

**Centro de Investigación Científica y de Educación
Superior de Ensenada, Baja California**



**Programa de posgrado en ciencias
en Óptica**

**Estudio de guías de onda angostas por multi-implantación de
iones de plata.**

Tesis

para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de
Maestro en Ciencias

Presenta:

Helena De los Reyes Cruz

Ensenada, Baja California, México
2016

Tesis defendida por

Helena De los Reyes Cruz

y aprobada por el siguiente comité

Dr. Heriberto Márquez Becerra

Director del comité

Dr. Francisco Javier Esparza Hernández

Dra. Alma Georgina Navarrete Alcalá

Dr. Raúl Rangel Rojo

Dr. David Salazar Miranda



Dr. Pedro Negrete Regagnon

Coordinador del Posgrado en Ciencias en Óptica

Dra. Rufina Hernández Martínez

Directora de Estudios de Posgrado

Helena De los Reyes Cruz ©2016

Queda prohibida la reproducción total o parcial de esta obra sin permiso formal y explícito del autor

Resumen de la tesis que presenta **Helena De los Reyes Cruz**, como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ciencias en Óptica con orientación en Optoelectrónica.

Estudio de guías de onda angostas por multi-implantación de iones de plata.

Resumen aprobado por:

Dr. Heriberto Márquez Becerra
Director de tesis

En este trabajo se presenta el estudio de guías de onda de canal por multi-implantación de iones de plata con perfil de índice tipo escalón en sustratos de SiO₂. El estudio comprende el diseño, fabricación y caracterización de guías de onda rectas, curvas-S y curvas-C. La etapa de diseño, está basada en un algoritmo del método de propagación de haz para circuitos de óptica integrada, BeamProp-Rsoft, y se consideró: guías de onda monomodo, con alto confinamiento óptico y pérdidas por propagación bajas, para longitudes de onda en el visible 633nm y para las líneas de comunicaciones ópticas de 1550nm. La fabricación de las guías de onda con un perfil de índice escalón fue realizada mediante el proceso de multi-implantación de iones de plata en sustratos de SiO₂. Finalmente la caracterización de las guías de onda comprendió inspección por microscopía óptica, metrología dimensional, análisis de pérdidas de propagación y análisis de distribución de intensidad de los modos de propagación para longitudes de onda de 1310nm y 1550nm.

Palabras clave: **guías de onda de canal, multi-implantación, perfil de índice escalón.**

Abstract of the thesis presented by **Helena De los Reyes Cruz** as a partial requirement to obtain the Master of Science degree in Optics with orientation in Optoelectronics.

Study of optical channel waveguides by silver ion multi-implantation.

Abstract approved by:

Dr. Heriberto Márquez Becerra
Director thesis

In this work, a study of optical step-index channel waveguides by silver ion multi-implantation in SiO₂ is presented. The study includes the design, fabrication, and characterization of optical channel waveguides, straight, S-bends, and C-bends. The design part, based on computational analysis by beam propagation method (BPM), consider single mode optical waveguides, high optical confinement and low propagation losses for wavelengths 633nm, and 1550nm, respectively. For the fabrication process, we use silver ion multi-implantation in SiO₂ substrates to obtain step index profile. The characterization of the channel waveguides include inspection of defects by optical microscopy, measurements of size of cross section of waveguides, analysis of propagation losses, and measurements of mode field diameter of propagation modes for wavelengths 1310nm and 1550nm.

Keywords: **channel optical waveguides, multi-implantation, step-index profile.**

Dedicatoria

A mi mamá,
A mis hermanos,
Y a la familia
Por estar cerca.

A Javier.
A Mirthala.

Agradecimientos

Agradezco a mi mamá y mis hermanos por el apoyo incondicional en los éxitos y los fracasos, por su cariño, confianza y enseñanzas. Por estar ahí siempre.

Al Dr. Heriberto Márquez Becerra por su gran ayuda, soporte y consejos; en la investigación y en la vida. Por la oportunidad de trabajar con él y enseñarme el significado de la palabra paciencia.

A mis sinodales Dr. Raúl Rangel Rojo, Dr. David Salazar Miranda, Dra. Georgina Navarrete Alcalá y Dr. Francisco Esparza Hernández, por sus comentarios y sugerencias para la realización de este trabajo.

A la Dra. Oliver, y los técnicos Karim López y Francisco Jaimes del acelerador Peletron en el IF-UNAM, por su gran amabilidad durante la fabricación de mis muestras.

A la Dra. Verónica Vázquez por su gran disposición y ayuda con el uso del programa BeamProp.

Al M.en C. Gabriel Rendón por el uso del microscopio con polarizador.

A los investigadores y personal del departamento de óptica del CICESE por sus enseñanzas académicas y el apoyo brindado estos años.

A los amigos y a los que dejaron de serlo; a todas las personas que conocí y ahora forman parte de mi historia durante estos años de Maestría. De todos aprendí algo muy valioso.

A Ensenada y al CICESE por enseñarme de la vida, y de óptica.

A CONACYT

Tabla de contenido

Resumen en español	ii
Resumen en inglés	iii
Dedicatoria	iv
Agradecimientos	v
Lista de figuras	viii
Lista de tablas	xi
Capítulo 1. Introducción	1
Capítulo 2. Fundamentos teóricos	5
2.1.- Teoría de guías de onda óptica.....	5
2.2.- Guías de onda planas formadas por materiales dieléctricos.....	7
2.3.- Estudio electromagnético en guías de onda planas.....	10
2.4.- Guías monomodo y multimodo.....	13
2.5.-Guías de onda ópticas de canal.....	15
2.6.- Método de propagación de haces.....	16
2.6.1.-BeamProp y Método de propagación de haces (BPM).....	17
2.7.- Fundamentos teóricos: implantación de iones.....	18
2.7.1.- Aceleración de iones.....	19
2.7.2.- Frenado de iones.....	19
2.7.3.- Efectos de implantación.....	22
2.7.4.- Simuladores: Implantación de iones.....	22
Capítulo 3. Metodología del diseño de guías de onda de canal y fabricación	23
3.1 Introducción.....	24
3.2 Simulación de índice de refracción e implantación de iones.....	25
3.3 Reconstrucción del perfil de índice de refracción.....	26

3.4 Aproximación en el análisis de la propagación.....	27
3.5 Obtención de dimensiones transversales.....	28
3.5.1.-Simulación Rsoft.....	30
3.6.- Obtención de radios de curvatura.....	30
3.7.-La mascarilla de implantación.....	33
3.8.-Fabricación de las guías de onda.....	34
Capítulo 4. Resultados y discusión.....	39
4.1.- Análisis por el método de propagación de haz.....	39
4.1.1.- Modos transversales de las guías de onda.....	40
4.1.2.- Propagación de luz en guías rectas.....	41
4.1.3 .-Propagación de luz en guías curvas-S.....	42
4.1.4 .- Propagación de luz en guías curvas-C.....	43
4.2 Caracterización de la mascarilla.....	43
4.3 Tratamiento térmico de las guías de onda.....	43
4.4 Sección transversal de las caras de entrada y salida de las guías de onda...	44
4.5 Cálculo de pérdidas y transmitancia.....	45
4.6 Visualización de los modos de propagación.....	50
Capítulo 5. Resumen general y conclusiones.....	55
Lista de referencias bibliográficas.....	59
Apéndice A. Acelerador de partículas.....	61
Apéndice B. Imágenes obtenidas de las guías de canal.....	65

Lista de figuras

Figura	Página
1 Reflexión total interna en una guía de onda óptica.....	6
2 Tipos de perfil a) escalón asimétrico, b) escalón simétrico y c) gradiente.....	7
3 Sección transversal de las guías de onda más comunes: a) plana sumergida, b) plana superficial, c) canal sumergido, d) canal superficial y e) fibra óptica.....	7
4 Casos fundamentales de polarización en las guías de onda plana a) TE y b) TM.....	10
5 Distribución de campo en modos guiados TE.....	14
6 Guías de canal, a) guía superficial, b) guía sumergida, c) guía sumergida con índice gradiente.....	15
7 Daño estructural al material implantado, a) trayectoria de los iones, b) reordenamiento de la red vítrea. SRIM 2012 (Ramírez C., 2014).....	19
8 Diferencias entre transferencia de energía por frenado electrónico (línea punteada) y energía nuclear (Townsend, 1994).....	20
9 Simulación de implantación de iones en materiales, a) ejemplo del cálculo de trayectorias probables para iones que entran al sustrato, b) ejemplo de una gráfica de distribución de iones implantados, en función de la profundidad en el sustrato. (Flores R. E. 2008).....	23
10 Guías de onda ópticas de canal tipo rectas, curvas-S y curvas-C.....	23
11 Radiación del modo, donde R, es el radio de curvatura.....	25
12 Perfil de implantación, con las dosis y energías mostradas en la Tabla 1.....	27
13 Perfiles de índice de refracción TE/TM calculados para las guías de onda M1, M2 y M4.....	27
14 Sección transversal de la guía de onda de canal.....	28
15 Espesor de corte modal para longitudes de 633nm y 1550nm.....	30
16 Diseño de una curva-S con estructura simétrica, a) partes de la estructura curva-S, b) corte transversal de curvas.....	30
17 Pérdidas por curvatura con diferentes radios de curvatura para M1, M2 y M4, con $\lambda = 633nm$	32

18	Pérdidas por curvatura con diferentes radios de curvatura para M1, M2 y M4, con $\lambda = 1550\text{nm}$	32
19	Familias en el diseño de la mascarilla.....	34
20	Diseño general de la mascarilla de implantación, con la configuración de las familias, y espaciado entre cada una.....	34
21	Fotografía de la mascarilla fabricada.....	35
22	Composición del portamascarillas, a) parte superior, b) parte inferior.....	35
23	Limpieza del sustrato.....	36
24	Parte inferior del portamascarillas y la mascarilla.....	37
25	Parte inferior conteniendo la mascarilla, y parte superior del portamascarillas..	37
26	Obtención de las guías de onda de canal ópticas.....	38
27	Distribución de intensidad de los modos transversales obtenidos mediante BPM, a) M1 para 633nm, b)M1 para 1550nm.....	40
28	Sección longitudinal de simulación usando BPM en M1 para a) 633nm y b) para 1550nm.....	41
29	Sección longitudinal de simulación para curvas-S usando BPM en M1 para a) 633nm y b) 1550nm.....	42
30	Sección longitudinal de simulación para curvas-C usando BPM en M1 para a) 633nm y b)1550nm.....	42
31	Microfotografía de la mascarilla de implantación.....	43
32	Fotografía a) antes del tratamiento térmico, y b) después del tratamiento.....	44
33	Fotografía sección transversal guías de canal formadas a) Aumento 20x, y b) Aumento 50x.....	45
34	Arreglo experimental para medir pérdidas y obtener modos de propagación en las guías de onda.....	45
35	Factores de pérdidas en el sistema óptico.....	46
36	Perfil de distribución del campo E_x y E_y	47
37	Familias de canales implantadas en el sustrato.....	48

38	Transmitancia de las guías de las muestras 1 y 2 a $\lambda=1310\text{nm}$: guías 1 a 10- líneas rectas, 11 a 20 curvas-S.75, 21 a 30 curvas-S1.0, 31 a 40 curvas-C.75, y 41-50 curvas-C1.0.....	49
39	Transmitancia de las guías de las muestras 1 y 2 a $\lambda=1550\text{nm}$: guías 1 a 10- líneas rectas, 11 a 20 curvas-S.75, 21 a 30 curvas-S1.0, 31 a 40 curvas-C.75, y 41-50 curvas-C1.0.....	49
40	Distribución de intensidad de salida, para las muestras 1 y 2, de las guías rectas, curvas-S y curvas-C, para una longitud de onda de 1310nm.....	51
41	Distribución de intensidad de salida, para las muestras 1 y 2, de las guías rectas, curvas-S y curvas-C, para una longitud de onda de 1550nm.....	52
42	Figura 42. Acelerador electrostático tándem, Peletrón (9SDH-2), del Instituto de Física de la Universidad Nacional Autónoma de México (IF-UNAM).....	65

Lista de tablas

Tabla	Página
1 Energía de implantación y dosis.....	26
2 Dimensiones de anchos obtenidas mediante ancho de corte.....	30
3 Rangos de cálculo de pérdidas en dB/cm.....	48
4 Anchos de los modos de las guías de cada familia, para las longitudes de onda de 1310nm, 1550nm.....	53
5 Dosis y energía de implantación.....	55
6 Dimensiones obtenidas transversales de las guías.....	56
7 Ancho modal.....	56
8 Anchos modales obtenidos en las guías fabricadas.....	59

Capítulo 1.

Introducción

En los últimos 50 años, se ha presenciado una evolución y progresos extraordinarios en investigación y desarrollo de diversas áreas de la fotónica al ser descubierto el láser como fuente de luz en 1960, las fibras de vidrio óptico fueron propuestas como medio de transmisión y para 1966 se había logrado una disminución significativa de pérdidas; sin percibir aun el impacto que tendrían en la sociedad moderna. Actualmente, láseres y fibras ópticas son los bloques constructores claves de sistemas de comunicaciones ópticas empleados en varios países. Componentes fotónicos son también usados en productos de consumo masivo, industrial y médico; además de ser parte del desarrollo en instrumentación científica y de ingeniería (Ching, 2006). Los dispositivos ópticos pueden ser de tipo estándar (volumétrico) o de tipo miniaturizado y para su uso en óptica integrada en forma de guía de onda óptica. Las componentes de guías de onda ópticas son relativamente nuevas y hay una gran área de oportunidad debido a que el campo debe ser desarrollado con nuevos dispositivos basados en guiado óptico de la luz. Actualmente el estudio de la óptica integrada ha llegado a escalas nanométricas produciendo estructuras tales como puntos cuánticos, hilos cuánticos, elementos ópticos holográficos y cristales fotónicos (Hunsperger, 2009).

El concepto de óptica integrada fue propuesto por Miller (Miller, 1969), él lo definió como una nueva generación de sistemas optoelectrónicos en los cuales los cables y alambres son reemplazados por circuitos ópticos integrados, de modo que todo estuviese integrado en un solo sustrato (Reinhard, 1995). En estos circuitos se transporta la señal por medio de haces de luz, en vez de una corriente eléctrica, y los diversos elementos del circuito se interconectan mediante guías de onda ópticas las cuales permiten el confinamiento y guiado de luz en los dispositivos. Hoy en día la óptica integrada agrupa el desarrollo de dispositivos y componentes ópticos para generar, enfocar, derivar, combinar, aislar, polarizar, acoplar, conmutar, modular y detectar luz en un solo sustrato (Villegas, 2002).

Los dispositivos de óptica integrada pasiva principalmente dividen las señales en dos o más partes y la encaminan a direcciones deseadas sin ayuda de ningún factor externo al circuito. Las componentes principales de óptica integrada son guías de onda planas, las

guías de onda angostas, derivadores ópticos, acopladores direccionales e interferómetros Mach-Zehnder. Las guías de onda planas presentan, desde un punto de vista técnico, el inconveniente de ser poco prácticas y desde el punto de vista científico, se tiene poco interés dado el amplio estudio que se ha hecho sobre ellas. En cambio, las guías de onda angostas son más interesantes desde el punto de vista científico y tecnológico ya que son la celda básica de la construcción de circuitos pasivos de óptica integrada, y también son los elementos potenciales de construcción de algunos tipos de sensores (Angel, 1999).

Existen diferentes técnicas para su fabricación y se clasifican principalmente en dos grupos: a) las que se basan en la modificación del índice de refracción de un material en volumen i.e. intercambio iónico, la difusión de iones y la implantación de iones (Ramaswamy y Srivastava, 1988; Li 2006; Márquez, 1995; Townsend, 1994) y b) las que se basan en la construcción de capas con materiales de índice de refracción diferente i.e. crecimiento de capas por procesos epitaxiales o el depósito por erosión iónica – sputtering- (Yamashiki y Tsuda, 2003; Mackenzie, 2007). En este trabajo se utilizó la técnica de implantación de iones; esta técnica tiene la ventaja de que puede realizarse a temperatura ambiente e inclusive a bajas temperaturas, y provee, hasta cierto punto, un buen grado de ajuste del perfil de índice de refracción para varias aplicaciones y puede ser usada en varios materiales ópticos como: vidrios, cristales y polímeros (Townsend, 1994).

La implantación de iones es un proceso versátil y robusto para producir guías de onda ópticas. Sin embargo, la técnica comúnmente usada es una sola implantación de iones, la cual produce una distribución de iones con un perfil semi-gaussiano asimétrico y debido a su tamaño reducido limita su potencial como guía de onda óptica. En general, las guías de onda ópticas producidas por implantación de iones pueden ser optimizadas por aumentar su barrera óptica o el núcleo de la guía por implantación de iones múltiple a diferentes energías (Márquez, 2013). Guías de onda ópticas planas con perfil de escalón han sido obtenidas por un proceso de implantación de iones múltiple con un confinamiento óptico adecuado y pérdidas de propagación bajas (Ramírez, 2015). Por lo que en este trabajo de tesis se pretende estudiar el diseño de guías de onda angostas

de canal tipo escalón por multi-implantación de iones de plata en sustratos de cuarzo fundido (SiO_2).

La presente tesis tiene como motivación el estudio teórico-experimental de guías de onda ópticas de canal rectas, tipo curva-S y curva-C con perfil de índice de escalón fabricadas mediante multi-implantación de iones de plata en sustratos de cuarzo fundido (SiO_2). El estudio abarca los procesos de diseño, fabricación y caracterización de las guías de onda. El proceso de diseño tiene como finalidad la definición de parámetros requeridos para la obtención de guías con perfil de índice escalón para componentes de óptica integrada compatibles con fibras ópticas monomodo. Se analizan las dimensiones y radios de curvatura de las componentes y se evalúan las propiedades ópticas por medio de un algoritmo basado en el método de propagación de haz usando el programa *R-Soft2015* (<https://optics.synopsys.com/rsoft/>); con los parámetros de implantación requeridos para generar las guías de onda. Para el proceso de implantación de iones, se utiliza una mascarilla metálica de Níquel hecha mediante tecnología de litografía de Rayos X y modelado; el diseño de la mascarilla es obtenido por medio de *R-Soft* y *Autocad 2015*, la cual acota la región de implantación y por tanto las dimensiones de las guías en los sustratos. En la parte de caracterización óptica se determinan los efectos de implantación en el sustrato y sus propiedades; en particular por microscopía óptica, se determinaron las dimensiones de las guías de onda ópticas de canal; la caracterización de las guías de onda comprendió la inspección por microscopía óptica, la metrología dimensional, el análisis de pérdidas de propagación y el análisis de distribución de intensidad de los modos de propagación para longitudes de onda de 1310nm y 1550nm.

Para alcanzar los objetivos antes propuestos se presenta la tesis con la siguiente estructura: en el primer capítulo se presenta la introducción y el contenido de la tesis, en el segundo capítulo, se describen los conceptos teóricos en los que se fundamenta este estudio, tales como fundamentos teóricos de guías de onda ópticas de canal, implantación de iones en la materia, método de propagación de haz, proceso de la implantación de iones en la materia y método de índice efectivo. Posteriormente en el tercer capítulo se detallan los materiales y la metodología utilizados para el diseño, fabricación y caracterización de las guías de onda de canal obtenidas por la técnica de implantación de iones. Finalmente en el capítulo 4, se presenta la caracterización de las

guías de onda que comprendió la inspección por microscopía óptica, metrología dimensional, análisis de pérdidas de propagación y análisis de distribución de intensidad de los modos de propagación para longitudes de onda de 1310nm y 1550nm.

Este trabajo de tesis es resultado de la colaboración conjunta entre el Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada (CICESE), el Centro de Investigaciones en Óptica (CIO) y el Instituto de Física de la Universidad Nacional Autónoma de México (IF-UNAM). Adicionalmente se han iniciado colaboración con la Universidad de Saskatchewan de Canadá y el Instituto de Microtecnología Karlsruhe (IMT) de Alemania.

Capítulo 2.

Fundamentos teóricos

Este capítulo presenta una breve descripción de los conceptos básicos de guías de onda formada por implantación de iones. Se inicia con el análisis de guías de onda ópticas planas por los métodos de trazo de rayos y teoría electromagnética, continuando con guías de onda de canal mediante el método de propagación de haz. Por último se describe el proceso de multi-implantación de iones usado para el diseño de guías de onda ópticas.

2.1 Teoría de guías de onda

Los dispositivos de óptica integrada se basan en el proceso de confinamiento de luz en estructuras llamadas guías de onda ópticas. Las cuales son consideradas elementos esenciales para la construcción de circuitos de óptica integrada y también son utilizadas en la fabricación de dispositivos ópticos y optoelectrónicos miniaturizados (Saleh y Teich, 1991). Algunas ventajas que presenta el uso de estas estructuras son: moderar la potencia necesaria para lograr la acción de láser o efectos no lineales y para facilitar el acoplamiento de fibras ópticas y láseres a dispositivos ópticos tales como: amplificadores, moduladores, y conmutadores. (Barbier y Hyde, 1999; Tamir, 1998 y Hunsperger, 2002). Por lo tanto, algunas de las principales aplicaciones que presentan son en las comunicaciones ópticas, donde trabajan en conjunto con fibra óptica y dispositivos de óptica integrada.

Una guía de onda óptica es una estructura física capaz de confinar, guiar y transportar ondas electromagnéticas de luz de un punto a otro en una dirección definida, mediante el principio de reflexión total interna mostrado en la Figura1. Este principio surge cuando un rayo de luz que se propaga por un medio con un índice de refracción n_f incidiendo con un ángulo θ_1 sobre una superficie de un medio de índice n_s , siendo $n_f > n_s$, y éste puede reflejarse totalmente en el interior del medio de mayor índice. Esto sucede para ángulos de incidencia mayores que un valor crítico, θ_c cuyo valor es:

$$\theta_c = \text{sen}^{-1}\left(\frac{n_s}{n_f}\right), \quad (1)$$

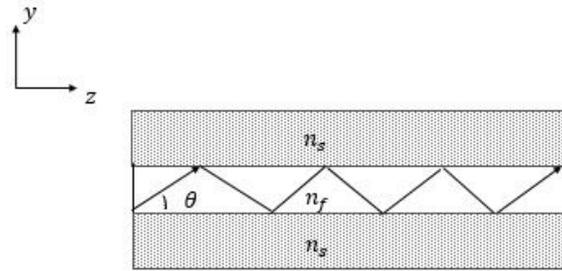


Figura1. Reflexión total interna en una guía de onda óptica.

Se ha hecho una clasificación básica de las guías de onda de acuerdo al número de dimensiones en las que se confina la luz: guías de onda planas confinan la luz en una dirección (1D), guías de onda de canal confinan la luz en dos dimensiones (2D). (Lifante, 2003). Para fines prácticos nos enfocaremos en guías planas y de canal, éstas se pueden clasificar de acuerdo a su distribución de índice de refracción en, guías con perfil de índice escalón o guías con perfil de índice gradiente. A su vez las guías con perfil de índice escalón se dividen en simétricas y asimétricas. Una guía de onda se dice que es simétrica si n_s es homogéneo a lo largo de la estructura y una guía es asimétrica si varía a lo largo de la estructura, ver Figuras 2a) y 2b). Para el caso de una guía de onda de índice gradiente mostrada en la Figura 2c), el índice de refracción varía continuamente con respecto a la profundidad y por lo general el índice más alto se encuentra en la superficie y decrece hasta llegar al índice del sustrato.

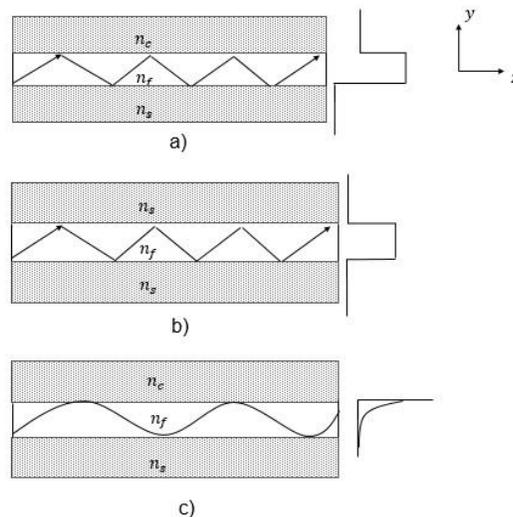


Figura 2. Tipos de perfil a) escalón asimétrico, b) escalón simétrico y c) gradiente.

Existen tres estructuras básicas de guías de onda ópticas: a) plana, b) angosta o canal, y c) cilíndrica, la cual se considera un caso especial de la guía de onda de canal. La Figura 3 presenta este tipo de estructuras que pueden ser del tipo sumergida o superficial, para el caso de la guía de onda cilíndrica, lo más común es la fibra óptica.

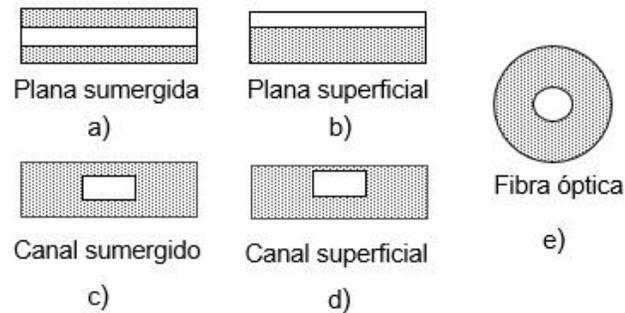


Figura 3. Sección transversal de las guías de onda más comunes: a) plana sumergida, b) plana superficial, c) canal sumergido, d) canal superficial y e) fibra óptica.

Las guías planas y las de canal son ampliamente utilizadas en óptica integrada; y las fibras ópticas son, en su mayoría, utilizadas para transmitir información a largas distancias en el rango de las comunicaciones ópticas. Las guías de onda están compuestas de material dieléctrico con cierto índice de refracción, el cual se define como la razón de la velocidad de la luz en el vacío, entre la velocidad de la luz en el medio dado por: $n = c/v$, donde c es la velocidad de la luz en el vacío ($\approx 3 \times 10^8 \text{ m/s}$) y v es la velocidad de la luz en el medio.

Con la finalidad de explicar la forma en la que se propaga una onda electromagnética en una guía de onda canal, se presenta primero la propagación de luz en las guías de onda planas.

2.2 Guías de onda planas formadas por materiales dieléctricos.

Se analizará el comportamiento óptico de una guía de onda plana asimétrica, primero desde un punto de vista geométrico y después electromagnético. Debido a que la tesis presentada contiene este perfil en específico.

Una guía de onda plana dieléctrica está formada por tres medios con índices de refracción $n_c < n_s < n_f$, el medio con índice n_c es conocido como *cubierta*, el de n_f es el *núcleo* y el n_s es conocido como *sustrato*.

La dirección de propagación de la luz es controlada por medio de múltiples reflexiones, es decir, cada interacción produce un rayo de luz reflejado dentro del núcleo. Cuando el ángulo de incidencia es menor al ángulo crítico, la intensidad de la luz que viaje en el núcleo disminuye con cada reflexión; provocando una baja intensidad en la transmisión a la salida. Estas pérdidas no ocurren si el ángulo de incidencia es más grande que el ángulo crítico, debido a la reflexión total interna. Es decir, para el sustrato si $\theta < \cos^{-1}(n_f/n_s)$, y para la cubierta $\theta < \cos^{-1}(n_f/n_c)$. Bajo esta condición la luz es contenida en el núcleo, ya que se considera la onda propagante en el núcleo como una onda electromagnética confinada que debe satisfacer la condición de continuidad en las fronteras entre el núcleo y el recubrimiento, y el núcleo y el sustrato.

Esta condición requiere que cuando la onda se refleja dos veces, se reproduzca a sí misma después de dos reflexiones subsecuentes de la onda electromagnética, ésta interfiere constructivamente con la onda original incidente formando en el interior de la guía una distribución de campo, donde sólo un conjunto de ángulos cumplen la condición a lo largo de la guía. Es conocida como condición de auto-consistencia y se analiza en términos de sus *eigenfunciones*, o *modos de la guía de onda*. Los modos se definen como campos que mantienen la misma distribución transversal y polarización a lo largo de la guía de onda (Saleh y Teich, 1991).

Para que exista interferencia constructiva bajo la condición de auto-consistencia, la fase total debe cumplir con la relación de dispersión; la cual implica un desplazamiento de fase total igual a cero o a un múltiplo entero de 2π , es decir:

$$2k_0 n_f 2a \cos\theta - \phi_c - \phi_s = 2\pi m, \quad m = 1, 2 \dots \quad (2)$$

donde $k_0 = 2\pi/\lambda_0$ es el vector de onda en el vacío, $2a$ es el espesor de la guía, m es el número de modo y ϕ_c y ϕ_s son el cambio de fase en las fronteras con la cubierta y el sustrato, respectivamente y están dados por (Reed G.T. y Knights, 2004):

$$\phi_{CTE} = 2 \tan^{-1} \frac{\sqrt{n_f^2 \sin^2 \theta - n_s^2}}{n_f \cos \theta}, \quad (3)$$

$$\phi_{STE} = 2 \tan^{-1} \frac{\sqrt{n_f^2 \sin^2 \theta - n_c^2}}{n_f \cos \theta}, \quad (4)$$

$$\phi_{CTM} = 2 \tan^{-1} \frac{n_f \sqrt{n_f^2 \sin^2 \theta - n_s^2}}{n_s \cos \theta}, \quad (5)$$

$$\phi_{STM} = 2 \tan^{-1} \frac{n_f \sqrt{n_f^2 \sin^2 \theta - n_c^2}}{n_c \cos \theta}. \quad (6)$$

Esta condición se analizó en términos de dos configuraciones fundamentales. En la primera la onda viaja con la polarización TE (transversal eléctrico) en la que el campo \vec{E} es ortogonal al plano de propagación, y en la segunda con polarización TM (transversal magnético), donde el campo \vec{H} es ortogonal al plano de propagación.

Para el caso de guía de onda plana, con \vec{k} como vector de componentes $(0, k_y, k_z)$ entonces:

$$k_y = n_f k_0 \cos(\theta_m), \quad (7)$$

$$k_z = \beta_m = n_f k_0 \sin(\theta_m). \quad (8)$$

donde β_m es la constante de propagación del modo para el ángulo θ_m . Igualando la expresión $n_2 \sin \theta$ a n_{eff} , definido como *índice de refracción efectivo*, el cual presenta una relación directa con la constante de propagación del modo (β_m) y el vector de onda en el vacío, la cual está expresada de la forma:

$$n_{eff} = \frac{\beta_m}{k_0}. \quad (9)$$

El índice de refracción efectivo representa el índice de refracción que experimenta el modo propagado a lo largo de la guía, el cual debe cumplir la siguiente condición:

$$n_s < n_{eff} < n_f. \quad (10)$$

Se ha demostrado entonces que se deben cumplir ciertas condiciones para que la fase se conserve. Ahora, para demostrar que la polarización y la amplitud se conservan, es necesario hacer un análisis con bases en teoría electromagnética.

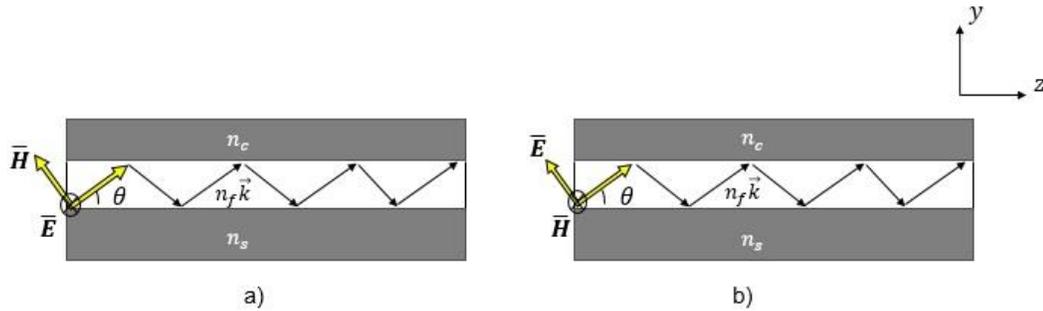


Figura 4. Casos fundamentales de polarización en las guías de onda plana a) TE y b) TM.

2.3 Estudio electromagnético en guías de onda planas.

Para poder calcular la interacción entre un haz de luz y la guía de onda por la que se propaga, es necesario fundamentarlo con la teoría electromagnética. La solución a este análisis es propuesto con base en las ecuaciones de Maxwell para medios dieléctricos, acercándonos a la distribución de la intensidad de los modos asociados.

Para esto tomaremos una onda plana monocromática que viaja con una constante de propagación β propagándose en dirección z en una guía plana con tres medios (n_1, n_2, n_3) homogéneos dieléctricos ($\sigma=0$), no magnéticos ($\mu = \mu_0$), isotrópicos y lineal ($\vec{D} = \epsilon \vec{E}$, con $\epsilon = \epsilon_0 n^2$), donde sus campos magnéticos y eléctricos están dados por:

$$\vec{E} = E(x, y)e^{i(\omega t - \beta z)}, \quad (11)$$

$$\vec{H} = H(x, y)e^{i(\omega t - \beta z)}. \quad (12)$$

Escribiendo las ecuaciones de Maxwell en términos de estos dos campos, éstas se reducen a:

$$\nabla \cdot \vec{E} = 0, \quad (13)$$

$$\nabla \cdot \vec{H} = 0, \quad (14)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\mu_0 \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}, \quad (15)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \varepsilon_0 n^2 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}, \quad (16)$$

donde μ_0 y ε_0 son la permeabilidad magnética, y la permitividad dieléctrica en el vacío respectivamente y n es el índice de refracción del medio.

Sustituyendo (11) y (12) en (13-16) obtenemos el sistema de ecuaciones para las componentes del campo electromagnético de la forma:

$$\left. \begin{aligned} -i\beta E_x &= -i\omega\mu_0 H_y, \\ -\frac{\partial E_x}{\partial y} &= -i\omega\mu_0 H_z, \\ \frac{\partial H_z}{\partial y} + i\beta E_y &= i\omega\varepsilon_0 n^2 E_x. \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial E_z}{\partial y} + i\beta E_y &= -i\omega\mu_0 H_x, \\ -\beta H_x &= i\omega\varepsilon_0 n^2 E_y, \\ \frac{\partial H_x}{\partial y} &= i\omega\varepsilon_0 n^2 E_z \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

Resolviendo el sistema de ecuaciones (17) y (18), para una guía de onda plana donde:

$\frac{\partial \vec{E}}{\partial x} = 0$ y $\frac{\partial \vec{H}}{\partial x} = 0$; es decir, los campos no dependen del eje x , obtendremos sistemas de

ecuaciones desacopladas entre sí, que describen los modos TE y TM respectivamente.

Quedando así que los modos TE satisfacen la ecuación:

$$\frac{\partial^2 E_x}{\partial y^2} + (k^2 n_2^2 - \beta^2) E_x = 0, \quad (19)$$

donde

$$H_y = \frac{-\beta E_x}{\omega \mu_0}, \quad (20)$$

$$H_z = \frac{-i}{\omega \mu_0} \frac{\partial E_x}{\partial y}, \quad (21)$$

y las componentes $H_x = E_y = E_z = 0$.

Los modos TM satisfacen:

$$\frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{1}{n^2} \frac{\partial H_x(y)}{\partial y} \right] + \left(k_0^2 - \frac{\beta^2}{n_i^2} \right) H_x(y) = 0, \quad (22)$$

donde

$$E_y = \frac{-\beta H_x(y)}{\omega \varepsilon_0 n^2}, \quad (23)$$

$$E_z = \frac{1}{i \omega \varepsilon_0 n^2} \frac{\partial H_x(y)}{\partial y}. \quad (24)$$

y las componentes $H_z = H_y = E_x = 0$.

Las soluciones para E_x y H_x dependerán de la región de la guía que se desee resolver, ya que las soluciones para ambos campos tiene la misma forma, la ecuación se expresa de manera general de la forma:

$$U_m = \begin{cases} A_0 e^{-\alpha_3(y-a)}, & y > a \\ A_0 \left\{ \cos \left(k_f(y-a) - \frac{\alpha_c}{k_f} \text{sen} k_f(y-a) \right) \right\}, & -a \leq y \leq a \\ A_0 \left[\cos(k_f 2a) + \frac{\alpha_c}{k_f} \text{sen}(k_f 2a) \right] e^{\alpha_s(y+a)}, & y < a \end{cases} \quad (25)$$

con $m=1, 2, 3, \dots$, y

$$\alpha_c^2 = \beta^2 - k_0^2 n_c^2, \quad (26)$$

$$k_f^2 = k_0^2 n_c^2 - \beta^2, \quad (27)$$

$$\alpha_s^2 = \beta^2 - k_0^2 n_s^2, \quad (28)$$

donde U_m representa a los diferentes campos, A_0 su respectiva amplitud y β queda acotado por la ecuación (10), lo que indica que está restringido por valores de índice de refracción del sustrato y el núcleo. La relación en función de β con respecto a ω es llamada relación de dispersión, y nos permite caracterizar los modos con $m=1, 2, 3, \dots, n$.

Para modos TE:

$$k_f 2a = \tan^{-1} \frac{\alpha_c}{k_f} + \tan^{-1} \frac{\alpha_s}{k_f} + m\pi. \quad (29)$$

Para modos TM:

$$k_f 2a = \tan^{-1} \frac{n_f^2 \alpha_c}{n_c^2 k_f} + \tan^{-1} \frac{n_f^2 \alpha_s}{n_s^2 k_f} + m\pi \quad (30)$$

2.4 Guías monomodo y multimodo.

Una guía de onda es capaz de soportar uno o varios modos, los cuales son dependientes de las dimensiones del núcleo, la longitud de onda incidente y los índices de refracción del medio en el que se propagan. Una guía que soporta solamente un modo, es llamada

guía monomodal, mientras que las guías que soportan dos o más modos, son llamadas guías multimodal, y su distribución de campo mostrada en la Figura 5 se puede expresar como una superposición de modos, dada por:

$$E_x(y, z) = \sum_m A_m U_m(y) e^{\beta_m z}. \quad (31)$$

La amplitud de la componente E_x , se obtiene mediante:

$$|E_x| = E_x E_x^* = A_0^2 U_0(y)^2, \quad (32)$$

la cual indica que la amplitud del campo depende solamente de la componente y y no de la distancia de propagación z (si no se consideran pérdidas por dispersión). Cuando existe más de un modo propagándose por la guía, por ejemplo, una guía que soporta dos modos TE (TE_0 y TE_1), el campo total queda como:

$$E_x(y, z) = A_0 U_0(y) e^{\beta_0 z} + A_1 U_1(y) e^{\beta_2 z} \quad (33)$$

Obteniendo la distribución de amplitud tenemos:

$$|E_x| = E_x E_x^* = A_0^2 U_0(y)^2 + A_1^2 U_1(y)^2 + A_0 A_1 U_0 U_1 e^{(\beta_0 - \beta_1)z} + A_0 A_1 U_0 U_1 e^{(\beta_1 - \beta_0)z} \quad (34)$$

Esto nos dice que existe una dependencia con z ya que $\beta_0 \neq \beta_1$ (Saleh y Teich, 1991)

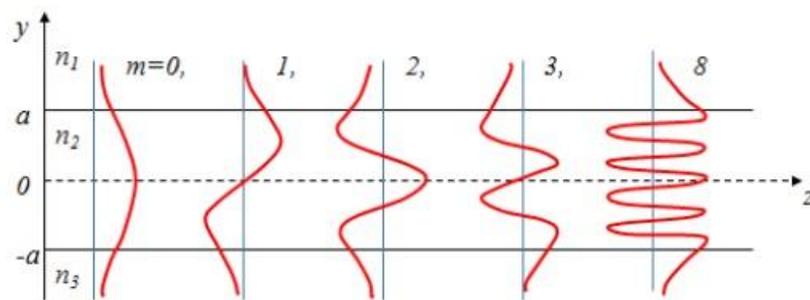


Figura 5. Distribución de campo en modos guiados TE.

2.5 Guías de onda ópticas de canal.

En general los dispositivos de óptica integrada están basados en guías de onda de canal, los cuales confinan la luz en dos direcciones, permitiendo la propagación en una sola dirección, a diferencia de las guías de onda planas donde la luz es confinada en una dirección, perpendicular a las interfaces.

El tipo de estructuras usadas como guías de onda de canal ópticas más comunes son: superficial, sumergida y sumergida con índice gradiente, y son mostradas en la Figura 6.

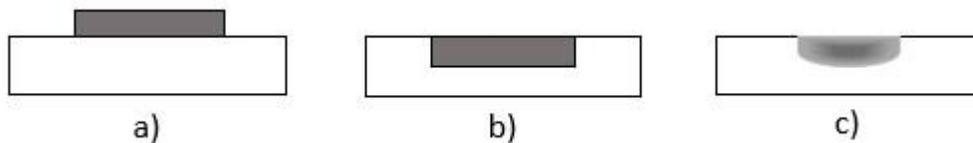


Figura 6. Guías de canal, a) guía superficial, b) guía sumergida, c) guía sumergida con índice gradiente.

Al trabajar con guías planas, ya sea con índice escalón o gradiente, la propagación de la luz puede ser descrita, como ya se ha dicho, en términos de modos de propagación TE y TM. Para el caso de guías de onda de canal ópticas no existen modos TE y TM “puros”, en su lugar se expresa en términos de modos electromagnéticos (TEM). Estos modos están fuertemente polarizados a lo largo de x y y (con z como la dirección de propagación de la luz) y por tanto se puede hacer una clasificación de acuerdo a la componente mayoritaria del campo eléctrico asociada a la radiación electromagnética.

Los modos que tengan su componente principal a lo largo del eje x son llamados modos E_{pq}^x y su comportamiento es muy parecido a los TM en las guías planas, por esta razón son llamados modos cuasi-TM, donde p y q son el número de nodos del campo eléctrico E_x en dirección x y y , respectivamente. Por consiguiente los modos E_{pq}^y , tienen E_y como componente principal del campo eléctrico, y su comportamiento está relacionado a los modos TE, y son considerados entonces modos cuasi-TE. (Lifante, 2003)

El análisis exacto de comportamiento modal para guías de canal ópticas, no es posible, aun tratándose del caso más simple de guía simétrica rectangular. Es por eso, que se realizan aproximaciones, y existen métodos numéricos que arrojan resultados

satisfactorios. Para esta tesis en particular, se recurrió al programa comercial *Rsoft*, el cual analiza el sistema mediante el método de propagación de haz y se describe brevemente a continuación.

2.6 Método de propagación de haces

En la presente sección se estudia el método de propagación de haces (*BPM-Beam Propagation Method*). Teniendo como objetivo la comprensión del método empleado por el programa utilizado para la simulación de propagación de luz en las guías de onda.

El Rsoft Beam PROP 2015.06 es un motor de simulación ampliamente utilizado para el diseño de dispositivos pasivos de óptica integrada y puede ser utilizado para la obtención del diseño y análisis de guías de onda de canal para la presente tesis. Este software incorpora técnicas de cálculo propias basadas en el método de propagación de haz (BPM) y utiliza un esquema implícito del algoritmo de Diferencias Finitas (FD-BPM) el cual posee mejor comportamiento en términos de robustez y eficiencia general cuando se compara con otros métodos disponibles (como por ejemplo el de Diferencia Finita Explícitas o soluciones basadas en la Transformada Rápida de Fourier (FFT)).

La interfaz gráfica de usuario se compone principalmente de un entorno CAD, fácilmente adaptable a las necesidades especiales de los dispositivos y circuitos fotónicos. Objetos fundamentales como segmentos de guías de onda rectos, curvados, ramificados, y lentes pueden ser seleccionados, y pueden ser añadidos de manera amigable, en cualquier momento pueden ser movidos o modificados a escala, también pueden ser eliminado o reinsertados. En general presenta un entorno bastante lógico y flexible para la creación de dispositivos complejos o sencillos. Cada componente del sistema posee su propio conjunto de propiedades y parámetros que pueden ser igualmente modificada o reasignada. El programa incluye un paquete de monitoreo que permite la medición de varias magnitudes físicas tales como distribución de potencia, pérdidas, obtención de modos de propagación, entre otros, durante la simulación. (BeamProp, User guide 2015)

2.6.1 Ecuación de Helmholtz, y Método de propagación de haces (BPM)

$$(\nabla^2 + k^2)\psi = \frac{\partial^2\psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\psi}{\partial z^2} + k^2\psi = 0. \quad (35)$$

El método de propagación de haz, para resolver la ecuación de Helmholtz en coordenadas cartesianas (35), utiliza el método diferencias finitas, el cual encuentra la distribución de los campos a lo largo de la guía de onda.

donde $k(x, y, z) = \frac{2\pi}{\lambda_0}n(x, y, z)$ y $n(x, y, z)$ es el índice de refracción. Definiendo ψ en términos de la distribución de campo, el factor de fase y amplitud dadas se obtiene la ecuación:

$$\psi(x, y, z) = u(x, y, z)e^{j\bar{k}z} \quad (36)$$

donde \bar{k} es una constante que describe los cambios de la fase de ψ en z . Sustituyendo la ecuación (36) en la ecuación (35) queda de la siguiente manera:

$$e^{j\bar{k}z} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + e^{j\bar{k}z} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u e^{j\bar{k}z}}{\partial z^2} + k^2 u e^{j\bar{k}z} = 0, \quad (37)$$

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} = e^{j\bar{k}z} \left(2j\bar{k} \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} - \bar{k}^2 u \right), \quad (38)$$

$$e^{j\bar{k}z} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + 2j\bar{k} \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} - \bar{k}^2 u + k^2 u \right) = 0. \quad (39)$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \ll 2j\bar{k} \frac{\partial u}{\partial z}, \quad (40)$$

Haciendo una aproximación, aplicando (40), la ecuación fundamental que usa el método de propagación de haz queda de la forma:

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{j}{2\bar{k}} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + (\bar{k}^2 + k^2)u \right). \quad (41)$$

La ecuación (41) es la más simple para el método de propagación de haz para tres dimensiones (3D), dado un campo de entrada $u(x, y, z = 0)$, se puede determinar la evolución del campo en $z > 0$. (Okamoto, 2000)

2.7 Fundamentos teóricos: implantación de iones.

Existen diversas técnicas para la fabricación de guías de onda, una de ellas es la implantación de iones, como ya se ha mencionado este proceso posee la ventaja de poder ser aplicado a diferentes materiales y puede hacerse en ambientes a bajas temperaturas.

La implantación de iones es una técnica de fabricación que modifica superficialmente las propiedades de los materiales alterando sus características ya sea químicamente o estructuralmente. Esto se debe a las interacciones de los iones con el material. Los iones al ser acelerados e incidir en el material atravesando las capas atómicas superficiales, poco a poco van siendo frenados hasta alcanzar una distancia máxima de implantación (profundidad), la cual puede ser controlada mediante la energía y la masa de los iones.

Para obtener los resultados deseados primero es necesario tomar en cuenta varios parámetros importantes, tales como: tipos de iones a implantar, material del sustrato donde se implantarán los iones, dosis o fluencia de implantación, y la energía de implantación. La dosis o fluencia de implantación se define como número de iones a implantar por unidad de área ($\text{átomos}/\text{cm}^2$). La energía de implantación varía desde unos cuantos keV a algunos MeV .

La profundidad de penetración de los iones es dependiente de la masa del ion, el material del sustrato, la energía de aceleración de los iones, y la orientación del haz de iones incidentes. (Ramírez C., 2014)

La implantación de iones puede dividirse en tres procesos principales:

- 1.-Aceleración de iones
- 2.-Frenado de iones
- 3.-Efectos de la implantación

2.7.1 Aceleración de iones:

Para acelerar los iones y así mismo darles una dirección de implantación, es necesario usar sistemas electromagnéticos, en este caso se usa un acelerador de iones en donde los iones son extraídos de una fuente generadora, un campo eléctrico los acelera y mediante un haz de iones se hacen incidir en el material con un barrido sobre la superficie.

2.7.2 Frenado de iones:

Al penetrar los iones, interactúan con el material experimentando una desaceleración hasta llegar a una profundidad máxima, dando un perfil de concentración de iones casi gaussiano. Como se ha mencionado antes, el material sufre cambios químicos y estructurales. Al llegar al frenado total de iones, la matriz sufre un re-ordenamiento en la red atómica como la que se muestra en la Figura 7. Este nuevo re-ordenamiento genera una compactación y un cambio de densidad en la red atómica.

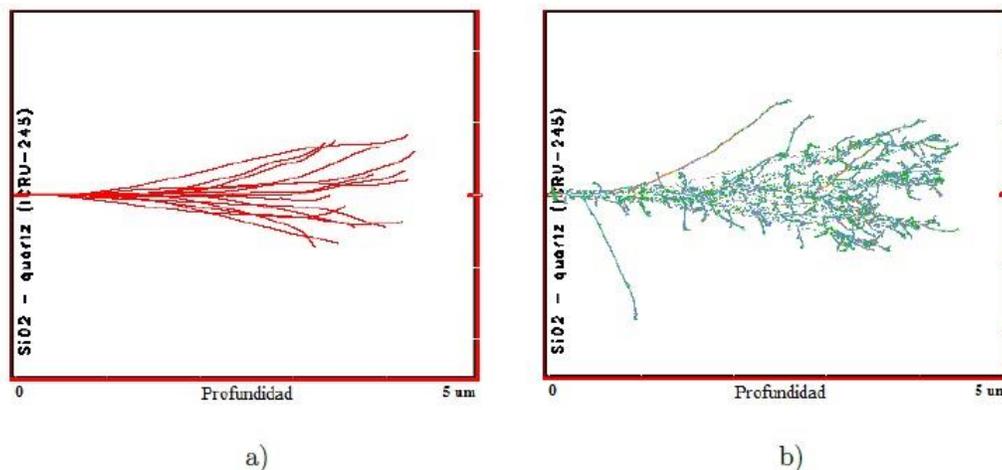


Figura 7. Daño estructural al material implantado, a) trayectoria de los iones, b) reordenamiento de la red vítrea. SRIM 2012 (Ramírez C., 2014)

Existen dos procesos para entender el frenado de iones:

1.- excitación electrónica.

2.-colisiones nucleares

Cada uno de estos procesos transfiere energía a la matriz del material originando el frenado de iones. La Figura 8 muestra la importancia de cada uno de estos procesos de frenado en función de la energía del ion; es decir, el frenado nuclear es dominante a energías bajas, y el frenado debido a excitación electrónica lo es a energías altas.

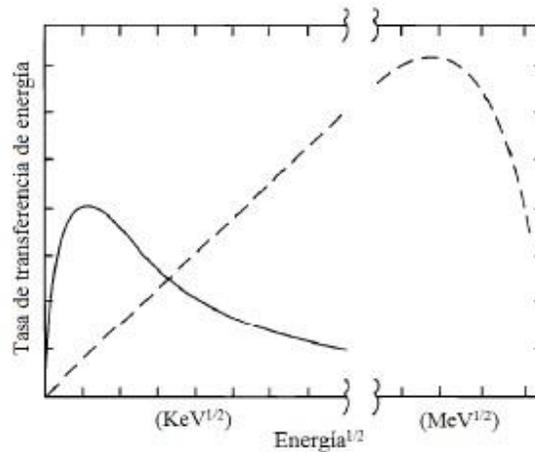


Figura 8. Diferencias entre transferencia de energía por frenado electrónico (línea punteada) y energía nuclear. (Townsend et.al.1994).

Cuando un ion con energía inicial de mega-electrón-volts (MeV) incide en la superficie del sustrato, el proceso de frenado aplicado es el de energía de excitación electrónica, el ion penetra a una profundidad del orden de micrómetros y su energía disminuye a kilo-electrón-volts (keV), y el proceso de frenado ahora es el de las colisiones nucleares, hasta que el ion es detenido (Flores, 2008).

Para hacer un análisis cuantitativo de las pérdidas de energía durante el tránsito de los iones por la materia. Se suman las energías perdidas por cada componente del sistema suponiendo que son independientes:

$$\left(\frac{dE}{dx}\right) = -S(E), \quad (42)$$

donde E , es la energía del ion, $S(E)$ es la fuerza de frenado, indica la pérdida de energía de una partícula por unidad de longitud. Sumando cada componente:

$$-S(E) = \sum_i \left(\frac{dE}{dx}\right)_i = \left(\frac{dE}{dx}\right)_{nuclear} + \left(\frac{dE}{dx}\right)_{electrónica} + \left(\frac{dE}{dx}\right)_{otras}, \quad (43)$$

En general $\left(\frac{dE}{dx}\right)_{otras}$ puede ser despreciada ya que son pequeñas.

Debido a que cada fuerza de frenado está en función de la masa y la velocidad del ion, la longitud media de la trayectoria seguida por los iones $R(E)$ dentro del material antes de llegar al reposo se puede estimar mediante:

$$R(E) = \int_0^E \frac{dE}{\sum_i \left(\frac{dE}{dx}\right)_i} \quad (44)$$

Es posible calcular la longitud de la trayectoria total de un ion para funciones establecidas para dE/dx . Debido a que la dispersión que sufre el ion, llamado alcance proyectado promedio $R_p(E)$, es menor que $R(E)$ por un factor dependiente de la trayectoria media, ángulos de dispersión y de la trayectoria específica para un solo ion. Del resultado de las múltiples colisiones los iones serán desviados de su dirección original, lo que provocará una propagación lateral, denotado por: R_{\perp} , llamado efecto de corrimiento lateral. Para el caso en que el objetivo es un solo elemento la proporción de $R_p/R \leq 1$ dependiendo de la masa de los iones. Cuando el objetivo es un elemento compuesto, el cálculo de las proporciones con los iones es más complejo debido a que se deben hacer consideraciones de las interacciones entre los iones y los diferentes átomos del compuesto. Las fluctuaciones en el mecanismo de frenado aumentarán la longitud media $R(E)$ y contribuirán a la dispersión longitudinal ΔR_p . El efecto corrimiento lateral es una distribución de iones aproximadamente gaussiana. Para implantes de baja energía a una profundidad x , en un sustrato de densidad atómico N , la concentración de iones incidentes φ (iones/cm²) está caracterizado por R_p and ΔR_p :

$$C(x) = \frac{\varphi}{(2\pi)^{1/2} N \Delta R_p} \exp \left[\frac{-(x - R_p)^2}{2\pi \Delta R_p^2} \right] \quad (45)$$

2.7.3 Efectos de implantación:

El principal efecto que produce implantar iones en un material, es en las propiedades físicas; mayormente en las ópticas, al modificar el índice de refracción. Estas modificaciones se deben a los dos procesos de frenado mencionados anteriormente: por colisiones nucleares y excitación electrónica.

El efecto dominante en la implantación de iones sobre el índice de refracción se debe principalmente al cambio en la red atómica, producido por las colisiones nucleares, es decir, una disminución en la densidad física que altera la composición del índice de refracción. Debido a este cambio en el índice de refracción, es posible formar guías de onda con aplicaciones en óptica integrada. Ya que estos cambios se producen en una zona limitada del sustrato, y al estudiarlos se ha podido comprobar que la implantación de iones es una poderosa herramienta para la formación de guías de onda ópticas en condiciones controladas, formación de capas en vidrios con propiedades ópticas no lineales y capas antirreflectoras controladas (Townsend et.al.1994).

Este cambio en el índice de refracción es posible calcularlo aplicando la adaptación que Wei et al.(1974) hicieron de la ecuación de Lorentz-Lorenz, la cual da el resultado para el cambio en el índice de refracción (Townsend et al., 1994):

$$\frac{\Delta n}{n} = \frac{(n^2 - 1)(n^2 + 2)}{6n^2} \left[-\frac{\Delta V}{V} + \frac{\Delta \alpha}{\alpha} + F \right] \quad (46)$$

donde ΔV es la expansión de volumen, $\Delta \alpha$ es el cambio en la polarizabilidad y F representa factores estructurales. El término $-\Delta V$ será en general el dominante lo cual origina una disminución en el índice de refracción de la región implantada. Sin embargo al reestructurarse la red se producen cambios en los enlaces químicos, y por tanto, en la polarizabilidad $\Delta \alpha$, entre otros cambios, tales como, el esfuerzo y la difusión atómica y de defectos.

2.7.4 Simuladores: Implantación de iones

La finalidad de un simulador es el uso de modelos matemáticos de naturaleza predictiva que puedan aproximarnos a los resultados que se pretenden alcanzar. Para éste caso en particular se implementó un simulador de implantación de iones, llamado SRIM 2012 (Stopping and Range of Ions in Matter), la cual es una versión actualizada de la sub-rutina TRIM (Transport of Ions in Matter) creada por Ziegler y Biersack (Ziegler, 2008). Se fundamenta en el método de Monte Carlo, relacionándolo a colisiones binarias y cálculos estadísticos logra determinar el número de átomos desplazados por ion mostrado en la Figura 9.

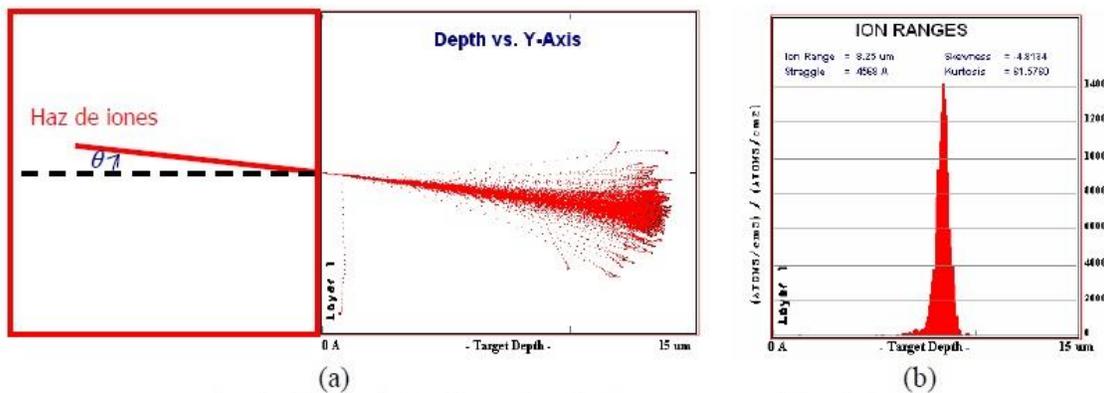


Figura 9. Simulación de implantación de iones en materiales, a) ejemplo del cálculo de trayectorias probables para iones que entran al sustrato, b) ejemplo de una gráfica de distribución de iones implantados, en función de la profundidad en el sustrato. (Flores R. E. 2008)

Capítulo 3.

Metodología del diseño de guías de onda de canal y fabricación

En este capítulo se presentan los criterios que se tomaron para el diseño y fabricación de las guías de onda de canal del tipo pasivas. El análisis se enfoca para guías de onda ópticas monomodal en estructuras rectas, curvas-S y curvas-C (medio acoplador direccional), para las líneas de comunicaciones ópticas de 1310 nm y 1550 nm. Se tomó como base el estudio previo en guías de onda planas (Ramírez, et.al. 2015). Los parámetros implementados se basaron en alto confinamiento óptico y pérdidas de propagación bajas con capacidad de acoplamiento a fibras ópticas.

3.1 Introducción

Como se ha mencionado con anterioridad el análisis se enfoca a guías ópticas de canal pasivas, con estructuras del tipo rectas, curvas-S y curvas-C mostradas en la figura 10. Para su diseño es necesario saber el funcionamiento de cada una; es decir, la estructura de canal recta tiene como principal función interconectar elementos del circuito, las curvas-S cambian la dirección del modo guiado, y la función curva-C se implementó con la finalidad de dar inicio al análisis del medio acoplador direccional. También es necesario saber qué tipo de pérdidas inducen este tipo de estructuras y cómo reducirlas, para el caso de curvas, la principal pérdida que se induce es en las curvaturas.

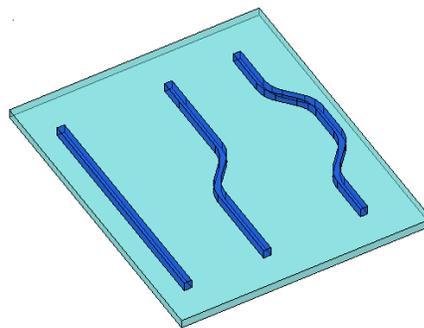


Figura 10.- Guías de onda ópticas de canal tipo rectas, curvas-S y curvas-C.

Las pérdidas por curvatura están definidas como la continua radiación tangencial de la potencia del modo al pasar por la sección curvada de la guía. Esta radiación se debe a que el campo del modo en la curva presenta fugas mostradas en la Figura 11. Este tipo de pérdidas se pueden reducir haciendo el radio de curvatura más grande o mediante el

incremento del confinamiento del modo. Sin embargo estos cambios generan un cambio en el tamaño del dispositivo o incrementan la introducción de pérdidas.

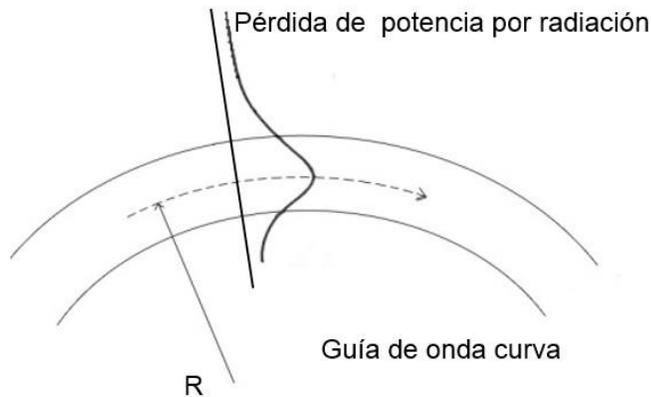


Figura 11. Radiación del modo, donde R, es el radio de curvatura.

3.2 Simulación de índice de refracción e implantación de iones.

En esta sección se hablará del estudio de los parámetros que se tomaron en el diseño para la fabricación de las guías de onda por multi-implantación de iones, tomando como referencia el marco teórico antes propuesto. Para esto fue necesario el uso de programas de simulación por computadora, tanto para estimar el índice de refracción como para obtener los parámetros de implantación.

El uso de simuladores durante los últimos años ha ido creciendo debido a su gran eficacia para estimar distribución de iones, perfil de implantación, concentración y distribución de daño causado al sustrato, en el proceso de implantación. Para este trabajo, se utilizó el programa SRIM 2012 (Stopping and Range of Ions in Matter) desarrollado por Ziegler y Biersack (Ziegler, et.al., 2008). Este simulador usa algoritmos con procesos estadísticos (Método MonteCarlo), que predicen el desplazamiento de los átomos al colisionar con los iones. En específico SRIM 2012, permite obtener información acerca de la implantación en diferentes materiales mostrando la distribución final de los iones y daño del sustrato. Algunos de los parámetros que se pueden variar en el programa son los iones, el sustrato, la energía y el número de iones a simular.

Los parámetros para la fabricación de guías de onda ópticas de canal son: energía de implantación, dosis y distribución de iones implantados; junto con una metodología para

el diseño de guías de onda de índice escalón que fueron obtenidos en estudios previos para guías de onda planas (Ramírez, et.al. 2015). El proceso y resultados se describen brevemente a continuación.

La primera etapa comprende la simulación del índice de refracción, los parámetros trabajados en ésta etapa fueron: índice de refracción de sustrato, cambio máximo de índice de refracción y profundidad. Cada uno de estos parámetros fue modificado para la obtención del perfil escalón deseado. El simulador empleado para este estudio fue desarrollado por G.Lifante, y tiene por nombre Ion Implanted Waveguide (WII), se basa en el Método del Cálculo de la Reflectividad (Lifante, et.al. 2003), para obtener valores teóricos del índice efectivo. Y dependiendo del perfil de índice de refracción determinado, se pueden obtener los modos de propagación característicos de cada longitud de onda. Con este análisis óptico en las propiedades de las guías de onda, se obtuvo un confinamiento adecuado de dos modos para 633nm, lo que es posible tomar si el núcleo de la guía es aproximadamente de 2-3 μm de ancho y $\Delta n \approx 0.008$. Asimismo, se determinó que tales condiciones pueden obtenerse usando multi-implantación de iones, esto se logra con 5 implantaciones a diferentes dosis y energías, mostrado en la Tabla 1 y Figura 12.

Tabla1.- Energía de implantación y dosis.

Energía de multi- implantación	Dosis(átomos/ cm^2)		
	<i>M1</i>	<i>M2</i>	<i>M4</i>
9 MeV	5×10^{14}	1×10^{15}	5×10^{15}
7 MeV	2.5121×10^{14}	5.025×10^{14}	2.5119×10^{15}
6 MeV	1.4748×10^{14}	2.9505×10^{14}	1.475×10^{15}
5.2 MeV	2.0689×10^{14}	4.1375×10^{14}	2.069×10^{15}
4.3 MeV	1.9508×10^{14}	3.9×10^{14}	1.95×10^{15}

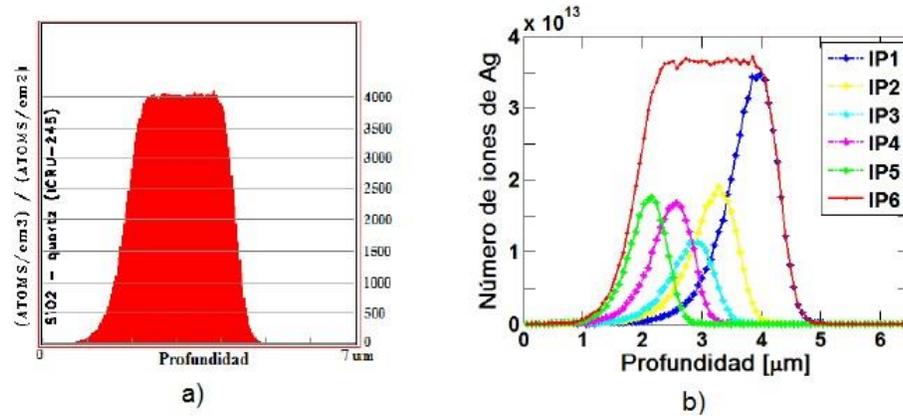


Figura 12.- Perfil de implantación, con las dosis y energías mostradas en la Tabla 1.

3.3 Reconstrucción del perfil de índice de refracción:

Como se había mencionado, formar guías de onda ópticas mediante implantación de iones, crea un área de compactación en la parte superior del canal; es decir, en la parte por donde inciden los iones, provocando un aumento de índice de refracción en esa sección, debido a las interacciones de frenado y colisiones de iones (Ramirez, et.al. 2015). Formando un perfil asimétrico escalonado como el que se muestra en la Figura 13.

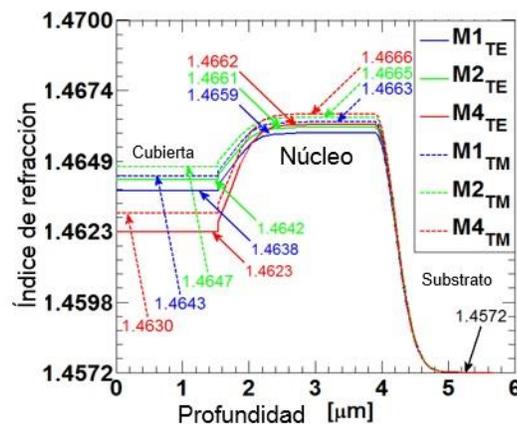


Figura 13.- Perfiles de índice de refracción TE/TM calculados para las guías de onda M1, M2 y M4.

3.4 Aproximación en el análisis de la propagación

Teniendo los parámetros que se necesitan para tener un perfil escalón y las condiciones óptimas en confinamiento óptico para guías de onda planas mediante multi-implantación de iones. Es posible continuar con la siguiente etapa, es decir, la obtención de parámetros

para el diseño de guías de onda ópticas de canal. El proceso para el diseño de guías de onda de canal consistió en:

1. Proponer dimensiones transversales de las guías; es decir, ancho y profundidad, en función del comportamiento óptico esperado, tomando en cuenta los estudios previos para guías de onda planas. Ver Figura 14.
2. Proponer radios de curvatura óptimos para obtener mínimas pérdidas por radiación por curvatura.
3. Diseño y fabricación de una mascarilla de implantación, con la finalidad de acotar las dimensiones propuestas en los pasos anteriores.

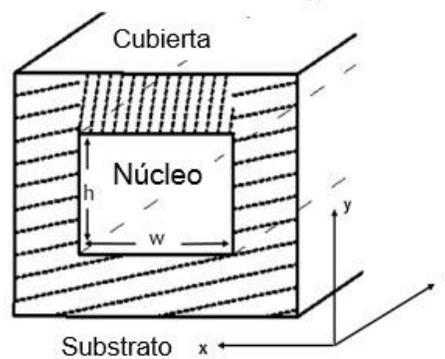


Figura 14.- Sección transversal de la guía de onda de canal.

3.5 Obtención de dimensiones transversales

Para que las guías de onda tengan un régimen monomodal, deben cumplir ciertas condiciones, y la diferencia entre índice de refracción del núcleo y cubierta deben ser los óptimos para tener la condición de reflexión total interna, que satisface $k_0 n_g > \beta > k_0 n_s$. Las ecuaciones de dispersión para estructuras del tipo asimétricas están descritas por:

Para polarizaciones TE:

$$2hk_0\sqrt{n_g^2 - N^2} - m\pi = \tan^{-1}\left(\sqrt{\frac{N^2 - n_c^2}{n_g^2 - N^2}}\right) + \tan^{-1}\left(\sqrt{\frac{N^2 - n_s^2}{n_g^2 - N^2}}\right), \quad (46)$$

y TM:

$$2hk_0\sqrt{n_g^2 - N^2} - m\pi = \tan^{-1}\left(\left(\frac{n_g}{n_c}\right)^2 \sqrt{\frac{N^2 - n_c^2}{n_g^2 - N^2}}\right) + \tan^{-1}\left(\left(\frac{n_g}{n_s}\right)^2 \sqrt{\frac{N^2 - n_s^2}{n_g^2 - N^2}}\right), \quad (47)$$

donde n_s , n_g y n_c son índices de refracción del sustrato, núcleo y cubierta respectivamente, N es el índice efectivo de la guía, $k_0 = \omega/c$, $\beta = Nk_0$ y h es el espesor.

Estas ecuaciones pueden ser resueltas mediante métodos analíticos o numéricamente, Una manera para determinar el carácter monomodal del diseño en las guías de onda, es variando el ancho w de la sección transversal. Este análisis se logró mediante un corte en el espesor mediante el método del índice efectivo (EIM) (Lifante, et.al., 2003), el cual separa la sección transversal de la guía de onda en la dirección x (horizontal); es determinada por el ancho de la mascarilla, y la dirección y (vertical,); es determinada por las condiciones de implantación (Ramírez, et.al. 2015). Ambas secciones pueden ser analizadas independientemente o juntas mediante el Método de Índice Efectivo (EIM). De manera que la guía analizada se secciona en dos estructuras de guías planas, la dirección x con perfil de índice simétrico y la sección y con perfil de índice asimétrico. El cual se realizó, para el ancho, w . *BeamProp Rsoft* provee ese tipo de análisis mediante un barrido de tamaños en las dimensiones; frecuencia de corte, los cuales fueron hechos para cada muestra (M1, M2 y M4) y para cada longitud de onda (633nm y 1550nm). Los resultados obtenidos para M1 se muestran en la Figura 15, en los cuales se observa el aumento de índice efectivo de los modos TE incrementen proporcionalmente al ancho, también se observa que la estructura se convierte a multimodal, al incrementar al ancho, como es de esperarse. Entonces para que la estructura soporte solamente un modo es necesario que el ancho sea menor a $5.75\mu\text{m}$ y $17\mu\text{m}$ para longitudes de onda de 633nm y 1550nm respectivamente para polarización TE. El análisis propuesto se hizo con la finalidad de obtener guías ópticas de canal monomodales, los tamaños obtenidos para cada longitud y muestra se describen en la tabla 2.

3.5.1.-Simulación Rsoft

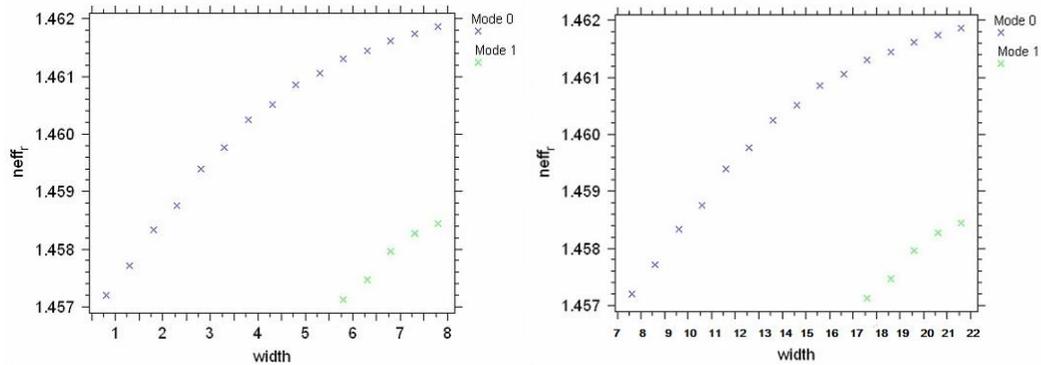


Figura 15.- Frecuencia de corte para $\lambda=633\text{nm}$ y $\lambda=1550\text{nm}$.

Tabla 2.- Dimensiones de anchos obtenidas mediante ancho de corte.

Muestra	633nm	1550nm
M1	5.5 μm	8.5 μm
M2	5.7 μm	9.0 μm
M4	5.6 μm	8.7 μm

3.6.- Obtención de radios de curvatura.

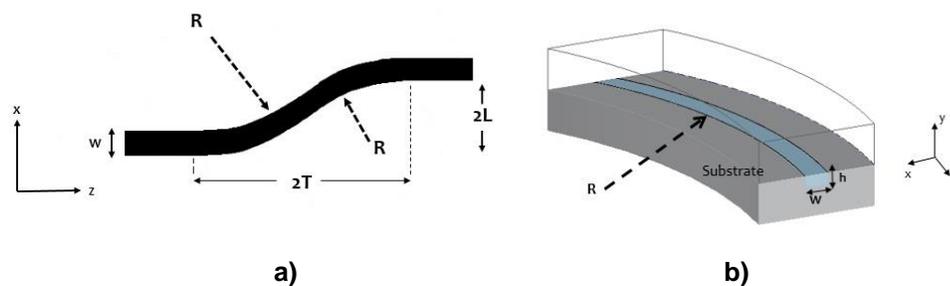


Figura 16.- Diseño de una curva-S con estructura simétrica, a) partes de la estructura curva-S, b) corte transversal de curvas

Una de las propiedades más importantes en las que se basa la óptica integrada es la flexibilidad con que las estructuras de guías de onda bidimensionales pueden crear una ruta a lo largo del sustrato, esto se obtiene mediante el uso de guías de onda curvas o rectas. El diseño que se presenta es el de una curva-S con estructura simétrica; es decir,

que los elementos curvos que componen a la estructura tienen un radio de curvatura idéntico como se muestra en la Figura 16, la relación de cada uno se obtiene mediante:

$$T = \sqrt{2RL - L^2}, \quad (48)$$

donde R es el radio de curvatura, T el desplazamiento longitudinal y L es un “jog” o paso corto.

Por lo general el radio empleado es del orden de cientos de micras hasta milímetros, ésta característica se basa en el comportamiento modal y las pérdidas, ya que existe la pérdida de energía que resulta de los modos radiados, esto se presenta en la curvatura de la guía al ser “empujado” el modo como se muestra en la figura 11. Tomando esto en consideración, las pérdidas por radiación de curvatura, α_{curva} se expresan como:

$$\alpha_{curva} = C_1 e^{-C_2 R}, \quad (49)$$

que nos dice que el radio R , debe ser tan pequeño como sea posible y las constantes C_1 y C_2 están relacionadas con la estructura de la guía de onda. La relación exponencial que existe entre las pérdidas por radiación de curvatura y R , muestra la importancia del uso de valores grandes que se utilizan en R normalmente. Las pérdidas también están en función del confinamiento óptico, que implica una constante de decaimiento lateral, la cual es requerida para obtener pérdidas bajas en las curvas. (Zappe, 1995).

Se ha mencionado entonces el tipo de pérdidas básicas que existen por curvaturas y un planteamiento a la solución del problema. Por simplicidad en esta tesis se presenta el análisis de radios de curvatura para el diseño de curvas-S y curvas-C, que consiste en el aumento de radio de curvatura hasta alcanzar una disminución de pérdidas en la propagación de las guías. Para este caso en especial se diseñó una estructura simétrica, es decir, los elementos curvos tienen el mismo radio de curvatura, y un desplazamiento transversal de $S = 62.5\mu m$, también se consideró el diseño de las curvas-S para ser usado como un divisor del tipo Y, o un acoplador 2x2, con una separación entre ramales de $250\mu m$, lo que hace posible conectar la estructura a dos fibras estándar con diámetro de

$125\mu\text{m}$. Los desplazamientos longitudinales $2T$, pueden ser obtenidos mediante la ecuación (49), para elementos curvos, con diferentes radios de curvatura, pudiendo obtener valores de 0.9mm , 1.8mm y 6mm para radios de curvatura de $1500\mu\text{m}$, $6000\mu\text{m}$ y $70000\mu\text{m}$ que se muestran en la Figura 17y 18, para longitudes de onda de 633nm y 1500nm respectivamente.

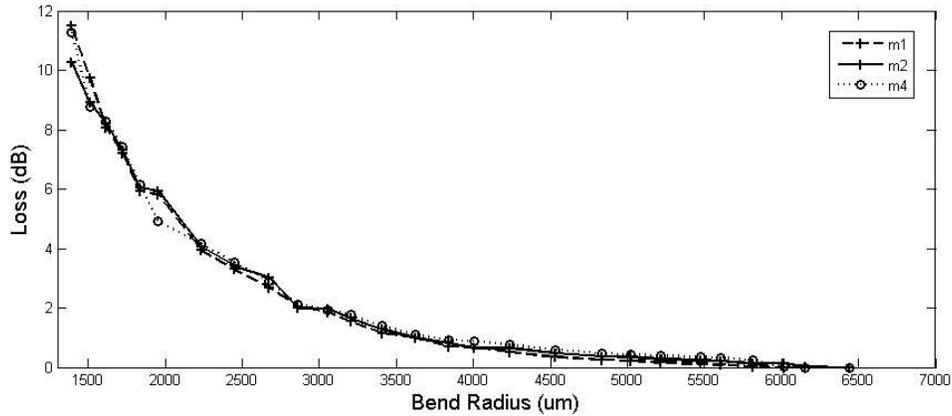


Figura 17.- Pérdidas por curvatura con diferentes radios de curvatura para M1, M2 y M4, con $\lambda= 633\text{nm}$.

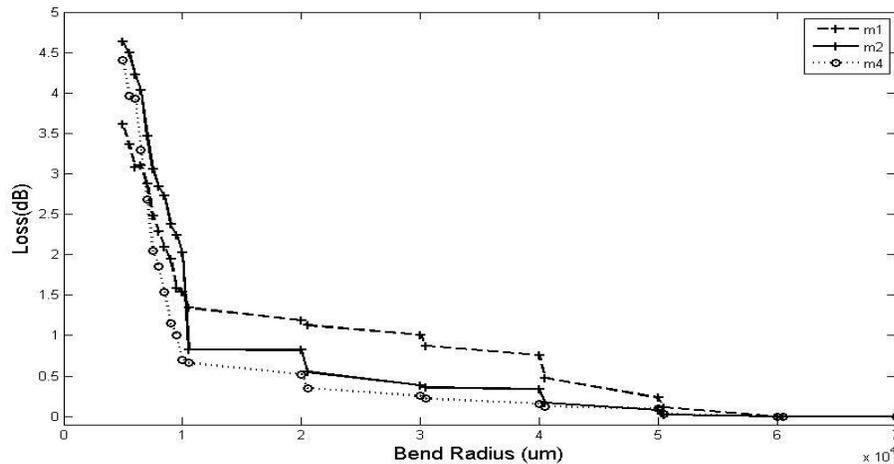


Figura 18. Pérdidas por curvatura con diferentes radios de curvatura para M1, M2 y M4, con $\lambda= 1550\text{nm}$.

Se eligieron para el diseño de curvas los radios de $4 \times 10^3 \mu\text{m}$ y $6 \times 10^3 \mu\text{m}$ para 633nm ; $4 \times 10^4 \mu\text{m}$ y $7 \times 10^4 \mu\text{m}$ para 1550nm considerando un rendimiento aproximado de $\sim 1.0\text{dB}$ y $\sim 0.01\text{dB}$, respectivamente.

3.7 La mascarilla de implantación.

Como se había mencionado antes, existen varios métodos para la fabricación de guías de onda de canal, uno de ellos es mediante el uso de mascarillas la cual sirve para acotar las dimensiones obtenidas mediante un análisis previo. Para la implantación de iones, es de gran importancia ya que en éste método la modificación del índice de refracción en el plano x-y y la mascarilla sólo deja pasar los iones en la dirección y, acotando las dimensiones del canal. Las características generales que debe tener tal mascarilla y sea útil al acotar

dimensiones con el ancho propuesto, son las siguientes:

- 1.- El espesor debe de ser lo suficientemente grande para impedir el paso de los iones en las regiones donde no se desea una formación de implantación.
- 2.- Contener la formación de familias de canales, con las dimensiones propuestas para la formación de las guías.
- 3.-Mantener una separación de 250 μm entre cada canal, para evitar el traslape de modos.
- 4.-Facilidad para ser usada y no causar daño físico ni químico al sustrato, durante y después de la implantación
- 5.-Ser de mayor tamaño al sustrato, con la finalidad de poder abarcar todas las zonas a implantar y formar la guía.

Existen varias técnicas para fabricar mascarillas de implantación de iones, las más utilizadas son las mascarillas metálicas depositadas por técnicas de microlitografía (Field, 1991), mascarillas de resina fotosensible (Fluck., 1996). Para este trabajo se utilizó una mascarilla de implantación fabricada por medio de litografía profunda de rayos X. La sigla LIGA, proviene del alemán y es una abreviación de “litografía, galvanización y conformado”.

Para este trabajo la mascarilla fue hecha de níquel fabricada por Optnics-Japón, el diseño final se muestra en la figura. El diseño que fue pensando para optimizar espacio y costos de fabricación, consta de 3 tipos de familias que se muestran en la Figura 19:

- 1.- Familia A - rectas: 10 líneas rectas con ancho de 8.5 μm
- 2.- Familia B y C- curvas S: 10 canales con radios de curvatura 4x10⁴ μm , y 10 canales con radios de curvatura 7x10⁴ μm .

3.- Familia D y E-curvas C: 10 canales con radios de curvatura $4 \times 10^4 \mu\text{m}$, y 10 canales con radios de curvatura $7 \times 10^4 \mu\text{m}$.

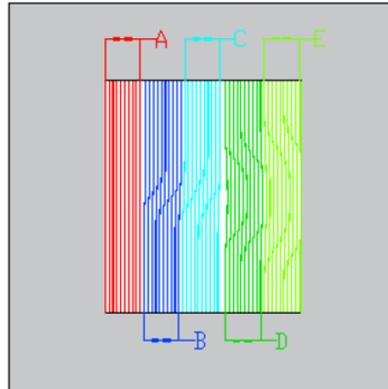


Figura 19. Familias en el diseño de la mascarilla.

De acuerdo a la simulación en el programa SRIM 2012 se requiere un espesor mínimo en la parte de las rendijas de $3 \mu\text{m}$ para impedir el paso de iones de plata, para la estructura de níquel. Los espacios y características generales se presentan en la figura 20.

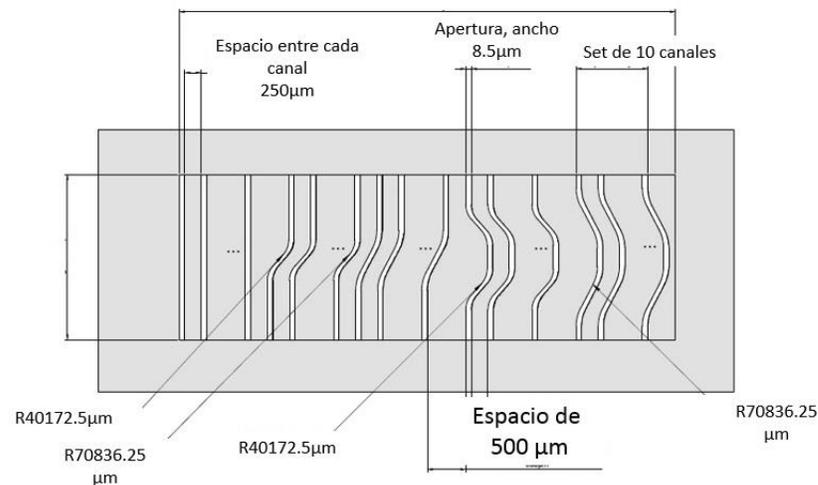


Figura 20. Diseño general de la mascarilla de implantación, con la configuración de las familias, y espaciado entre cada una.

Una vez fabricada la mascarilla se obtuvo una fotografía de ésta mediante un arreglo de lentes para aumentar la imagen. La cual se muestra en la Figura 21.

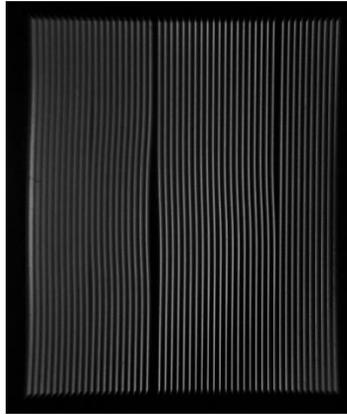


Figura 21. Fotografía de la mascarilla fabricada.

Se fabricó un portamascarillas mostrado en la Figura 22 para mantener fijo, tanto el sustrato como la mascarilla durante la implantación, el cual consiste en una base y una cubierta. La base contiene al sustrato y la mascarilla. La cubierta contiene una ventana que deja pasar los iones para la implantación, las dos estructuras se sujetan con tornillos en las esquinas. Sus dimensiones internas son:

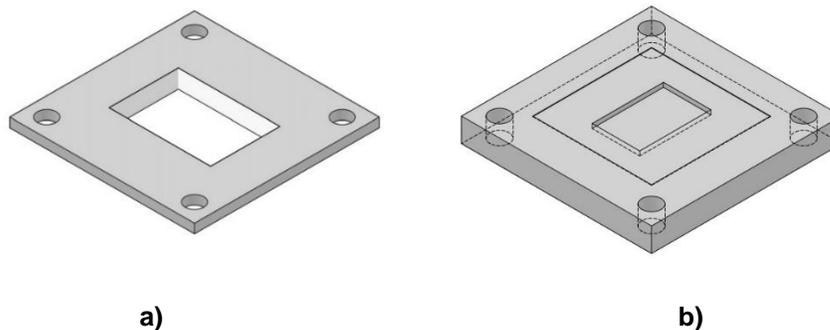


Figura 22. Composición del portamascarillas, a) parte superior interna mide 11mmx18mm, y la parte externa 40mmx40mm b) parte inferior donde se coloca el sustrato mide 10mmx15mm, donde se coloca la mascarilla 25mmx25mm y la parte exterior es de 40mmx40mm.

3.8 Fabricación de las guías de onda.

Para que la implantación de iones se lleve a cabo de una manera óptima, se deben seguir, primero, varios procedimientos de limpieza, y después la muestra puede ser depositada en la implantadora de iones.

Selección del sustrato. Los sustratos utilizados para la implantación fueron de cuarzo fundido (SiO_2), de 15mmx10mmx1mm previamente pulidos. Debido a que el uso de estos sustratos es para el guiado de luz, deben tener sus caras lo menos dañadas posible, esto

se corrobora mediante la observación del sustrato a través de un microscopio. Se hace una selección de la cara menos dañadas, para dos muestras a implantar.

Limpieza del sustrato. Una vez seleccionada la cara a implantar, se puede limpiar el sustrato, este procedimiento consiste en, primero, hacer una ligera limpieza con hisopos de algodón levemente humedecidos con acetona. En la segunda etapa se coloca una capa de crema para limpieza de sustrato, en este caso se utilizó la de la compañía Umicore, que se muestra en la Figura 23 y se deja secar aproximadamente 24 horas. El último procedimiento es retirar la capa de crema de toda la superficie del sustrato, esto se logra utilizando, nuevamente, hisopos de algodón humedecidos con acetona. El procedimiento se aplica para toda la superficie del sustrato, sin perder de vista la cara previamente seleccionada para la implantación y se repite para cada sustrato.



Figura 23. Limpieza del sustrato.

Limpieza del portamascarillas. Esta estructura al ser no tan delicada como el sustrato, y presentar muestras mayores de polvo o grasa debido a su proceso de fabricación, es posible limpiarla con una toallita para limpieza de superficies ópticas igualmente humedecida en acetona o alcohol, para las esquinas se utilizó hisopos de algodón.

Limpieza de la mascarilla. Ya que esta estructura fue enviada de fábrica, no presentaba tantas impurezas, pero al ser colocada en el portamascarillas y expuesta al ambiente adquirió un poco de polvo en la superficie, y ésta al ser delicada por su espesor, para su limpieza, fue tratada con aire comprimido para remover las partículas de polvo.

Una vez limpios los sustratos, mascarilla y portamascarillas, se montó cada elemento para meterlo a la implantadora, la Figura 24 muestra la parte inferior del portamascarillas con el sustrato dentro y a un lado la mascarilla.

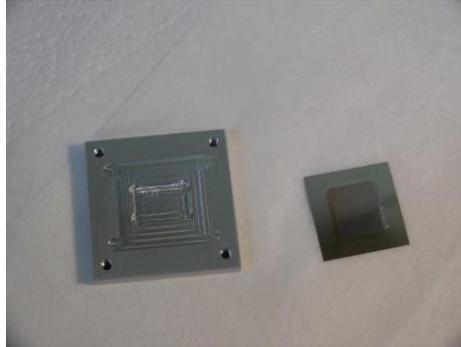


Figura 24. Parte inferior del portamascarillas y la mascarilla.

Como se puede observar en la Figura 25 el único elemento que presenta problemas para su colocación en la mascarilla, ya que tiene forma cuadrada y si está mal colocada, las guías quedarán implantadas a lo largo y no a lo ancho del sustrato. Así que tomando en cuenta esto, la mascarilla es colocada con los canales perpendicularmente, a lo largo del sustrato. Y la cubierta es atornillada al finalizar.

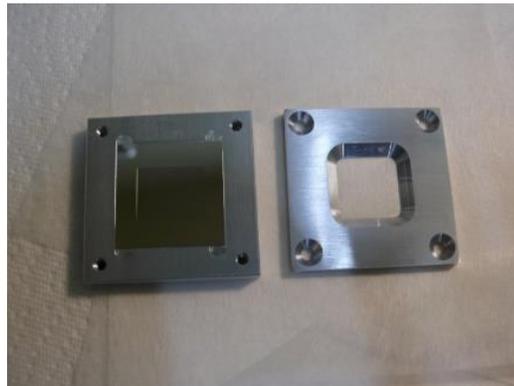


Figura 25. Parte inferior conteniendo la mascarilla, y parte superior del portamascarillas

Área de implantación. Debido a que tenemos una superficie delimitada que queremos implantar, antes de colocar nuestro sustrato en la cámara de implantación del acelerador, se hacen pruebas para determinar el área que cubre el barrido del haz, y también para verificar que el barrido del haz sea uniforme. El proceso de implantación se realizó en el acelerador de partículas Peletron (9SDH-2) del Instituto de Física de la Universidad

Autónoma de México (IF-UNAM), el sustrato se coloca dentro de la cámara de implantación, con una inclinación de 8° , con respecto a la propagación del haz de iones, a un vacío de 10^{-7} Torr, a temperatura ambiente. El funcionamiento del acelerador de partículas Peletrón, se describe en Apéndice A. Al terminar la implantación fue necesario esperar una hora para sacar la muestra, con la finalidad evitar cambios bruscos en la temperatura del sustrato, y el equipo. Por último se obtuvo la formación de las guías de onda mediante implantación de iones, mostrada en la Figura 26.

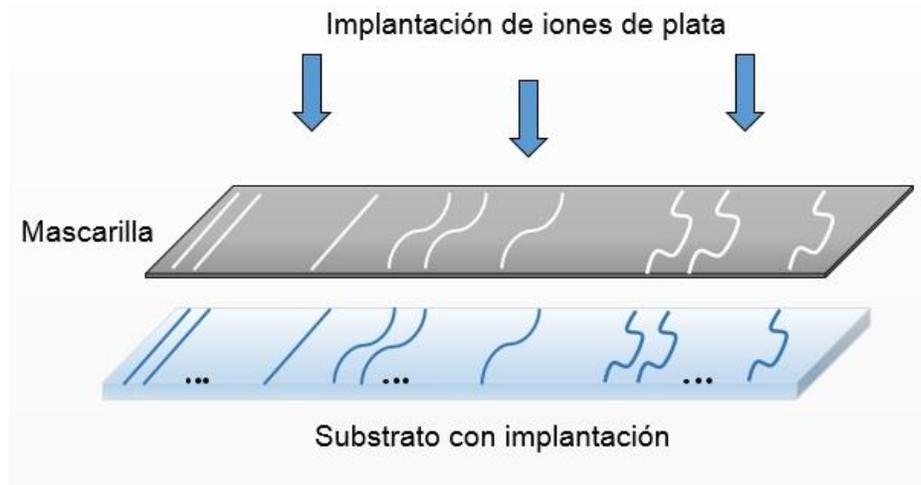


Figura 26. Obtención de las guías de onda de canal ópticas.

En resumen, se logró diseñar y fabricar dispositivos pasivos base de óptica integrada tales como guías de onda rectas, curvas-S.75, curvas-S1.0, curvas-C.75 y curvas-C1.0, mediante implantación múltiple de iones de plata con índice escalón usando una mascarilla como medio formador de guías de canal. Estas guías fueron diseñadas pensando en un comportamiento monomodal, con bajas pérdidas por propagación, con dimensiones básicas para su uso con fibras ópticas, para longitudes de onda en el visible e infrarrojo.

Capítulo 4.

Resultados y discusión

Se han obtenido guías de onda ópticas con perfil de índice escalón, mediante implantación múltiple de iones de plata con energías de 4.3 a 9 MeV y dosis de 10^{14} a 10^{15} iones/cm², en sustratos de SiO₂. Las dimensiones de la sección transversal de las guías, en profundidad h y ancho w fueron seleccionadas para una conducta monomodal en longitudes de onda para 633nm y 1550nm. En éste capítulo se presentan los resultados obtenidos de la simulación mediante el método de propagación de haz para guías de onda rectas, curvas-S y curvas-C. Se presenta la caracterización de las guías de onda por microscopía óptica mostrando imágenes de las guías y de sus caras de entrada y salida. Se presenta la metodología de caracterización de pérdidas por propagación y adquisición de la distribución de intensidad de los modos de propagación en las líneas de comunicación ópticas en 1310nm y 1550nm.

4.1 Análisis por el método de propagación de haz

Se presentan los resultados obtenidos mediante el simulador *BeamProp* de *Rsoft*, para la distribución de modos transversales para propagación de luz a longitudes de onda de 633nm y 1550nm para cada una de las guías de onda propuestas: rectas, curvas-S y curvas-C.

4.1.1 Modos transversales de las guías de onda.

Al obtener las dimensiones transversales para tener funcionamiento monomodal en las guías para cada una de las muestras a longitudes de onda de 633nm y 1550nm, fue posible simular la propagación del haz a lo largo de las guías y obtener, índice efectivo y el ancho modal para un diámetro en $1/e^2$.

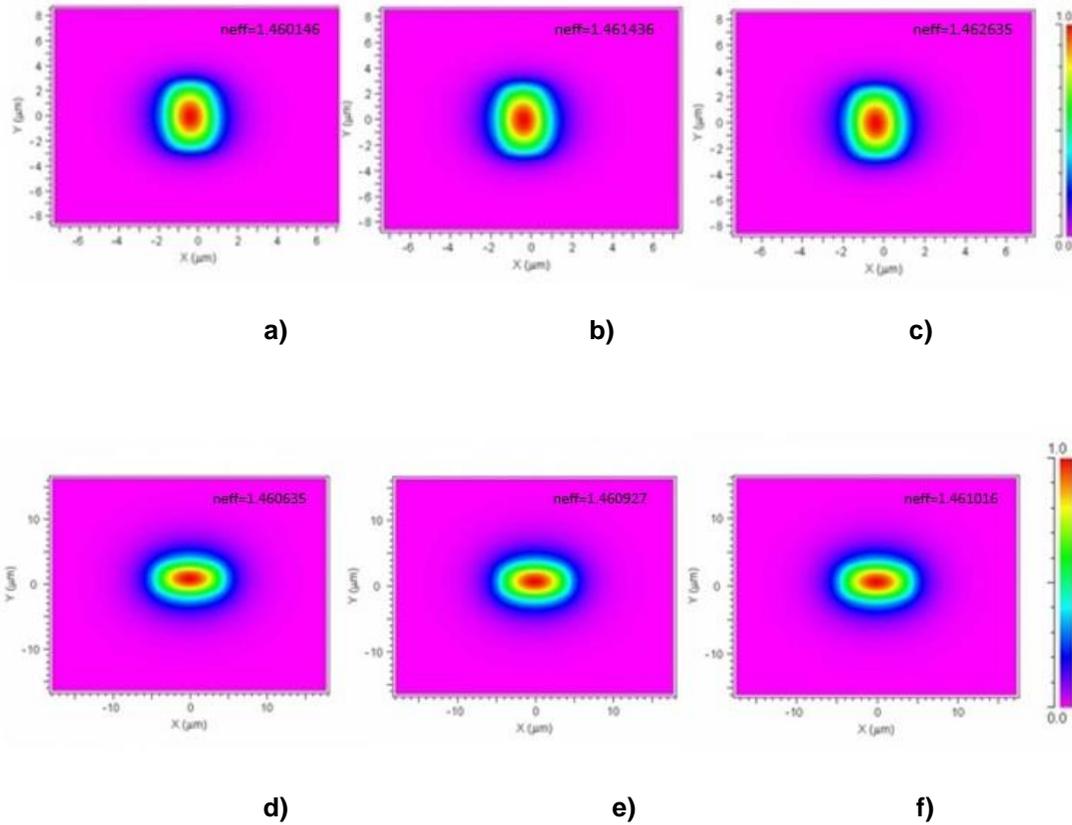


Figura 27. Distribución de intensidad de los modos transversales obtenidos mediante BPM, a) M1, b) M2 y c)M4 para 633nm, d)M1, e)M2 y f)M4 para 1550nm.

La Figura 27 muestra la distribución de intensidad de salida, del modo propagado el cual soportado por las guías de onda M1, M2 y M4, el índice efectivo de éstas guías está entre 1.4601-1.4626 para $\lambda=633\text{nm}$, mientras que para $\lambda=1550\text{nm}$ es de 1.4606-1.4610. El factor de confinamiento, definido como la razón entre la potencia del modo en el núcleo y el modo de la guía, obtenido fue de 90% aproximadamente, en todas las guías, y el diámetro del campo modal (MFD) con valores para un diámetro en $1/e^2$ son: $\text{MFD}_x \sim 3.39\mu\text{m}$ y $\text{MFD}_y \sim 3.88\mu\text{m}$ para 633nm; and $\text{MFD}_x \sim 8.16\mu\text{m}$ y $\text{MFD}_y \sim 5.38\mu\text{m}$ para 1550nm.

4.1.2 Propagación de luz en guías rectas.

Las pérdidas por propagación en las guías de onda rectas y curvas se analizaron mediante el método de propagación de haz (BPM) con el simulador *BeamProp* de la compañía *Rsoft*, para dimensiones mostradas en la tabla 2. Los elementos que conforman las curvas-S son guía recta a curva, curva a curva y curva a recta, por igual los elementos que constituyen las curvas-C son guía recta a curva, curva a curva, curva

a curva y curva a recta. El aumento de radio de curvatura como método de disminución de pérdidas por curvatura, se debe a la accesibilidad tecnológica de fabricación de la mascarilla. Y a que las guías presentaban un alto confinamiento evitando así el uso de los “offset”, definido como el corrimiento lateral de las uniones que componen la estructura, en este caso, entre la recta-curva, curva-curva y curva recta.

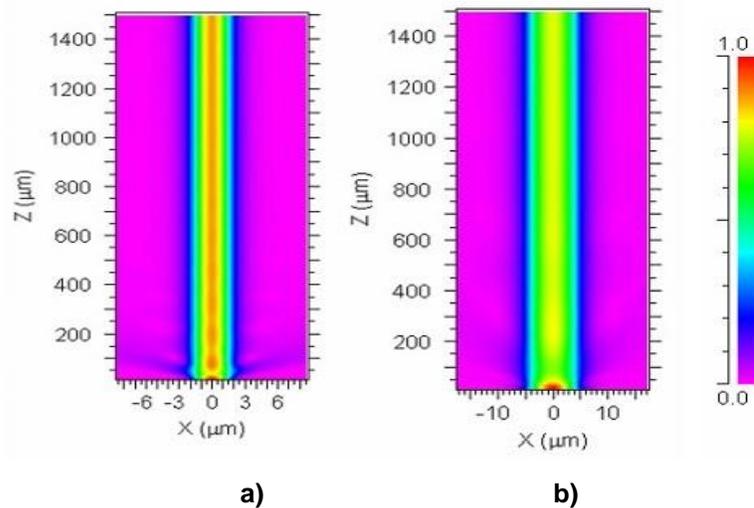


Figura 28. Sección longitudinal de simulación usando BPM en M1 para a) con 633nm y b) para 1550nm.

Los resultados obtenidos de las simulaciones mediante el método de propagación de haz, considerando las dimensiones antes propuestas, operando en un régimen monomodal para guías de onda rectas, se presentan en las Figuras 28 las cuales muestran la sección longitudinal de la propagación de un haz gaussiano TE con longitudes de onda para 633nm y 1550 nm.

4.1.3 Propagación de luz en guías Curvas-S.

Se diseñaron curvas usando radios de $4 \times 10^3 \mu\text{m}$ y $6 \times 10^3 \mu\text{m}$ para 633nm; $4 \times 10^4 \mu\text{m}$ y $7 \times 10^4 \mu\text{m}$ para 1550nm considerando una tolerancia de pérdidas de $\sim 1.0 \text{ dB}$ y $\sim 0.01 \text{ dB}$, respectivamente. La Figura 29 muestra los resultados obtenidos de la simulación con BPM de la propagación de la luz a lo largo de las guías curvas-S, al acoplar una onda gaussiana TE. Obteniendo pérdidas de propagación de aproximadamente 0.05 dB y 0.008dB para 633nm y 1550nm, respectivamente.

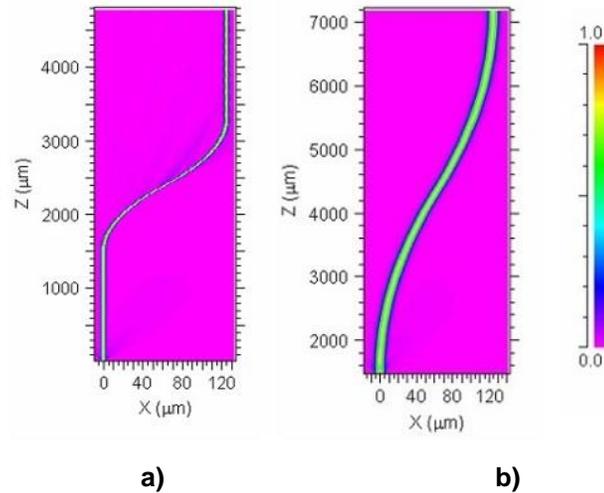


Figura 29. Sección longitudinal de simulación para curvas-S usando BPM en M1 para a) con 633nm y , b) con 1550nm.

4.1.4 Propagación de luz en guías Curvas-C.

La Figura 30 muestra los resultados obtenidos de la simulación con BPM de la propagación de la luz a lo largo de las guías curvas-C, al acoplar una onda gaussiana TE. Obteniendo pérdidas de propagación de aproximadamente 0.10 dB y 0.016dB para 633nm y 1550nm, respectivamente.

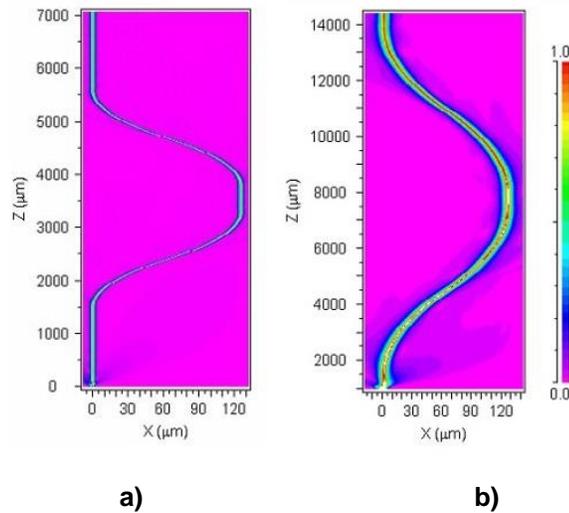


Figura 30. Sección longitudinal de simulación para curvas-C usando BPM en M1 para a) con 633nm y ,b) para 1550nm

4.2 Caracterización de la mascarilla

Con la finalidad de inspeccionar la mascarilla de implantación y sus dimensiones de fabricación se hizo un análisis microscópico mediante microfotografías obtenidas en el microscopio de polarización vertical con iluminación LED-Leica DM 2700 P.

Inicialmente se hizo una inspección general de cada uno de los canales fabricados encontrando una muy buena calidad del producto prácticamente sin defectos. Posteriormente se realizó la medición de los ancho de los canales de las diferentes estructuras, como se muestra en las imágenes tomadas a diferentes ampliaciones las cuales se muestran en la Figura 31. Por medio del análisis de metrología se obtuvieron las dimensiones de las rendijas, estimando un aumento de $8.5 \pm 0.5 \mu\text{m}$. El campo visual del microscopio impidió analizar las curvaturas en forma integral. También se comprobó la ausencia de defectos en cada uno de sus componentes (50 canales).

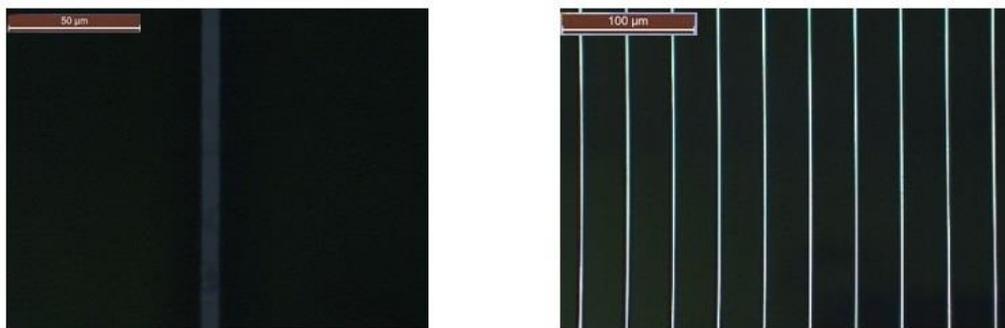


Figura 31. Microfotografía de la mascarilla de implantación

4.3 Tratamiento térmico de las guías de onda

Después del proceso de implantación de iones se realizó una inspección microscópica de la región de implantación y se procedió a eliminar residuos de carbón originados durante la implantación. Por lo que el siguiente proceso a realizar fue la eliminación de carbón en las guías de onda, esto se realizó mediante la técnica de tratamiento térmico, la cual consiste en una termo-oxidación del carbono ($C + O_2 \rightarrow CO_2$). El tratamiento térmico consiste en someter a las guías de onda a altas temperaturas, para evaporar el carbono. Este proceso se realizó en un horno a una temperatura máxima de $450 \text{ }^\circ\text{C}$, durante 170 minutos, con una presión atmosférica normal y una rapidez de remoción de 100nm/hr (Tanarro I. et al., 2009). Esta técnica nos ayuda a contrarrestar los efectos

producidos por la presencia del carbón, la imagen 32 muestra la imagen de las guías con y sin tratamiento térmico donde se puede apreciar la eliminación de la coloración oscura del carbón.

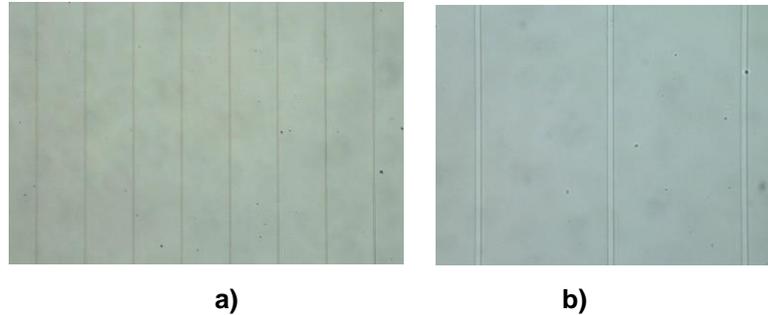


Figura 32.- Fotografía a) antes del tratamiento térmico, y b) después del tratamiento.

4.4 Sección transversal de las caras de entrada y salida de las guías de onda.

Las caras de entrada y salida de las guías fueron caracterizadas por medio de Microscopio de polarización vertical con iluminación LED - Leica DM2700 P. Una inspección preliminar indica que las caras de entrada y salida de las guías de onda presentan una calidad adecuada; sin embargo, las terminales de las guías que están cerca de las orillas del sustrato presentan defectos mayores. Así mismo fueron inspeccionadas las 50 guías de onda a lo largo de toda su trayectoria para revisar su integridad; encontrando que el proceso de implantación de iones a través de mascarilla proporcionó una técnica viable para la fabricación de guías de onda angostas en sustratos de óptica integrada con un alto rendimiento; es decir, un porcentaje alto de las guías son de muy alta calidad, menos del 5% de las guías presentaron defectos en su trayectoria. Algunas de las secciones transversales se muestran en la Figura 33, y las dimensiones medidas para ambas muestras son similares para la profundidad de las guías y las dimensiones son de $4\pm 0.3\ \mu\text{m}$ y para el ancho de $8.5\pm 0.5\ \mu\text{m}$.

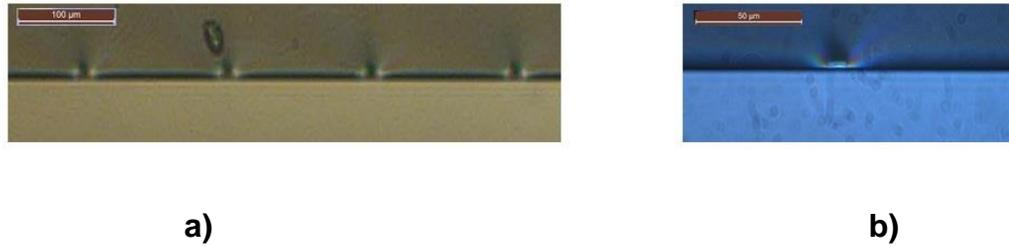


Figura 33. Fotografía sección transversal guías de canal formadas a) Aumento 20x, y b) Aumento 50x.

4.5 Cálculo de pérdidas y transmitancia

Para caracterizar la propagación de luz en las guías de onda se implementó el arreglo experimental que se muestra en la Figura 34 el cual consiste de la fuente de luz láser de longitudes de onda de 1310nm y 1550nm, una fibra monomodal para acoplar la luz a las guías de onda obtenidas por implantación de iones de plata, un microscopio con amplificación de 10x el cual tiene como función la de enfocar el haz proveniente de la salida hacia una cámara CCD para el infrarrojo, para capturar las imágenes de los modos, o a un medidor de potencia con esfera integradora *Melles-Griot modelo 13PDH005*.

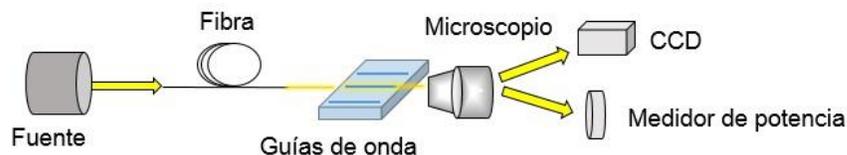


Figura 34. Arreglo experimental para medir pérdidas y obtener modos de propagación en las guías de onda.

Para el cálculo de pérdidas por propagación, se realizó la captura de datos en función a las potencias de entrada y salida. Para valorar estas pérdidas se obtiene el coeficiente de absorción de la guía de onda α_w , definido por (Márquez H. *et al.*, 2013):

$$\alpha_w = \ln \left(\frac{P_{ent}}{P_{sal}} \right) / L, \quad (50)$$

o bien, expresado en decibeles (Saleh Bahaa E.A. y Teich Malvin Carl, 1991):

$$\alpha_{w dB} = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{ent}}{P_{sal}} \right) / L, \quad (51)$$

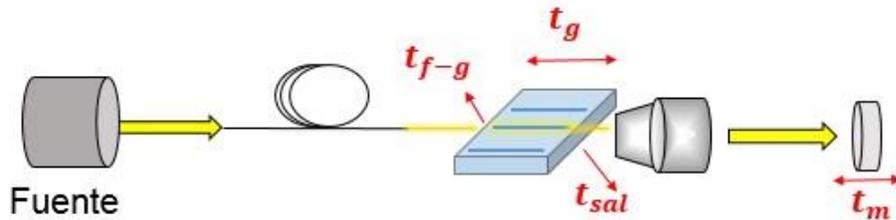


Figura 35. Factores de pérdidas en el sistema óptico.

donde P_{ent} y P_{sal} son las potencias de entrada y salida respectivamente y L es la longitud de la guía. Para el caso de la medición de transmitancia se utilizó el método descrito en (Márquez H. *et al.*, 2013), el cual nos indica que la transmitancia T del sistema óptico se calcula respecto a las potencias de salida y de entrada, usando la expresión (52) considerando los factores de pérdidas del sistema óptico utilizado, los cuales se describen a continuación:

$$T = t_{f-g} \eta_0 t_g t_{sal} t_m, \quad (52)$$

donde t_{f-g} es la reflexión de Fresnel a la entrada, η_0 es el acoplamiento de los modos, t_{sal} la reflexión de Fresnel a la salida, t_m transmitancia del microscopio, y t_g es la transmitancia de la guía mostrada en el arreglo de la figura 35. Cada término está dado por:

$$t_{f-g} = 1 - \eta_R, \quad (53)$$

donde

$$\eta_R = \frac{\left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2}\right)^2 + \left(\frac{n_3 - n_2}{n_3 + n_2}\right)^2 + 2 \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2}\right)^2 \left(\frac{n_3 - n_2}{n_3 + n_2}\right)^2 \cos\left(4\pi n_2 g \frac{1}{\lambda}\right)}{1 + \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2}\right)^2 \left(\frac{n_3 - n_2}{n_3 + n_2}\right)^2 + 2 \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2}\right)^2 \left(\frac{n_3 - n_2}{n_3 + n_2}\right)^2 \cos\left(4\pi n_2 g \frac{1}{\lambda}\right)} \quad (54)$$

y donde n_1 y n_3 son el índice de refracción de la fibra y de los modos guiados, respectivamente, n_2 es el índice de refracción que existe entre la fibra y la guía; la separación entre éstas está dada por g y λ es la longitud de onda.

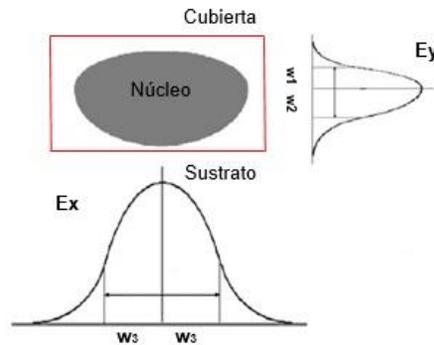


Figura 36. Perfil de distribución del campo E_x y E_y .

El perfil del modo se aproxima mediante un análisis de perfiles gaussianos, es decir, se separan en sus componentes de campos eléctricos en E_x y E_y como se muestra en la Figura 36. Por lo tanto η_0 se puede escribir como:

$$\eta_0 = \frac{\left(\frac{\sqrt{w_1}}{\sqrt{\frac{w_1}{w_0} + \frac{w_0}{w_1}}} + \frac{\sqrt{w_2}}{\sqrt{\frac{w_2}{w_0} + \frac{w_0}{w_2}}} \right)^2}{\frac{w_1 + w_2}{2} \left(\frac{w_3}{w_0} + \frac{w_0}{w_3} \right)} \quad (55)$$

donde w_0 es la cintura del modo de la fibra, w_1 , w_2 y w_3 son la media cintura del modo de de
el siguiente término de la ecuación (52) esta dado por :

$$t_g = I_0 e^{-\alpha_g L} \quad (56)$$

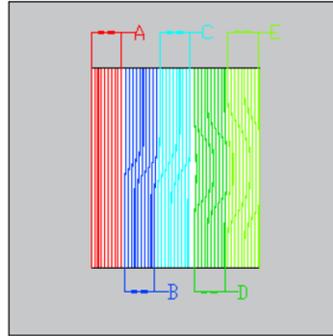


Figura 37. Familias de canales implantadas en el sustrato.

Los resultados obtenidos fueron:

Para el cálculo de pérdidas presentadas en dB/cm se obtuvieron los resultados que se presetan mediante rangos en la tabla 3 correspondientes a las familias presentadas en la figura 37, que muestra las familias de A.-líneas rectas, B.- curvas-S.75, C.-curvas-S1.0, D, curvas-C.75, y E.- curvas-C1.0

Tabla 3. .- Rangos de cálculo de pérdidas en dB/cm para las diferentes familias de guías.

Familia	Pérdidas (dB/cm)			
	M1 $\lambda=1310\text{nm}$	M2 $\lambda=1310\text{nm}$	M1 $\lambda=1550\text{nm}$	M2 $\lambda=1550\text{nm}$
Recta(A)	3-7	2-5	1-4	3-5
Curva-S .75 T(B)	3-6	2-5	2-7	3-5
Curva-S 1.0 T(C)	3-5	0.6-6	0.7-5	0.7-2
Curva-C .75 T(D)	1-5	3-6	0.5-3	2-4
Curva-C 1.0 T(E)	0.5-1	1-5	0.1-3	3-5

Para el cálculo de transmitancia usando la ecuación (52), se obtuvieron los siguientes resultados que se muestran en las Figuras 38 y 39.

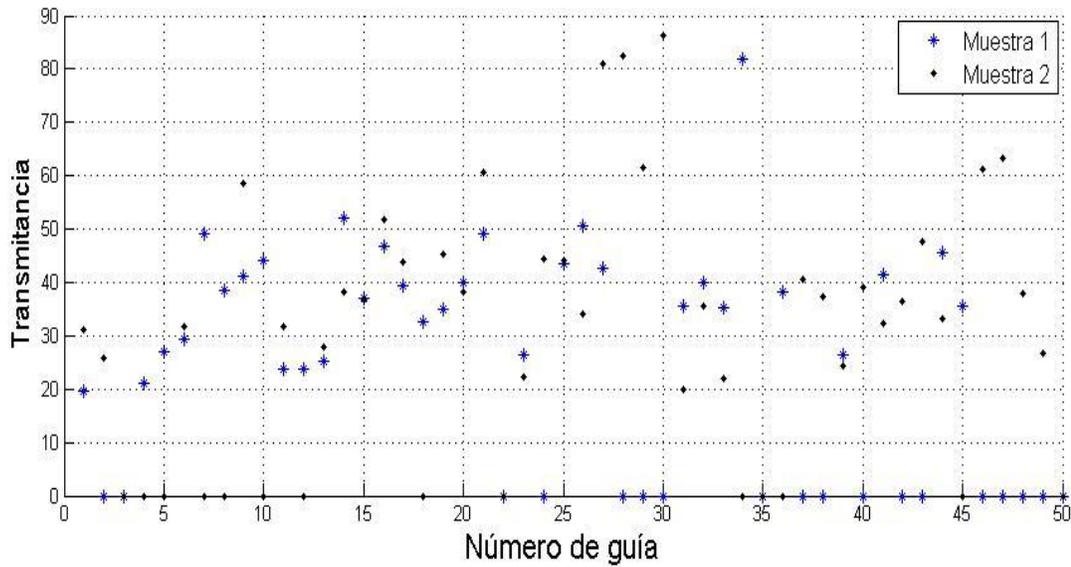


Figura 38. Transmitancia de las guías de las muestras 1 y 2 a $\lambda=1310\text{nm}$: guías 1 a 10-líneas rectas, 11 a 20 curvas-S.75, 21 a 30 curvas-S1.0, 31 a 40 curvas-C.75, y 41-50 curvas-C1.0.

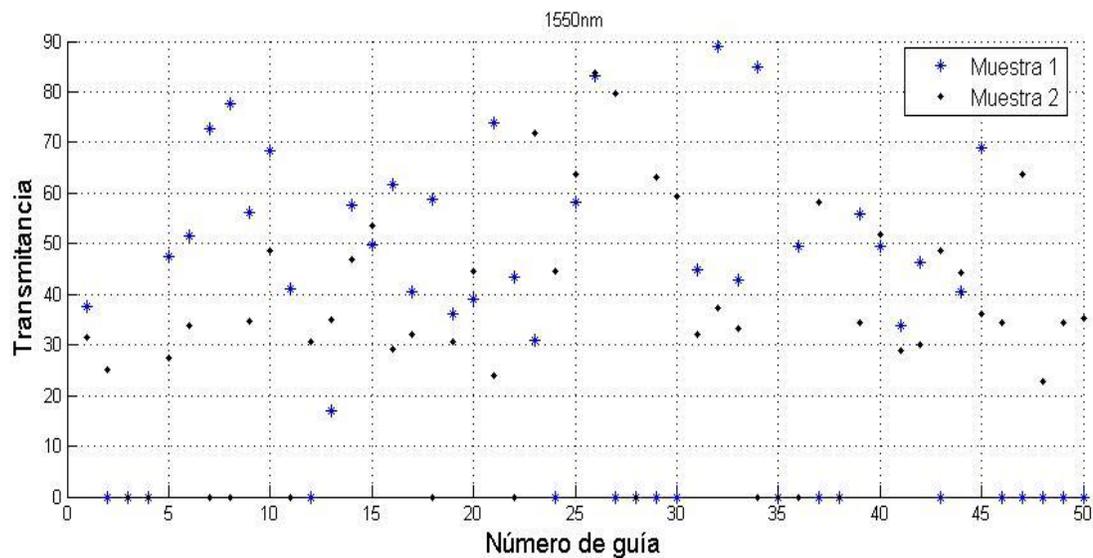


Figura 39. Transmitancia de las guías de las muestras 1 y 2 a $\lambda=1550\text{nm}$: guías 1 a 10-líneas rectas, 11 a 20 curvas-S.75, 21 a 30 curvas-S1.0, 31 a 40 curvas-C.75, y 41-50 curvas-C1.0.

Estas guías fueron analizadas también para $\lambda=633\text{nm}$, presentando una conducta multimodal, altas pérdidas y bajo confinamiento óptico. Sin embargo cuando se realizó la evaluación para el IR ($\lambda=1310\text{nm}$ y $\lambda=1550\text{nm}$) las guías presentaron el comportamiento óptico adecuado, como era esperado debido a que las guías de onda fueron diseñadas y fabricadas para operación en el IR- $\lambda=1550\text{nm}$.

4.6 Visualización de los modos de propagación

Utilizando el arreglo experimental mostrado en la figura 34, y mediante un CCD sensible al Infrarrojo, se adquirieron los modos de propagación para cada una de las guías de onda, en las dos muestras implantadas. Los cuales se muestran a continuación en las figuras 40 y 41 para las longitudes de onda de 1310nm y 1550nm, respectivamente.

Las Figuras 40 y 41, presentan la distribución de intensidad de salida de las diferentes guías de onda mostrando el modo TEM_{00} , con forma elipsoidal. Así mismo se presenta el modo TEM_{10} , con la típica distribución de intensidad de dos modos. Cabe mencionar que el modo TEM_{00} es el modo de propagación dominante y para excitar el modo TEM_{10} se tiene que desalinear el acoplamiento fibra guía para inducir su excitación.

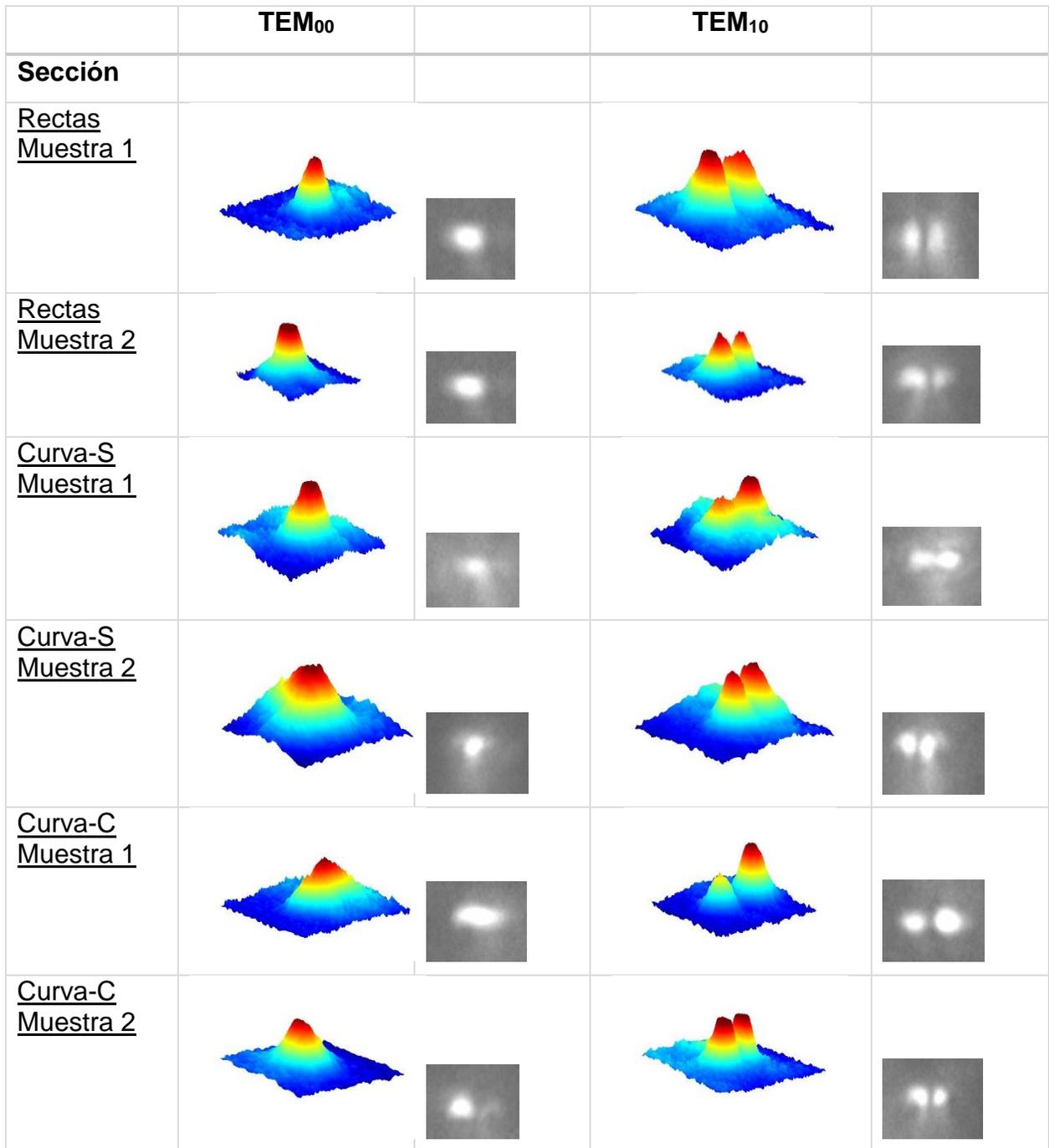


Figura 40. Distribución de intensidad de salida, para las muestras 1 y 2, de las guías rectas, curvas-S y curvas-C, para una longitud de onda de 1310nm.

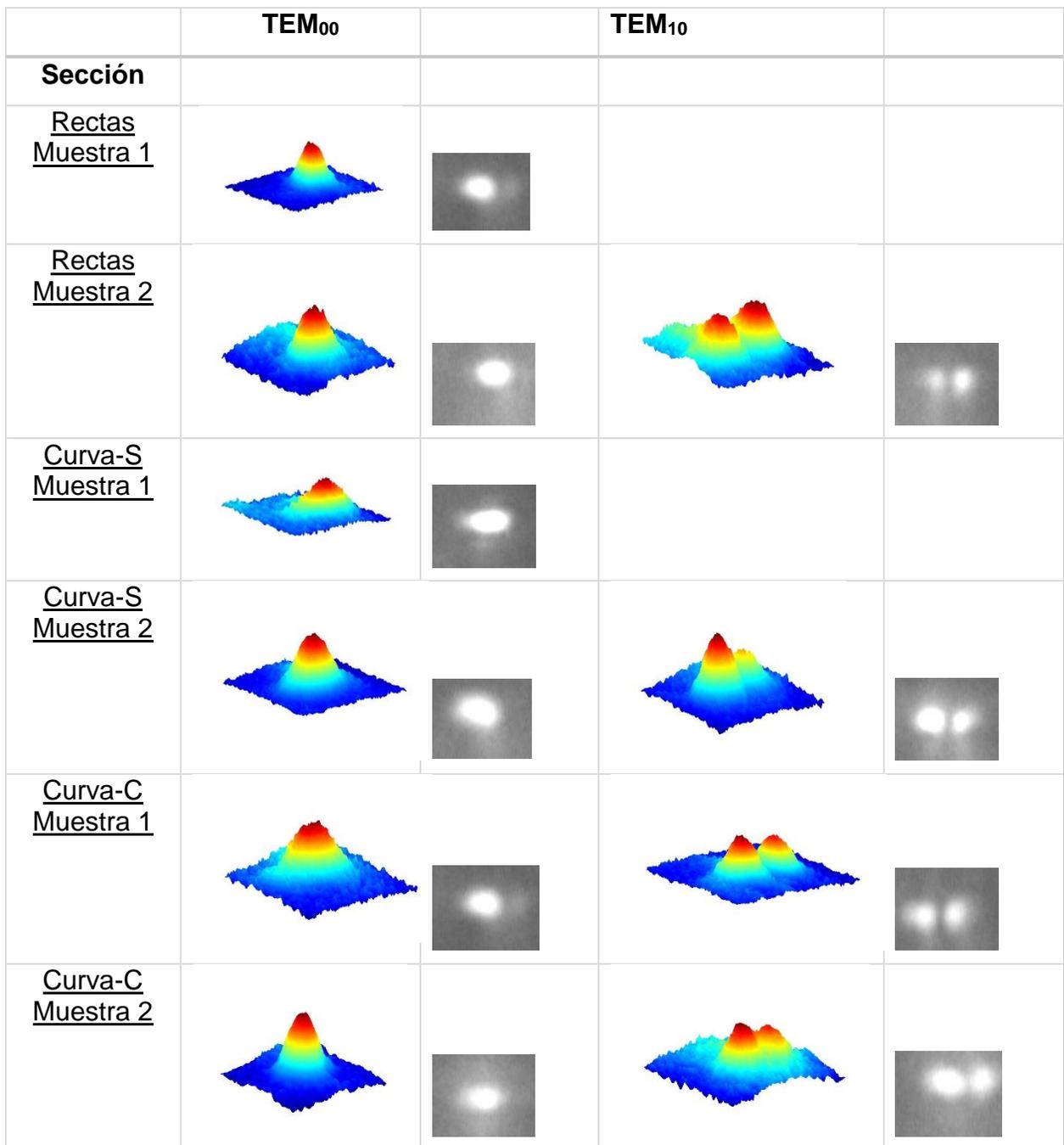


Figura 41. Distribución de intensidad de salida, para las muestras 1 y 2, de las guías rectas, curvas-S y curvas-C, para una longitud de onda de 1550nm.

Después de tomar las imágenes para cada una de las salidas de las guías funcionales, en las dos muestras, las cuales se presentan en el apéndice B, se procesó cada una de ellas con la finalidad de obtener sus anchos modales en ambos ejes. La medida de cada modo se realizó en el ancho de modo con diámetro en $1/e^2$, el resultado de cada guía, se muestra en la tabla 4 para rectas, curvas-S.75, curvas-S1.0, curvas-C.75 y curvas-C1.0 para longitudes de onda en 1310nm y 1550nm.

Tabla 4.- Anchos de los modos de las guías de cada familia, para las longitudes de onda de 1310m, 1550nm.

Familia	Dimensiones(μm)			
	x	y	x	y
	$\lambda=1310\text{nm}$	$\lambda=1310\text{nm}$	$\lambda=1550\text{nm}$	$\lambda=1550\text{nm}$
Recta(A)	5-9	4.5-9	5-10	4-8
Curva-S .75 T(B)	5-11	4-8	4-9	5-9
Curva-S 1.0 T(C)	5-13	4-7.5	4-10	4-6.5
Curva-C .75 T(D)	5-10	4.5-8	5-11	5-8
Curva-C 1.0 T(E)	5-10	4-8	5-12	4-7

En general las diferentes componentes de óptica integrada fabricadas de las familias rectas, curvas-S.75, curvas-S1.0, curvas-C.75 y curvas-C1.0 presentaron una buena conducta de propagación con pérdidas de propagación entre 0.1 y 7 dB/cm para longitudes de onda en 1310nm y 1550nm; para los modos TEM_{00} y TEM_{01} . Las guías de onda que presentaron las mayores pérdidas de propagación están en los extremos del sustrato, los cuales presentaban varios defectos de orilla en las caras de entrada y salida de las guías. El diseño de las guías de onda se hizo con un ancho de 8.5 μm de ancho, para que tuvieran un comportamiento monomodal para $\lambda= 1310$ y $\lambda= 1550$; este objetivo se cumplió debido a que predomina la conducta monomodo en las diferentes estructuras de las guías y para excitar los dos modos de propagación se tiene que desalinearse el acoplamiento, como es de esperarse. Las guías de onda rectas, curvas-S.75, curvas-S1.0, curvas-C.75 y curvas-C1.0 pueden ser utilizadas como base para el diseño y fabricación de derivadores ópticos, acopladores ópticos e interferómetros M-Z, basados

en el proceso de multi-implantación de iones con alta probabilidad de que los dispositivos fabricados funcionen óptimamente para las longitudes de onda de comunicaciones ópticas de $\lambda=1310\text{nm}$ y $\lambda=1550\text{nm}$, pero falta incursionar en esta siguiente etapa.

Capítulo 5.

Resumen General y Conclusiones

En este trabajo se estudió la formación de guías de onda de canal del tipo recta, curva-S, y curva-C con perfil de índice escalón obtenido mediante multi-implantación de iones de plata en sustratos de SiO₂. Esta técnica de fabricación consiste en una secuencia de implantaciones de iones de plata a diferentes energías y dosis, generando un perfil de concentración uniforme, conocido como índice escalón.

El estudio comprendió el diseño, fabricación y caracterización de guías de onda de canal. En esta sección se presentan a continuación los datos y conclusiones más relevantes del trabajo:

- a. Índice escalón por multi-implantación de iones de plata. Para fabricar guías con perfil de índice tipo escalón por multi-implantación fue necesario un análisis de subimplantaciones a diferentes dosis y energías que se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5.- Dosis y energía de implantación

Energía de multi-implantación	Dosis(átomos/cm ²)		
	<i>M1</i>	<i>M2</i>	<i>M4</i>
9 MeV	5×10^{14}	1×10^{15}	5×10^{15}
7 MeV	2.5121×10^{14}	5.025×10^{14}	2.5119×10^{15}
6 MeV	1.4748×10^{14}	2.9505×10^{14}	1.475×10^{15}
5.2 MeV	2.0689×10^{14}	4.1375×10^{14}	2.069×10^{15}
4.3 MeV	1.9508×10^{14}	3.9×10^{14}	1.95×10^{15}

La implantación de iones ha demostrado ser una técnica eficiente para la formación de guías de onda de canal ópticas. Debido a su fácil control de parámetros, los resultados son en su mayoría repetibles y reproducibles. Es considerado también un método de fabricación robusto y eficaz. La dosis utilizada

es suficiente para que se produzca el aumento de índice de refracción, produciendo el confinamiento de luz. Algunas de las desventajas de éste método son su alto costo y tiempo de espera para el uso de la implantadora.

- b. Análisis de la frecuencia de corte para la sección transversal Esta etapa consistió en la obtención de dimensiones transversales, el estudio se hizo con el programa BeamProp RSoft mediante la obtención del ancho de corte para tener guías monomodales con longitudes de onda de 633nm y 1550nm. Para cada una de nuestras muestras. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 6.

Tabla 6. Dimensiones obtenidas transversales de las guías.

Muestra	633nm	1550nm
M1	5.5 μm	8.5 μm
M2	5.7 μm	9.0 μm
M4	5.6 μm	8.7 μm

- c. Comportamiento modal de las guías. Habiendo obtenido las secciones transversales con el índice escalón antes propuesto. El siguiente estudio fue el estudio del comportamiento modal de las guías, para las muestras M1, M2 y M4 con longitudes de onda de 633nm y 1550nm. El cual arrojó los siguientes resultados mostrados en la Tabla 7.

Tabla 7. Ancho modal de las guías de onda para 633nm y 1550nm.

Estudio	633nm	1550nm
Índice efectivo	1.4601-1.4626	1.4606-1.4610
Factor de confinamiento	~90%	~90%
MFD_x (1/e²)	~3.39 μm	~8.16 μm
MFD_y (1/e²)	=~3.88 μm	~5.38 μm

- d. Obtención de radios de curvatura. Habiendo llegado hasta el estudio del comportamiento modal mediante simulaciones, lo siguiente fue el análisis de los radios de curvatura óptimos para las guías de canal propuestas con los parámetros previos. Este estudio consistió en un análisis simple de aumento de radio de curvatura hasta obtener un mínimo de pérdidas. Se diseñaron curvas usando radios de $4 \times 10^3 \mu m$ y $6 \times 10^3 \mu m$ para $633 nm$; $4 \times 10^4 \mu m$ y $7 \times 10^4 \mu m$ para $1550 nm$ considerando un rendimiento aproximado de $\sim 1.0 dB$ y $\sim 0.01 dB$, respectivamente.

En general el estudio de las guías de onda por medio de simulación en BeamProp-Rsoft mediante el método de propagación de haz, presentó una gran ventaja para el diseño de cada guía a implantar. Se obtuvieron resultados satisfactorios con diseños simples, que darán pie al siguiente paso en el diseño de guías pasivas mediante éste método de fabricación u otros. Se enfocó la mayoría de los parámetros a los estándares técnicos de guías de onda pasivas, presentando también un diseño reproducible.

- e. Mascarilla de implantación. La mascarilla fue hecha para $1550 nm$ con níquel mediante la técnica de litografía de rayos X, debido a sus dimensiones, su espesor en la zona de las rendijas ($\sim 25 \mu m$) fue suficiente para detener los iones y formar las guías de onda de canal. Se caracterizó la mascarilla antes y después de la implantación, para obtener una aproximación de daños y dimensiones de las rendijas. Las cuales no presentaban defectos mayores, y sus dimensiones presentaban error de $\pm 0.25 \mu m$. Algunas ventajas del uso de mascarilla para la formación de guías de onda son: las guías de onda son uniformes, su uso en la implantadora es sencillo, se pueden producir conjuntos de guías de onda con diferentes anchos en el mismo sustrato, usando las mismas condiciones de implantación y se pueden producir a gran escala como aplicación industrial. En cuanto a la mayor desventaja del uso de mascarilla, es el costo elevado, y la dificultad de fabricar la mascarilla.

- f. Muestra fabricada. El análisis experimental se enfocó a la muestra; M1. Las energías y dosis a implantar, fueron de 9MeV, 7MeV, 6MeV, 5.2MeV y 4.3 MeV, con dosis de 5×10^{14} , 2.5121×10^{14} , 1.4748×10^{14} , 2.0689×10^{14} y 1.9508×10^{14} (*átomos/cm²*), respectivamente. Esto debido que esta muestra presentaba el mejor desempeño en la simulación. A las dos muestras implantadas se les aplicó un tratamiento térmico con la finalidad de remover el carbón, el cual produjo un mejor desempeño en las guías de onda. La caracterización de las guías formadas se hizo mediante un microscopio de polarización vertical, resultando que las guías presentan dimensiones en el ancho de $8.5 \pm 0.5 \mu\text{m}$. También se analizó la sección transversal, resultando que la profundidad producida por la implantación era de $4.5 \pm 0.05 \mu\text{m}$.
- g. Propiedades ópticas por transmitancia. El análisis se hizo para longitudes de onda de 1310nm y 1550nm. Las transmitancias van desde 20% a 90% dependiendo de los defectos del sustrato, ya que en los esquinas presentaban alto grado de defectos de orilla debido a que en el procesos de fabricación el sustrato debía ser removido tocando los bordes, provocando, defectos en esa área. Debido a esto no todas las guías fabricadas podían ser caracterizadas, se perdió alrededor de un 20% de guías debido a estos defectos en las caras de entrada y salida.
- h. Propiedades ópticas en pérdidas por propagación. El análisis se hizo para longitudes de onda de 1310 nm y 1550nm, los resultados de pérdidas van desde 1 dB/cm a 7 dB/cm para las rectas, 0.6 dB/cm a 7 dB/cm en curvas-S, y 0.1 dB/cm a 5 dB/cm en curvas-C. Teniendo un comportamiento de pérdidas por propagación alto, esto debido a los defectos de orilla. Cabe mencionar que hay guías de onda sin imperfecciones que presentan pérdidas de propagación menores a 1 dB/cm.
- i. Propiedades ópticas de los modos de propagación. Se tomaron imágenes de los modos de salida con una cámara CCD en el IR, para las guías sin defectos de orilla, analizando las imágenes para obtener el ancho del modo $\text{MFD}_x (1/e^2)$

y MFD_y ($1/e^2$). Un promedio de los resultados obtenidos se presenta en la Tabla 8.

Tabla 8.- Anchos modales obtenidos en las guías fabricadas.

λ	MFD_x ($1/e^2$) μm	MFD_y ($1/e^2$) μm
1310nm	5-11	4-9
1550nm	4-12	4-9

Se logró fabricar guías de onda ópticas angostas mediante multi-implantación de iones de plata del tipo rectas, curvas-S y curvas-C, para $\lambda=1310\text{nm}$ y $\lambda=1550\text{nm}$ analizando más del 70% de ellas, se obtuvo un comportamiento óptico con un buen confinamiento y con comportamiento multimodal, soportando modos TEM_{00} y TEM_{10} . Cabe mencionar que el modo TEM_{00} es el modo de propagación dominante y para excitar el modo TEM_{10} se tenía que desalinearse el acoplamiento fibra-guía. Las guías de onda rectas, curvas-S.75, curvas-S1.0, curvas-C.75 y curvas-C1.0 pueden ser utilizadas como base para el diseño y fabricación de derivadores ópticos, acopladores ópticos e interferómetros M-Z, basados en el proceso de multi-implantación de iones con alta probabilidad de que los dispositivos fabricados funcionen óptimamente para las longitudes de onda de comunicaciones ópticas de 1310nm y 1550nm.

Lista de referencias bibliográficas

- Angel Valenzuela, J.L. (1999). Estudio de un transductor de temperatura de óptica integrada tipo Fabry-Perot. Tesis de maestría en ciencias. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California.
- Barbier, D., y Hyde, R. L. (1999). *Integrated Optical Circuits and Components*. Marcel Dekker.
- Chen, C. L. (2006). *Foundations for guided-wave optics*. John Wiley & Sons.
- Field, S.J., D.C. Hanna, A.C. Large, D.P. Sheperd, A.C. Tropper, P.J. Chandler, P.D. Townsend y L. Zhang. (1991)a. *Low threshold ion-implanted Nd:YAG channel waveguide laser*. *Electron. Lett.* 27(25), 2375-2376.
- Flores Romero Erick (2008). Estudio de guías de onda ópticas activas obtenidas por implantación de iones en cristales de YAG. Tesis de doctorado, Centro de Investigación y de Educación Superior de Ensenada.
- Fluck, D., T. Pliska, G. Günter, St. Bauer, L. Beckers y Ch. Buchal. (1996). *Blue-light second-harmonic generation in ion-implanted KNbO₃ channel waveguides of new design*. *Appl. Phys. Lett.* 69(27), 4133-4135.
- Hunsperger, R. G. (2009). *Integrated optics: theory and technology*. Berlin: Springer-Verlag.
- Li, G., K.A. Winick, H.C. Griffin y J.S. Hayden. (2006). Systematic modeling study of channel waveguide fabrication by thermal silver ion exchange. *Appl. Opt.* 45: 1743-1755.
- Lifante, G. (2003). *Integrated Photonics: Fundamentals*. Wiley
- Mackenzie, J.I. (2007). *Dielectric solid-state planar waveguide laser: a review*. *IEEE J. Selec. Top. Quantum electron.* 13(3), 626-637.
- Márquez H., Salazar D., Rangel-Rojo R., Angel-Valenzuela J.L., Vázquez G.V., Flores-Romero E., Rodríguez-Fernández L., y Oliver A. (2013). Synthesis of optical waveguides in SiO₂ by silver ion implantation. *Optical Materials*, 35: 927–934.
- Miller, S. E. (1969). *Integrated optics: an introduction*. *Bell System Technical Journal*, 48(7), 2059-2069.
- Montanari G. B., De Nicola P., Sugliani S., Menin A., Parini A., Nubile A., Bellanca G., Chiarini M., Bianconi M., y Bentini G. G. (2012). Step-index optical waveguide produced by multistep ion implantation in LiNbO₃. *Optics Express*, 20(4), 4444–4453.

- Okamoto, K. (2010). *Fundamentals of optical waveguides*. Academic press.
- Ramaswamy, R. V., & Srivastava, R. (1988). Ion-exchanged glass waveguides: a review. *Lightwave Technology, Journal of*, 6(6), 984-1000.
- Reed G. T. y Knights A. P. (2004). *Silico Photonics an Introduction*. Wiley
- Reinhard, M. (1994). *Integrated Optics, design and modeling*. Boston, London: Artech House.
- Saleh, B. E., Teich, M. C., y Saleh, B. E. (1991). *Fundamentals of photonics*(Vol. 22). New York: Wiley.
- Tanarro I., Ferreira J. A., Herrero V. J., Tabarés F. L., y Gómez-Aleixandre C. (2009). Removal of carbon films by oxidation in narrow gaps: Thermo-oxidation and plasmaassisted studies. *Journal of Nuclear Materials*, 390-391: 696–700.
- Townsend, P. D., Chandler, P. J., y Zhang, L. (2006). *Optical effects of ion implantation* (Vol. 13). Cambridge University Press.
- Villegas Vicencio, Luis Javier. Estudio de derivadores ópticos 1 a 2 utilizando guías de onda con índice de gradiente Tesis de doctorado en ciencias. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California. 2002.
- Wilson, E., y Wilson, E. J. (2001). *An introduction to particle accelerators*. Clarendon Press.
- Yamashiki, T. y K. Tsuda. (2003). Low-loss waveguides of benzylidene-aniline derivatives by organic molecular beam heteroepitaxy. *Opt. Lett.* 28, 316-318 .
- Zappe Hans P. (1995). *Introduction to semiconductor integrated optics*. Artech House.
- Ziegler J. (2008). SRIM -The Stopping and Range of Ions in Matter. Recuperado en: <http://www.srim.org/>, consultado 2014-03-05.

Apéndice A.

Funcionamiento del acelerador de iones Peletrón

El proceso de implantación de iones se realizó en un acelerador electrostático tándem, Peletrón (9SDH-2), del Instituto de Física de la Universidad Nacional Autónoma de México (IF-UNAM). Los aceleradores electrostáticos tipo tándem funcionan con un proceso de doble aceleración de los iones. El modelo 9SDH-2 tiene dos configuraciones, una estándar y una con un sistema de inyección al tubo acelerador con alta aceleración en masa; el acelerador del IF-UNAM tiene configuración estándar. En la figura 42, se presenta un esquema del acelerador. A continuación se describen los procesos generales de funcionamiento del acelerador, todos los cuales son controlados y monitoreados electrónicamente a través de una consola de mando.

Producción de aniones. Un haz de iones negativos (aniones) se produce en una fuente fuera del tubo donde se produce la aceleración. Para poder producir el haz de aniones se cuenta con dos fuentes externas, ambas fuentes se encuentran a 30° con respecto al eje del acelerador. La fuente NEC Alphasross se utiliza para ionizar gases. El gas se inyecta en un cilindro de cuarzo y es ionizado positivamente (produciendo cationes) mediante una fuente de radiofrecuencia; los cationes son extraídos del cilindro y dirigidos hacia una cámara rellena de vapores de rubidio. Al interactuar con el rubidio, que cede electrones fácilmente, los cationes se convierten en aniones mediante la captura de electrones. Puesto que la fuente en un conjunto se halla a un potencial de -50keV , los aniones se ven empujados hacia la línea del acelerador, donde se encuentra el electroimán inyector que los conduce hacia el acelerador. La otra fuente, conocida como SNICS (Source of Negative Ions by Cesium Sputtering), funciona a partir de la erosión iónica de cátodos sólidos por medio de gases de cesio; los iones producidos en la SNICS son negativos desde el inicio. En este caso, el elemento del cual se desean producir iones se encuentra como sólido de un cátodo, formado fundamentalmente de cobre, el cual se bombardea con un haz de iones de cesio. Esto produce una erosión en el cátodo, los átomos expulsados interactúan con los vapores de cesio y mediante la captura electrónica producen un haz de aniones. Al igual que en la fuente de Alphasross, estos

aniones se encaminan al acelerador mediante el electroimán inyector. Para la implantación de protones, la fuente SNICS se utiliza para extraer hidrógeno ionizado (H^+) de un cátodo de hidruro de titanio (TiH_2); en el caso de carbono, la fuente SNICS extrae los iones (C^{2+}) de un cátodo de grafito.

Inyección de aniones al tubo del acelerador. Los aniones producidos por la fuente son monitoreados e inyectados al tubo acelerador. Para ello, después de las fuentes se cuenta con los siguientes elementos: un electroimán inyector que conduce el haz de aniones hacia el tubo acelerador, un monitor perfil del haz, que permite monitorear la forma y sección del haz, una lente Einzel electrostática para focalizar el haz en las coordenadas (x,y) sobre el plano perpendicular a su dirección, y una caja de Faraday que permite medir la corriente de iones antes de la inyección hacia el tubo acelerador.

Primera aceleración:

En el tubo acelerador se encuentran una serie de platos equipotenciales cuyo voltaje positivo es cada vez mayor, la terminal de alto voltaje se encuentra a la mitad del tubo acelerador y es del orden de *mega-electrón-volts (MeV)*. Los aniones son atraídos y acelerados por la terminal dando una energía inicial que depende de la tensión en la terminal. En el caso del acelerador *Peletrón* del IF-UNAM la diferencia máxima de potencial que se puede obtener en la terminal es de 3.0 MeV. La terminal de alto voltaje se carga mediante una o más cadenas formadas por barras alternadas de metal y de plástico (las barras de metal son conocidas como “*pellets*”, de ahí el nombre en inglés *Pelletron*). Las cadenas transportan la carga de manera más eficiente que las bandas aislantes utilizadas en los aceleradores Van de Graaff por lo que el voltaje en la terminal es más estable. Este voltaje es regulado por medio de puntas de corona. Todo el tanque encierra a la terminal de alto voltaje y el tubo acelerador se encuentra presurizado con gas dieléctrico SF6 para evitar descargas; además, está diseñado de manera que la producción de radiación a su alrededor sea mínima pues cuenta con un blindaje de plomo.

Conversión de aniones a cationes. Los aniones acelerados llegan a la parte media del tubo del acelerador donde se les despoja de sus electrones (proceso de “stripping”) convirtiéndolos en cationes. El proceso de “stripping” se realiza haciendo pasar el haz de

aniones a través de una atmósfera de gas o de láminas delgadas de carbón. El gas puede ser nitrógeno cromatográfico no industrial, el cual hace recircular por medio de una bomba turbomolecular.

Segunda aceleración: Los cationes son ahora repelidos por la terminal de alto voltaje y son acelerados nuevamente. Para la aceleración se utiliza otra serie de platos equipotenciales cuyo voltaje va disminuyendo hasta llegar a cero a la salida del tubo acelerador. Como puede verse la configuración del acelerador permite utilizar el voltaje de la terminal para producir una doble aceleración.

Energía final: La energía final de los iones está dada en unidades de eV (*electrón volts*), donde e es la carga del electrón y V es el voltaje de la terminal. Puesto que en el proceso de “stripping se pueden producir iones positivos con diferentes estados de carga m (es decir, se pueden perder m electrones), la energía final de los iones está dada por:

$$E = (m + 1)eV \quad (57)$$

Enfoque del haz y sección de los iones útiles. A la salida del tubo acelerador se encuentra otra caja de Faraday y otro electroimán, éste último enfoca nuevamente el haz para que sea prácticamente horizontal a la salida. Inmediatamente después, un electroimán analizador selecciona los iones positivos por su carga, masa y energía, y los desvía hacia la línea de experimentación deseada. Con este haz se hace un barrido sobre el sustrato hasta cubrir la superficie necesaria con la dosis elegida.

Líneas de experimentación: El laboratorio del IF-UNAM cuenta con cuatro líneas de diferentes. La línea colocada a $+30^\circ$ con respecto al eje del acelerador se utiliza para realizar análisis mediante rayos X. La línea colocada a $+15^\circ$ cuenta con una cámara de implantación para modificación de superficies. La que se encuentra a -15° tiene una cámara de análisis al vacío en la que se pueden llevar a cabo diferentes técnicas simultáneamente.

El tubo acelerador y todo el sistema de transporte de los iones hasta el blanco se encuentran al vacío, a presiones por debajo de 10^{-3} Pascales, con la finalidad de que los iones puedan viajar libremente grandes distancias sin chocar con moléculas de gas residual. Para producir el alto vacío se usan bombas turbomoleculares o criogénicas, el vacío inicial se hace con bombas mecánicas.

El tiempo que dura la implantación depende de la corriente de iones, la energía, la dosis y el área a implantar. Es claro que entre mayores sean la dosis y el área a implantar, mayor será el tiempo que dure la implantación; sin embargo, también puede suceder que la energía deseada para los iones requiera estados ionizados cuya abundancia relativa sea pequeña, como la corriente de iones es proporcional a la abundancia relativa, esto provocará que la corriente de iones sea pequeña y que el tiempo de implantación aumente. (Edward J. N. Wilson, 2001)

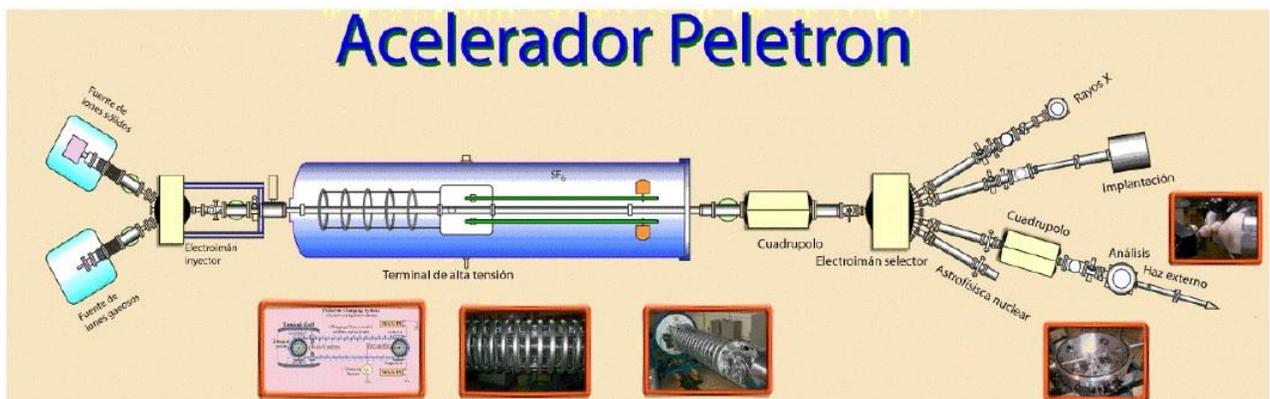


Figura 42. Acelerador electrostático tándem, Peletrón (9SDH-2), del Instituto de Física de la Universidad Nacional Autónoma de México (IF-UNAM), tomada de <http://www.fisica.unam.mx/peletron/>

Apéndice B.

Imágenes completas de distribución obtenida para las guías de onda.

Rectas

# de guía	Muestra1		Muestra 2	
	TEM ₀₀	TEM ₁₀	TEM ₀₀	TEM ₁₀
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				

Figura 43.- Distribución de intensidad de salida, para las muestras 1 y 2, de las guías rectas, para una longitud de onda de 1310nm.

Curvas S.75

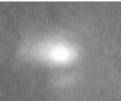
# de guía	Muestra1		Muestra 2	
	TEM ₀₀	TEM ₁₀	TEM ₀₀	TEM ₁₀
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				

Figura 44.- Distribución de intensidad de salida, para las muestras 1 y 2, de las guías curvas-S0.75, para una longitud de onda de 1310nm.

Curvas-S1.0

		Muestra1	Muestra 2	
# de guía	TEM ₀₀	TEM ₁₀	TEM ₀₀	TEM ₁₀
11				
12				
13				
14				
15				
16				
17				
18				
19				
20				

Figura 45. Distribución de intensidad de salida, para las muestras 1 y 2, de las guías curvas-S1.0, para una longitud de onda de 1310nm.

Curvas-C0.75

# de guía	Muestra1		Muestra 2	
	TEM ₀₀	TEM ₁₀	TEM ₀₀	TEM ₁₀
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				

Figura 46.- Distribución de intensidad de salida, para las muestras 1 y 2, de las guías curvas-C0.75 para una longitud de onda de 1310nm.

Curvas-C1.0

# de guía	Muestra1		Muestra 2	
	TEM ₀₀	TEM ₁₀	TEM ₀₀	TEM ₁₀
11				
12				
13				
14				
15				
16				
17				
18				
19				
20				

Figura 47.- Distribución de intensidad de salida, para las muestras 1 y 2, de las guías curvas-C1.0 para una longitud de onda de 1310nm.

Rectas

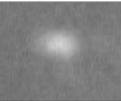
# de guía	Muestra1		Muestra 2	
	TEM ₀₀	TEM ₁₀	TEM ₀₀	TEM ₁₀
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				

Figura 48.- Distribución de intensidad de salida, para las muestras 1 y 2, de las guías rectas, para una longitud de onda de 1550nm.

Curvas S.75

# de guía	Muestra1		Muestra 2	
	TEM ₀₀	TEM ₁₀	TEM ₀₀	TEM ₁₀
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				

Figura 50.- Distribución de intensidad de salida, para las muestras 1 y 2, de las guías curvas-S0.75, para una longitud de onda de 1550nm.

Curvas S1.0

		Muestra1	Muestra 2	
# de guía	TEM ₀₀	TEM ₁₀	TEM ₀₀	TEM ₁₀
11				
12				
13				
14				
15				
16				
17				
18				
19				
20				

Figura 51.- Distribución de intensidad de salida, para las muestras 1 y 2, de las guías curvas-S1.0, para una longitud de onda de 1550nm.

Curvas C.75

# de guía	Muestra1		Muestra 2	
	TEM ₀₀	TEM ₁₀	TEM ₀₀	TEM ₁₀
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				

Figura 52.- Distribución de intensidad de salida, para las muestras 1 y 2, de las guías curvas-C0.75, para una longitud de onda de 1550nm.

Curvas C1.0

# de guía	Muestra1		Muestra 2	
	TEM ₀₀	TEM ₁₀	TEM ₀₀	TEM ₁₀
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				

Figura 53.- Distribución de intensidad de salida, para las muestras 1 y 2, de las guías curvas-C1.0, para una longitud de onda de 1550nm.