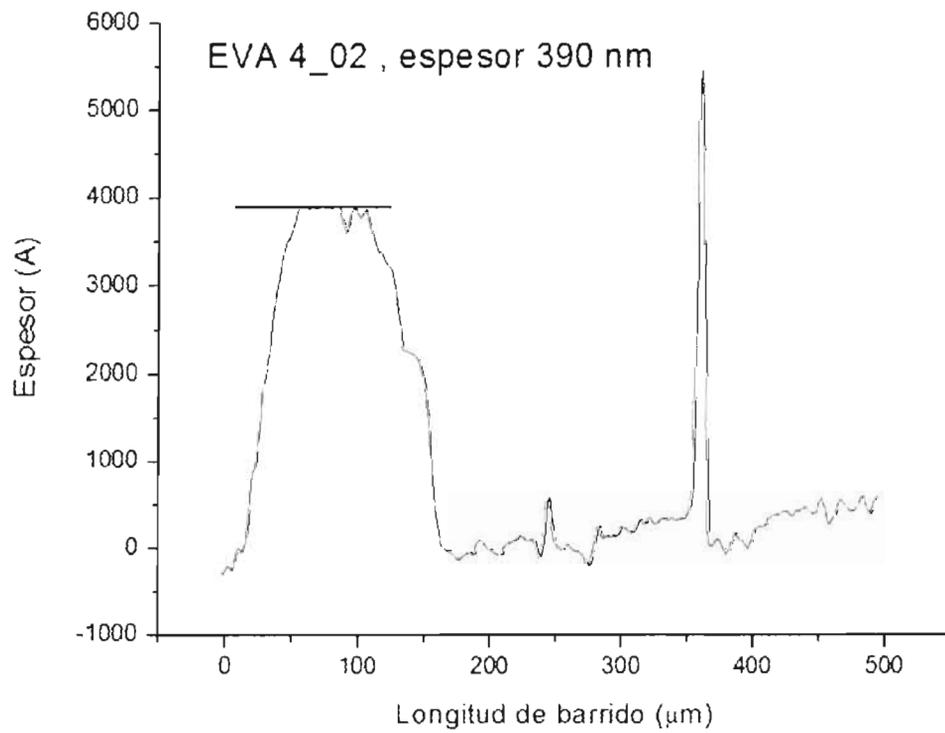


Figura 32.- Diagrama de arreglo de muestras para Evaporación 4.

En las gráficas de las figuras 33 y 34, los espesores obtenidos para cada una de las gráficas fueron los siguientes en función de la longitud de barrido (en micras) realizado para la cuarta evaporación: en la gráfica de la figura 33(a) se midió un espesor de 360.6nm, en la gráfica de la figura 33(b) un espesor de 390 nm y en la gráfica de la figura 34 un espesor de 365nm. En esta evaporación se tuvieron espesores cuyos rangos fueron muy similares entre sí, por lo que las muestras evaporadas tuvieron una mejor homogeneidad de la capa de aluminio.



(a)



(b)

Figura 33.- Gráficas (a) y (b). obtenidas al medir espesor de muestra en la Evaporación 4

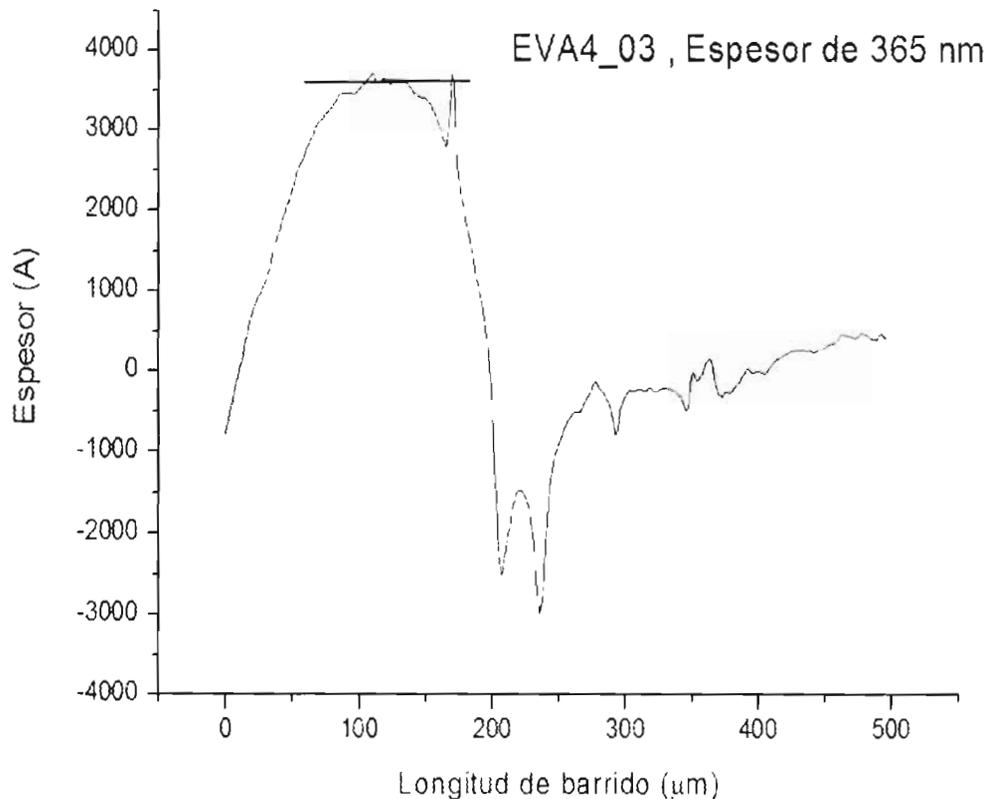


Figura 34.- Gráfica obtenida al medir espesor de muestra en la Evaporación 4

Se observa en las gráficas anteriores que algunos de los espesores evaporados no son homogéneos. Las gráficas muestran los espesores evaporados de algunas zonas barridas con el perfilómetro para medir espesor. Las capas de los espesores no son homogéneas, esto es debido a que la fórmula calculada para una fuente puntual está diseñada para radios de la zona a evaporar (L) muy pequeños (del orden de milímetros). En el caso particular de las muestras evaporadas, se abarcó la mayor área posible a evaporar con el fin de tener mayor número de muestras para el proceso de fabricación de guías de onda. Las muestras con espesor más homogéneo son las que se colocaron más cerca del centro del radio de evaporación.

Es posible que algunos problemas técnicos que presentó la evaporadora de metales al perder vacío durante el proceso, influyan en la falta de homogeneidad de los espesores depositados.

4.1.3.- Proceso de Fotolitografía:

A.- MAQUINA ALINEADORA DE RAYOS UV

Como se mencionó en el capítulo 3 en la sección 3.2 (Proceso de Fabricación Convencional de guías de onda por intercambio iónico), se utilizó el sistema de alineado y exposición de máscara OAI serie 200; la cual tiene un módulo de alineación (J200), una fuente de luz UV, un microscopio y un Controlador de Intensidad constante CIC.

El módulo de alineación J200 tiene un sistema de soporte para mascarillas y un sujetador de sustrato en vacío para que la muestra sea colocada, la máscara es sujeta por vacío y es ayudada por un conjunto de tuercas las cuales la sujetan alrededor del borde. La máscara es montada en la parte superior del armazón tal que no puede caer sobre el sustrato o cambiar de posición en ausencia de vacío. La rotación de la máscara es dada para alinear el arreglo de patrones en la máscara con el eje X del movimiento del microscopio. El sistema consta de tres micrómetros que controlan los movimientos X, Y, Z y θ de rotación, independientes el uno del otro.

El sistema cuenta con un cronómetro de exposición (radiación de la lámpara U V.) que permite al usuario programar tiempos de exposición en incrementos de 0.1 segundos, de 0.1 hasta 99.9 segundos, y en incrementos de un segundo de 1 a 999 segundos. [18]

El controlador de intensidad constante CIC, mantiene la intensidad de la lámpara dentro de un $\pm 2\%$ del valor de intensidad dado por el operador en el plano de exposición y compensa el envejecimiento de la lámpara y variaciones de potencia de hasta $\pm 15\%$ VAC. El CIC usa un sistema de control de realimentación de circuito cerrado que tiene 2 sensores cada uno ajustado a una longitud de onda seleccionada. La longitud de onda a ser

monitoreada se selecciona mediante el uso de un switch de selección que se encuentra en la parte frontal del CIC [24].

El sistema de luz U.V. colimada ofrece una exposición uniforme que cubre el 100% del área destinada para depósito de la muestra. La lámpara empleada es de mercurio y ofrece una potencia máxima de 200 watts, el intervalo de radiación que ofrece es de $\lambda = 260\text{nm}$ a 325 nm , con una intensidad estable máxima de $160\text{mW}/\text{cm}^2$ [18].

B.- EXPOSICIÓN DE MUESTRAS:

Se utilizaron muestras de vidrio (previamente limpiadas y pulidas después del clivado para evitar fisuras en los bordes de la muestra) para caracterizar los parámetros de exposición y revelado del proceso fotolitográfico empleando la Alineadora profesional de máscaras OAI serie 200, siguiendo los siguientes pasos:

- 1) Depósito de resina (ver capítulo 3, sección 3.3).
- 2) Horneado de la muestra durante 30 minutos a $90\text{ }^\circ\text{C}$ (máximo $100\text{ }^\circ\text{C}$)
- 3) Se prende la bomba de vacío (para la alineadora de rayos UV).
- 4) Se prende la fuente y se presiona el botón START
- 5) Colocar la mascarilla sobre el plato de la máscara (previamente limpiada con acetona, alcohol y agua).
- 6) Se coloca la muestra sobre el sujetador de vacío y se prende el switch de vacío de sustrato.
- 7) Se sube la muestra hasta estar en contacto con la mascarilla.
- 8) Se expone a rayos UV (parámetro de tiempo de exposición ajustable)
- 9) Se revela la muestra. (tiempo de revelado ajustable)
- 10) Enjuague con agua desionizada y secado con N_2 .

Las muestras obtenidas para la caracterización de parámetros de exposición y revelado se muestran en las figuras 35-37, donde el tiempo de exposición óptimo para franjas mejor definidas fue de 1 segundo con tiempos de revelado de 15 a 20 segundos para las muestras, en donde sólo hay resina depositada sobre el sustrato de vidrio y resina.

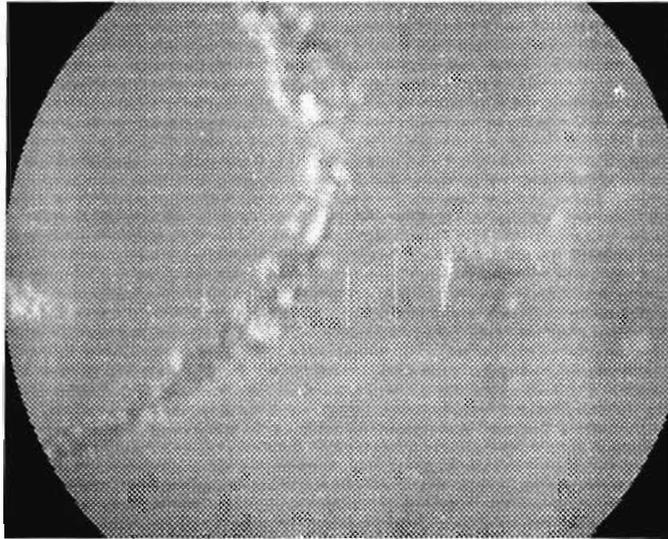


Figura 35.- Muestra de vidrio con resina expuesta a UV durante 2 seg., revelado de 15 seg.

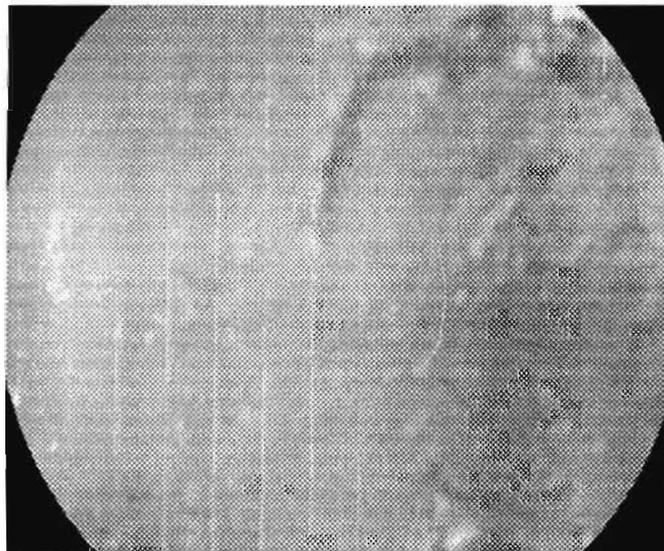


Figura 36.- Muestra de vidrio con resina expuesta a UV durante 2 seg., revelado de 10 seg.

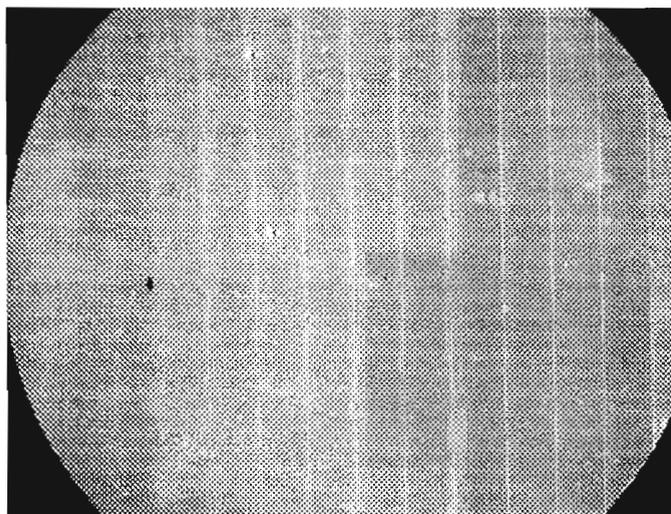


Figura 37.- Muestra de vidrio con resina expuesta a UV durante 1 seg., revelado de 20 seg.

Después de haber caracterizado el proceso fotolitográfico sobre muestras de vidrio previamente depositadas con resina fotosensible, se hicieron pruebas ahora con muestras con Aluminio evaporado.

Ahora bien, para las muestras con aluminio los tiempos de exposición en la máquina alineadora de rayos UV cambiaron debido a las condiciones de la muestra. Se hicieron diversas pruebas con muestras de aluminio concluyendo que el tiempo ideal de exposición era de 4 segundos y un tiempo de revelado de 20 a 30 segundos dependiendo de la resolución de los canales en la muestra (observada en el microscopio después del revelado).

Se siguió con el proceso convencional de fabricación de guías de onda para grabar los canales en la capa de aluminio. Resumiendo (ver sección 3.2.3.B): Una vez expuesta la resina a los rayos UV y después de ser revelada, se hace el ataque químico sumergiendo la muestra en ácido ortofosfórico.

El ataque químico del aluminio se llevó a cabo calentando el ácido en baño maría hasta haber obtenido una temperatura de 40 °C, se introdujeron las muestras, observándose que algunas de ellas necesitaban más tiempo de revelado. Se observó también que el revelador, al ser alcalino, se podía utilizar en lugar del ácido, cuidando de no pasarse de

tiempo ya que el revelador carcome las orillas de las franjas impresas. Las muestras atacadas listas para intercambio iónico se muestran en las figuras 38-42. Las franjas que se observan oscuras en las figuras corresponden al aluminio. En los canales claros, en donde el aluminio fue atacado, se llevará a cabo el intercambio iónico.

Los canales de aluminio en las muestras (ver las figuras 38, 39, 40 y 41) son de diferente ancho ya que los motivos impresos de la mascarilla varían desde 200, 100, 50, 20, 15 y 10 micras. En la figura 38 se muestran canales de aluminio con anchos de 200 y 100 micras y en la figura 39 los canales son de 200 micras. En ambas figuras se observan canales rotos ya que no se tuvo una buena adherencia de aluminio en esas zonas probablemente por falta de limpieza durante el proceso, las manchaduras que se observan en la parte clara corresponden a impurezas en el objetivo del microscopio (con el que se sacó la fotografía de la muestra).



Figura 38. - Muestra 1 con canales en Aluminio lista para intercambio iónico.



Figura 39.- Muestra 2 con canales en Aluminio lista para intercambio iónico

En las figura 40 se muestran los canales de aluminio con ancho de 15 micras aproximadamente. En donde nuevamente algunos canales están rotos debido probablemente a la falta de limpieza tanto en el sustrato, como la limpieza del laboratorio de fotolitografía (cuarto limpio) y de la evaporadora.

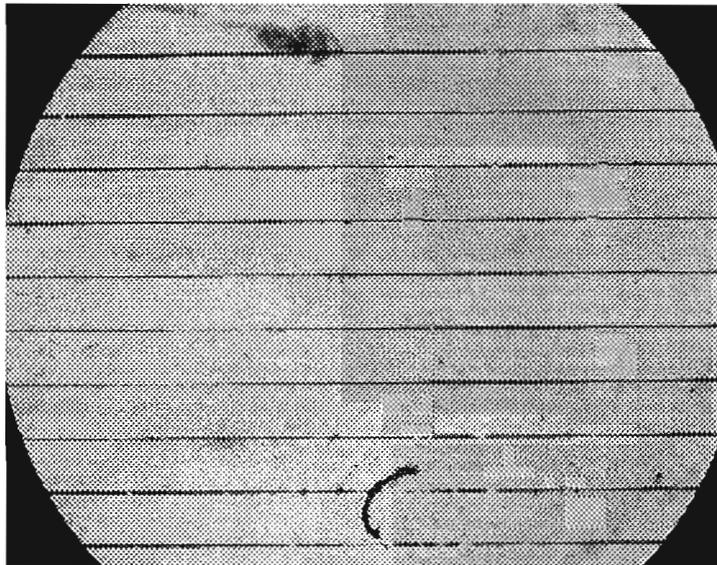


Figura 40.- Muestra 3 con canales en Aluminio lista para intercambio iónico

En la figura 41 se observan canales de aluminio de ancho de 15 micras, se muestran "manchas" entre los canales, también probablemente debido a la falta de limpieza durante el proceso tanto de la muestra o bien del laboratorio de fotolitografía.

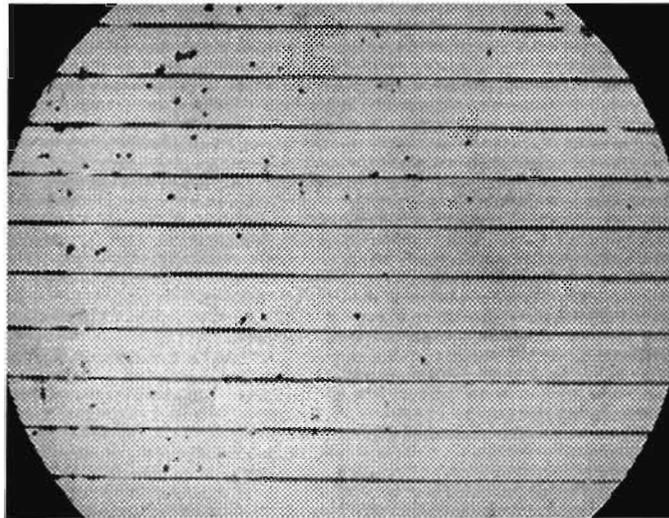


Figura 41.- Muestra 4 con canales en Aluminio lista para intercambio iónico

En la figura 42 se muestran canales de ancho de 15 micras, donde se observa una rayadura en el vidrio, probablemente hecha durante la manipulación de la muestra, las manchas circulares en la superficie, esto es debido a que con el spinner no se obtuvo un espesor homogéneo

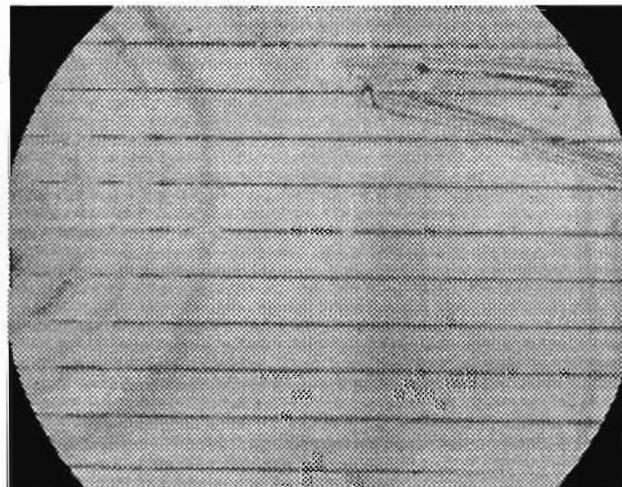


Figura 42.- Muestra 5 con canales en Aluminio lista para intercambio iónico

4.1.4.- Intercambio Iónico de Sales

Para el intercambio iónico de sales se utilizó un horno (ver figura 43), donde se derritieron las sales de nitrato de potasio (KNO_3) en las cuáles se introduce la muestra para realizar el intercambio de iones con los iones de Sodio (Na^+) del vidrio de la muestra preparada. El horno está controlado electrónicamente para mantener una temperatura constante durante el tiempo deseado. En el caso de las sales de Nitrato de Potasio (KNO_3) el “melting point” (punto de derretimiento) está 334°C [3]. Una vez encendido el horno se espera a que se estabilice el sistema y éste alcance la temperatura deseada (380°C) para realizar el proceso. Ya alcanzada la temperatura y que esta este constante en el horno según marque el indicador de temperatura electrónico, se procede a bajar poco a poco la muestra después de que las sales se hayan derretido por completo. La muestra se sumerge en el baño de sales, el cual se mantiene a 380°C .

Como se mencionó en el capítulo 2 en la sección 2.2; el principio del intercambio iónico se realiza a temperaturas T_g (temperatura de transformación) del vidrio, para los cuales los iones de los óxidos modifican la red. La temperatura de 380°C , cumple con los requisitos para que se lleve a cabo el intercambio iónico de sales, habiendo escogido las sales de nitrato de potasio (KNO_3), porque estas tienen un muy bajo “melting point” (punto de derretido), lo cual permite intercambiar temperaturas por debajo de la temperatura de transformación del vidrio.

Siguiendo la referencias [4] y [26] el tiempo del el intercambio iónico fue de 6 horas. Después de haber transcurrido el tiempo de intercambio iónico, el sistema se apaga, y esperando a que se baje poco a poco la temperatura, se va subiendo la muestra sin sacarla del horno hasta que la muestra alcance la temperatura ambiente y así evitar que se rompa debido a un shock térmico.

Se saca la muestra y se enjuaga con abundante agua para quitar los residuos de sal adheridos a la superficie durante el proceso. Se seca con nitrógeno (N_2) comprimido

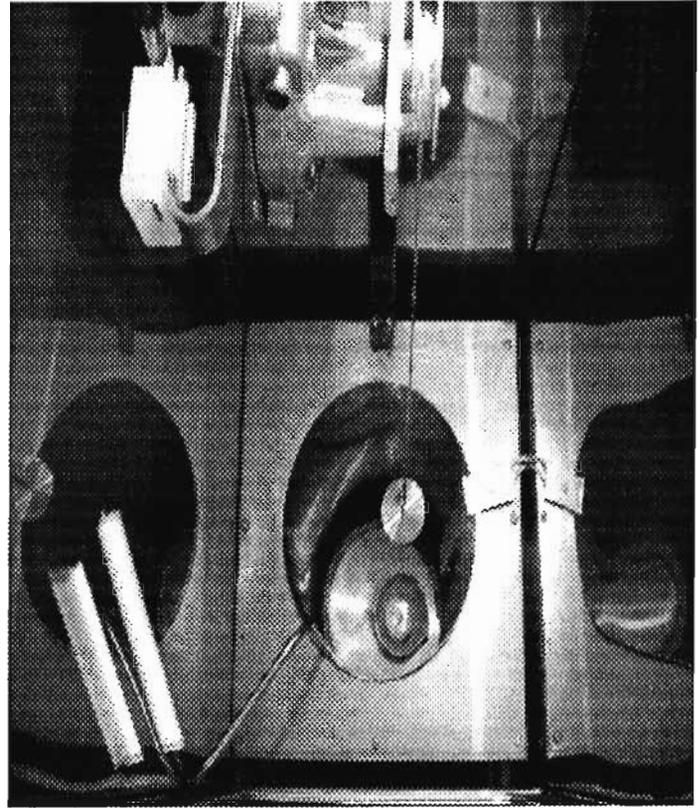
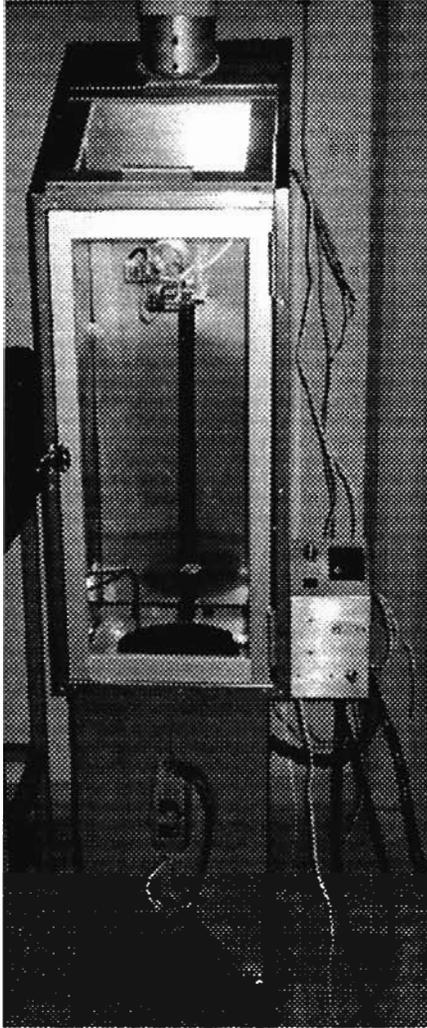


Figura 43.- Horno para intercambio iónico de sales
(vista externa e interna)

4.1.5.- Eliminación del material de barrera, corte y pulido.

Una vez intercambiada la muestra, se pulen de canto los dos extremos de la muestra, como se muestra en la figura 44. Dichos extremos, perpendiculares al canal intercambiado, son por los que se acopla la luz. El pulido se lleva a cabo utilizando un disco giratorio bajo un flujo constante de agua. La muestra se enjuaga (en el flujo de agua) constantemente durante el proceso para eliminar impurezas, además se deben usar guantes para manipular la muestra para evitar accidentes (heridas en la piel), así como para no rayar la muestra.

Primeramente, se inclina la muestra en un ángulo de 45° para acortar el área del pulido, (ver figura 45). Se usan unos discos abrasivos (lijas) de $60\mu\text{m}$ y $20\mu\text{m}$. Después unos discos de grano de $12\mu\text{m}$, $3\mu\text{m}$, $0.3\mu\text{m}$ y $0.1\mu\text{m}$. Finalmente, el aluminio se retira con un baño de ácido Ortofosfórico (hasta que desaparezca el Aluminio). La calidad del pulido se verifica con un microscopio de alta resolución ($\times 1000$).

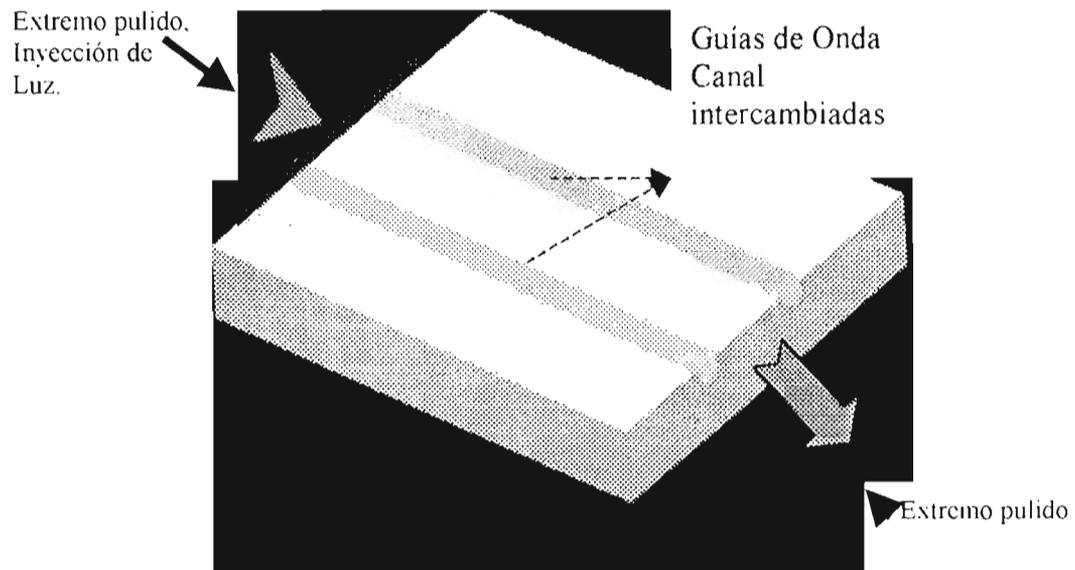
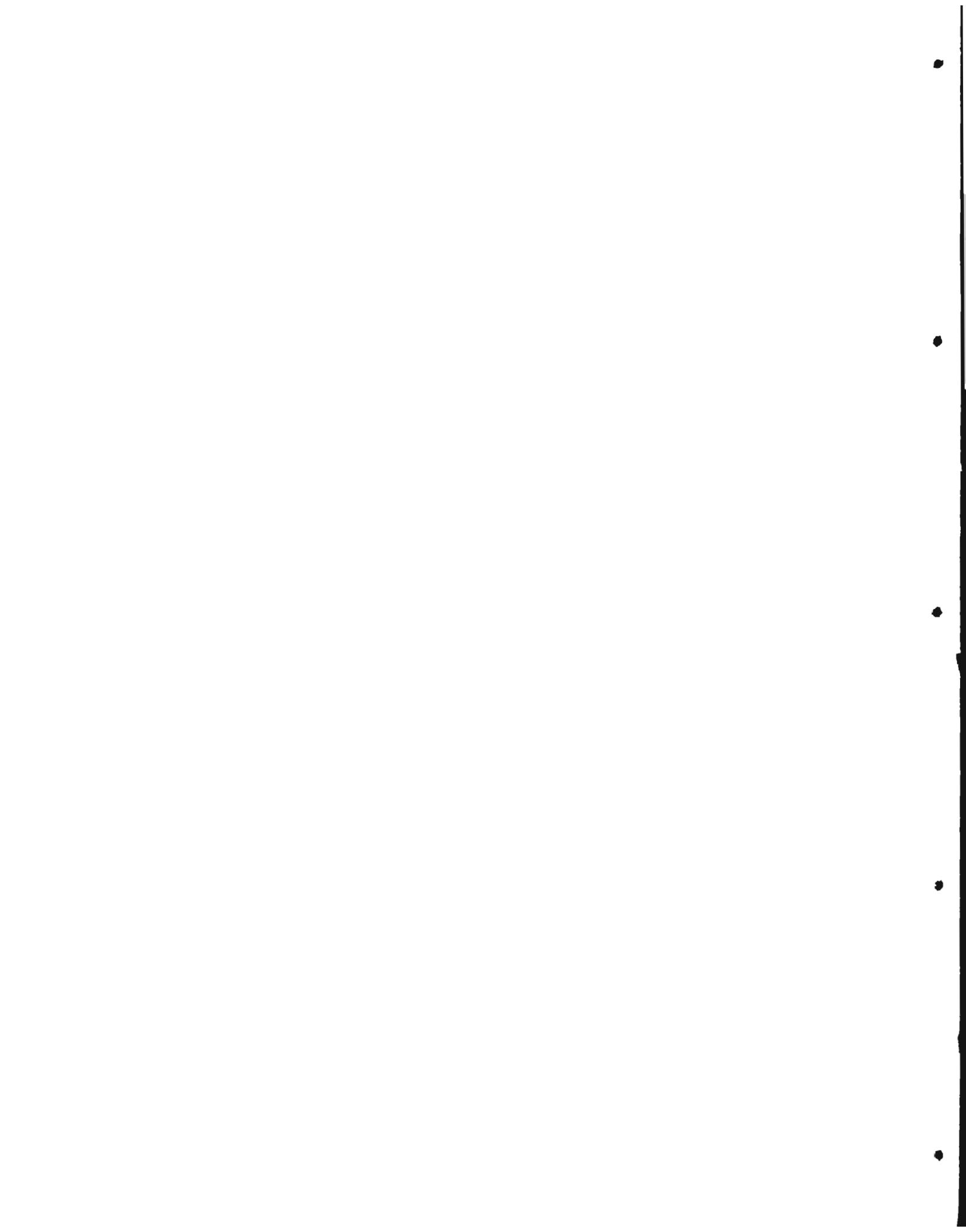


Figura 44.- Diagrama de Guías de Onda Canal Intercambiadas

Al realizar el pulido se debe ser muy cuidadoso ya que si alguno de los extremos no se pule de manera adecuada, la caracterización de las guías de onda no será aceptable y por lo tanto no se podrá acoplar la luz en las guías fabricadas o bien se tendrán pérdidas de acoplamiento.



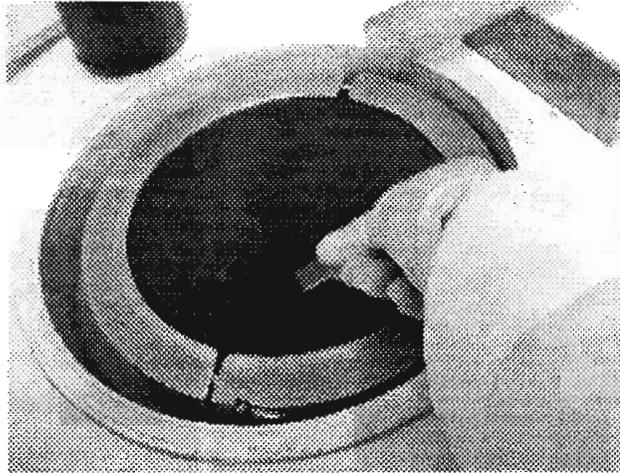


Figura 45.- Proceso de pulido de una muestra utilizando un disco giratorio.

Ahora bien, después de realizar el proceso de pulido descrito en los pasos anteriores, se tienen las guías de onda canal confinadas, las cuales debido a la transparencia del vidrio resulta difícil observarlas a simple vista o por el microscopio. Es por ello que se ideó interponer la superficie de las muestras a un haz de láser He-Ne ($\lambda=632.8 \text{ nm}$) para observar el láser transmitido proyectado en la pared. Esto nos permitió apreciar la forma de los canales.

Las guías de onda canal se muestran a continuación en las figuras 46- 49.

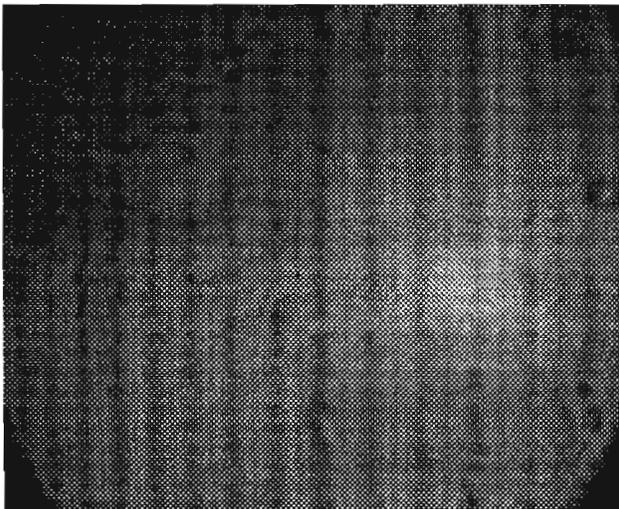


Figura 46.- Guías de Onda Canal Confinadas
1. proyectadas con láser
(vista externa e interna)

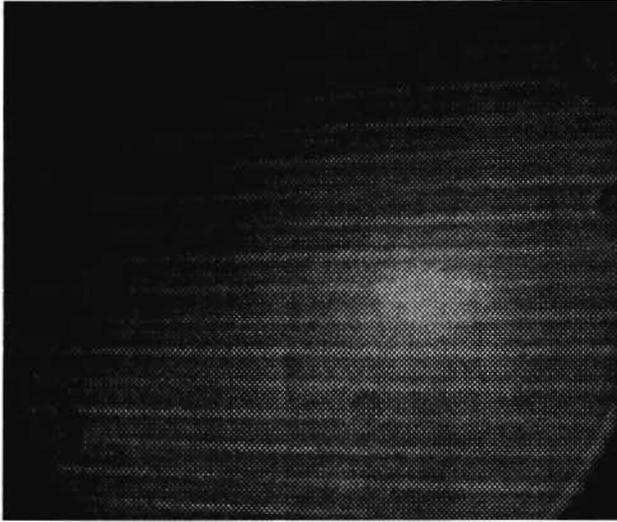


Figura 47.- Guías de Onda Canal Confinadas
2. proyectadas con láser

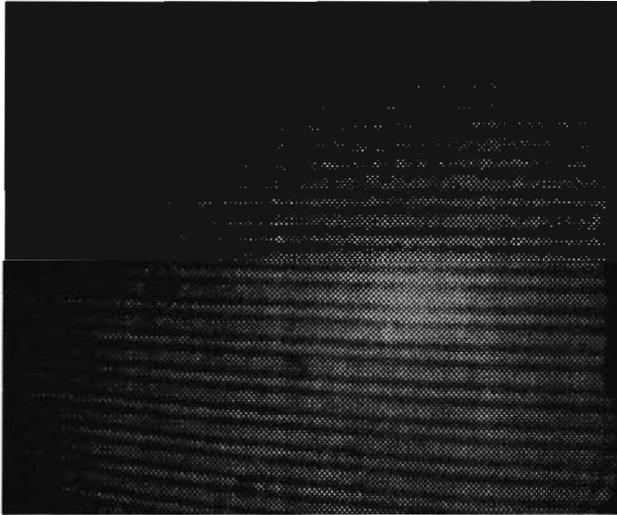


Figura 48.- Guías de Onda Canal Confinadas
3. proyectadas con láser



Figura 49.- Guías de Onda Canal Confinadas
4. proyectadas con láser

Como se observa en las figuras anteriores, las guías de onda canal tienen partes defectuosas debido a las condiciones en el laboratorio, tales como falta de limpieza o de un spinner adecuado para tener un espesor de resina uniforme. Por lo tanto, algunos de los canales no están bien definidos o bien se tienen impurezas en la muestra.

En la figura 46 se puede observar que los canales no están definidos. Esto pudo haber sido a un proceso de fotolitografía deficiente. Al parecer el revelador atacó los canales en las orillas por exceso de tiempo de revelado o falta de tiempo de exposición. En la figura 47 los canales de las guías están mejor definidos que los de las guías de la figura 46, se observa que a comparación de la figura 49, los canales son más delgados y no están rotos, es decir hubo mayor limpieza en el proceso de fabricación de la guía de la figura 46 en comparación de la guía de la figura 49.

Mientras que en la figura 48 se observan canales mejor definidos, estas no se fabricaron en este proyecto, provienen del IMEP Laboratorio de Grenoble, Francia [4] y se utilizaron para comparar los resultados obtenidos en este proyecto.

Se utilizó inicialmente en el proceso de fotolitografía la resina fotosensible AZ®5214-E, la cual tiene la propiedad de poder utilizarse tanto positiva como negativamente. Los parámetros involucrados son: temperatura y tiempos de pre-horneado, velocidad del spinner y tiempo, primer tiempo de exposición e intensidad, temperatura del post-horneado y tiempo, tiempo de enjuague (con agua desionizada), solución del revelado y tiempo de revelado [31].

Con la finalidad de obtener anchos de canal más pequeños grabados en la resina depositada en el substrato, se optó por realizar el proceso para lograr el negativo de la resina. Después de haber depositado la resina y realizado un horneado de 30 minutos, se expone la muestra usando la máquina alineadora de rayos UV.

Antes de revelarse como habitualmente se hacía, se realizó un post-horneado de la muestra, en donde el parámetro crítico de este proceso era el controlar la temperatura del horno, la concentración del revelador y el tiempo de revelado [32]. El tiempo de horneado fue de 30 minutos, la temperatura del post-horneado fue de 112°C a 115°C. Se dejó enfriar la muestra

y se reveló utilizando el revelador AZ400K 1:3 en agua desionizada (1 de revelador, 3 de H₂O).

El proceso para lograr el negativo de la resina fotosensible AZ®5214-E (inicialmente positiva), no funcionó probablemente a que como la resina ya estaba caduca y perdió sus propiedades.

Aunque no se logró el negativo de la mascarilla observamos que cuando se vuelve a hornear la resina (post-horneado) está se hace más resistente y el patrón de canales obtenidos tiene mejor resolución. Se requiere aumentar el tiempo de revelado a 1 minuto aproximadamente y de ahí pasar al ataque con el baño de ácido ortofosfórico a 40°C, para grabar los canales en el aluminio. El ancho de los canales obtenidos se estimó usando un microscopio metalográfico por medio de una retícula óptica, los resultados se observan en las figuras 50-53, respectivamente.

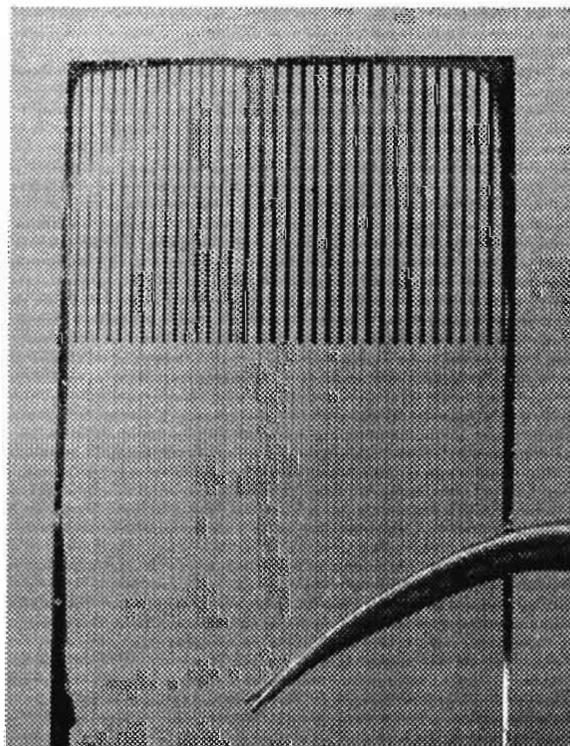


Figura 50.- Muestra 1 con Aluminio, después de ataque químico lista para intercambio iónico.

En la figuras 50 y 51 se observan las muestras (sin utilizar microscopio), obtenidas utilizando el método del “postbake”, y después del ataque químico. Se utilizaron diferentes motivos de la mascarilla, donde en la figura 50 se muestran tres tipos de canales de diferentes anchos: 205 μm , 105 μm , y 15 μm . En la figura 51 los canales son de los motivos más delgados de la mascarilla (10 μm)

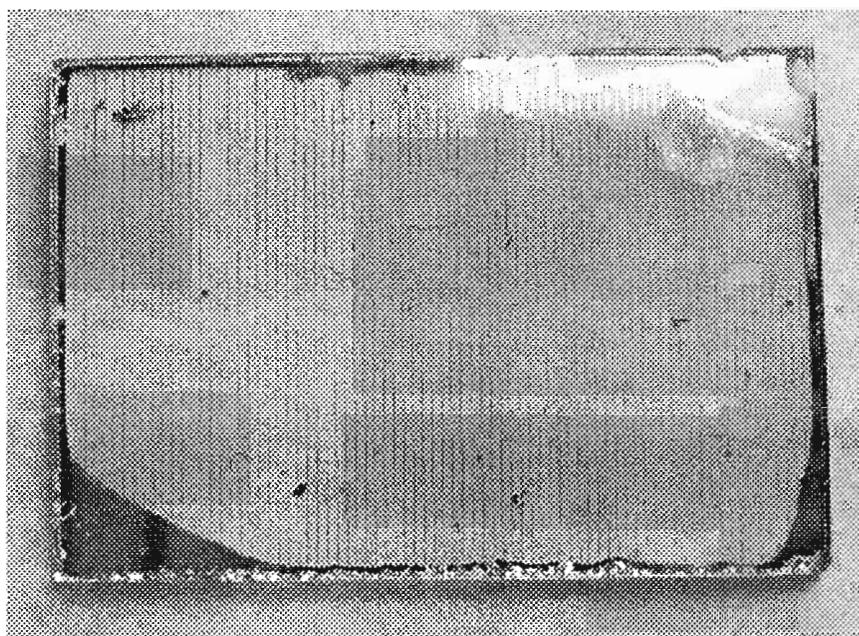


Figura 51.- Muestra 2 con Aluminio. después de ataque químico lista para intercambio iónico.

En las figuras 52 y 53 se muestran las vistas zoom de las muestras de las figuras 50 y 51 , al medir los anchos de los canales usando el microscopio metalográfico. Se pueden observar que los canales obtenidos en estas muestras están mejor definidos a comparación de los canales obtenidos sin haber utilizado el método del “postbake” ya que en las figuras 38 a 42 se observan canales rotos y mayor cantidad de impurezas en las muestras.

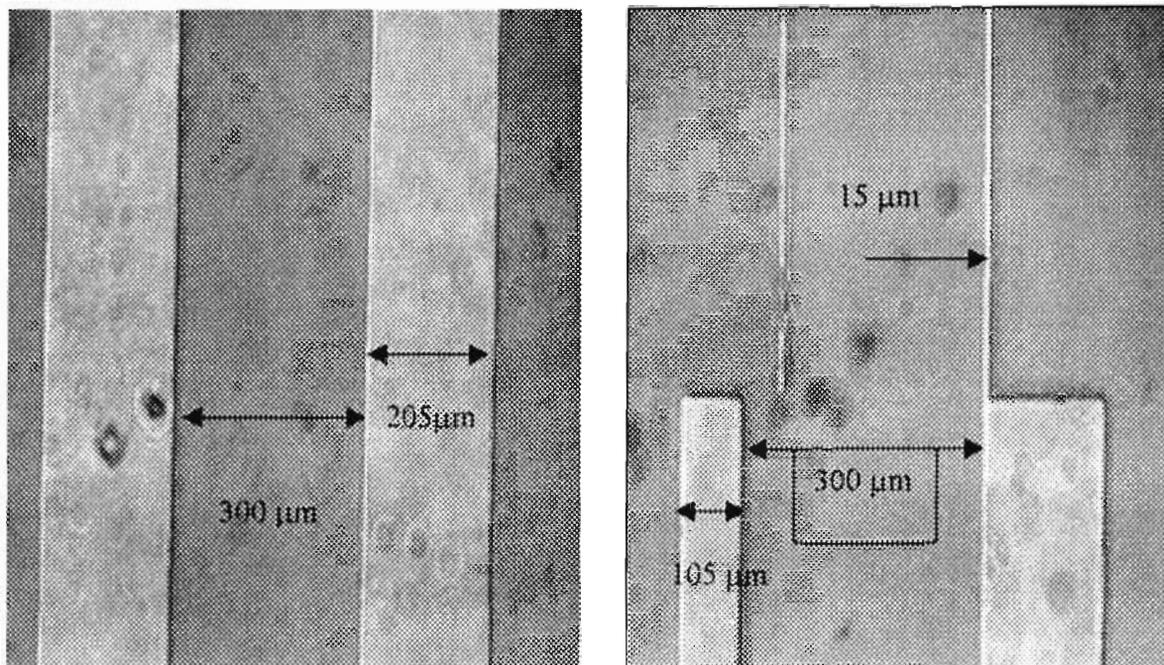


Figura 52.- Vista Zoom de Muestra 1, con periodos de $205\mu\text{m}$, $105\mu\text{m}$ y $15\mu\text{m}$ de ancho, separación de $300\mu\text{m}$ entre canales

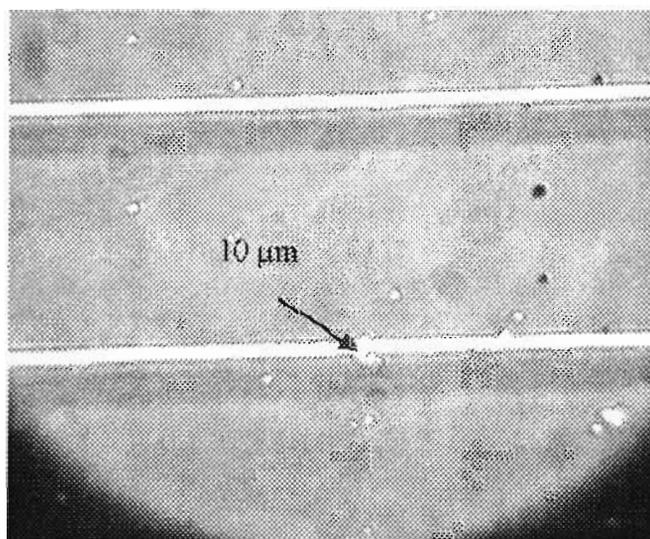


Figura 53.- Vista Zoom de Muestra 2, con ancho de canales de $10\mu\text{m}$.

4.1.6.- Caracterización de Campo Cercano

Habiendo fabricado diferentes muestras, se prosigue a su caracterización de campo cercano. Dicha caracterización permite observar si las guías fabricadas son monomodo a la longitud de onda de caracterización ($\lambda = 632.8\text{nm}$). Se montó un banco óptico de caracterización de campo cercano de guías de onda canal (ver figura 54), para observar los modos guiados por la muestra y poder determinar si las guías de onda eran monomodo o bien multimodo.

Un láser He-Ne ($\lambda = 632.8\text{nm}$) pasa por una densidad óptica que nos permite atenuar su intensidad. El láser es acoplado a la guía de onda canal mediante un objetivo de microscopio (20x). A la salida de la guía la señal es captada por otro objetivo de microscopio (20x) el cual dirige la señal a una cámara CCD que conectada a un monitor nos permite observar el campo cercano de la guía de onda caracterizada.

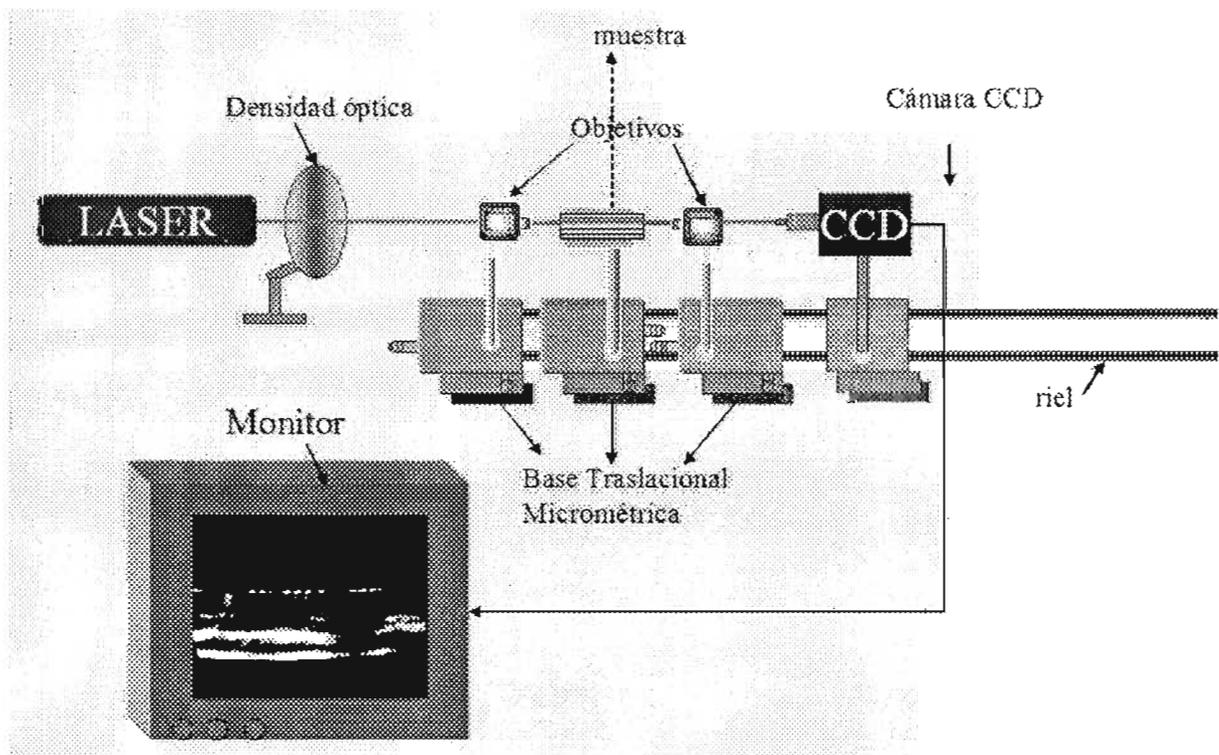
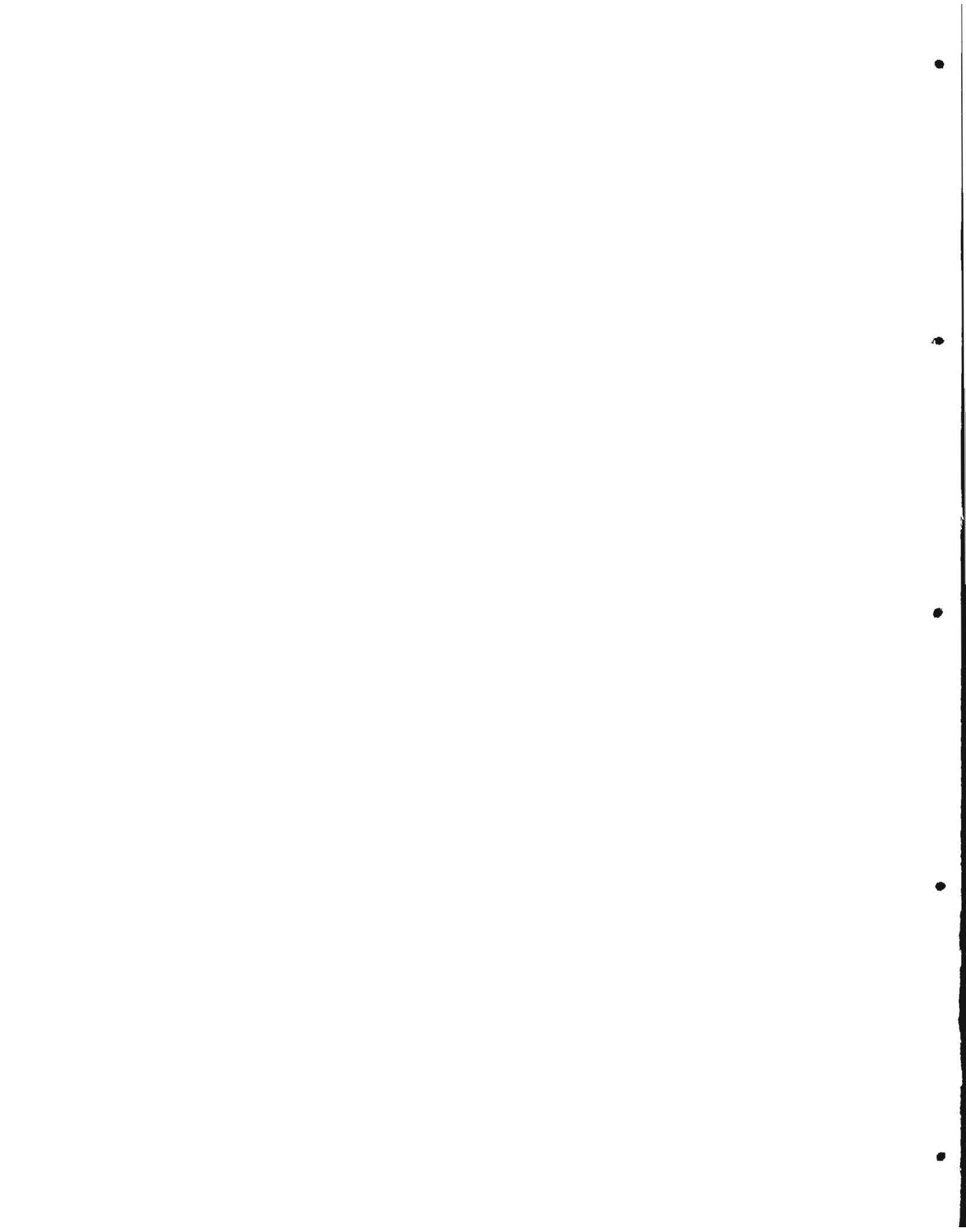


Figura 54.- Esquema de banco óptico de caracterización de campo cercano para guías de onda canal.



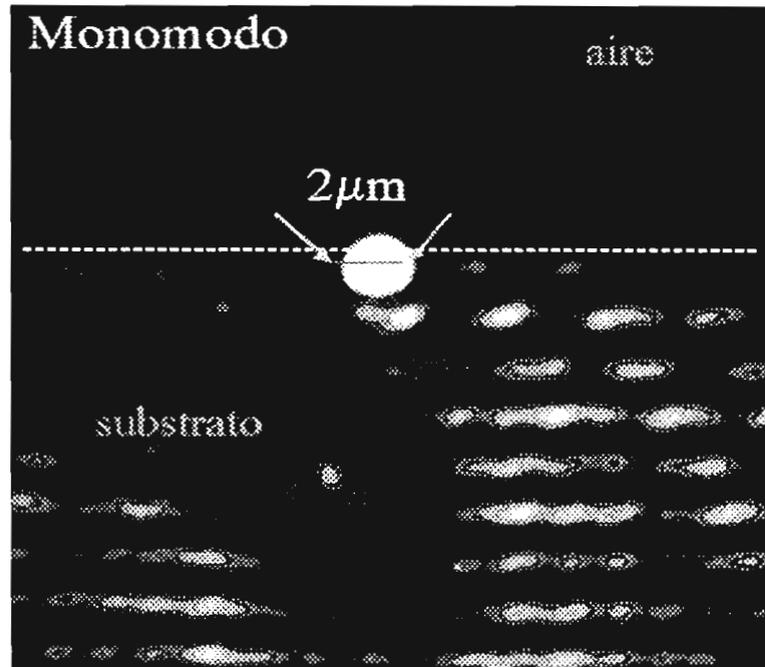


Figura 56.- Imagen de campo cercano de una guía canal monomodo para $\lambda = 638\text{nm}$ (ideal para acopladores direccionales)

4.2.- Método Interferométrico

En la sección 3.2 se planteó el proceso óptico en donde la implementación de un interferómetro permite obtener franjas de periodo variable, para fabricar guías de onda canal monomodo. No perdamos de vista que el ancho de canal deseado es de 2 a 5 μm , y que en un patrón interferométrico esto se traduce a tener franjas de interferencia con un periodo de 2 a 5 μm .

4.2.1.- Interferómetro Holográfico

Primeramente, se montó el interferómetro Holográfico que se muestra en el diagrama de la figura 16 (ver capítulo 3). En donde primeramente un haz filtrado de un Láser de Argón, $\lambda = 455\text{nm}$) se divide en dos usando un divisor de haz. Acto seguido, se

superponen los dos haces que interfieren entre sí, en un plano donde se coloca una muestra previamente depositada con una película fotosensible, en la cual se graba el patrón de interferencia dado por la interferencia entre ambos. La longitud de camino óptico entre ambos haces debe ser igual para obtener interferencia grabada sobre la resina [11]

Después de varias pruebas para caracterizar los parámetros tanto del tiempo de exposición como del tiempo de revelado de la resina se obtuvieron franjas de interferencia, en las muestras expuestas, como se puede observar en las imágenes de las figuras 57-60. Los tiempos de exposición para la resina fotosensible AZ®5214-E, fueron de 1hr con un revelado de 10 a 20 segundos aproximadamente, con una corriente máxima de 25 mA y con una potencia máxima de 45 mW para cada una de las muestras de las figuras 57-60.

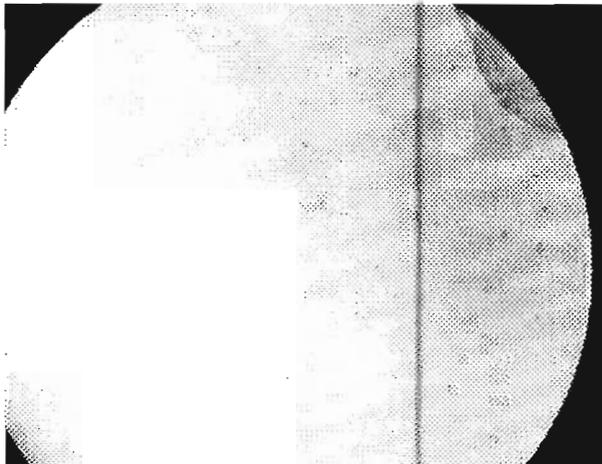


Figura 57.- Franjas de interferencia 1

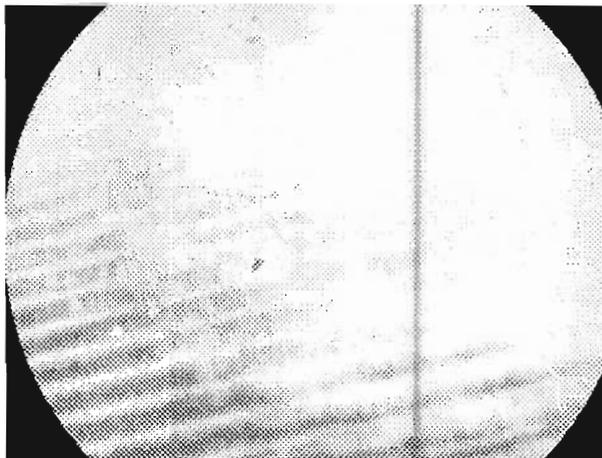


Figura 58.- Franjas de interferencia 2

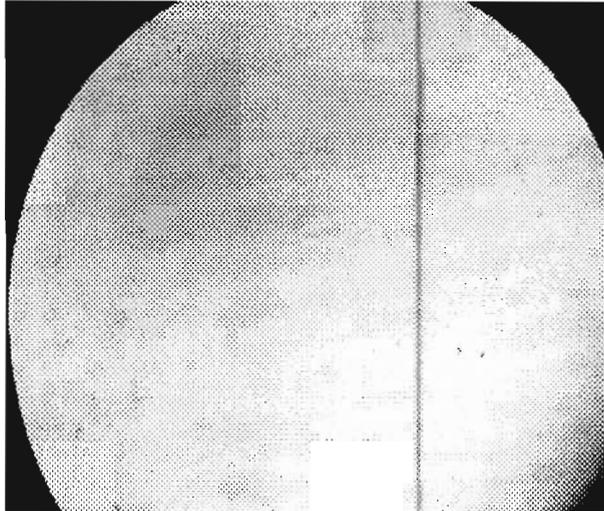


Figura 59.- Franjas de interferencia 3

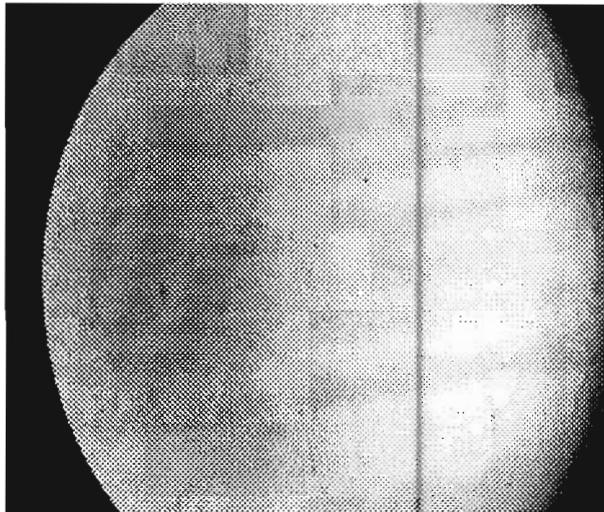


Figura 60.- Rejila de Difracción 4

Las franjas obtenidas ya reveladas, se observaron con un microscopio metalográfico. Los periodos estimados de las franjas de interferencia obtenidas, usando una retícula graduada en el microscopio metalográfico, fueron de $3.0 \mu\text{m}$ y $3.6 \mu\text{m}$ respectivamente. Cabe señalar que perpendiculares a las franjas de interferencia, aparecen además franjas de difracción debidas a los bordes de los implementos ópticos (divisores de haz, espejos, etc), superpuestas sobre el patrón final como se observan en las figuras 61 y 62. Cuando estos patrones se examinaron con un láser para observar sus efectos dispersores, las franjas de interferencia producían puntos luminosos, pero las franjas de difracción, producían ruido (ver Fig. 63).

En la figura 61 se observan franjas de interferencia perpendiculares a las franjas de difracción en una sola muestra, en donde el ancho de canal estimado fue de $3 \mu\text{m}$.

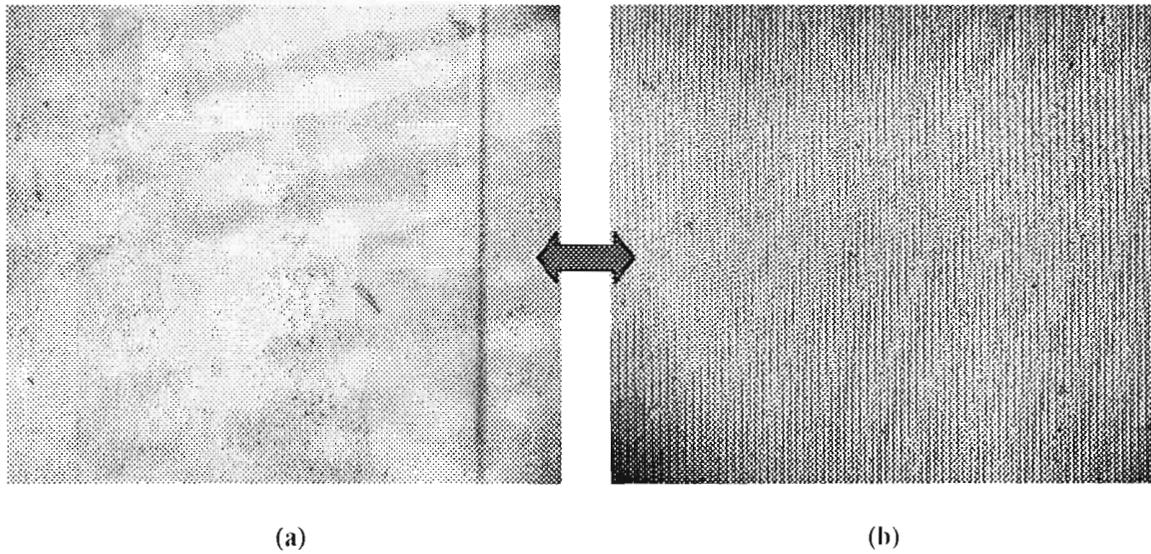


Figura 61.- (a) Franjas de difracción muy visibles. (b) franjas de Interferencia sobre una sola muestra expuesta a Interferómetro Holográfico con ancho de canal de $3 \mu\text{m}$.

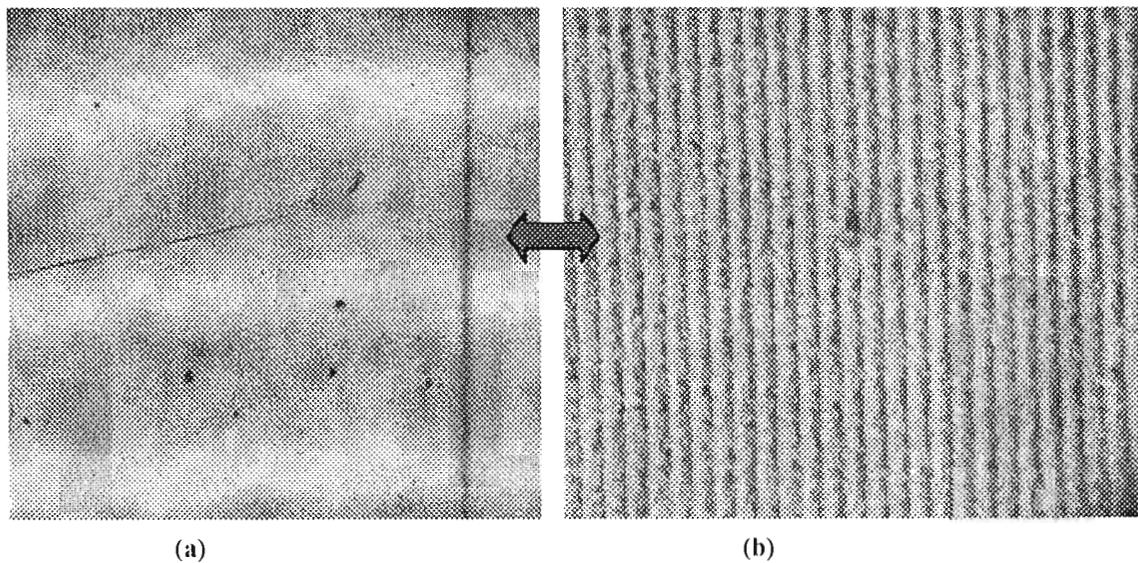


Figura 62.- (a) Franjas de Difracción 2. (b) franjas de Interferencia sobre muestra expuesta a Interferómetro Holográfico con periodo de $3.6 \mu\text{m}$.

En la figura 62 se observa igualmente una muestra donde se tienen franjas de interferencia perpendiculares a las franjas de difracción, donde el ancho de canal es más grande en comparación a la figura 62, este fue estimado de $3.6 \mu\text{m}$. Donde ambas figuras no tienen la misma escala la figura 61 se observó con un objetivo de microscopio 50x mientras que la figura 62 se observó con un objetivo de microscopio 100x.

Debido a que las franjas obtenidas, tanto de difracción como de interferencia sobre la muestra son del orden de micras, después del revelado de cada muestra para saber si se obtuvieron o no franjas en la muestra se verificaron los patrones de difracción. Se hizo incidir un haz de láser (Argón de longitud de onda sintonizable, $\lambda = 455\text{nm}$) sobre las muestras, los patrones de difracción de algunas de las muestras se observan en las figuras 63-65.

En las figuras 63 a 65 se observan “puntos” difractados por el haz, unos perpendiculares a otros tales como se muestra en el diagrama de la figura 66, en donde el patrón vertical corresponde a las franjas de interferencia y el patrón horizontal corresponde a las franjas de difracción.

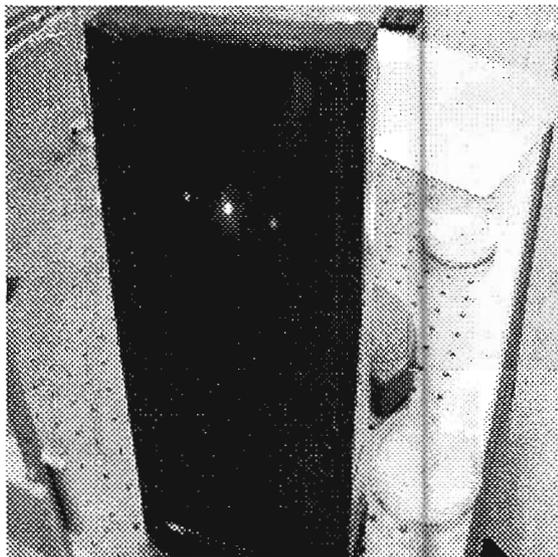


Figura 63.- Patrón de Rejilla
I fabricada con Interferómetro
Holográfico

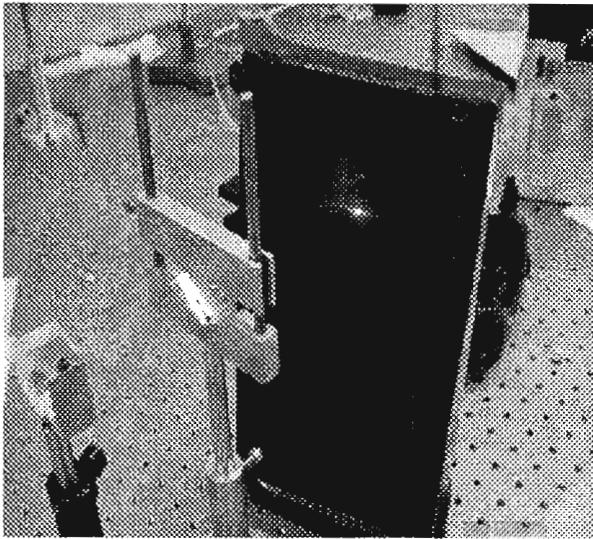
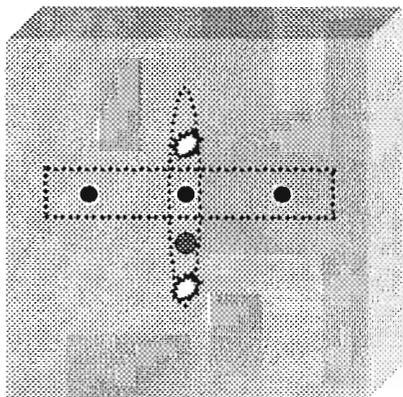


Figura 64.- Patrón de Rejilla 2
fabricada con Interferómetro Holográfico



Figura 65.- Patrón de Rejilla 3
fabricada con Interferómetro
Holográfico



Difracción



Interferencia

Figura 66.- Diagrama de
patrones de difracción
proyectados en una
pantalla

Una vez probado el sistema holográfico y habiendo fabricado las rejillas en resina depositada en un substrato de vidrio, se procedió a hacer el filtraje de las salidas de los dos haces del láser para evitar el efecto de difracción que pudiera haber sobre la muestra.

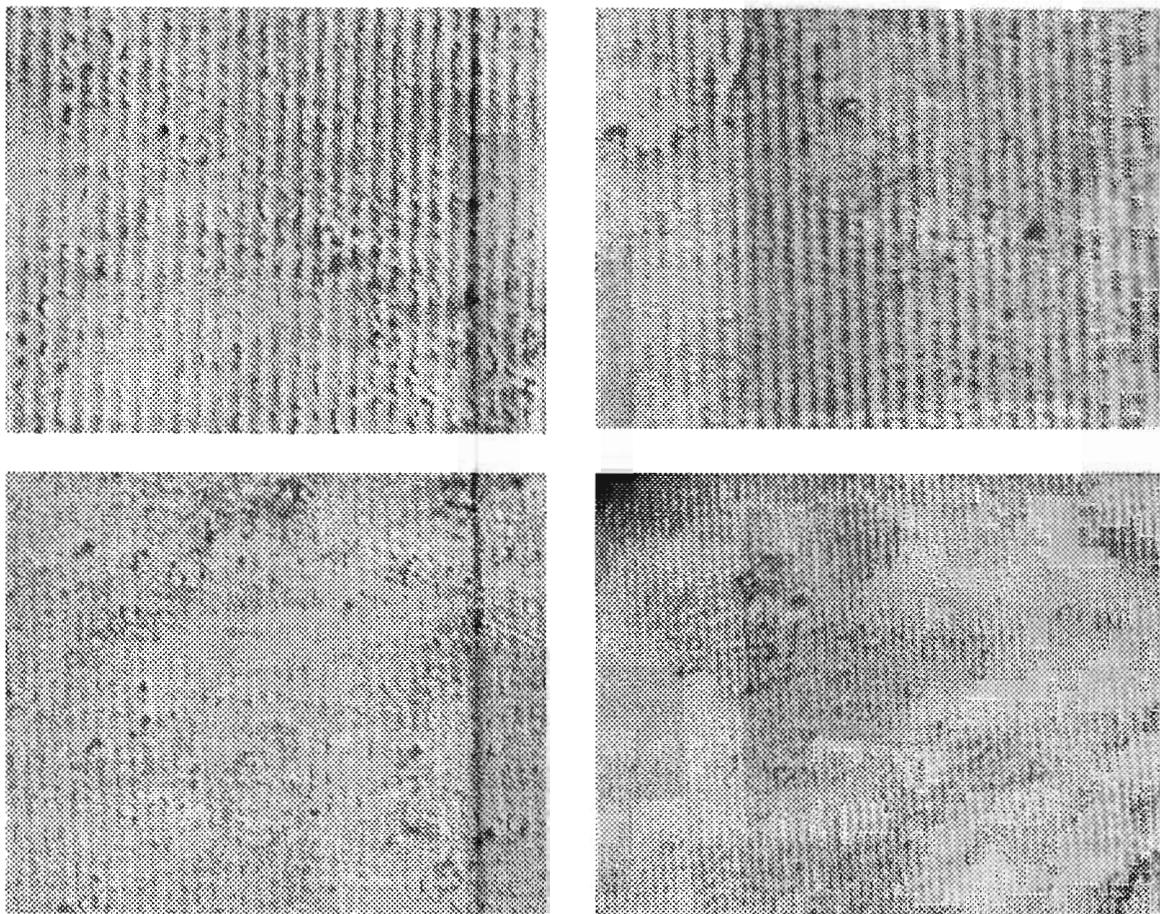


Figura 67.- Vistas de una muestra de vidrio con Al, expuesta al interferómetro Holográfico, lista para realizar ataque químico, con periodo de franjas de $1.6 \mu\text{m}$.

Ya optimizado el sistema, se procedió a hacer una exposición sobre resina depositada sobre una película delgada de Aluminio (material de barrera) que a su vez se depositó, previamente , en un substrato de vidrio; para grabar el patrón de interferencia (franjas claras y oscuras). Los resultados obtenidos en la muestra expuesta se muestran en

la figura 67, donde se observan diferentes partes de la muestra (vistas) donde se encuentran los canales obtenidos de ancho de canal estimado de $1.6 \mu\text{m}$.

Después de exponer la muestra y tener revelada la resina, se prosiguió a realizar el ataque usando un baño de ácido ortofosfórico a 40°C . El tiempo de ataque fue muy largo, se dejó la muestra por más de ocho horas controlando su temperatura, y observando los resultados, hasta que la superficie de la muestra no presentara cambio ante el ataque químico. La figura 68 muestra como el ácido ortofosfórico atacó por capas la muestra preparada, donde debido a la inhomogeneidad del aluminio sobre la superficie, así como a la falta de homogeneidad del depósito de la capa de resina fotosensible (spinner no adecuado), solo partes de la muestra se atacaron y otras permanecieron intactas.

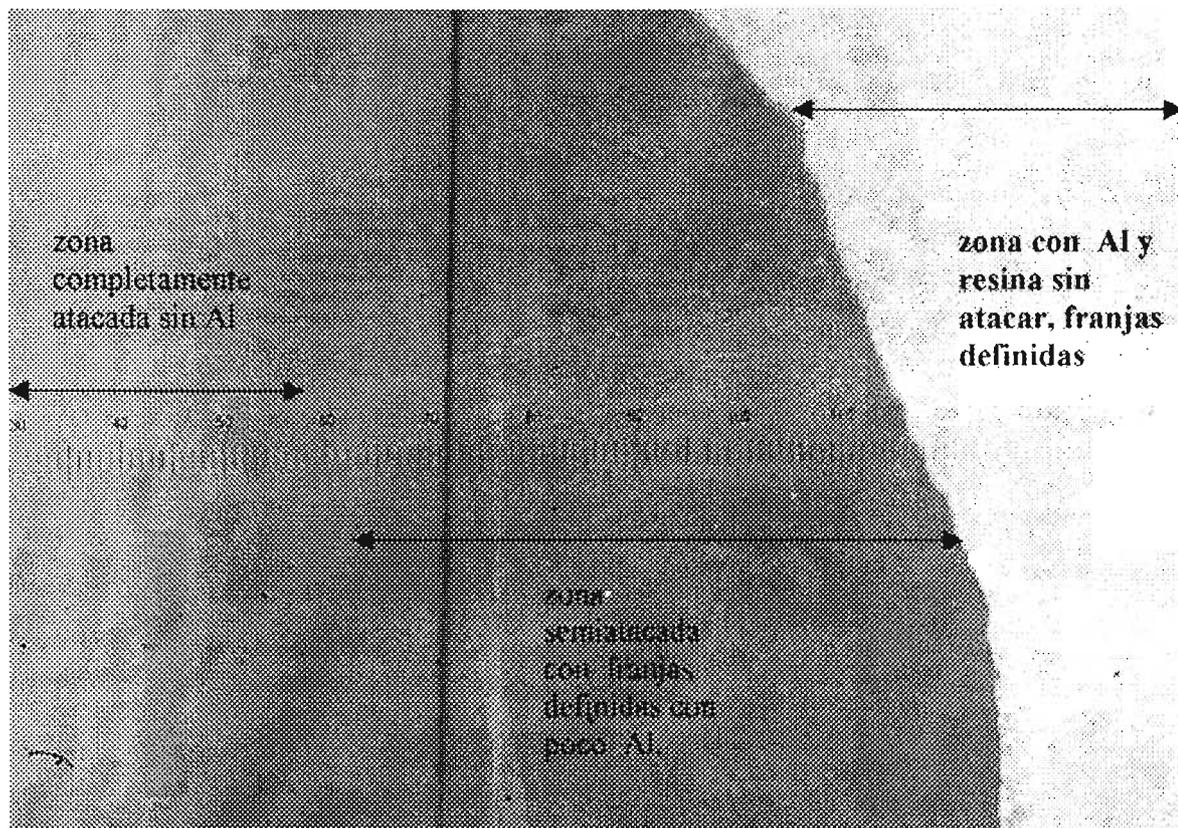


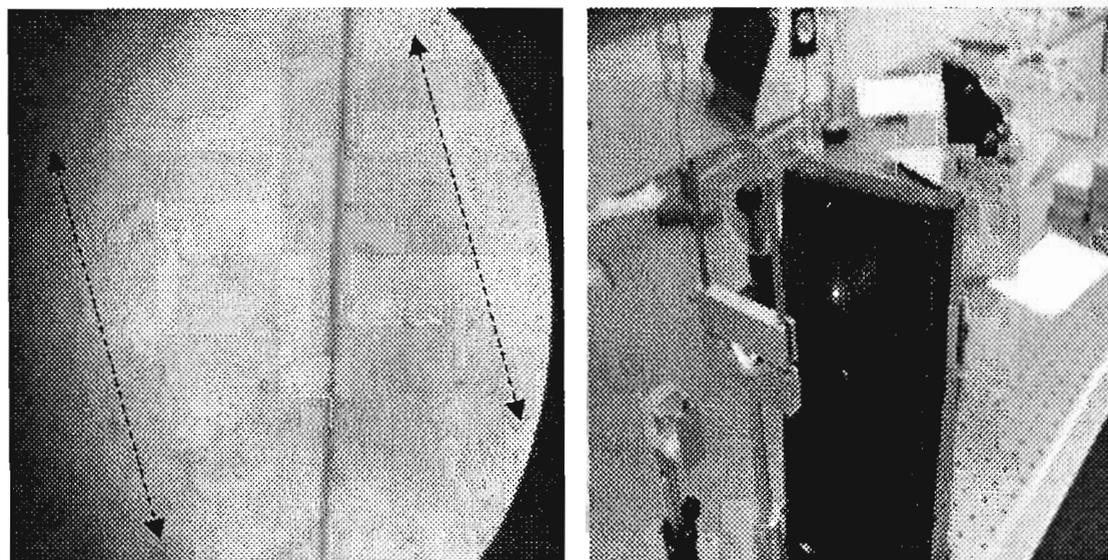
Figura 68- Muestra expuesta a Interferómetro Holográfico. después de ataque químico.

Por lo anterior, se recomienda vigilar el espesor de las capas depositadas de aluminio sobre las muestras a exponer, utilizar un buen spinner, darle más tiempo de exposición a la muestra con el sistema de Interferencia Holográfico (más de una hora, con el láser de Argón $\lambda = 455\text{nm}$, con una potencia de salida de 45mW), cuidando de no pasar de tiempo límite para que los canales estén bien definidos, ya que estos tienden a engrosarse y juntarse entre sí cuando se excede de tiempo de exposición

Lo anterior es con el objetivo de lograr un grabado adecuado de patrón de franjas de interferencia, sobre todo debido a la resolución que se necesita, del orden de $2\ \mu\text{m}$.

4.2.2.- Interferómetro por División de Frente de Onda

Debido a la posición de las partes que forman el Interferómetro Holográfico que se muestra en la figura 16 (capítulo 3), el ángulo θ entre los dos haces, está restringido por un límite donde los espejos se interponen entre sí y el área de exposición se reduce a su mínimo. El ángulo θ es fundamental para calcular el periodo entre las franjas del patrón de interferencia. (Ver figura 16), como se muestra en la ecuación (39).



(a)

(b)

Figura 69.- (a) Rejilla obtenida usando Interferómetro por División de Frente de Onda (1 hora de exposición).
(b) patrón de difracción al hacer incidir un haz del láser

Por ello se decidió implementar un Interferómetro de por División de Frente de Onda (ver figura 17), el cual usando una mesa giratoria (que sostiene la muestra a exponer) nos permite variar el ángulo entre los haces y así variar el periodo deseado de las franjas del patrón de interferencia [29]

Las pruebas que se realizaron para optimizar este sistema óptico, fueron de exposiciones sobre resina depositada en substratos de vidrio. Ver figura 69.

El láser que se utilizó (Argón de longitud de onda sintonizable), tiene su máxima potencia en $\lambda = 514\text{nm}$, para realizar los experimentos se utilizó la línea en $\lambda = 455\text{nm}$ debido a que el rango de absorción de la resina "AZ®5214-E i-Line Photoresist" está entre 365 y 405 nm. Los parámetros de exposición óptimos para un espesor de resina de 1 μm fueron de 1 hora y para el revelado fue de 20 a 30 segundos aproximadamente.

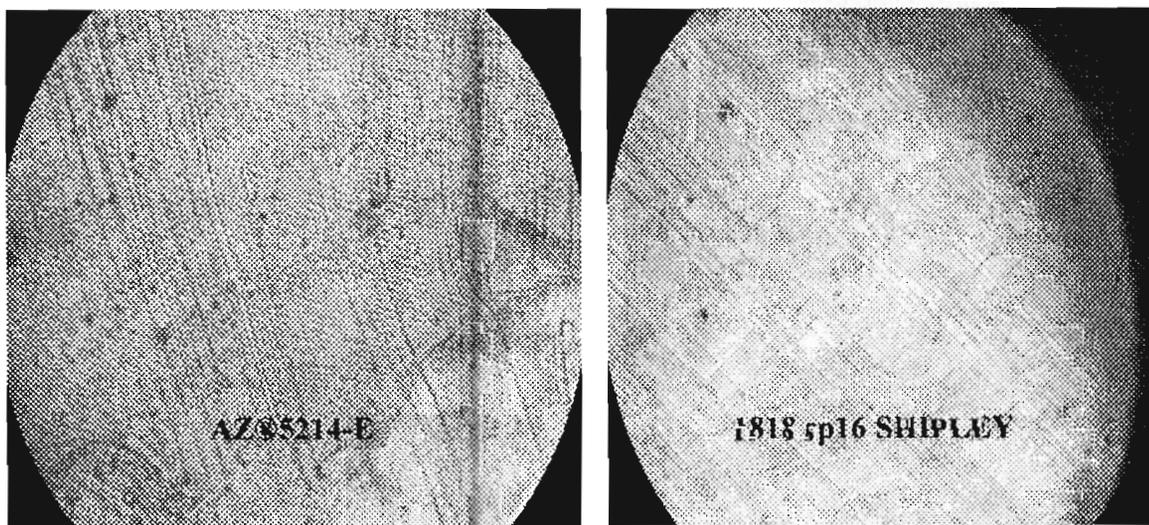


Figura 70.- Patrones grabados para dos muestras de vidrio, una con resina AZ®.5214-E y la otra con 1818 sp16 SHIPLEY.

Además de utilizar la resina “AZ®5214-E i-Line Photoresist”, se probó una nueva resina la “1818 sp16 SHIPLEY” [33], con la cual se esperaba mejorar los resultados hasta ahora obtenidos. Debido a que, además de ser nueva, presenta una absorción dentro del rango de 350 a 450nm. Al depositar resina con un espesor de 1.3 μm sobre un sustrato de vidrio, los tiempos de exposición se redujeron a la mitad, facilitando el proceso de exposición así como de resolución de franjas.

Usando esta nueva resina el tiempo de exposición fue de 30 minutos y el tiempo de revelado de 10 a 20 segundos, aproximadamente.

Con el fin de contraponer ambas resinas en la figura 70, se observan los resultados obtenidos con cada una de ellas de exposiciones en resina sobre sustratos de vidrio.

Los resultados obtenidos con la nueva resina “1818 sp16 SHIPLEY” y el “Microposit CD30 developer” (revelador) fueron satisfactorios para obtener un patrón de franjas definidas y periódicas, en menor tiempo de fabricación (exposición).

Comparando los dos sistemas ópticos utilizados para grabar el patrón de franjas de interferencia sobre una muestra de resina fotosensible, ambos sirven para realizar un proceso alternativo de fabricación de rejillas de difracción de propósitos generales.

En donde el Interferómetro Holográfico presenta la desventaja de que no se puede controlar con precisión el periodo de las rejillas de difracción, por lo que las rejillas de difracción obtenidas presentan algunas partes difusas y no periódicas.

Mientras que el Interferómetro de por División de Frente de Onda presenta la ventaja de poder realizar rejillas de difracción mejor definidas debido al grado de libertad con el que se cuenta para manejar el ángulo de incidencia entre los haces por medio de la mesa giratoria (ver esquema, figura 17).

Sin embargo, para la fabricación de guías de onda canal se necesitan periodos muy pequeños de las franjas de interferencia, tales como el patrón de franjas obtenido con el Interferómetro Holográfico con el que se logró una resolución de franjas de periodo de hasta 1.6 μm , lo cual no se pudo lograr en el Interferómetro de por División de Frente de Onda, debido a que las franjas estaban demasiado espaciadas entre sí (anchos \approx 35 μm)

Para observar las rejillas de difracción, ya que a simple vista no es posible debido a la transparencia del vidrio, al igual que los canales fabricados con el proceso convencional, se les hizo incidir un haz de láser de $\lambda = 632.8\text{nm}$ con el fin de apreciar la forma de rejillas en la proyección del láser sobre una pantalla. Se muestran a continuación en las figuras 71-74, las proyecciones del láser ($\lambda = 632.8\text{nm}$) sobre las rejillas.

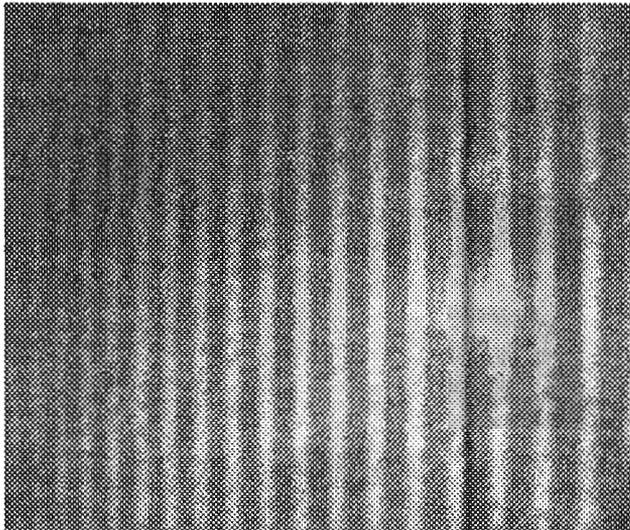


Figura 71 -
Proyección de Rejilla de
Difracción 1



Figura 72.-
Proyección de Rejilla
de Difracción 3

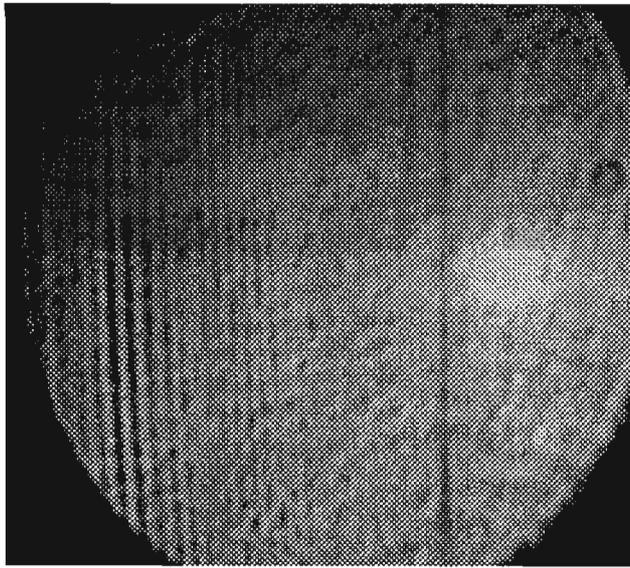


Figura 73 -
Proyección de Rejilla de
Difracción 3

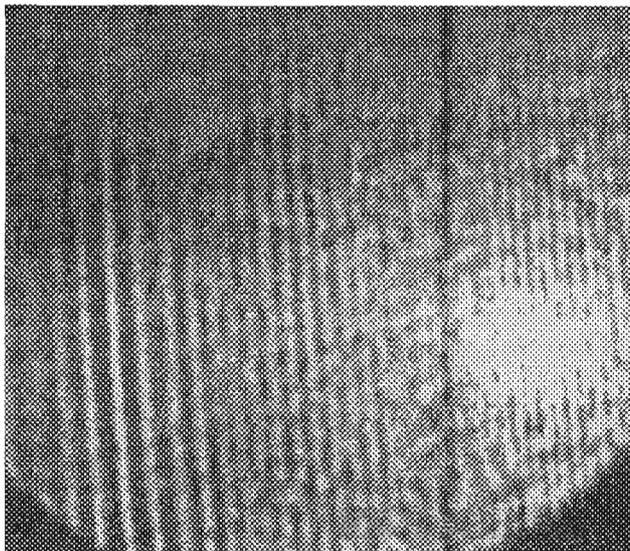


Figura 74.-
Proyección de Rejilla de
Difracción 4

En las figuras 71-74 se observan la forma de los canales de difracción, pero debido al orden de las franjas de interferencia (~ 1.6 a $3 \mu\text{m}$ aproximadamente), éstas no se aprecian en las proyecciones.

4.3.- CONTRAPOSICIÓN DE AMBOS PROCESOS



Figura 75.- Diagrama de Desarrollo del Proyecto "Fabricación de Guías de Onda"

El desarrollo del proyecto consta de dos partes como se muestra en el diagrama de la figura 75 y se resume a continuación.

- Método Interferométrico Implementación de interferogramas para la fabricación de rejillas de difracción y utilizar éstas para obtener franjas de separación de 2 a

5 μ m de ancho (franjas de interferencia plasmadas sobre una película fotosensible), para la fabricación de guías de onda canal confinadas monomodo en el cercano infrarrojo.

- Método Convencional Fabricación de guías de onda confinadas mediante intercambios iónicos siguiendo el proceso convencional. Se realiza haciendo uso de una máquina alineadora de rayos UV para grabar canales en un material fotosensible con ayuda de una mascarilla cuyo periodo van desde 205 μ m hasta 10 μ m como mínimo, con las que sólo se pueden obtener guías de onda canal multimodo en el cercano infrarrojo.

Comparando ambos procesos, el proceso interferométrico tiene la ventaja de permitirnos obtener franjas de periodo variable con el propósito de obtener guías de onda canal confinadas monomodo.

La desventaja de este proceso es que la caracterización de los parámetros críticos, tales como ángulo de incidencia (θ), tiempos de exposición y revelado, uso de la resina fotosensible (espesor sobre muestra y rango de absorción), es muy minuciosa. Es decir, el experimento se torna complicado debido al número de parámetros involucrados, por lo que los resultados no son inmediatos, se obtienen en un largo tiempo después de diversas pruebas experimentales que estandarizan los parámetros.

Mediante este proceso se realizaron más de 60 pruebas sobre muestras diferentes, utilizando los dos sistemas de interferencia propuestos, obteniendo como ventaja un proceso alternativo de fabricación de guías de onda canal

En cuanto al proceso de fabricación convencional, la ventaja es que al interponer una mascarilla (con patrón de franjas) sobre la muestra y utilizando la máquina alineadora, es mucho más sencillo tanto obtener buenos resultados en poco tiempo, como optimizar los parámetros de exposición y revelado.

Además de que resulta más sencillo obtener buena definición de franjas en las dos resinas probadas (AZ®5214-E i-Line Photoresist y 1818 sp16 SHIPLEY); usando los motivos de

la mascarilla en la máquina alineadora sin necesidad, a comparación del sistema óptico, de alinear el sistema, así como calcular el ángulo ideal de incidencia (θ). Se debe tener en cuenta que el pico máximo de absorción de ambas resinas se encuentra dentro de la longitud de onda de los rayos UV (de la máquina alineadora), por ello se necesita mas tiempo de exposición en el proceso óptico (~de 30 minutos a 1hr.) que en el proceso convencional (~ 4 segundos).

Como desventaja es que la mascarilla con la que se cuenta en el laboratorio de fotolitografía en el instituto (IICO), tiene canales demasiado anchos para lograr fabricar guías de onda canal monomodo a una longitud de onda del infrarrojo cercano ($\lambda = 1\mu\text{m}$). El ancho mínimo de franjas es de $10\mu\text{m}$, por lo que sólo se pudo obtener guías de onda canal confinadas multimodo usando el proceso convencional.

4.4 CONCLUSIONES PARCIALES EXPERIMENTALES:

La realización de este proyecto requirió de un trabajo minucioso a nivel experimental en donde es imperativo asegurar la limpieza de los materiales y del equipo a utilizar. De la misma forma, es necesario optimizar los diferentes parámetros involucrados en el proceso de fabricación de las guías de onda confinadas: la temperatura de los diferentes químicos, tiempos de exposición y revelado.

Para lograr fabricar las guías de onda confinadas fué necesario tener conocimientos de:

- a) El proceso de fotolitografía utilizando la máquina alineadora de rayos UV para la fabricación de guías de onda canal.
- b) El proceso de evaporación de metales (en este caso de Al)
- c) El proceso de limpieza de diferentes materiales como son el vidrio y el aluminio
- d) El proceso de intercambio iónico.

e) Así como el manejo Óptico de distintos dispositivos como de los conceptos básicos de Interferencia.

- Limpieza del aluminio (material de barrera para fabricación de guías de onda)

Después de haber realizado cuatro pruebas diferentes de distintos procesos químicos, el mejor resultado fue el de realizar un desengrasado en la muestra para posteriormente someterla a un ataque químico usando una solución de Ácido Nítrico al 20% (HNO_3) en agua desionizada.

- En las cuatro evaporaciones realizadas, algunas de las zonas barridas con el perfilómetro para medir espesor, no resultaron ser homogéneas en algunas muestras evaporadas. Esto es debido a que la fórmula calculada para una fuente puntual está diseñada para radios de la zona a evaporar (L) muy pequeños (del orden de milímetros) y en el caso particular de las muestras evaporadas, se abarcó la mayor área posible a evaporar con el fin de tener mayor número de muestras para el proceso de fabricación de guías de onda. Además, se tuvieron algunos problemas técnicos con la evaporadora, los cuales provocaban una pérdida de vacío y como consecuencia se tuvo la falta de homogeneidad del material evaporado sobre los substratos. Por lo tanto, es imperativo tener mucha precaución cuando se va a depositar el material de barrera tratando de tener un vacío adecuado (y que este no se pierda), una limpieza adecuada tanto de las muestras como del material a evaporar
- Los parámetros de exposición tanto para el proceso convencional como para el proceso óptico adaptado para el IICO, son diferentes si la muestra no tiene depositado material de barrera (muestras de vidrio solo con resina), donde el tiempo de exposición aumenta para las muestras con Aluminio previamente depositado y con resina fotosensible
- Si la resina fotosensible no es expuesta durante un tiempo suficiente ya sea en la máquina alineadora o en el interferómetro, entonces el ataque químico del aluminio se realizará muy lento o bien no se atacará.

- Se debe poner especial cuidado a la etapa de pulido de las muestras. Es necesario cuidar el ángulo de inclinación así como de pulir de manera homogénea, ya que si alguno de los extremos no se pulen de manera adecuada, en la caracterización de las guías de onda no se podrán observar los modos de onda guiados por nuestro dispositivo fabricado

CAPITULO 5

CONCLUSIONES GENERALES

Como resultado del desarrollo de este trabajo de tesis se fabricaron, por primera vez en el IICO, guías de onda confinadas mediante intercambio iónico. Para ello se concluyó el proceso total de fabricación convencional de guías de onda canal multimodo optimizando los parámetros involucrados:

- Horneado (30 min a 100oC)
- Exposición (4 ~ 5 seg).
- "Postbake" (30 min a 112 ~ 115oC)
- Revelado (20 a 30 seg).
- Ataque Químico (2 min)
- Temperatura para el intercambio iónico de sales (380oC)
- Tiempo de intercambio iónico (6 hrs)
- Técnica de pulido.

Este método de fabricación tiene la ventaja de que al interponer una mascarilla (con un motivo de canales) sobre la muestra y utilizando la máquina alineadora, es mucho más sencillo obtener buenos resultados en poco tiempo. Es menor el tiempo invertido en caracterizar los parámetros de exposición y revelado. Los canales grabados en los dos tipos de resinas utilizadas muestran una mejor definición debido a que su pico máximo de absorción se encuentra dentro del rango del ultravioleta el cuál corresponde a la emisión de la lámpara de la máquina alineadora.

En nuestro caso, la limitante de este método es que la mascarilla con la que se cuenta en el laboratorio de fotolitografía en el instituto (IICO), tiene canales demasiado anchos para lograr fabricar guías de onda canal monomodos en el cercano infrarrojo. El ancho de

canal mínimo es de $10\mu\text{m}$. Es por ello, que mediante este método de fabricación sólo se pudieron obtener guías de onda canal multimodo para el cercano infrarrojo. Una solución, si su costo lo permite, sería adquirir una mascarilla con anchos de canal de 2 a $5\mu\text{m}$.

El método de fabricación interferométrico que se desarrolló tiene la ventaja de que nos permite obtener franjas de periodo variable. Esto con el propósito de fabricar guías de onda canal confinadas monomodo para el cercano infrarrojo. La desventaja es que la optimización de los parámetros críticos, tales como ángulo de incidencia, tiempos de exposición y revelado, uso adecuado de la resina fotosensible (espesor sobre muestra y rango de absorción), es muy minuciosa. Es decir, el experimento resulta laborioso debido al número de parámetros involucrados. Es por ello que los resultados no son inmediatos, se obtienen después de un gran número de pruebas experimentales.

Se observaron diferentes resultados para los dos sistemas ópticos implementados en donde uno de ellos nos permite obtener una mejor resolución de franjas y el otro obtener un mayor control del periodo de las rejillas fabricadas.

A pesar de los inconvenientes del método interferométrico, los resultados obtenidos fueron favorables, ya que se logró fabricar rejillas de difracción en resina fotosensible con periodos de hasta $1.6\mu\text{m}$.

5.1.- PERSPECTIVAS.

No fue posible fabricar las guías de onda canal utilizando el método Interferométrico debido a problemas técnicos en el laboratorio. Tales problemas consistieron en la utilización de un spinner cuyo vacío para sostener la muestra era deficiente y la utilización de una resina no óptima para el proceso de fotolitografía, ya que su rango de absorción estaba fuera de la longitud de onda del láser empleado. Además, de fallas técnicas que se tuvieron con la evaporadora de metales que nos impidieron depositar películas homogéneas del material de barrera sobre los substratos.

Sin embargo, lo que se desarrolló con el método Interferométrico (rejillas grabadas en resina de hasta $1.6 \mu\text{m}$ de periodo), es útil para la fabricación de rejillas de periodo variable en sustratos de vidrio. Estas rejillas encuentran gran aplicación en otros dispositivos de óptica integrada como son. acopladores, filtros en longitud de onda, amplificadores, etc.

En este aspecto podemos concluir que se han desarrollado las bases de la fabricación de rejillas de difracción en resina fotosensible. Pudiendo continuarse este trabajo como un nuevo tema de tesis en el cual sería necesario optimizar algunos parámetros con el fin de aplicar las rejillas de difracción fabricadas en sustratos de vidrio.

En particular, en el laboratorio de Óptica Aplicada, se tiene la necesidad de fabricar rejillas de periodo variable sobre sustratos de vidrio para ser utilizadas como acopladores en guías de onda planas. Ello permitiría acoplar un haz de luz a las películas depositadas sobre las rejillas y de esta forma determinar el perfil de índice de refracción del material depositado.

REFERENCIAS

- [1] Aschoff, V, "Geschichte der Nachrichtentechnik", Vol. 1 Berlin, Springer 1984, pag 86.
- [2] Reinhard März, "Integrated Optics, Design and Modeling", Library of Congress Cataloging-in-Publication Data", 1994 Artech House, Inc.
- [3] S Iraj Najafi, "Introduction to Glass Integrated Optics, Library of Congress Cataloging-in-Publication Data", 1992 Artech House, Inc.
- [4] Amparo Rodríguez Cobos, "Etude d' un commutateur en optique integree sur verre commande optiquement par l'intermediaire d'un polymere photochromique", These de Docteur de l'INGP, Institut National Polytechnique de Grenoble, Febrero 2002
- [5] S Iraj Najafi, "Glass Integrated Optics and Optical Fiber Devices", Critical Reviews of Optical Science and Technology, Spie Optical Engineering Press, 1994.
- [6] J Albert and G.L. Yip, "Stress- induced index change for K -Na ion échange in glass", Electron Lett , Vol 23, pp. 737, 1987.
- [7] A Branderburg, "Stress in ion-exchanged glass waveguides", J Lightwave Technol., vol LT-4, pp. 1580, 1986
- [8] T Lang, "Etude des effets de polarisation dans de guides d'optique integree sur verre Application convertisseur de polarisation ", Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, Nov 1997.
- [9] R V Ramaswamy, and R. Srivastava, "Ion exchange glass waveguides. a review", Opt J Lightwave Technol , Vol.6, pp.984, 1988

- [10] Persegol Dominique, Levy Michel, "Modeling ion exchange in glass with concentration dependent diffusion coefficients and mobilities", *Opt. Eng.*, 35, pp 1603-1610, 1996
- [11] Hans P Zappe, "Introduction to Semiconductor Integrated Optics", 1995 Artech House Inc.
- [12] S Bhandarkar, "Planar Waveguide Laser", *Encyclopedia of Modern Optics*, Alfred University, Alfred, NY, USA, 2005, Elsevier Ltd
- [13] B.E.A. Saleh, M.C. Teich, "Fundamentals of Photonics", J W Goodman, Editor, 1991
- [14] T Tamir, "Guided -Wave Optoelectronics", Springer-Verlag, 1990.
- [15] A.Yariv, "Optical Electronics", Saunders Collage Publishing, 1990.
- [16] K.Chiang, "Performance of effectif"index method for the analysis of the dielectric waveguides", *Optics Lett.*, Vol 16, no.10, pp 714, 1991
- [17] S.G.Lipson, H. Lipson and D S. Tannhauser, "Optical Physics", Third Edition, Cambrigde University Press , 1998
- [18] Ma De Jesús Guadalupe Aguilar Jiménez, "Fabricación de Canales de GaAs con Doble Ataque Químico para Diodos Láser Tipo Reif ", Tesis de Maestría, Instituto de Investigación en Comunicación Óptica (IICO), U.A.S.L.P , Diciembre de 2003
- [19] A. Richardt, A.M Durand, "Le vide, les couches minces, les couches dures", Editions In Fine. 1994

[20] Sergio E. Hdz Corpus, Manuel Flores Camacho, "Referencia Rápida para Evaporadora de Metales VEECO V-300", Adaptación IICO- UASLP

[21] S.M. Sze, "Semiconductor Devices-Physics and Technology", John Wiley & Sons, Inc., 2da edición, 2002.

[22] M.Spak, D.Mammato, S.Jain, and D. Durham, "Mechanism and Lithographic Evaluation of Image Reversal in AZ 5214 Photoresist", American Hoechst Corporation, AZ Photoresist products.

[23] www.clariant.com, AZ5200 Data Package.pdf, Business Unit Electronic Materials

[24] Operation Manual, OAI Series 200, Tabletop manual, Mask Aligner and UV Exposure System, Optical Associates, Inc.

[25] www.prism.princeton.edu/PRISM_cleanroom , "Standard Procedure for Positive Tone Photo-Lithography"

[26] Ludwing RoB, "Integrated optical components in substrates glasses", Review Paper, IOT Entwicklungsgesellschaft für Integrierte Optik-Technologie mbH, Waghäusel (FRG), Received 19th December 1988.

[27] Graham Saxby, "Practical Holography", Prentice Hall, Second edition, 1994

[28] Eugene Hecht "Optics", Fourth Edition , San Francisco Addison Wesley, 2002

[29] X.L.Jiang, L.Li, D.Y Kim, V Shivshankar, S K Tripathy, and J Kumar, "Polarization dependent recordings of surface relief gratings on azobenzene containing polymer films" Center of Advanced Materials, University of Massachusetts Lowell, Lowell, Massachusetts 01854, 1996.

[30] Mario Zambrano García, "Anonizado del Aluminio como Proceso Industrial", Tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias Químicas, Universidad de Nuevo León

[31] www.cise.columbia.edu/clean/process/Photolithography_Negative.pdf, "AZ05214-E , Negative Lithography", © 2003 Columbia Center for Integrated Science and Engineering

[32] Vic Marrito, Cesar M. Garza, Mark Spak, "A practical Approach to submicron lithography", Semiconductor Process and Design Center, Texas Instruments Incorporated, Dallas Texas.

[33] www.cnf.cornell.edu/equipment/photolith/PROCsh1800.html, "Shipley 1800 Series Photoresist", CNF Photolithography Process Notes, Cornell University, Ithaca, New York