DISEÑO Y CARACTERIZACIÓN DE LÁSERES DE GUÍA DE ONDA EN Nd: YAG

Tesis que para obtener el grado de Maestro en Optomecatrónica

Presenta

Ing. Monserrat Alejandra López Urquieta.

Asesor

Dra. Gloria Verónica Vázquez García

León, Guanajuato, México. *Marzo 2012*

AGRADECIMIENTOS

"Las grandes obras están llenas de sabiduría, de vida, pero para encontrarla hay que hacerla nuestra y para entenderla hay que compartirla, decirla no solo leerla, explicarla no solo escribirla"

Jorge Lavat

Quiero dar gracias a ***DIOS*** porque hasta este momento de mi vida me ha llenado de grandes satisfacciones, ha estado conmigo en todo momento y a pesar de que en el transcurso de este camino me ha mandado pruebas difíciles y no tan difíciles, me ha enseñado a ser más fuerte para así alcanzar cada una de mis metas y esta es una de ellas: terminar mi maestría. Gracias Dios.

Agradecer también a mis ***PAPÁS*** es algo que no debo olvidar, a ellos tengo que agradecer infinitamente por el esfuerzo que hacen día a día para que yo pueda salir adelante, por el apoyo que me brindaron durante todo este tiempo, por los desvelos, las preocupaciones, los malos ratos que les provoque, por la paciencia que me han tenido les doy las gracias y los quiero mucho, esta maestría la dedico a ustedes.

Agradecer a mis ***HERMANAS*** por el apoyo que me brindan y porque siempre están ahí animándome a terminar y cumplir mis metas, en especial a mi hermana ***GABY*** que aunque en algunos momentos no teníamos las mismas ideas, ni los mismos horarios siempre lo resolvíamos de la mejor manera, las quiero mucho hermanas.

Agradezco al ***Dr. ERICK FLORES*** y al ***Dr. HERIBERTO MÁRQUEZ*** por haberme brindado su hospitalidad en la estancia que realicé en el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California (CICESE), en la que se logró realizar una parte de este trabajo de investigación y me proporcionaron el cristal con el que realizamos las pruebas.

Agradezco a la ***Dra. GLORIA VERÓNICA VÁZQUEZ GARCÍA*** por haberme compartido su conocimiento y haberme brindado su apoyo en la realización de este trabajo de tesis, por su acertada dirección y por tenerme la paciencia en momentos en los cuales no entendía sus correcciones.

Gracias también a mis ***AMIGOS,*** a los nuevos amigos que encontré, a los que se quedaron conmigo, a los que me tuvieron la paciencia, a los que me pidieron ayuda, a los que les pedí ayuda, quiero decirles que encontré personas muy especiales aquí, agradezco a los amigos que por alguna u otra razón o toma de decisiones poco acertadas se tuvieron que ir, agradezco también a los amigos incondicionales por haber compartido conmigo estos casi ya mas de 6 años de mi vida dentro y fuera del salón de clase, por el apoyo incondicional brindado saben que los quiero mucho.

Agradezco al ***ING. GUSTAVO MORENO GONZÁLEZ TERÁN*** por el apoyo prestado para la obtención de la carta de enlace con la industria, ya que a pesar de que tuvimos algunos contratiempos se logro satisfactoriamente la aprobación de la misma.

Finalmente agradezco a todas las personas que formaron parte de esta maravillosa etapa de mi vida, gracias a las personas que se dieron la oportunidad de conocerme y agradezco también a las personas que me permitieron conocer.

Tengo que agradecer también al ***CENTRO DE INVESTIGACIONES EN ÓPTICA*** porque aunque al principio no fue fácil finalmente pude formar parte de esta institución, agradezco también al ***CONACYT*** por haberme apoyado económicamente en la realización de este sueño.

ÍNDICE

RESUMEN ..... **I**
INTRODUCCIÓN ..... **II**

Capítulo 1. IMPLANTACIÓN IÓNICA **1**

1.1 Frenado de los iones 2

1.2 Simulación de la implantación 4

1.3 Efectos de la implantación en el material 5

Capítulo 2. GUÍAS DE ONDA **8**

2.1 Guía de onda plana 9

2.1.1 Teoría de rayos 11

2.1.2 Teoría electromagnética 14

2.2 Guías de onda de canal 15

2.3 Acoplamiento de guías 16

2.3.1 Acoplamiento por los extremos 17

2.3.2 Acoplamiento por prisma 18

2.3.3 Acoplamiento fibra óptica - guía 20

Capítulo 3. ESPECTROSCOPÍA Y EMISIÓN LÁSER **23**

3.1 Niveles de energía 23

3.2 Espectros de absorción y emisión 24

3.3 Emisión láser 25

3.3.1 Inversión de población 26

3.3.2 Bombeo óptico 27

3.4 Láser de estado sólido 28

3.4.1 Láser de guía de onda 30

3.5 Cristal de Nd: YAG 30

Capítulo 4. MATERIALES Y MÉTODOS **33**

4.1 Caracterización de guías de onda de canal 33
4.1.1 Microfotografías 33
4.1.2 Modos transversales 34
4.1.3 Pruebas de transmisión 34
4.1.4 Pérdidas por propagación 35
4.1.5 Espectros de absorción 36
4.1.6 Espectros de luminiscencia 36
4.1.7 Emisión láser 37
4.2 Fibra óptica con terminación en forma de lente 38
4.2.1 Acoplamiento láser – fibra 38
4.2.2 Fabricación y caracterización de microlentes 39

Capitulo 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN 41
5.1 Dimensiones de las guías 41
5.2 Modos transversales de las guías de onda 42
5.3 Pérdidas por propagación 43
5.4 Espectros de absorción 44
5.5 Espectros de luminiscencia 45
5.6 Emisión láser 47
5.6.1 Espectro de emisión láser 47
5.6.2 Eficiencia láser 48
5.6.3 Potencia umbral 50
5.7 Fibra óptica con terminación en forma de lente 50
5.8 Diseño del láser de guía 54

CONCLUSIONES 56
REFERENCIAS 58
APÉNDICE A. Especificaciones para la fibra Corning MMF 62.5 μm.....60
APÉNDICE B Especificaciones de la fuente de bombeo sugerida 61
PLAN DE NEGOCIOS.....62

RESUMEN

El objetivo principal de este trabajo es el diseño de un prototipo de láser de guía de onda compacto. Una propuesta para obtener láseres en miniatura es fabricar guías de onda ópticas con la capacidad de generar emisión láser. Este trabajo abarca el estudio experimental de guías de onda de canal obtenidas mediante la implantación de protones en cristales de Nd: YAG. Incluye la caracterización de 30 guías de onda de canal con diferentes anchos en las cuales se realizaron pruebas de emisión láser para obtener la eficiencia láser y la potencia umbral de oscilación láser que es lo que nos interesa conocer para el diseño del láser de guía.

Este trabajo cuenta con 5 capítulos, los tres primeros muestran una breve explicación de lo que es el método de implantación iónica así como los conceptos básicos acerca de lo que es una guía de onda y la emisión láser; los dos últimos capítulos nos presenta el desarrollo experimental y los resultados que obtuvimos al realizar la caracterización de las guías de onda antes mencionadas.

En el capítulo 1 se presenta una breve explicación acerca de la técnica de implantación iónica, se describen algunos aspectos de la interacción de iones con la materia para entender ciertos fenómenos que dan origen a la formación de defectos, y estos a su vez a la generación de guías de onda.

En el capítulo 2 encontramos la descripción de lo que es una guía de onda óptica, se presenta un análisis matemático a través de la teoría de rayos y la teoría electromagnética, finalmente se describen los diferentes tipos de acoplamiento de la luz en guías de onda.

El capítulo 3 presenta una descripción de lo que son los niveles de energía, se describen los espectros de emisión y absorción para poder entender las transiciones radiativas, las cuales ayudan a obtener la longitud de onda de bombeo que puede utilizarse para producir emisión láser; encontramos también una breve descripción de los elementos que conforman un láser incluyendo la configuración de un láser de guía de onda, lo cual es el objetivo de este trabajo. Finalmente se presentan las características físicas y ópticas del cristal de Nd: YAG usado para la fabricación de guías de canal.

En el capítulo 4 se detallan los métodos experimentales que se utilizaron para la caracterización de las guías de onda de canal, cabe señalar que esta caracterización incluye propiedades pasivas tales como dimensiones, transmitancia y modos transversales, y propiedades activas las cuales incluyen la absorción, luminiscencia y emisión láser.

En el capítulo 5 podemos encontrar los resultados obtenidos de la caracterización mencionada en el capítulo 4, los cuales nos ayudan para la aplicación del desarrollo de láseres compactos.

Finalmente se dan las conclusiones del presente trabajo así como también dos apéndices: el apéndice A en donde se describen las características y especificaciones de la fibra óptica utilizada para el acoplamiento fibra – guía y a la cual se le fabricó una lente en uno de sus extremos, y el apéndice B que incluye las especificaciones del diodo láser que se sugiere para ser utilizado como fuente de bombeo en el diseño del láser de guía de onda propuesto.

INTRODUCCIÓN

Desde su invención en 1960, el láser ha pasado de ser una curiosidad científica sin aparente utilidad a convertirse en un objeto cotidiano en nuestra vida. Por el camino, ha revolucionado las comunicaciones, la industria, la biomedicina y otras muchas ramas de la ciencia y la tecnología.

Una necesidad actual al hablar en términos de circuitos integrados, tales como circuitos electrónicos y óptica integrada es la *miniaturización.* El elemento fundamental en los dispositivos de óptica integrada son las guías de onda, las cuales tienen la ventaja de confinar en un pequeño volumen altas densidades de energía y por su tamaño pueden ser acopladas a láseres de fibra óptica y láseres semiconductores. Las guías de onda ópticas consisten en una estructura no homogénea para guiar luz. El índice de refracción del núcleo es más alto que el índice de refracción del medio que se encuentra a su alrededor; esta característica es un requisito necesario para que exista reflexión total interna, la cual permite el confinamiento y guiado de la luz dentro de las guías de onda. [1].

Para la obtención de guías de onda de buena calidad, el método de fabricación es de vital importancia. La implantación iónica es solo uno de varios métodos utilizados para su fabricación y ha probado ser uno de los más efectivos por su buena reproducibilidad y control sobre los resultados esperados [2].Esta técnica tiene las ventajas de que puede realizarse a temperatura ambiente e inclusive a bajas temperaturas, no presenta problemas secundarios de difusión y provee, hasta cierto punto, un buen grado de ajuste de perfil de índice de refracción para varias aplicaciones [3].

Una de las aplicaciones de guías de onda obtenidas por implantación de iones es que pueden ser usadas para el desarrollo de láseres en miniatura con una alta eficiencia de emisión y un bajo umbral de potencia de bombeo. El cristal de Nd: YAG es uno de los materiales más usados en láseres de estado sólido y el desarrollo de guías de onda por implantación iónica en este material ha sido realizado satisfactoriamente [4].

Un tema fundamental en la óptica integrada es el acoplamiento de luz a las guías de onda, lo cual evitará tener en gran medida pérdidas por acoplamiento y así poder obtener una mayor eficiencia en la propagación de la luz dentro de las guías, por lo tanto en este trabajo se utilizaron fibras ópticas a las cuales se les fabricó una microlente en un extremo, lo cual nos permite enfocar el haz de salida a los tamaños de las guías y tener un mejor acoplamiento fibra – guía.

Por otra parte, una de las inquietudes de este trabajo fue explorar qué ventajas o desventajas genera el fabricar guías de onda con una dosis más alta en comparación con las que se fabricaron en trabajos anteriores para poder utilizarlas en el desarrollo de láseres compactos, ya que debemos tomar en cuenta que las pérdidas por propagación en las guías de onda son causadas en parte por la dosis de la implantación.

El primer objetivo de este trabajo es realizar la caracterización de guías de onda de canal para poder determinar si la eficiencia láser y la potencia umbral de cada conjunto de guías son adecuadas con el fin de que dichas estructuras sean utilizadas como medio activo en la fabricación de un láser de guía, el segundo objetivo es presentar una propuesta de los elementos que pueden conformar dicho láser.

Capítulo 1. IMPLANTACIÓN IÓNICA

La implantación iónica es una técnica mediante la cual se introducen átomos (impurezas) en un sustrato, con el propósito de cambiar sus propiedades mecánicas, eléctricas, ópticas, metalúrgicas o químicas. Las energías iónicas consideradas están en el orden de KeV, y las dosis iónicas típicas varían de 10^{11}-10^{19} iones/cm^2.Las ventajas principales que incluye la implantación iónica son: control preciso sobre la dosis total, profundidad del perfil, y uniformidad del área implantada, entre otros.

Lo que ocurre durante la implantación iónica es que iones de diferentes elementos se impulsan y aceleran para hacerlos incidir sobre el sustrato, los iones con energías tan altas (KeV) penetran cientos de capas atómicas superficiales y van siendo frenados hasta que son detenidos, gracias a su energía cinética los iones logran penetrar la red cristalina produciendo una alteración en el comportamiento mecánico y químico y sus propiedades ópticas, eléctricas y magnéticas. Una vez que los iones incidieron en el material, se obtiene sobre la superficie un material de composición diferente al del sustrato, por lo tanto con propiedades diferentes.

La utilidad práctica de esta técnica comparada con otras de dopado de materiales radica en que muchas de las propiedades químicas del átomo original se conservan, produciendo recombinación o permaneciendo en estado ionizado, generando vacancias (defectos) dando origen a cambios en las propiedades del material huésped. A su vez, una de las ventajas de la implantación iónica, respecto de procedimientos de dopado como el de difusión térmica, tiene que ver con el control de los perfiles de concentración; sin embargo, en implantación iónica se presentan diferencias en la concentración de dopantes dependiendo del estado del material.

La implantación iónica permite introducir prácticamente cualquier tipo de material dentro de otro sin tener en cuenta la solubilidad de las especies interactuantes. Además ofrece la posibilidad de crear patrones de concentración de dopantes dentro del material debido a la alta direccionalidad del haz. Un aspecto de gran importancia tiene que ver con la posibilidad de superponer diferentes tipos de haces dentro de un material, creando regiones de concentración y profundidad bien definidas. En una implantación podemos distinguir tres grupos de procesos [3]:

- La aceleración de los iones
- Lo que le ocurre a los iones desde el momento en que inciden sobre el sustrato (mecanismos de frenado de los iones)
- Lo que le ocurre al sustrato desde el momento en que los iones entran al material (efectos de la implantación)

En la aceleración de los iones, la dirección y enfoque del haz de iones hacia el sustrato se realiza mediante sistemas electromagnéticos tales como un acelerador de iones, en los cuales el alto voltaje conduce a la generación de radiación. La manera en que la radiación interactúa con la materia depende en primera instancia de la naturaleza de la radiación, así pues, iones positivos, electrones, fotones, entre otros, cada uno interactúa distintamente con la materia.

Ahora bien, llamaremos aquí iones positivos a aquellos átomos que viajan a altas velocidades y que por alguna razón en el transcurso de su viaje han perdido uno o más electrones, en consecuencia llevan carga neta positiva. Cuando un ion penetra en la materia con cierta

velocidad, puede ir intercambiando electrones en el medio, el intercambio de electrones es más factible cuando la velocidad del ion es del orden de la velocidad de los electrones en el material.

1.1 Frenado de los iones

Los iones veloces tienen dos interacciones importantes: la primera es con los electrones del material lo cual produce excitación e ionización del material, la segunda ocurre con los átomos completos (núcleo y electrones), lo cual produce desplazamientos de los átomos y por lo tanto daños estructurales.

Como ya mencionamos anteriormente, el tipo de radiación y su energía son parámetros importantes en la interacción; las características que destacan son que los iones presentan frenado electrónico y nuclear, depositan gran cantidad de energía por distancia recorrida, sus trayectorias son casi rectas y sus alcances son del orden de los μm en sólidos.

El **frenado electrónico** se debe a la interacción del proyectil con los electrones del material, produciendo en él ionización y excitación atómica, se caracteriza porque las trayectorias de los proyectiles con carga eléctrica son esencialmente rectas debido a que los electrones de masa pequeña no alcanzan a desviar el proyectil; por otro lado, por la gran diferencia entre las masas del electrón y el ion, la transferencia de energía es muy pequeña de modo que se requiere de un gran número de colisiones para poder producir el frenado y se pueda asemejar a una función continua. La figura 1.1 nos muestra con detalle la transferencia de energía que existe durante la implantación de iones [4].

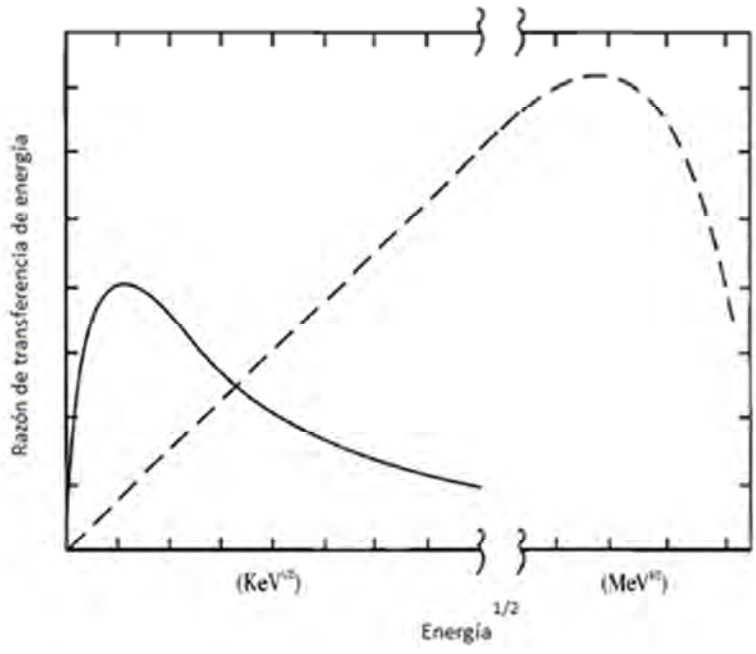


Figura 1.1: Comparación de la razón de transferencia de energía para el frenado electrónico (línea punteada) y las interacciones nucleares de un ion ligero entrando en el sustrato [1].

Cabe señalar que la ionización es el efecto mas importante de las radiaciones en la materia ya que es el proceso mediante el cual se producen iones y se genera por una transferencia de electrones ocasionada por un bombardeo de partículas o aplicando luz.

La energía de ionización I es la energía necesaria para ionizar un átomo. Depende del elemento y de la capa del electrón expulsado. Las energías de ionización crecen con el número atómico porque entre más carga tiene el núcleo más energía se requiere para separar al electrón. La figura 1.2 muestra las energías de ionización de las capas K, L y M para todos los elementos. Si se promedia la energía de ionización sobre todos los electrones del átomo, se obtiene la energía promedio de ionización <I> que varía de elemento a elemento y se expresa en eV.

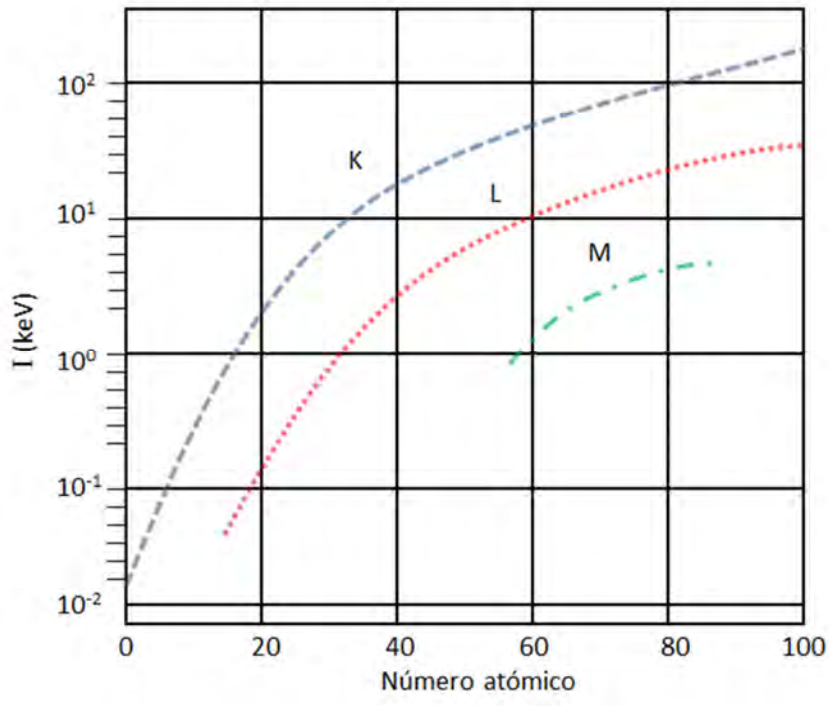


Figura 1.2: Energía de ionización de los niveles K, L y M de los elementos.

Por otro lado, la ionización que produce el proyectil a lo largo de su trayectoria cuando va a entrar a la red va acompañada de la transferencia de energía cinética a los electrones secundarios que fueron liberados. Estos a su vez pueden ionizar el material y cuando se alejan de la trayectoria del ion inicial se pueden distinguir por sí solos. Por lo tanto puede haber ionización secundaria producida en una región amplia que envuelve a la trayectoria original. La ionización y excitación del material absorbedor ya sea la primaria o la causada por los electrones secundarios, provoca un desexcitación atómica del material produciendo la emisión de fotones [4].

El **frenado nuclear** se debe a choques del proyectil con átomos del material, debido a que estos tienen masas comparables con la del proyectil, pueden desviarlo dando lugar a trayectorias desviadas y mayor esparcimiento de los proyectiles. El resultado de este proceso es que los átomos del material pueden ser desplazados de sus posiciones originales ocasionando daños estructurales en el material. Este tipo de frenado es importante cuando la velocidad del proyectil es pequeña, por lo tanto la fracción de ionización es baja, es decir que el proyectil se desplaza con casi todos sus electrones. La interacción con el material se describe entonces como una serie de

colisiones. Como las trayectorias del proyectil son desviadas en cada colisión el ángulo de dispersión es grande debido a las masas comparables y el esparcimiento tanto longitudinal como transversal es también grande [4].

Por lo tanto, cuando un ion con energía inicial de MeV incide sobre la superficie del sustrato comienza un mecanismo de frenado el cual es debido a la excitación electrónica, el ion penetra en el material con una profundidad de unas cuantas micras hasta que su energía esté en el orden de los KeV, una vez que sucede esto comienzan a predominar las **colisiones nucleares** entre el ion y la red de átomos del sólido, estas ocurren hasta que el ion es detenido. Las colisiones nucleares que se generan a esta profundidad pueden generar un daño de radiación (rarefacción) que son alteraciones en la estructura del sustrato producidas por la implantación, las cuales causan modificaciones en el índice de refracción, cambio de densidad, cambio de fase o formación de nuevos compuestos [6].

Por otra parte, los defectos puntuales producidos por las cascadas de colisiones pueden emigrar dentro del material hasta encontrar un obstáculo que lo detiene, por ejemplo los espacios intersticiales pueden encontrarse con una vacancia dentro del material lo cual produce que se recombinen y aniquilen mutuamente por lo que no se produce daño; ahora bien existe la posibilidad de que varios espacios intersticiales se acumulen dentro del material iniciando un defecto extendido que crece conforme es alimentado por nuevos espacios intersticiales. La extensión de defectos extendidos o su crecimiento modifica las propiedades macroscópicas del material.

1.2 Simulación de la implantación

Las predicciones del rango de iones y la distribución del daño son esenciales para la implantación iónica por tal motivo se ha desarrollado una amplia variedad de simulaciones por computadora. Un problema inherente es que la generación de una simulación realista de todos los eventos que ocurren cuando un ion energético viaja a su destino requiere de un detallado conocimiento de los tipos de interacción entre el ion y el destino de los electrones y átomos. Idealmente en la simulación se debe tomar en cuenta el movimiento simultáneo de todos los desplazamientos de los átomos así como el ion entrante y seguir su movimiento hasta que el material se relaje a energías térmicas.

Una simulación de implantación debería de incluir también la posibilidad de un recocido del daño, esparcimiento de la superficie, estabilidad de los defectos complejos y la formación de nuevos compuestos. En una red cristalina la situación es compleja ya que no solo las trayectorias de los iones están dirigidas a los planos o canales de la red, adicionalmente la separación de las vacancias y los espacios intersticiales serán sensibles a la difusión a lo largo de las direcciones cristalinas. Incluso si se pudieran especificar todos los detalles del problema, el tiempo computacional sería demasiado. Por lo tanto, todos los algoritmos computacionales usados tienen como objetivo realizar predicciones aceptables para lograr que el tiempo de procesamiento del programa sea poco.

Muchas de estas simulaciones son ampliamente usadas, hasta el punto que podemos decir que son totalmente confiables. Uno de los más usados es el código SRIM (Stopping and Range of Ions in Matter). Este programa desarrollado por Ziegler [5] es la versión actualizada del TRIM (TRansport of Ions in Matter), un conjunto de programas que calculan el poder de frenado y el

alcance de los iones (10 eV – 2 GeV/uma) en la materia usando un tratamiento completamente cuántico para las colisiones ion-átomo. Se puede obtener información acerca de la implantación en sustratos formados por varias capas, cada una compuesta con diferentes materiales, y es posible calcular la distribución final de iones y los fenómenos cinéticos asociados con la pérdida de energía del ion: daño del sustrato, bombardeo iónico, ionización y producción de fonones. En la figura 1.3 podemos observar algunas imágenes que se pueden obtener con el programa. Aunque presenta algunas limitaciones se ha encontrado que sus resultados son útiles para predecir algunos efectos de la implantación [3].

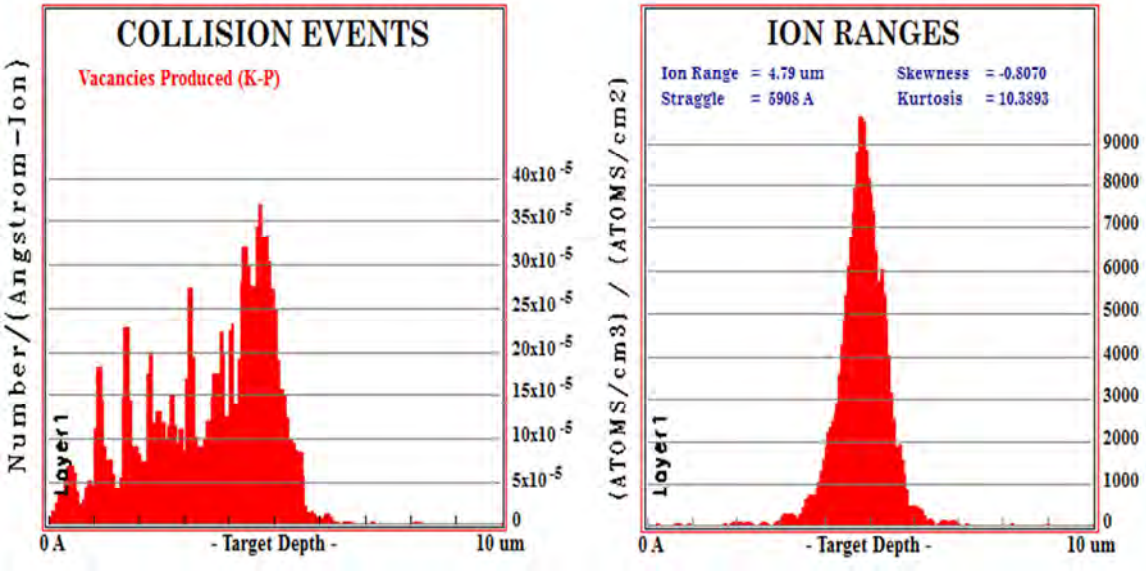


Figura 1.3: Simulación de la implantación de iones en materiales. Ejemplo de una gráfica de colisiones nucleares (izquierda) y distribución de iones implantados como función de la profundidad en el sustrato (derecha).

1.3 Efectos de la implantación en el material

Como mencionamos, la implantación iónica produce cambios en las propiedades de los materiales, por lo tanto las propiedades físicas de los materiales dieléctricos que son más afectadas son las propiedades ópticas del material. Debemos tener en cuenta que al realizarse la implantación existe una restructuración de la red, lo cual produce cambios en los enlaces químicos y en consecuencia en la polarización conduciendo al cambio del índice de refracción [1]. Estos cambios solo se producen en una zona del sustrato lo cual da lugar a regiones con grandes diferencias en el índice de refracción en el mismo material, por lo tanto se ha podido comprobar que estos cambios producidos en general por la implantación de iones ligeros ayudan a la formación de guías de onda ópticas en condiciones controladas.

El efecto dominante de la implantación iónica sobre el índice de refracción se debe principalmente a un desorden parcial de la red producido por las colisiones nucleares, lo cual lleva a una disminución de la densidad física y por tanto una disminución en el índice de refracción del cristal. Sin embargo, el resultado final en cada caso es mucho más complejo ya que el cambio en el

índice de refracción depende de otros factores. Una forma de calcularlo es aplicando la adaptación de la ecuación de Lorentz-Lorenz que está dada por [3]:

$$\frac{\Delta n}{n} = \frac{(n^2-1)(n^2+2)}{6n^2}\left[-\frac{\Delta V}{V} + \frac{\Delta \alpha}{\alpha} + F\right] \tag{1.1}$$

donde ΔV es la expansión volumétrica, $\Delta\alpha$ el cambio de la polarizabilidad y *F* representa factores estructurales. Cabe señalar que el término negativo ΔV domina y origina una disminución en el índice de refracción de la región implantada, pero no debemos olvidar que al restructurarse la red se producen cambios en los enlaces químicos y cambios en $\Delta\alpha$, además otras contribuciones como el esfuerzo y la difusión atómica y de defectos pueden producir pequeños cambios incluso en la región de excitación electrónica.

La región de colisiones nucleares donde ocurre la disminución de índice es llamada **barrera óptica**, de tal manera que existe una región de mayor índice de refracción rodeada por dos regiones con índice de refracción menor, esta región de mayor índice es donde se forma la guía de onda como se muestra en la figura 1.4.

Por otro lado, se ha encontrado que en algunos materiales amorfos se produce un aumento en el índice de refracción en las regiones de excitación electrónica y de colisiones nucleares, lo cual genera guías de onda con perfiles de índice de refracción muy similares a los de las guías obtenidas por otras técnicas de implantación como son la difusión o el intercambio de iones. En los materiales cristalinos no sucede lo mismo ya que estos presentan una disminución del índice de refracción en la región de las colisiones y se debe a los defectos puntuales aislados en la superficie.

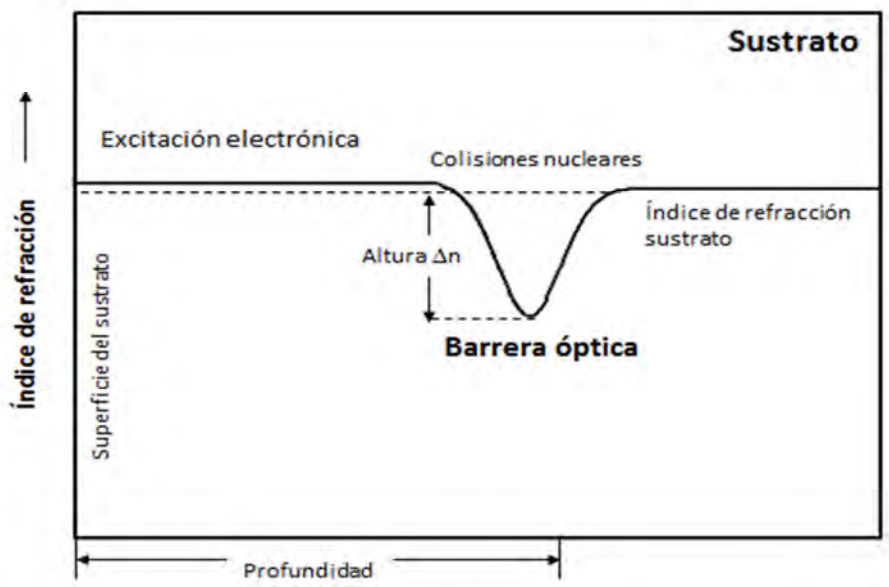


Figura 1.4: Efectos de la implantación de iones ligeros en cristales de Nd: YAG donde se observa la barrera óptica.

Los cambios estructurales que podrían dar lugar a efectos del índice de refracción son en su mayoría causados por las colisiones nucleares, lo cual genera defectos puntuales a lo largo de la trayectoria recorrida por los iones. A altas dosis de implantación, los efectos del estrés dominan el cambio del índice de refracción y en algunos materiales son suficientes para evitar que el material se convierta totalmente en amorfo [3].

Una aplicación importante de la implantación iónica es la formación de láseres de guía de onda en cristales, ya que tales estructuras requieren de potencias de bombeo bajas y se obtienen altas densidades de potencia. La implantación puede influir en el rango de transiciones convenientes y en el ensanchamiento de las líneas de emisión y cabe mencionar que las intensidades relativas de dichas líneas se pueden alterar [6], por lo tanto en este trabajo se caracterizaron guías de onda de canal fabricadas por implantación iónica con el objetivo de desarrollar un láser de guía de onda.

Capítulo 2. GUÍAS DE ONDA

En la mayoría de las aplicaciones ópticas, los haces de luz son confinados lateralmente con elementos ópticos especiales que permiten la propagación de los modos de dicho haz. Una de las estructuras más utilizada en este tipo de aplicaciones es la estructura multicapa o guía de onda, sus aplicaciones son variadas ya que van desde el desarrollo de sistemas que permiten llevar la luz a lugares de difícil acceso, hasta el desarrollo de dispositivos ópticos miniaturizados y optoelectrónicos como lo es la óptica integrada que requieran confinar un haz de luz para poder realizar su función.

Una **guía de onda** se puede definir como una estructura capaz de guiar el flujo de energía electromagnética en una dirección paralela a su eje, mientras que sustancialmente se confina en una región dentro o adyacente a su superficie [7], se caracteriza por una región de alto índice de refracción rodeado por regiones de índice de refracción menor, el confinamiento de la luz así como la distribución espacial de la energía óptica en el interior de la capa de la guía dependen del perfil de índice de refracción. Existen varias técnicas convencionales para la fabricación de guías de onda ópticas. Estas técnicas incluyen crecimiento epitaxial, difusión, intercambio de iones e implantación iónica, las cuales nos permiten obtener perfiles de índice de refracción diferentes para cada guía de onda como se puede observar en la figura 2.1 [1], cabe señalar que el índice se graficó en forma negativa para poder observar el pozo de potencial y la barrera óptica que se forma después de la implantación.

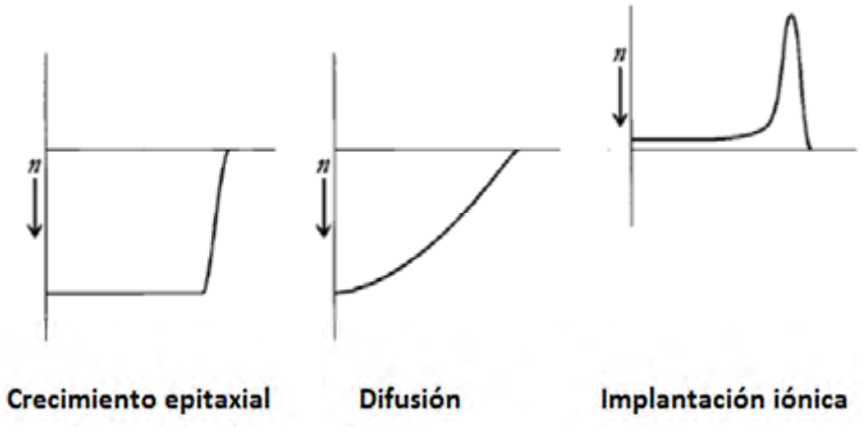


Figura 2.1: Perfiles de índice de refracción de guías de onda fabricadas por varias técnicas.

Las guías de onda pueden ser fabricadas a partir de la combinación apropiada de materiales dieléctricos o semiconductores y suelen ser llamadas guías de onda dieléctricas, se pueden clasificar según su estructura geométrica en planas o rectangulares (canales), en las cuales el confinamiento de la luz se realiza variando la constante dieléctrica de la guía de onda en una sola dimensión o en dos dimensiones respectivamente; y en guías de onda cilíndricas, las cuales se obtienen por la fundición del vidrio y suelen ser conocidas como fibras ópticas; la figura 2.2 muestra tres estructuras diferentes en las que se pueden encontrar las guías de onda [8,9]. Cabe señalar que las guías de onda angostas o de canal son la unidad básica en el área de óptica integrada y es la utilizada en este trabajo.

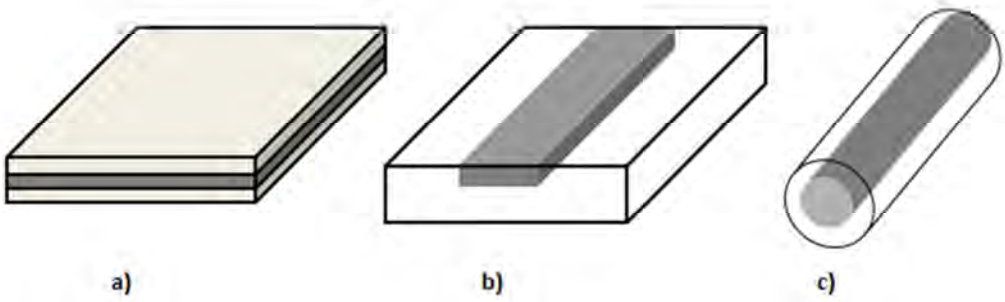


Figura 2.2: Diferentes estructuras de guías de onda, a) plana, b) rectangular o canal y c) cilíndrica.

Como ya se mencionó anteriormente, una guía de onda es un elemento óptico capaz de atrapar la luz y guiarla sin pérdidas en una dirección definida, la capacidad de confinar la luz es una consecuencia del fenómeno llamado *reflexión total interna* que ocurre en la interfaz entre dos medios con índice de refracción diferente; el fenómeno consiste en que bajo ciertas condiciones la luz que viaja en el medio con índice de refracción mayor no entra en la interfaz que tiene índice de refracción menor sino que es reflejada totalmente en ella. Sin embargo, la condición de reflexión total interna no es suficiente para que la luz se propague a través de la guía, para esto se requiere de una condición más la cual es llamada condición de ***autoconsistencia***, que nos dice que la onda se reproduce a sí misma si se refleja dos veces consecutivas en las interfaces [10].

2.1 Guía de onda plana

Un adecuado tratamiento matemático para comprender la propagación de la luz en las guías de onda planas es la creación de un problema de valores propios de las ecuaciones de Maxwell y resolverlos en orden para obtener los modos normales (estados propios) que corresponden a la dirección de la propagación de la luz en la guía, así como sus distribuciones de campo (funciones propias). Sin embargo, es posible analizar la propagación de la luz en la guía de onda desde otros puntos de vista, uno de los cuales es el uso de óptica geométrica, considerando un rayo de luz que se refleja hacia atrás y hacia adelante entre dos interfaces siguiendo un camino en zig –zag en la guía de onda y utilizando la ley de Snell y de Fresnel para la reflexión y la transmisión del mismo en una interfaz entre dos medios con índice de refracción diferente [1]. Por lo tanto, en las siguientes secciones se muestra un análisis de la guía de onda plana utilizando la teoría de rayos y la teoría electromagnética para la comprensión de la propagación de la luz en las mismas.

Aunque en la mayoría de las aplicaciones de las guías de onda es necesario utilizar canales, las guías de onda planas son útiles porque con ellas es posible obtener información acerca del comportamiento general de la guía y del proceso de fabricación, esto se logra debido a que la luz se acopla relativamente fácil a la guía. La guía de onda plana es la forma más simple y consiste en la combinación de tres elementos (núcleo, sustrato y cubierta) con diferentes índices de refracción (usualmente guía de onda n_0, sustrato n_1 y aire n_2) como se representa en la figura 2.3; para que la luz pueda ser guiada en el núcleo, el índice de refracción debe ser ligeramente mayor que los índices del sustrato y la cubierta. Como consecuencia de la diferencia de índices de refracción, la luz es confinada en la dirección *X* y se propaga libremente en las direcciones *Y* y *Z* [10].

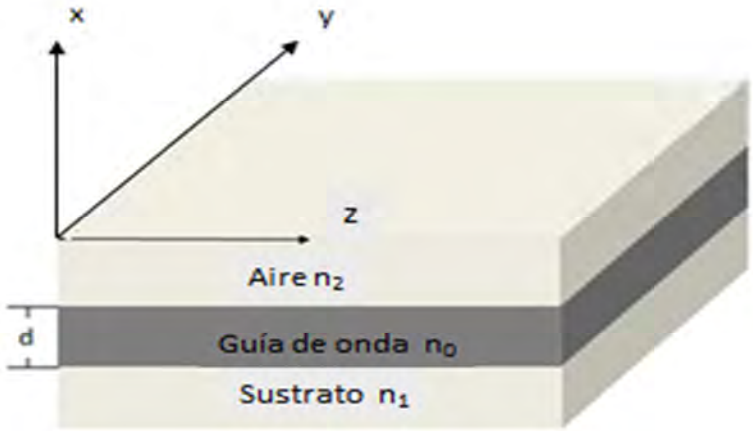


Figura 2.3: Guía de onda plana de tres capas paralelas de distinto índice de refracción.

El espesor del núcleo depende de la longitud de onda que queramos guiar, de las diferencias de índice de refracción de las capas que forman la guía de onda y del número de modos en que se desea que se propague la luz. Se puede considerar que la guía tendrá un buen confinamiento de la luz cuando su espesor es aproximadamente el doble de la longitud de onda con la que se trabaje.

Ahora bien, si el índice de refracción del sustrato (n_1) es igual al índice de refracción de la cubierta o el aire (n_2) como se observa en la figura 2.4 se dice que es una guía de onda simétrica ($n_1 = n_2$), el caso contrario en el que los índices de refracción varían entre sí se dice que es una guía de onda asimétrica ($n_0>n_1>n_2$). Las guías de onda planas se pueden clasificar según la variación del índice de refracción como función de la profundidad con respecto a la superficie para obtener entonces guías de onda con perfil de índice en forma de escalón, donde el cambio en el índice de refracción es bastante considerable, de índice gradiente en donde el cambio de índice de refracción es gradual, y de barrera óptica en donde el cambio de índice de refracción puede ser considerable o gradual como se observa en la figura 2.4.

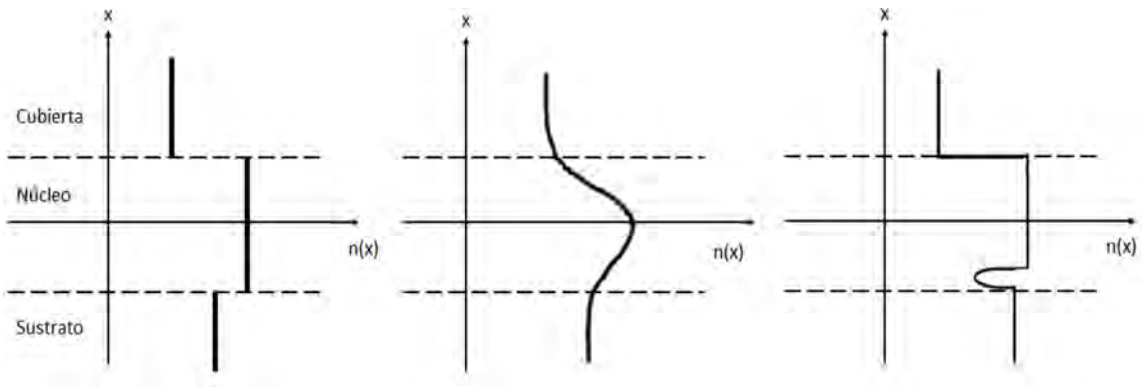


Figura 2.4: Perfil de índice de refracción para guías de onda planas a) guía de índice escalón, b) guía de índice gradiente y c) guía de barrera óptica.

2.1.1 Teoría de rayos

La guía de onda plana se forma utilizando materiales con índices de refracción diferentes y la luz se queda confinada por reflexión total interna. Cuando la luz pasa de un medio de mayor índice a otro medio de menor índice el rayo refractado se aleja de la normal, en este caso para un cierto rango de valores del ángulo de incidencia puede darse el fenómeno de **reflexión total interna (RTI)**. En el límite en que el rayo refractado emerge sobre la superficie (90°), el ángulo de incidencia recibe el nombre de ángulo crítico. Cuando la luz incide con un ángulo superior al ángulo critico no se produce refracción, sino que esta es totalmente reflejada volviendo al primer medio [8].

Como se mencionó anteriormente, el principio de funcionamiento de las guías de onda planas puede explicarse analizando una guía de onda asimétrica, que está formada por un sustrato con índice de refracción (n_1), un núcleo rectangular de ancho *d* con índice de refracción n_0 y una cubierta con índice de refracción menor n_2 (figura 2.5) [10].

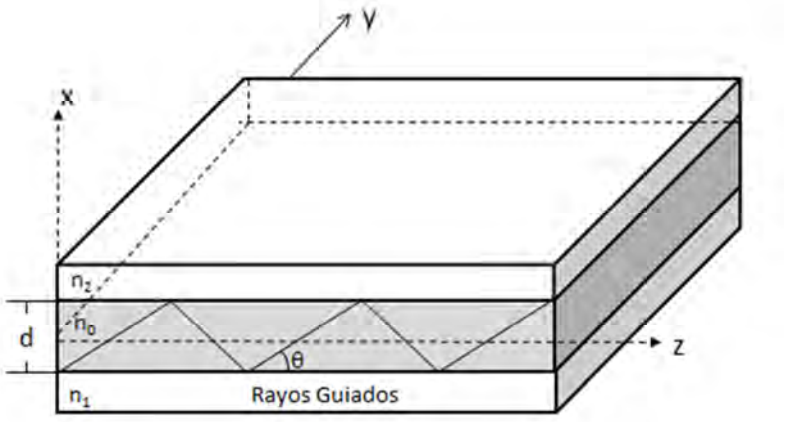


Figura 2.5: Rayos guiados en una guía de onda plana.

De la figura 2.5 podemos considerar que los rayos que hacen ángulos θ con el eje *z* en el plano *xz* sufren reflexiones internas múltiples en la interfaz núcleo – cubierta y núcleo sustrato, con ayuda de la aplicación de la ley de Snell podemos obtener los siguientes valores para los ángulos críticos:

$$\theta_{c1} = \operatorname{sen}^{-1}\left(\frac{n_1}{n_0}\right) \tag{2.1}$$

$$\theta_{c2} = \operatorname{sen}^{-1}\left(\frac{n_2}{n_0}\right) \tag{2.1a}$$

donde θ_{c1} es el ángulo crítico en la interfaz del núcleo y el sustrato y θ_{c2} es el ángulo crítico en la interfaz del núcleo y la cubierta.

La reflexión en las interfaces depende de los índices de refracción de los medios, de la longitud de onda y polarización de la luz, así como también del ángulo de propagación [11]. Los cambios de fase producidos por la reflexión en una interfaz para cada polarización son muy importantes en una guía de onda plana ya que nos ayudan a determinar los modos permitidos en una guía de onda que pueden ser de tres tipos como se muestra en la figura 2.6:

1. ***Modos de radiación*** ($\theta<\theta_{c1}$ y $\theta<\theta_{c2}$): se presentan cuando el ángulo de incidencia es menor al ángulo crítico formado en las interfaces núcleo (n_o) – sustrato (n_1) y núcleo (n_o) – cubierta (n_2), por lo tanto el rayo de luz se escapa de la guía de onda.

2. ***Modos de radiación al sustrato*** ($\theta_{c2}<\theta<\theta_{c1}$): estos se presentan cuando el ángulo de incidencia es mayor que el ángulo critico formado en la interfaz núcleo (n_o) – cubierta (n_2) pero es menor al ángulo critico formado en la interfaz núcleo (n_o) – sustrato (n_1), por lo tanto la radiación se refleja totalmente en la cubierta y se escapa por el sustrato.

3. ***Modos guiados*** ($\theta_{c1}<\theta$ y $\theta_{c2}<\theta$): se presentan cuando existe RTI en ambas interfaces y la radiación está confinada en la guía. Los rayos que cumplen con esta condición se propagan sin pérdidas en la dirección *z*.

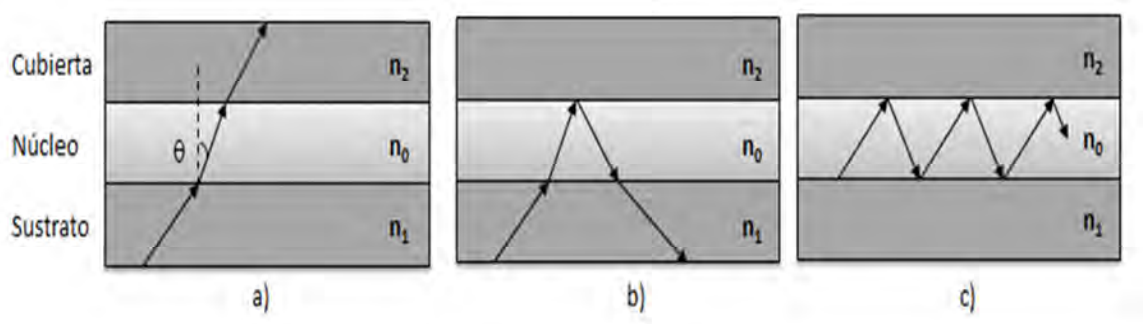


Figura 2.6: Tipos de modos propagándose en una guía plana, a) modo radiado, b) modo radiado al sustrato y c) modo guiado.

Para determinar los modos guiados en una guía de onda plana utilizaremos la figura 2.5 en donde se puede observar que el rayo se refleja totalmente a lo largo de la guía en la dirección *z* con una inclinación θ. Los frentes de fase de las ondas son perpendiculares al rayo de luz [10].

Consideraremos los parámetros siguientes:

- Longitud de onda $\lambda = \frac{\lambda_o}{n_1}$ (λ_o = longitud de onda en el vacío)
- Número de onda $k = n_1 k_o$ ($k = 2\pi/\lambda_o$)

Las constantes de propagación a lo largo del eje *xz* son expresadas por:

$$\beta = n_1 k_z = kn_1 \operatorname{sen} \theta_m = kn_m \tag{2.2}$$

donde n_m es el índice efectivo del modo m-ésimo. El número y espaciamiento de estos modos es para cualquier estructura de guías lo cual depende del espesor y del perfil del índice de refracción.

Para obtener los modos de propagación en la guía de onda se utiliza la condición de autoconsistencia que se describió anteriormente; utilizando la óptica geométrica podemos demostrar que la relación de fase para esta condición está dada por la siguiente ecuación conocida como ecuación de dispersión, cabe señalar que para que exista la propagación en una guía de onda la luz debe tener interferencia constructiva, esto ocurre cuando la fase de la luz en una determinada posición coincide con la de los rayos que se han reflejado en dos interfaces considerando un factor 2π:

$$2kn_0 d \cos \theta_m + 2\varphi_{01} + 2\varphi_{02} = 2m\pi \tag{2.3}$$

donde φ_{01} y φ_{02} son los cambios de fase por la reflexión en las dos interfaces, d es el ancho de la guía y *m* el orden del modo (*m* = 0,1,2…). Para cada valor de m existe un valor único de ángulo de propagación y solo una constante de propagación.

Los modos de la guía de onda plana pueden ser clasificados en modos TE y modos TM, los modos TE o modos eléctricos transversales son los modos que no cuentan con una componente del campo eléctrico en la dirección de propagación de la onda, mientras que los modos TM o modos magnéticos transversales no tienen una componente longitudinal al campo magnético [12].

Utilizando la ecuación de dispersión (2.3), algunas identidades trigonométricas y habiendo realizado los cálculos para los cambios de fase producidos por la reflexión en cada interfaz obtenemos la ecuación de eigenvalores para **los modos TE:**

$$\tan(dq - m\pi) = \frac{q(p+r)}{q^2 - pr} \qquad m = 0,1,2,\ldots \tag{2.4}$$

Se calculan los modos TM siguiendo el mismo análisis que se utilizó para obtener los modos TE, por lo tanto obtenemos la ecuación de eigenvalores para los **modos TM**:

$$\tan(dq - m\pi) = \frac{{n_1}^2 q({n_0}^2 p + n_2^2 r)}{{n_2}^2 {n_0}^2 q^2 - {n_1}^4 pr} \qquad m = 0,1,2,\ldots \tag{2.5}$$

donde:

$$r^2 = \beta^2 - k^2 {n_2}^2$$

$$p^2 = k^2 {n_0}^2 - \beta^2$$

$$q^2 = \beta^2 - k^2 {n_1}^2$$

2.1.2 Teoría electromagnética

Ahora bien, una vez realizado el análisis de teoría de rayos debemos realizar un análisis de teoría electromagnética lo cual nos ayudará a entender mejor la propagación de la luz en la guía de onda plana, para esto suponemos que la luz está confinada en la dirección *x*. Como se mencionó en la sección 2.1.1, hay dos posibles conjuntos de modos dependiendo de su polarización, el modo eléctrico transversal (TE) el cual tiene E_z=0 y el modo magnético transversal (TM) caracterizado por H_z=0. Se deben resolver las ecuaciones de Maxwell aplicadas a una onda de luz, y obtenemos que para los modos TE las únicas componentes que son distintas de cero son $\mathrm{E}_y, \mathrm{H}_x \mathrm{y}\ \mathrm{H}_z$, por tanto:

$$\frac{\partial \mathrm{E}_y}{\partial x^2} + (k^2 n_i^2 - \beta^2)\mathrm{E}_y = 0 \qquad i = 0,1,2 \tag{2.6}$$

donde *i* representa los índices de refracción en cada una de las interfaces de la guía de onda.

Para los modos TM las únicas componentes que son distintas de cero son $\mathrm{H}_y, \mathrm{E}_x \mathrm{y}\ \mathrm{E}_z$, por lo tanto obtenemos:

$${n_i}^2 \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{1}{{n_i}^2}\frac{\partial \mathrm{H}_y}{\partial x}\right) + (k^2 n_i^2 - \beta^2)\mathrm{H}_y = 0 \qquad i = 0,1,2 \tag{2.6a}$$

Para modos guiados la potencia debe ser confinada en la región central de la guía. La forma de las ecuaciones (2.6) y (2.6a) implica que se requiere satisfacer una solución oscilatoria en la región central de la guía y una solución de ondas evanescentes en la región de la cubierta, elegiremos el origen en el centro de la guía que tiene un ancho de d como se muestra en la figura 2.5, por lo tanto se consideran las siguientes soluciones:

$$\mathrm{E}_y = \begin{cases} Ce^{-rx} & \mathrm{x} \geq d/2 \\ A\cos qx + \mathrm{B}\sin qx & d/2 \geq \mathrm{x} \geq -d/2 \\ De^{(px)} & x \leq -d/2 \end{cases} \tag{2.7}$$

donde *p, q* y *r* se describieron en la sección 2.1.1.

Si se aplican las condiciones en la frontera para los campos eléctricos, el campo paralelo a la interfaz tiene que ser continuo y la misma condición debe satisfacerse para el campo magnético perpendicular. Aplicando estas condiciones, eliminando las constantes y realizando un poco de álgebra obtenemos las ecuaciones (2.4) y (2.5) que son las ecuaciones de eigenvalores para los modos TE y los modos TM respectivamente descritas en la sección de teoría de rayos.

Las ecuaciones (2.4) y (2.5) son ecuaciones transcendentales ya que son resueltas por métodos numéricos, por lo tanto la solución tiene múltiples valores y cada valor del índice de refracción efectivo $n_m = \beta/k$ representa un modo de la guía de onda. El número de modos depende del espesor y del índice de refracción de la guía y de la longitud de onda de la luz [13].

2.2 Guías de onda de canal

Las guías de onda de canal también son conocidas como guías de onda acanaladas o guías de onda en 2-D. La estructura básica de la guía acanalada es una región llamada núcleo con un índice de refracción dado n_0, rodeada por uno o más materiales de menor índice. De esta forma la luz está confinada en las dos direcciones transversales x e y, propagándose en la dirección z. Los tipos más utilizados son las guías de canal saliente y canal superficial que se muestran en las figuras 2.7 y 2.8.

La guía de canal superficial consiste en un sustrato con índice de refracción n_1, una región empotrada de mayor índice que es el núcleo de la guía de onda n_o y una cubierta de índice de refracción n_2 que por lo general es aire (figura 2.7).

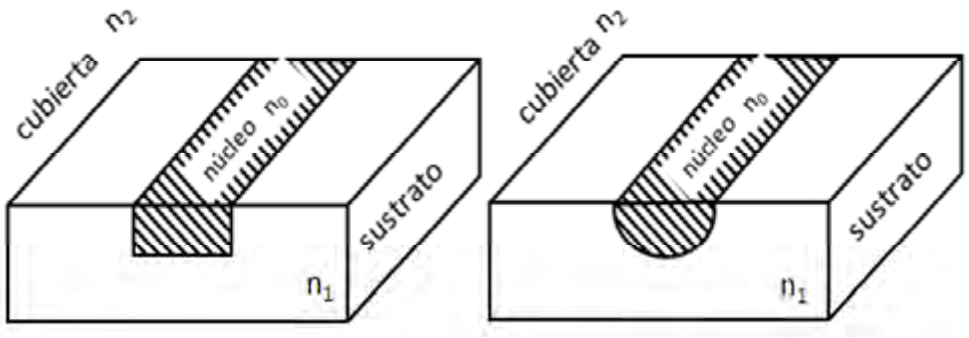


Figura 2.7: Guías acanaladas del tipo canal superficial.

La guía de canal saliente consiste en un sustrato con índice de refracción n_1 y una zona de mayor índice de refracción n_0 que es depositada sobre una guía de onda plana de índice n_3, la cubierta tiene un índice de refracción n_2 (figura 2.8). La zona del núcleo es la que define la región de guiado ($n_0 > n_3$), lo cual proporciona la ventaja de definir el guiado por medio del material depositado sobre la guía de onda plana.

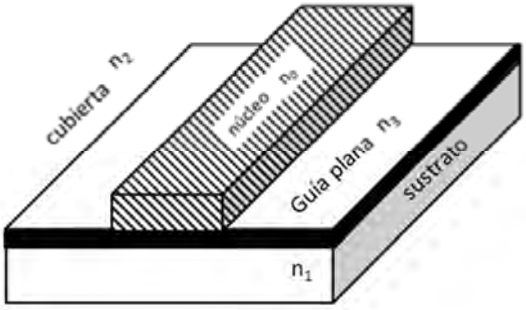


Figura 2.8: Guía acanalada del tipo canal saliente.

La fabricación de las guías de onda acanaladas puede realizarse a partir de guías de onda planas dopando la superficie del sustrato directamente o a través de mascarillas en materiales dieléctricos, utilizando técnicas de fabricación como intercambio de iones o implantación iónica [10].

2.3 Acoplamiento de guías

La principal característica de un acoplador es su ***eficiencia***, así como la forma en que se selecciona el modo a acoplar. La eficiencia de acoplamiento está dada como la razón de potencia del haz acoplado dentro o fuera de la guía de onda con la potencia total del haz. Otra forma de expresarlo es con la medición de pérdidas de potencia de la luz cuando se acopla a la guía de onda o se propaga en esta.

El mayor problema que presenta el acoplamiento son las dificultades en establecer o mantener un preciso y critico alineamiento. Existen varias formas de acoplar la luz en las guías de onda; una de ellas es a través del canto del sustrato por medio de un objetivo de microscopio o una fibra óptica, este proceso requiere de un cuidadoso pulido mecánico en los extremos de la guía. Un problema adicional es la diferencia entre los diámetros de las dos partes a acoplar o entre las secciones de dos manchas de luz como por ejemplo entre una guía circular (fibra) y una guía de onda de canal [10]. Otra forma de acoplar es con la utilización de un prisma cuyo índice de refracción sea mayor que el índice efectivo de la guía [4].

Un tipo de componente utilizado para obtener una mayor eficiencia de acoplamiento entre la fibra y la guía de onda son las microlentes, algunos diseños se muestran en la figura 2.9, donde las microlentes se forman al final de la fibra óptica como las que se utilizaron en este trabajo.

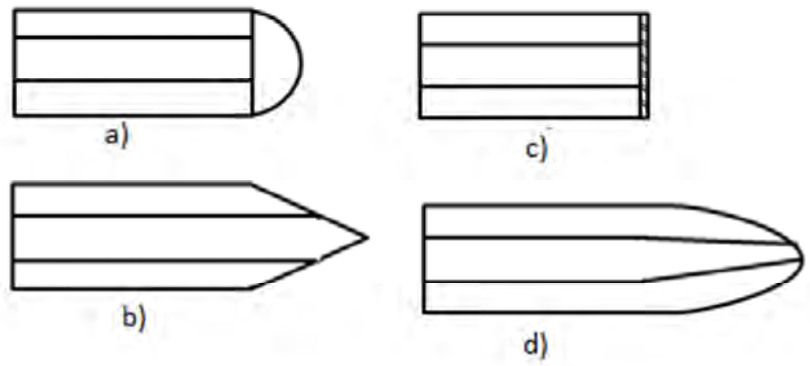


Figura 2.9: Microlentes usadas en acoplamiento: a) lente hemisférica, b) lente cónica, c) lente de Fresnel y d) lente hemisférica adelgazada al final de la fibra.

2.3.1 Acoplamiento por los extremos

Este tipo de acoplamiento se puede utilizar para guías planas o acanaladas. La principal característica de este tipo de acoplamiento es que se aprovecha la naturaleza de los campos propios del haz de luz, de forma que mediante una lente se acopla directamente el modo del haz al modo de la guía.

El acoplamiento por los extremos requiere que las muestras tengan los extremos pulidos con un terminado ópticamente liso, el arreglo del experimento se muestra en la figura 2.10. Se coloca una pantalla para ver el patrón del campo de los modos de la guía de onda. El acoplamiento del haz láser dentro de la guía de onda se puede lograr por un extremo o por medio de prisma para seleccionar un solo modo. El objetivo de microscopio tiene ajustes en el eje X y Z para el enfoque en el extremo de la muestra, la cual está montada horizontalmente sobre una montura que tiene desplazamientos en X y Y para poder observar diferentes partes de la guía. Un conjunto de franjas de interferencia horizontales tienden a aparecer en la pantalla, las cuales son resultado de la interferencia entre las dos fuentes de luz (rayo láser directo al objetivo de microscopio y una reflexión originada desde la superficie de la muestra).

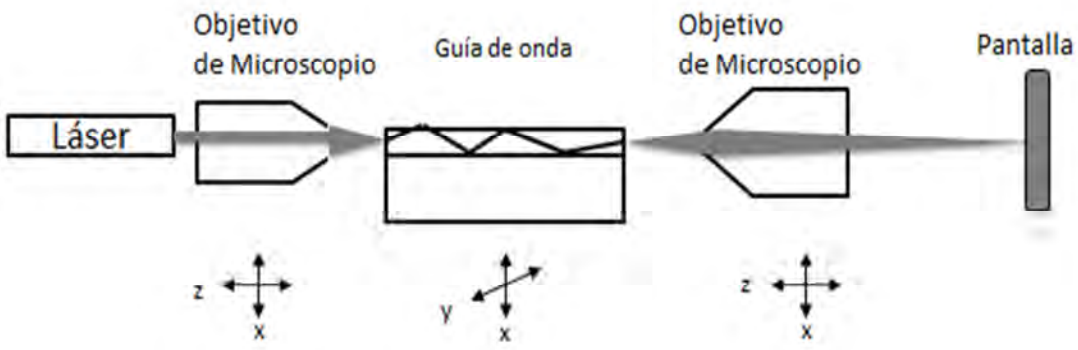


Figura 2.10: Arreglo experimental para acoplamiento por los extremos.

El espaciamiento entre franjas incrementa conforme la superficie de la guía de onda está cerca al eje óptico del primer objetivo de microscopio, eventualmente estas franjas desaparecerán y aparecerá una línea brillante la cual es el patrón del campo de los modos de la guía de onda como podemos observar en la figura 2.11 [1].

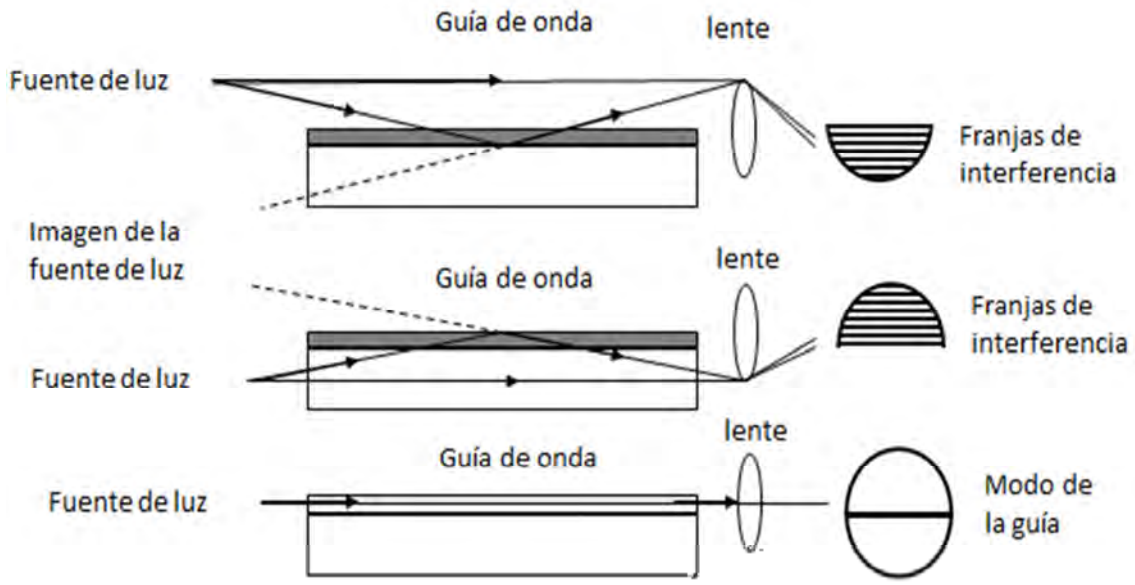


Figura 2.11: Ilustración del método de acoplamiento por los extremos para el campo cercano de los modos de la guía de onda.

2.3.2 Acoplamiento por prisma

Otra forma muy común de acoplamiento de un rayo de luz a una guía de onda es mediante la utilización de un prisma como acoplador. En este sistema se aprovechan las ondas evanescentes producidas en la reflexión total interna en un prisma y se acoplan a los campos de un modo guiado de una guía de onda. Consideremos el acoplamiento de la luz sobre la superficie de la guía a un ángulo oblicuo. Para que el acoplamiento ocurra, es necesario que las componentes de la velocidad de fase de las ondas en dirección z sean iguales tanto en la guía como en el haz.

Las condiciones para que ocurra el acoplamiento son las siguientes:

1. El haz incidente debe tener la misma dirección de polarización que la del modo que se desea excitar, ya que como sabemos los modos en las guías tienen distinta polarización (TE o TM).

2. El campo evanescente en el espacio de separación entre el prisma y la guía deberá viajar con la misma velocidad de fase que la velocidad del modo excitado que se está excitando, esto se logra si el haz incidente tiene un ángulo de incidencia apropiado.

3. La guía debe colocarse cerca de la base del prisma con una separación que se encuentra en el orden de media longitud de onda.

Satisfechas las condiciones mencionadas en los puntos 1 y 3, la condición 2 establece que el acoplamiento de la luz deberá ocurrir cuando se cumpla:

$$kn_p \operatorname{sen} \theta = kn_m \tag{2.9}$$

donde k es el número de onda en el vacío, θ el ángulo de incidencia del haz sobre la base del prisma y n_m es el índice efectivo del modo acoplado [11].

Este tipo de acoplamiento es usado en la óptica integrada por su versatilidad y se puede utilizar un prisma a la entrada como se muestra en la figura 2.12, en la cual un prisma cuyo índice de refracción es mayor al de la guía de onda se presiona contra la muestra, dejando un espacio de aire pequeño entre la base del prisma y la superficie superior de la guía de onda. El hueco de aire es del orden de 0.1 µm. Un haz de luz láser entra en el prisma y es reflejado totalmente en su base. Los campos evanescentes producidos por la reflexión total en el hueco de aire se acoplan del prisma hacia la guía de onda.

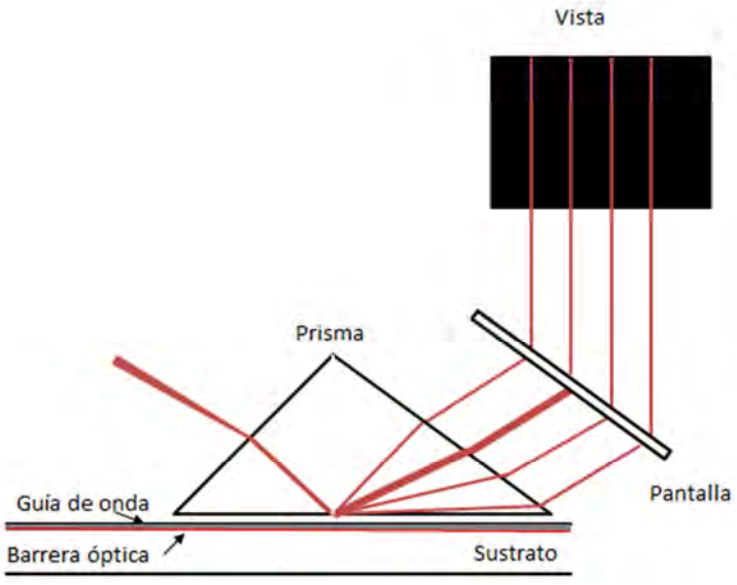


Figura 2.12: Arreglo experimental usado comúnmente para observar el espectro de las líneas brillantes de los modos.

El espectro de modos que es producido por esta técnica consiste en las posiciones angulares de los modos de la guía. Estas posiciones angulares pueden usarse para calcular las velocidades de onda de todos los modos guiados y por lo tanto del índice de refracción y espesor de la guía.

2.3.3 Acoplamiento fibra óptica – guía

El acoplamiento fibra – guía es esencial para el acoplamiento de señales ópticas en la fibra a señales de procesamiento de circuitos en la óptica integrada. La eficiencia de acoplamiento depende de la superposición espacial entre los campos transversales de los modos ópticos en la fibra y en la guía de onda acanalada. La falta de similitud geométrica entre el núcleo de la guía de onda que tiende a tener una sección alargada y el núcleo de la fibra óptica que es circular es un factor importante [14]. Una forma de acoplamiento fibra – guía es colocando la fibra óptica con terminación en microlente en uno de los cantos del sustrato de la guía de onda, lo que ocasionaría pérdidas por acoplamiento debidas a cuatro factores importantes [11]:

1. **Desalineación:** ocurre cuando el eje óptico del haz de la fibra no coincide con el eje óptico del haz de la guía de onda, se puede encontrar en los cuatro grados de libertad que se conocen, es decir el vertical en el eje x, el horizontal en el eje y, el longitudinal en el eje z y por último el angular que se conoce como φ.

2. **Reflexión de Fresnel: es** debida al cambio de índice de refracción que existe entre las tres interfaces, la fibra, la guía y el medio que se encuentra entre ellas que generalmente es aire. Se pueden disminuir colocando películas antirreflectoras en las caras de la guía.

3. **Desacoplamiento de modos transversales:** ocurre cuando no se presenta una correcta superposición de los modos transversales del haz incidente y del modo de la guía, perdiendo potencia e intensidad del haz a la salida de la guía.

4. **Propagación:** se presentan cuando existe un esparcimiento y absorción, esta última generada por los centros de color formados por el proceso de implantación. Estas pérdidas dependen principalmente de los parámetros y de la técnica de fabricación de las guías de onda.

Los primeros tres factores pertenecen a las pérdidas por acoplamiento denotados por:

$$\eta_{ac} = I_1/I_0 \tag{2.10}$$

I_1 es la intensidad de la luz acoplada a la guía de onda e I_0 es la luz incidente en la guía de onda. Existe una relación importante entre la eficiencia de acoplamiento y el coeficiente de pérdidas por propagación (α_p), la cual puede expresarse de la siguiente manera:

$$I_S = I_0 \eta_{ac} * 10^{-\frac{\alpha_p L}{10}} T_F \tag{2.11}$$

donde I_S es la intensidad a la salida de la guía, T_F es el coeficiente de transmisión resultante de la reflexión de Fresnel en la cara de salida de la guía de onda y *L* es la longitud de la guía como se

muestra en la figura 2.13. Cabe señalar que el coeficiente de pérdidas por propagación α_p está dado en dB/cm.

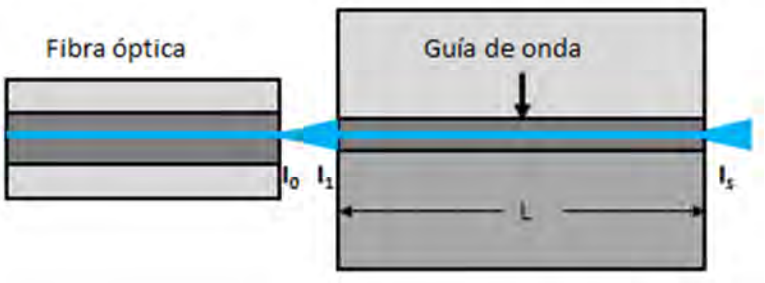


Figura 2.13: Acoplamiento fibra-guía, las regiones más oscuras representan índices de refracción mayores.

Las pérdidas de propagación se pueden estimar a través de la siguiente ecuación en donde T_g es la transmitancia de la guía de onda definida por $T_g = I_s/I_0$, cabe destacar que los valores de $I_s \ e \ I_0$ se pueden obtener a partir de las mediciones de las intensidades de entrada y salida de la guía como se muestra en la figura 2.13,

$$\alpha_p = -\frac{10}{L}\log\left(\frac{T_g}{\eta_{ac}T_F}\right) \tag{2.12}$$

Ahora bien, como podemos observar en la ecuación (2.12), es necesario conocer la eficiencia de acoplamiento para calcular las pérdidas por propagación por lo tanto podemos estimarla de la siguiente manera:

$$\eta_{ac} = \eta_{des}\eta_{fresnel}\eta_{modos} \tag{2.13}$$

donde η_{des} es la eficiencia de las pérdidas por desalineación descrita anteriormente y se puede calcular con la siguiente ecuación:

$$\eta_{des} = \exp\left(-\frac{2d_x^2}{\omega_0^2+\omega_1^2}\right)\exp\left(-\frac{2d_y^2}{\omega_0^2+\omega_2^2}\right) \tag{2.14}$$

d_x y d_y representan la desalineación entre los ejes ópticos de la fibra y la guía

$\eta_{fresnel}$es la eficiencia debida a las reflexiones de Fresnel en la cara de entrada de la guía de onda y está dada por:

$$\eta_{fresnel} = 1 - R_{fresnel} \tag{2.15}$$

$$R_{fresnel} = \frac{\left(\frac{\eta_f-\eta_z}{\eta_f+\eta_z}\right)^2+\left(\frac{\eta_g-\eta_z}{\eta_g+\eta_z}\right)^2+2\left(\frac{\eta_f-\eta_z}{\eta_f+\eta_z}\right)\left(\frac{\eta_g-\eta_z}{\eta_g+\eta_z}\right)\cos\left(\frac{4\pi Z^2}{\lambda}\right)}{1+\left(\frac{\eta_f-\eta_z}{\eta_f+\eta_z}\right)^2+\left(\frac{\eta_g-\eta_z}{\eta_g+\eta_z}\right)^2+2\left(\frac{\eta_f-\eta_z}{\eta_f+\eta_z}\right)\left(\frac{\eta_g-\eta_z}{\eta_g+\eta_z}\right)\cos\left(\frac{4\pi Z^2}{\lambda}\right)} \tag{2.16}$$

donde η_f es el índice de refracción de la fibra óptica, η_g es el índice de refracción de la guía de onda, η_z es el índice de refracción del espacio intermedio entre la fibra y la guía, Z es la separación entre fibra y guía y finalmente λ es la longitud de onda en la que opera el láser con el que se trabaja.

Finalmente η_{modos}es la eficiencia de modos transversales que se presenta por el traslape de los modos de la fibra y de la guía de onda, dicha eficiencia se obtiene con la siguiente ecuación:

$$\eta_{modos} = \frac{\left(2*\sqrt{\omega_1}\left(\frac{\omega_1}{\omega_0}+\frac{\omega_0}{\omega_1}\right)^{-\frac{1}{2}}\right)^2}{\left(\frac{2\omega_1}{2}\right)\left(\frac{\omega_2}{\omega_0}+\frac{\omega_0}{\omega_2}\right)} \tag{2.17}$$

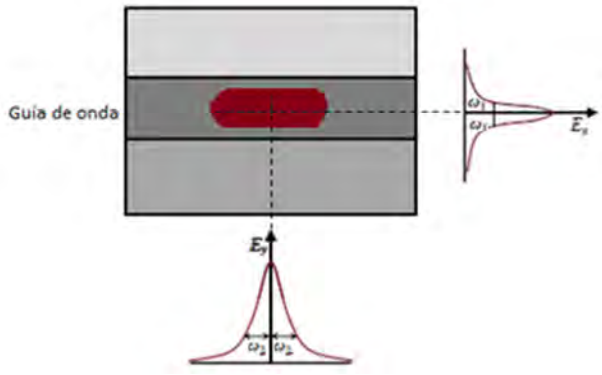


Figura 2.14: Esquema de la distribución de intensidad de los modos que soporta una guía de onda.

donde ω_0 es la cintura del haz de la fibra, ω_1 y ω_2 son los anchos del haz que se propaga en la guía como podemos observar en la figura 2.14 [4]. Cabe señalar que dadas las características de la guía suponemos que el haz es simétrico tanto en la dirección vertical como en la dirección horizontal.

Capítulo 3. ESPECTROSCOPÍA Y EMISIÓN LÁSER

La espectroscopía es una disciplina dedicada a entender como la materia absorbe y emite luz, nos proporciona información sobre la estructura de los átomos y moléculas, la distribución de electrones en los mismos, el tiempo de vida de los estados excitados y la interacción de los átomos y moléculas con otras partículas o con campos electromagnéticos externos.

Ahora bien, ¿qué es la emisión estimulada?, ¿qué entendemos por amplificación?, en este capítulo trataremos de explicar todos estos conceptos y su funcionamiento, describiremos también algunos tipos de láseres y los elementos que lo conforman.

3.1 Niveles de energía

Un modelo sencillo para entender el funcionamiento del átomo es considerarlo como un núcleo alrededor del cual se mueven los electrones formando órbitas. Los átomos son estables porque la energía que posee el electrón en cada una de estas órbitas se mantiene constante a lo largo de todo el movimiento, una variación de órbita implicaría un cambio de energía lo que se identifica como una transición en los niveles de energía. La física cuántica no permite que los electrones de un átomo puedan ocupar cualquier órbita, en consecuencia no pueden ocupar cualquier nivel de energía, sino un conjunto muy restringido de ellos. Cuando el electrón ocupa el nivel de menor energía, se dice que el átomo está en su estado fundamental, mientras que si ocupa un nivel superior tenemos un átomo excitado.

La luz es capaz de inducir transiciones entre los niveles de energía del átomo (cambios de energía de los electrones), mediante procesos de absorción y emisión. Ahora bien, la luz se encuentra formada por partículas (fotones) cuya energía es proporcional a la frecuencia de radiación. Así pues, la **absorción** de luz se lleva a cabo cuando la energía de los fotones coincide con la diferencia entre dos niveles de energía del átomo, resultando en un mayor número de átomos excitados en el material como se muestra en la figura 3.1. Si por el contrario, la energía de los fotones no es suficiente para excitar la transición, la luz apenas interactúa con el material y este se vuelve transparente, es decir la luz atraviesa el material sin ser absorbida.

Figura 3.1: Absorción de un fotón en un átomo que pasa a un estado excitado.

El proceso inverso es en el que el electrón en el estado de energía excitado es inestable y decae a un nivel de energía inferior emitiendo un fotón cuya energía corresponde a la diferencia entre esos dos niveles. Dicho proceso se conoce como **emisión espontánea** como se muestra en la figura 3.2, y es el fundamento de las fuentes de luz habituales [14].

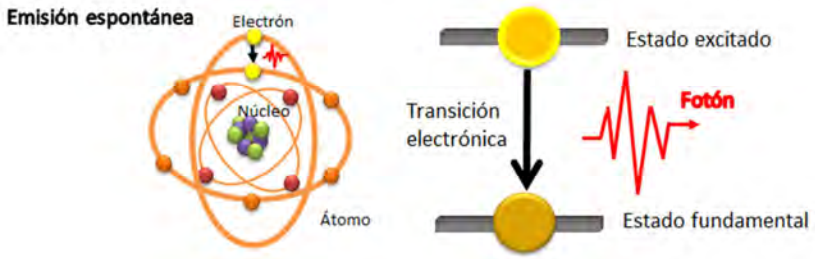


Figura 3.2: Emisión espontánea de un fotón por un átomo que se desexcita.

Como mencionamos anteriormente, el fotón sufre cambios de estado a los cuales se les conoce como **transiciones radiativas** que pueden ocurrir entre dos niveles energéticos cualesquiera. Einstein identificó tres tipos de transiciones radiativas: absorción, emisión espontánea y la tercera es conocida como **emisión estimulada** en la cual un fotón del campo externo con energía $\boldsymbol{h\nu = E_2 - E_1}$, lleva al átomo a realizar una transición del estado excitado al estado fundamental y con ello se emite un fotón con energía$\boldsymbol{h\nu}$para agregarlo al campo, sumándose coherentemente a la intensidad.

Ahora bien, con la excepción del átomo de hidrógeno, para un átomo compuesto de *n* protones y *n* electrones es complicado esperar una solución analítica para los niveles cuánticos. Cabe señalar que las interacciones al interior del átomo producen diagramas de energía mucho más complejos que las figuras 3.1 y 3.2, además de esto puede ocurrir que en varias configuraciones exista la misma energía debido a las propiedades de los orbitales, si esto sucede se produce un estado llamado **estado degenerado.**

3.2 Espectros de absorción y emisión

Los espectros atómicos constituyen la fuente de información más importante que puede tener el átomo ya que prueban que la energía es discontinua. Un espectro atómico cuenta con una serie de franjas que indican las frecuencias a las que el átomo emite luz (espectro de emisión) o la absorbe (espectro de absorción) y cubre en principio toda la gama de frecuencias [15].

Ahora bien, para que un átomo emita radiación es necesario que se someta a excitaciones adecuadas: temperaturas elevadas, descargas eléctricas o absorción de otras radiaciones electromagnéticas. Como ya mencionamos, si un átomo se excita emite luz, aunque solo a unas frecuencias determinadas.

Los espectros ópticos son los medios principales para obtener experimentalmente las energías para las transiciones que sufre un electrón. Para átomos aislados e iones, los espectros de absorción y emisión son conocidos por ser extremadamente marcados. Por lo tanto, las energías de absorción y emisión para los átomos pueden ser determinadas con gran precisión. El espectro óptico para los sólidos es bastante amplio, esto se debe a la alta densidad en los sólidos y a las interacciones atómicas que existen en ellos, las cuales separan a los niveles atómicos en cuasi-bandas continuas [16].

El **espectro de absorción** es un conjunto de frecuencias a las que la absorción ocurre cuando se hace incidir sobre un material un haz de luz con un rango amplio de frecuencias, usualmente es registrado por instrumentos conocidos como espectrofotómetros y se utiliza para

poder determinar la longitud de onda de luz que puede ser usada para excitar los átomos en un material. El **espectro de emisión** por su parte es el conjunto de frecuencias de la radiación electromagnética emitida por el material después de que es excitado; mediante él se pueden determinar las longitudes de onda de luz que puede amplificarse por emisión estimulada.

3.3 Emisión láser

Tal y como se explicó en la sección 3.1, un electrón en un nivel de energía superior es capaz de decaer al estado fundamental por sí solo emitiendo un fotón en el proceso (emisión espontánea). Ahora bien, un fotón interactuando con un átomo inicialmente excitado puede provocar que este pase a su estado fundamental emitiendo un nuevo fotón que se suma al que provocó la transición. Este proceso denominado emisión estimulada se caracteriza además porque el fotón emitido por el átomo tiene las mismas propiedades del fotón inicial como se muestra en la figura 3.3.

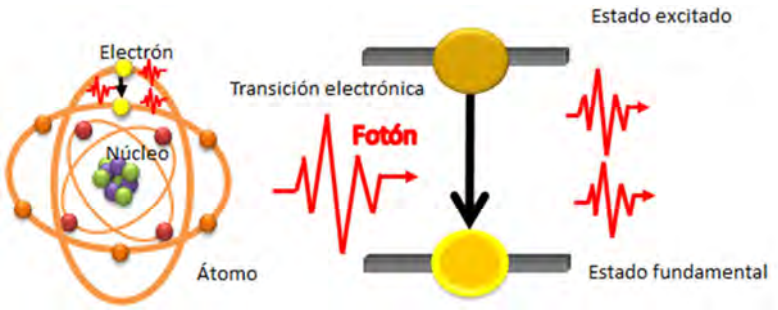


Figura 3.3: Emisión estimulada de radiación.

La emisión estimulada es la base de la amplificación de la luz. Sin embargo, no funciona sin la presencia del propio campo electromagnético. A pesar de esto, los láseres son capaces no solo de amplificar la luz sino también de crearla. Es decir, no son solo amplificadores sino también fuentes de luz. El mecanismo por el que el propio medio activo crea un primer fotón es la emisión espontánea. El fotón emitido espontáneamente es posteriormente amplificado al estimular la emisión de nuevos fotones por parte de otros átomos excitados del material.

El medio activo es el material donde se produce la inversión de población; es decir, el medio donde se consigue situar más átomos en un estado excitado que en el estado de más baja energía de la transición electrónica utilizada en el láser; generalmente para láseres de estado sólido este medio activo es un cristal. El dopante de un cristal mejor conocido como elemento activo es el causante de la emisión o radiación en ciertos materiales, estos dan origen a los cristales láser y los más utilizados son las tierras raras. Las matrices cristalinas para láseres deben tener lugares en la red de dimensiones comparables a las del ion dopante, por ejemplo, los cristales láser que utilizan tierras raras son dopados con más de 1% at. del ion activo, porque en general los umbrales bajan cuando aumenta la concentración del dopante y alcanzan un valor mínimo por arriba del 1%.

3.3.1 Inversión de población

En general cualquier medio está compuesto por una combinación de átomos que se encuentran en su estado fundamental y su estado excitado. Los átomos que se encuentran en el estado fundamental son absorbentes de la radiación, mientras que los átomos que se encuentran en el estado excitado pueden amplificar la luz mediante la emisión estimulada. La emisión estimulada y el proceso de absorción ocurren simultáneamente siempre y cuando los átomos estén distribuidos en los niveles de excitación y el estado base o fundamental. La probabilidad de una transición inducida desde el estado excitado hasta el estado fundamental es la misma que si se realizara la transición desde el estado fundamental hasta el estado excitado. En el estado normal del medio hay más átomos en el estado fundamental que en el estado excitado, dando como resultado una absorción neta de luz.

Si el medio es excitado por un método apropiado tal que el número de átomos en el estado excitado N_u es más grande que el número de átomos en el estado fundamental N_L, la luz incidente sobre el medio será amplificada por emisión estimulada lo cual es la amplificación láser. El proceso en el que $N_u > N_L$ en lugar de $N_L > N_U$ en equilibrio térmico es la llamada inversión de población. Con el fin de invertir las poblaciones de los niveles atómicos, los átomos deben ser excitados depositando energía en el medio para decrementar el numero N_L de átomos en el estado fundamental e incrementar el número N_U de átomos en el estado excitado, este proceso es llamado bombeo, ya que los átomos se redistribuyen como si se bombeara desde el estado fundamental al estado excitado; los métodos de bombeo más usados son el bombeo óptico, en el cual los átomos son excitados mediante una fuente de iluminación, la excitación por descarga eléctrica en el caso de los gases y la inyección de portadores por medio de una corriente eléctrica en el caso de los láseres semiconductores. Además de estos métodos, hay otros como la excitación por irradiación con haces de electrones u otras radiaciones, excitación por reacciones químicas, entre otras.

Puesto que el estado fundamental de la transición láser es el nivel más bajo para un láser de tres niveles la mayoría de los átomos están en este estado en equilibrio térmico. Por lo tanto con el fin de invertir la población, el número de átomos en el estado fundamental debe ser reducido a menos de la mitad por la intensidad del bombeo. Este requerimiento es mejor visto en el sistema de cuatro niveles.

En un láser de cuatro niveles la transición electrónica que genera los fotones ocurre entre los niveles de energía intermedios, mientras que el nivel superior y el nivel inferior son niveles auxiliares que se utilizan para facilitar la inversión de población. El bombeo en este tipo de láseres se realiza excitando electrones desde el nivel fundamental hasta el nivel superior, desde el que decaen rápidamente al nivel intermedio de mayor energía. Una vez allí, el fotón láser se genera en una nueva transición al nivel intermedio con menor energía, finalmente el electrón decae de este último al nivel fundamental como se observa en la figura 3.4.

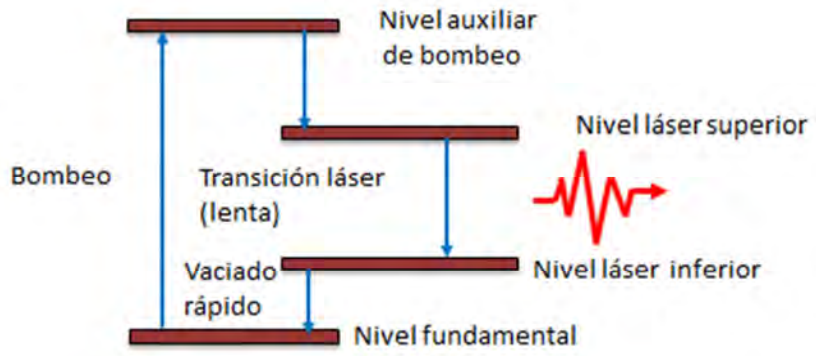


Figura 3.4: Esquema de un sistema láser de cuatro niveles.

La utilidad de los niveles auxiliares radica en que ofrecen transiciones extremadamente rápidas, es por esto que los electrones bombeados al nivel superior decaen extremadamente rápido hacia el nivel intermedio de mayor energía. Puesto que la transición láser es lenta los electrones se acumulan en este nivel. Por otro lado, los electrones que han realizado finalmente la transición láser decaen rápidamente hasta el estado fundamental. Así pues, la inversión de población está asegurada por la acumulación de electrones en el estado intermedio superior y el vaciado rápido del estado intermedio inferior. Las transiciones rápidas entre los niveles auxiliares e intermedios son generalmente no radiativas, es decir no hay emisión de un fotón y son posibles gracias a que la diferencia de energía entre los niveles implicados es suficientemente pequeña como para que esta pueda ser cedida en forma de calor [14].

Como ya se mencionó, la operación del láser depende de un material con niveles de energía estrechos entre los cuales los electrones pueden hacer las transiciones. Por lo general estos niveles se deben a las impurezas en la matriz de un cristal. El bombeo y el proceso del láser típicamente involucran muchos niveles de energía, con procesos de excitación compleja y relajación en cascada entre todos estos niveles [4].

3.3.2Bombeo óptico

Por ser una situación extraordinaria, es necesario recurrir a algún mecanismo artificial para producir la inversión de población. No es de extrañarse entonces que el mecanismo encargado de mantener la inversión de población en los láseres se denomine ***bombeo***. Existen muchos tipos de bombeo, ya que dependen del tipo de material que queramos utilizar como medio amplificador o activo. Sin embargo, todos ellos tienen el requisito de que deben ser lo suficientemente eficientes como para poder compensar la pérdida de átomos excitados y mantener la inversión de población. Probablemente la técnica más sencilla para crear una inversión de población es usar otro fotón como fuente de bombeo. En el caso del Nd: YAG, algunos de los niveles de energía se pueden utilizar para generar emisión láser con un bombeo óptico que puede ser directo o indirecto.

El **bombeo directo** lleva los átomos del estado fundamental al nivel 2 directamente, en el cual los átomos decaen para producir la emisión láser como se puede observar en la figura 3.5. El **bombeo indirecto** por su parte lleva a los átomos a niveles excitados superiores en los cuales los átomos decaen al nivel 2 por medio de transiciones que no son radiativas.

Para cada tipo de bombeo óptico se utilizan bandas del espectro de absorción, por ejemplo para el bombeo óptico directo del Nd en YAG se utiliza la banda de absorción de 885 nm (mediante un láser de Ti:Zafiro o diodo láser), para el bombeo óptico indirecto existen varias fuentes de bombeo ya que dependen de la banda de absorción que se utilice (808 nm de un diodo láser o Ti: Zafiro, en el infrarrojo cercano entre 770 y 900 nm se utilizan lámpara de gases nobles, entre otros); este tipo de bombeo óptico es el más común.

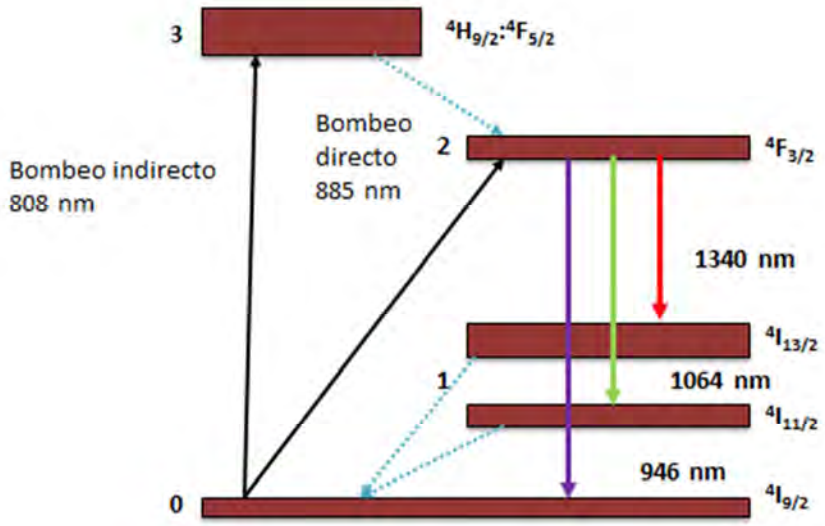


Figura 3.5: Esquema de bombeo directo e indirecto y líneas principales de emisión del láser de Nd: YAG. Las líneas de color morado, verde y rojo representan transiciones radiantes mientras que las líneas de color azul son transiciones no radiantes.

La excitación de un medio láser por bombeo óptico requiere que el espectro de absorción del medio sea similar al espectro de emisión de la fuente de bombeo, ya que de esta manera una gran cantidad de radiación será absorbida. Las fuentes convencionales de luz usadas para el bombeo óptico tienen un amplio espectro de emisión pero en el proceso de excitación solo se emplea una pequeña parte de luz. Debido a que los átomos de gas absorben una pequeña parte del espectro, el bombeo óptico no es en general un método eficiente de excitación en láseres de gas. Por lo tanto, los gases se excitan habitualmente mediante una descarga eléctrica. Los espectros de absorción de los sólidos son más anchos que los espectros de absorción de gases, de modo que la eficiencia del bombeo de láseres de estado sólido mediante bombeo óptico (lámparas, LEDs u otro tipo de láser) es mayor que para láseres de gas.

3.4 Láser de estado sólido

Se consideran como láseres de estado sólido los que tienen como medio activo un material sólido ya sea un cristal o un vidrio dopado con una pequeña porción de iones aproximadamente del orden del 1% que emiten la radiación láser. El material base utilizado puede tener distintas formas como cilindros, prismas, discos, etc. En estos láseres el bombeo es habitualmente de tipo óptico, con lámpara u otro tipo de láser.

Los iones utilizados en este tipo de láseres son metales de transición (Cr, Ti,…) o tierras raras (Nd, Er, Yb,…), estos elementos tienen niveles energéticos internos que permiten transiciones en el rango óptico, siendo relativamente fácil conseguir la inversión de población. Las características fundamentales de la matriz son su transparencia, facilidad de fabricación y buenas propiedades térmicas, uno de los más usados es el láser de iones de neodimio en matrices sólidas; en este trabajo se utilizó el YAG (granate de itrio y aluminio).

En los láseres de estado sólido los niveles energéticos de los iones entre los que se producen las transiciones están ensanchados debido al efecto de la red cristalina que se encuentra alrededor de ellos, a veces este ensanchamiento es muy grande y por ello algunos láseres de este tipo pueden emitir en una amplia banda de longitudes de onda, las cuales están cerca de la región del infrarrojo cercano (1.0 – 2.6 μm) pero recientemente un láser basado en YLF (fluoruro de itrio y litio) ha sido desarrollado para trabajar en longitudes de onda del ultravioleta y el infrarrojo.

Un arreglo típico de un láser de estado sólido se muestra en la figura 3.6, el material láser tiene forma de barra con las caras completamente pulidas para obtener un plano paralelo; cuando la barra se encuentra entre dos espejos y es radiada fuertemente por un intenso destello de luz por una o más lámparas a su alrededor, se emite un pulso de luz láser. El tamaño típico de una barra láser es de 6 cm de longitud y 6 mm de diámetro.

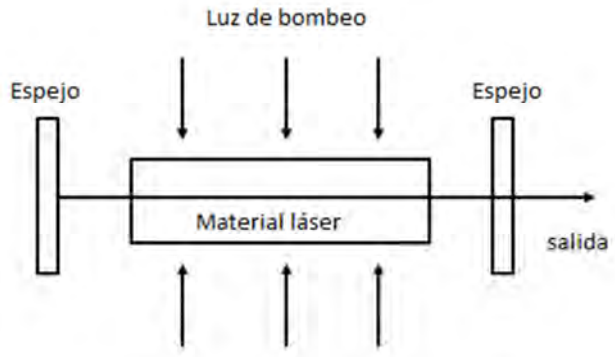


Figura 3.6: Esquema del bombeo óptico para un láser de estado sólido.

En algunos tipos de láseres como los de YAG, la onda continua puede ser generada por la excitación con una fuente de luz con radiación continua. Un típico láser de YAG puede generar una onda continua con potencia de 10 -100 W [17].

Aunque hemos revisado varios de los componentes de un láser, la combinación de un medio activo (material amplificador) y un mecanismo de bombeo óptico no es suficiente para producir la luz láser. En primer lugar deseamos un control muy estricto de la longitud de onda y en segundo lugar necesitamos una fuente de luz brillante, es decir más intensa de lo que se conseguiría amplificando el campo en una sola pasada a través del medio activo. Ambas condiciones se obtienen colocando el medio activo en el interior de una cavidad formada por dos espejos, la cual es llamada **cavidad láser**. Cabe señalar que uno de los espejos debe ser parcialmente reflejante, capturando la mayor cantidad de radiación en el interior de la cavidad, pero al mismo tiempo dejando pasar una pequeña fracción que pueda salir al exterior formando un haz láser como podemos observar en la figura 3.6.

3.4.1 Láser de guía de onda

Un láser de guía de onda puede ser generalmente descrito como un resonador donde la radiación es transmitida por la propagación de ondas guiadas en lugar de la propagación en el espacio libre. Un láser de guía de onda es entonces un láser que utiliza una guía de onda como resonador para proporcionar la retroalimentación necesaria para establecer la oscilación.

Es razonable preguntarse porqué se requiere hacer funcionar un láser en la configuración de guía de onda. La respuesta es que la potencia de salida por unidad de longitud y la eficiencia de muchos sistemas de láser de guía de onda es independiente del diámetro de salida de la cavidad láser, que proporciona un rendimiento idéntico a los láseres convencionales. Las ventajas que se obtienen al utilizar una guía de onda como medio activo son: menor tamaño del láser a través de las pequeñas dimensiones transversales de la guía de onda; un láser de mayor ganancia y menor potencia umbral de bombeo. La cavidad láser puede ser contenida dentro de un sustrato plano y compacto que nos permite integrarlo con otras aplicaciones en un solo circuito. Se pueden obtener altas densidades de inversión de población lo cual es extremadamente benéfico para amplificadores y láseres que sufren reabsorción a la longitud de onda de emisión. Finalmente, las guías de onda tienen un alto grado de inmunidad térmica debida a su geometría por su proporción dimensional y razón de área superficial grande (enfriamiento/volumen).

Podemos encontrar también guías de onda bombeadas por otro láser en las cuales podemos dar una estimación teórica para la eficiencia ϕ, la cual se puede definir como la cantidad de potencia de bombeo que es convertida a potencia de salida de oscilación láser y la potencia umbral P_{umb} que es la potencia de bombeo mínima requerida para el inicio de la oscilación láser; estos parámetros se definen como sigue:

$$\phi = \eta \frac{1-R_2}{\delta} \frac{\lambda_b}{\lambda_e} \tag{3.1}$$

$$P_{umb} = \frac{h\nu_b}{\eta\sigma\tau} \frac{\delta}{2} A \tag{3.2}$$

donde h es la constante de Planck, ν_b la frecuencia de la luz de bombeo, η la fracción de fotones absorbidos que contribuyen a la población del nivel 2, σ la sección transversal de emisión estimulada, τ la vida media de la fluorescencia, A el área efectiva del medio activo, $\lambda_b \, y \, \lambda_e$ son las longitudes de onda de la luz de bombeo y de la señal láser respectivamente,δ son las pérdidas totales de la cavidad y R_2 es la reflectividad del espejo de salida.

3.5 Cristal de Nd:YAG

El cristal de Nd: YAG es el más utilizado para la fabricación de láseres de estado sólido por su alta ganancia y buenas propiedades térmicas y mecánicas, lo cual es importante ya que el cristal

es sometido durante el bombeo a elevadas temperaturas y por lo tanto a esfuerzos de calor y su buena conductividad térmica y coeficiente de expansión térmico bajo aseguran que el calor se remueva y evite que el cristal se expanda ocasionando una alteración en su tamaño durante la operación. Es muy útil en el área de emisión láser al ser utilizado como medio activo y teniendo como impureza el neodimio ya que absorbe muy poco a la longitud de onda del láser.

Pueden conseguirse cristales grandes de muy buena calidad y acabado, su alta conductividad térmica hace que sea fácilmente refrigerable lo que permite potencias muy altas. Cuando se utiliza el cristal de Nd: YAG como medio activo de un láser se obtiene un láser de cuatro niveles, la inversión de población de este láser se logra bombeándolo con lámparas o con un diodo láser. Si el bombeo se hace con este último la eficiencia es mucho mayor porque se puede ajustar la emisión del diodo a la absorción del neodimio casi perfectamente. Para una misma potencia de salida, un láser bombeado por diodo requiere una menor refrigeración que si se bombeara con una lámpara. La tabla 3.1 muestra algunas propiedades ópticas y físicas del Nd: YAG.

Tabla 3.1: Propiedades físicas y ópticas del Nd: YAG [18].

Fórmula química	**Nd: $Y_3Al_5O_{12}$**
Concentración típica de iones de Nd^{3+}	1.0 (% at.)
Dureza (knoop)	1215
Punto de Fusión	1970 °C
Módulo de elasticidad	3 X 10^6 Kg/cm_2
Vida media de fluorescencia	230 μs
Índice de refracción (a 1.06 μm)	1.82
Densidad	4.56 g/cm^3
Coeficiente de expansión térmica	
[100]	8.2 X 10 -6 °C-1
[110]	7.7 X 10^{-6} $°C^{-1}$
[111]	7.8 X 10^{-6} $°C^{-1}$
Pérdidas por esparcimiento	0.002 cm^{-1}
σ_{em}@ 1.06 μm	2.8 X 10^{-19} cm^2
σ_{abs}@ 808 nm	0.485 X 10^{-19} cm^2
Energía del fotón a 1.06 μm	$h\nu = 1.86 \text{ X } 10^{-19}$J
Longitud de onda de laseo	1064 nm, 1338 nm y 946 nm

Los niveles de energía del Nd: YAG son determinados por los iones de neodimio (Nd^{3+}) en la matriz de YAG los cuales se muestran en la figura 3.7, donde podemos observar que la transición láser predominante a 1064 nm ocurre entre el nivel Stark superior del estado $^4\mathbf{F_{3/2}}$ y uno de los estados de $^4\mathbf{I_{11/2}}$. El tiempo de vida de fluorescencia del nivel $^4\mathbf{F_{3/2}}$ es aproximadamente 230 μs para una concentración de Nd de 1% at. [18]. Los estados de los átomos se denotan por un símbolo de la forma $^{2S+1}\mathbf{L_J}$, donde el número cuántico orbital **L = 0,1,2,…,8**, es denotado por las

letras mayúsculas **S,P,D,F,G,H,I,K,L**, respectivamente; el superíndice a la izquierda, **2S+1**, es la multiplicidad del estado debida a la orientación del espín S resultante (por ejemplo, un sistema de un electrón, S = ½, tiene una multiplicidad 2); el subíndice a la derecha es el momento angular total $\boldsymbol{J} = \boldsymbol{L} + \boldsymbol{S}$[4].

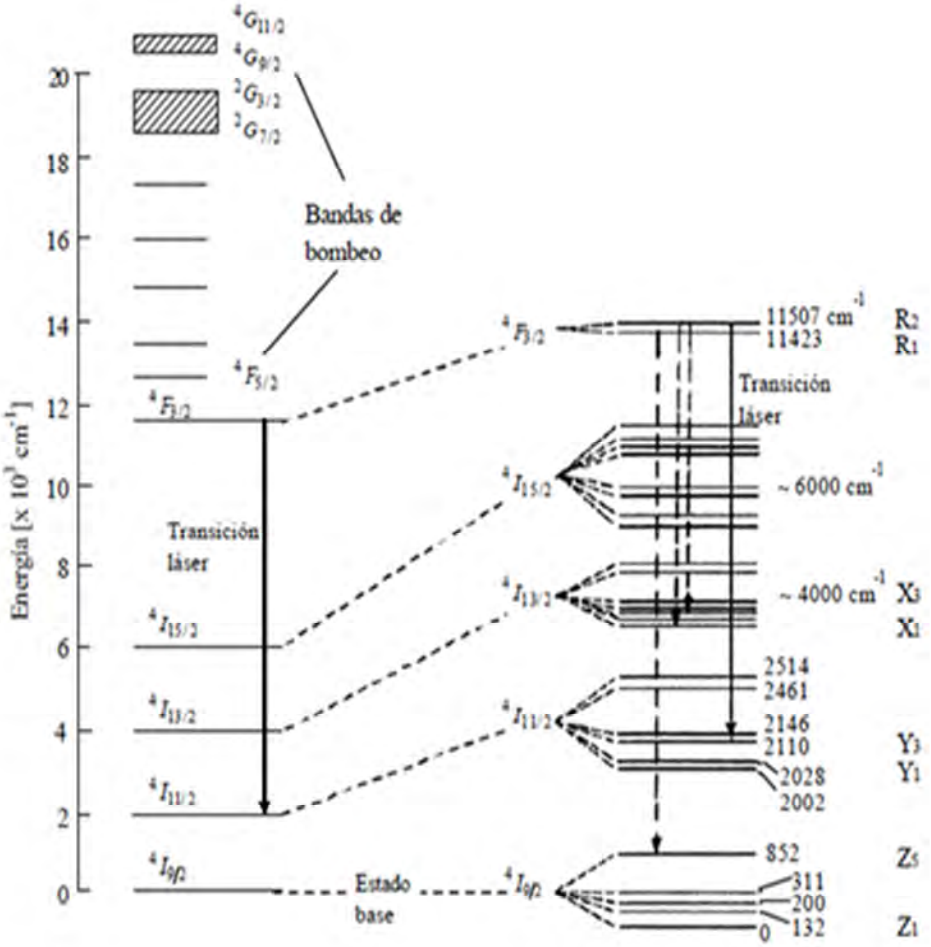


Figura 3.7: Diagrama de niveles de energía del Nd: YAG [18].

Capítulo 4. MATERIALES Y MÉTODOS

Este capítulo aborda los métodos experimentales que se realizaron para la caracterización de guías angostas realizadas por el método de implantación iónica en cristales de Nd: YAG para el desarrollo de láseres compactos, así como la fabricación de microlentes en uno de los extremos de varias fibras ópticas para tener una mayor eficiencia de acoplamiento fibra – guía y lograr obtener la mayor intensidad posible, ya que una parte importante de la caracterización de guías es la estimación o medición de las pérdidas de intensidad de la luz cuando se acopla a la guía y mientras se propaga en ésta [3].

4.1 Caracterización de guías de onda de canal

Las guías de onda de canal fueron realizadas por medio del método de implantación iónica utilizando protones con un acelerador de partículas tipo Peletrón, que se encuentra en el Instituto de Física de la UNAM. Se utilizó una mascarilla de electroformado de una aleación de Ni: Co (Níquel y Cobalto), la cual cuenta con tres conjuntos de diez aberturas cada uno, estas aberturas tienen anchos de 10, 15 y 20 micrómetros y entre cada conjunto de 10 aberturas hay una distancia de 215 micrómetros, por lo tanto con cada implantación obtenemos 30 guías con tres anchos diferentes.

La muestra que se caracteriza en este trabajo fue implantada con una dosis de $4X10^{16}$ iones/cm^2 de protones sobre un cristal de Nd: YAG, esta es una dosis alta; cabe señalar que se han realizado trabajos [3, 21, 22] con la mitad de la dosis de protones y con implantación de iones de carbono como se menciona en la introducción de este trabajo. La implantación se realizó con una energía de 1 MeV y el ángulo de implantación fue de 61° entre el campo del haz y la normal a la superficie del cristal.

4.1.1 Microfotografías

El microscopio que se utilizó tiene acoplada una cámara digital que nos ayuda a tomar las fotografías de las guías de canal con mayor facilidad, las cuales nosotros llamamos microfotografías; una vez tomadas las microfotografías se estimó por medio de una aproximación numérica las dimensiones de las guías. Cabe señalar que para poder realizar la aproximación numérica es necesario que las fotografías tengan la misma magnificación (40X) y tener una referencia, por lo tanto nuestra referencia fue una rejilla de Ronchi de 2500 LPI; una vez obtenidos los valores con la aproximación numérica, estos se corroboraron utilizando el programa SRIM (Stopping and Range of Ions in Matter) [5]. Este programa desarrollado por Ziegler (1999), es la versión actualizada del TRIM (TRansport of Ions in Matter), un conjunto de programas que calculan el poder de frenado y el alcance de los iones (10 eV – 2 GeV/uma) en la materia usando un tratamiento completamente cuántico para las colisiones ion-átomo. El cálculo se hace eficiente mediante el uso de algoritmos estadísticos que permiten al ion hacer saltos entre las colisiones calculadas y entonces promediar los resultados de las colisiones sobre el espacio. Se considera que la colisión entre el ion y el átomo es una interacción de Coulomb apantallada que incluye interacciones de intercambio y correlación entre las nubes electrónicas traslapadas [3,20].

4.1.2 Modos transversales

Los modos transversales de las guías fueron estudiados con un láser de He-Ne que opera en el visible (633 nm), la luz que sale de la guía de onda es colectada mediante un objetivo de microscopio de 20X, una vez colectada la luz de la guía de onda se colocó un diafragma para poder eliminar la luz proveniente del sustrato y sólo permitir el paso de la luz proveniente de la guía de onda, esta luz llega directamente a una cámara CCD (Charge Coupled Device)que nos entrega las imágenes de los modos transversales soportados por la guía.

El arreglo experimental utilizado para observar los modos trasversales se muestra en la figura 4.1. Cabe señalar que para estimar el tamaño real de las dimensiones de las guías de onda, fue necesario colocar la cámara CCD a una distancia de 160 mm que es la longitud de tubo específica para los objetivos de microscopio DIN (Deutsches Institut fûr Normung) que utilizamos (la longitud de tubo es la distancia entre el punto focal imagen del objetivo de microscopio y el punto focal objeto del ocular que en nuestro caso es la cámara CCD); enseguida se debe dividir el valor obtenido de la cámara CCD entre la magnitud de magnificación del objetivo de microscopio que utilizamos (20X), es decir $t_o = {}^{t_i}/_{m}$; donde t_o es el valor real de la imagen, t_i es el valor que nos manda la cámara CCD y m es la magnificación del objetivo de microscopio que se utilizó; la utilización de esta pequeña ecuación es importante ya que la cámara CCD nos entrega los valores del tamaño de los modos proporcionales a la magnificación del objetivo utilizado y al no dividir estos valores entre el valor de la magnificación del objetivo de microscopio obtendríamos resultados erróneos en nuestros cálculos.

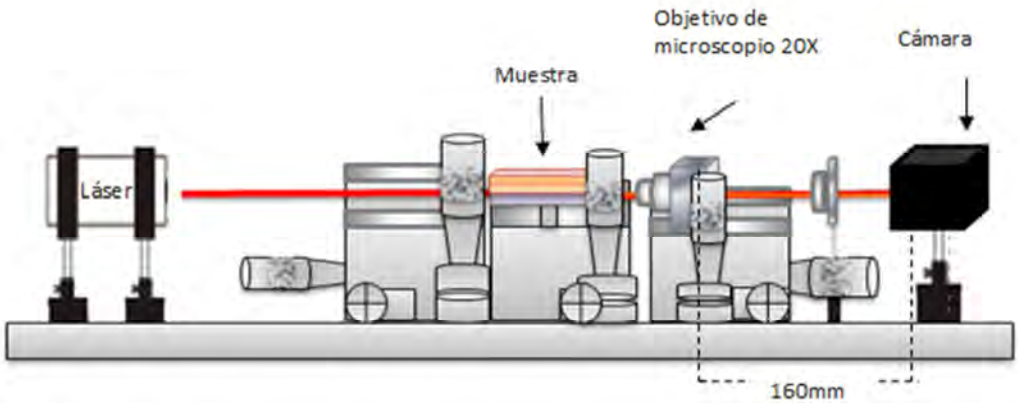


Figura 4.1: Arreglo utilizado para el estudio de los modos de las guías de onda.

4.1.3 Pruebas de transmisión

Las pruebas de transmitancia se realizaron para el cálculo de las pérdidas por propagación, en estas pruebas se utilizó un láser de He-Ne (633nm) y se montó el arreglo experimental de la figura 4.2 en donde la luz láser es colectada por una fibra óptica multimodal, pasa a través del cristal y sale por el objetivo de microscopio de 20X, se colocó un diafragma después de dicho objetivo para que la luz que llegue al detector de potencia sea sólo la luz de la guía de onda. Para

esta prueba se debe tomar la potencia de entrada y de salida de la guía; la potencia de entrada (figura 4.2) es la potencia medida a la salida de la fibra óptica.

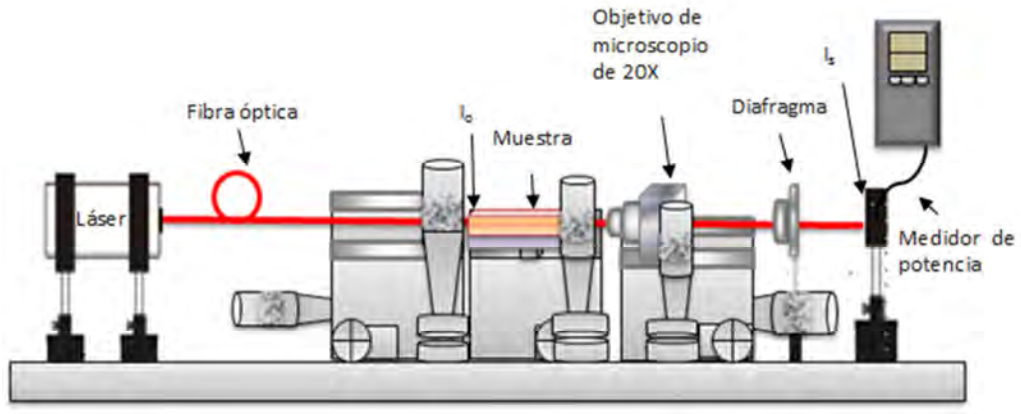


Figura 4.2: Arreglo experimental para la medición de la transmisión en las guías.

Una vez medida la potencia de entrada y de salida se calcula la transmitancia para cada una de las guías (T_G) la cual es el cociente entre la intensidad de salida de la guía (I_s) y la intensidad de entrada a la guía de onda denotada por (I_o) utilizando la ecuación 4.1.

$$T_G = \frac{I_s}{I_o} \tag{4.1}$$

Las pruebas de transmitancia también fueron realizadas con la utilización de un diodo láser que opera a 806 nm y utilizando la misma fibra multimodal a la cual se le realizó en uno de sus extremos una microlente, en estas pruebas se montó el mismo arreglo experimental de la figura 4.2.

4.1.4 Pérdidas por propagación

Con el cálculo de la transmitancia de cada guía de onda utilizando la ecuación 4.1 se prosigue a realizar los cálculos para obtener las pérdidas por propagación en las guías a 633 nm y 806 nm que fueron las dos longitudes de onda a las que se calcularon las transmitancias, para dichos cálculos se utiliza la siguiente ecuación:

$$\alpha_p = \frac{-10}{L} Log\left(\frac{T_G}{n_{ac} T_F}\right) \tag{4.2}$$

Donde:

α_p = Pérdidas por propagación [dB/cm]

L = Longitud de la muestra en este caso el cristal de Nd:YAG [cm]

n_{ac} = Eficiencia de acoplamiento fibra – guía

T_F = Coeficiente de transmisión resultante de la reflexión de Fresnel en la cara de salida de la guía.

Como sabemos, las transmitancias dependen de las reflexiones de Fresnel por lo tanto para el cálculo de T_F se utilizó la ecuación 4.3, como podemos observar es necesario considerar los medios que intervienen en estas reflexiones para utilizar los índices de refracción correctos, los cuales en nuestro caso para 806 nm fueron n_z= 1 y n_g = 1.8289 y para 633 nm fueron n_z= 1 y n_g = 1.8285.

$$T_F = \frac{4n_z n_g}{(n_z+n_g)^2} \tag{4.3}$$

donde n_z es el índice de refracción del aire y n_g corresponde al índice de refracción del sustrato.

La eficiencia de acoplamiento fibra - guía se calcula utilizando la ecuación 2.13 y finalmente para medir la cintura del haz tanto para cada fibra que se fabricó como para cada una de las guías de onda, se utilizó una cámara CCD y se obtuvo el valor como se explicó en la sección 4.1.2.

4.1.5 Espectros de absorción

Los espectros de absorción del cristal se realizaron a través de un espectrofotómetro Perkin Elmer lambda 900 UV/VIS/NIR, en el cual se colocó la muestra de manera en que las guías de onda quedaran perpendiculares al haz de luz incidente y se dio un rango de 350-900nm para que pudiera abarcar las principales bandas de absorción del material, esta prueba se realiza para identificar las posibles longitudes de onda para la fuente de bombeo de un material en particular [3]. La probabilidad de absorción a cada frecuencia es diferente, por tanto, el espectro muestra la intensidad relativa de la luz absorbida a cada frecuencia [23].

4.1.6 Espectros de luminiscencia

Los espectros de luminiscencia se tomaron para poder analizar los efectos de la implantación iónica, ya que ésta modifica las propiedades de emisión de los materiales (i.e. luminiscencia), esta modificación se aprecia en un ensanchamiento de las bandas de emisión o en una disminución de la intensidad relativa entre los valores máximos de esas bandas, por lo tanto la comparación que se debe realizar es entre los espectros de luminiscencia de las guías de onda con los espectros de luminiscencia del cristal en volumen.

Estos espectros se obtuvieron con un diodo láser que opera a 806 nm, el cual es usado como fuente de bombeo y a una potencia de 0.08 W, la luz del láser es colimada por un objetivo de microscopio de 10X, un objetivo de microscopio de 20X colecta la luz que entra a las guías de onda, y la luz emitida por los átomos de neodimio llega a una fibra monomodo que va directo a un analizador de espectros (OSA), figura 4.3.

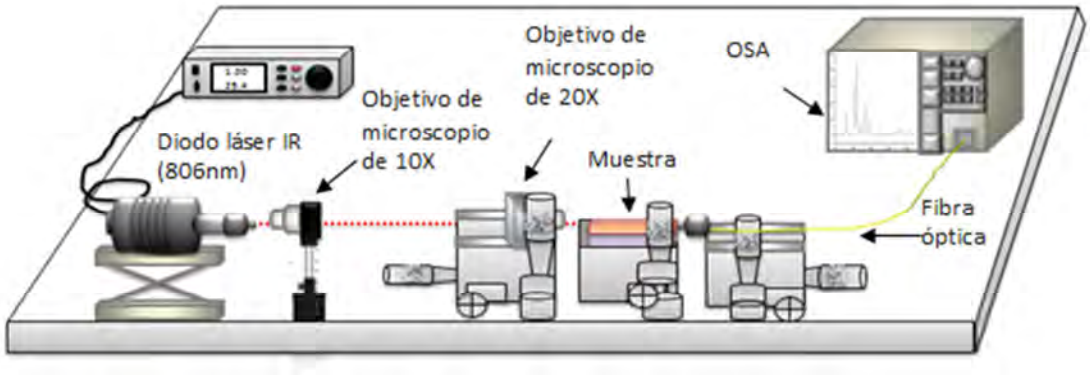


Figura 4.3: Arreglo montado para obtención de espectros de luminiscencia de las guías de onda.

Los espectros de luminiscencia del cristal en volumen se obtuvieron con el mismo arreglo experimental de la figura 4.3, sólo que se movió la muestra de tal manera que la luz incidente estuviera fuera de la guía de onda.

4.1.7 Emisión láser

El estudio de la emisión láser se realizó con un láser de Ti: Zafiro que opera a 809 nm en modo continuo el cual fue utilizado como fuente de bombeo, se colocó un divisor de haz a la salida del láser para detectar la potencia con un medidor, cabe señalar que ésta es la potencia entrante en la cavidad láser. La luz es colectada por un objetivo de microscopio de 10X el cual acopla la luz a la entrada de la guía de onda. La luz que sale de la cavidad láser es colectada por medio de una lente asférica que tiene en sus superficies películas antirreflectoras en el rango de 1050 – 1500 nm.

La luz colectada por la lente asférica llega a un diafragma el cual nos permite colectar únicamente la luz que viene de la guía de onda y eliminar la luz proveniente del sustrato. Como se mencionó anteriormente, se realizó una cavidad láser utilizando como acoplador de entrada un espejo de total reflectividad a 1064 nm y como acoplador de salida un espejo de 90% de reflectividad a 1064 nm, estos espejos fueron pegados a los cantos pulidos de la muestra utilizando una gota de aceite de inmersión; se colocó un filtro después del segundo espejo con una transmisión de 0.5% en la longitud de onda del bombeo para poder eliminar los residuos de la potencia de bombeo, enseguida del filtro se encontraba un segundo detector conectado a un medidor de potencia para obtener el valor de la potencia de salida (figura 4.4).

Con estas pruebas se obtuvieron el espectro de emisión láser con el cual se determinaron la longitud de onda de emisión y el ancho de banda; y las curvas de eficiencia láser con las cuales se determinaron la potencia umbral y la eficiencia láser.

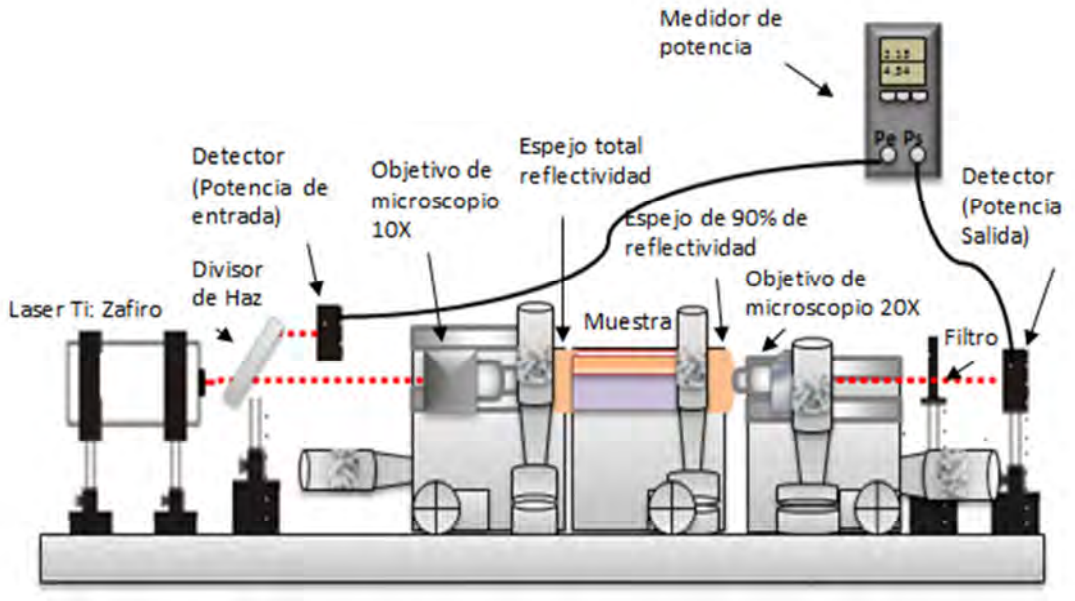


Figura 4.4: Arreglo montado para obtener la emisión láser en las guías.

4.2 Fibra óptica con terminación en forma de lente

Se utilizó una fibra óptica multimodal que tiene una apertura numérica de 0.14 con las dimensiones de la figura 4.5, se contaba con 3 m de esta fibra por lo tanto se cortaron 6 tramos de 50 cm y a cada uno se les realizó una microlente en uno de sus extremos con diferentes parámetros para poder obtener microlentes con diferentes radios de curvatura. Las especificaciones de la fibra multimodal utilizada se muestran en el apéndice A.

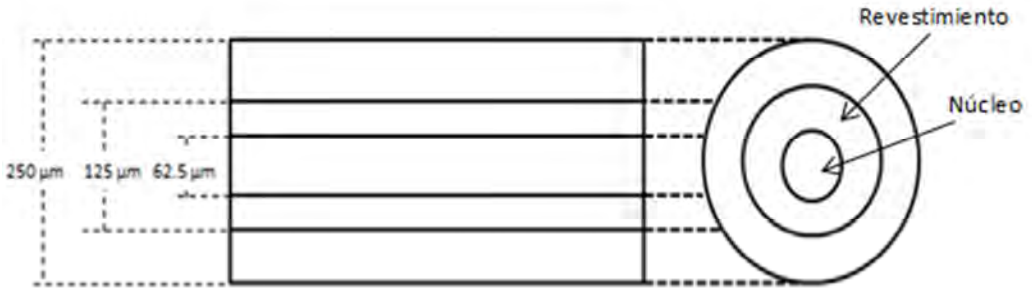


Figura 4.5: Dimensiones de la fibra multimodal utilizada.

4.2.1 Acoplamiento láser – fibra

En las pruebas de transmisión mencionamos que realizamos un acoplamiento fibra- guía en el cual se utilizó una fibra multimodal a la cual se le fabricó una microlente en uno de sus extremos para poder enfocar la luz que sale de nuestra fuente de bombeo a la entrada de la guía

de onda; por lo tanto inicialmente se debe realizar un acoplamiento diodo láser – fibra. Para realizar este acoplamiento se colocó la fibra multimodal en un capilar y éste a su vez en una montura con microposicionadores que nos ayudaran a tener la mejor eficiencia de acoplamiento, cabe señalar que el diodo láser con el que se cuenta tiene una lente acoplada la cual tiene una distancia focal de 6 mm por lo tanto la fibra óptica se posicionó a esa distancia.

Se tomó el valor de la potencia de salida del diodo láser para que una vez acoplada la fibra a la salida de éste podamos tomar la potencia que nos entrega la fibra y por medio de los microposicionadores mover la fibra para obtener la mayor eficiencia de acoplamiento, en este caso la potencia entregada por el diodo láser es de 80 mW y estamos obteniendo una potencia máxima de salida de la fibra de 70.7 mW, por lo tanto tenemos aproximadamente un 80% de eficiencia de acoplamiento. Cabe señalar que las pruebas también se realizaron con un láser de He-Ne que opera a 633 nm el cual nos entregaba una potencia de salida de 4.7 mW mientras que a la salida de la fibra obteníamos una potencia máxima de 3.07 mW, teniendo una eficiencia de acoplamiento del 75%.

4.2.2 Fabricación y caracterización de microlentes

La fibra óptica multimodal se utilizó para poder realizar un acoplamiento fibra – guía con el fin de tener un arreglo más compacto y un mejor acoplamiento que es la idea principal de este trabajo, por lo tanto después de haber realizado el acoplamiento diodo láser – fibra se debe enfocar la salida de la fibra a la entrada de la guía pero ya que el tamaño del haz de salida de la fibra multimodal es muy grande se sugiere colocar una lente para que este haz sea enfocado y tenga una cintura menor, el problema de colocar una nuevo elemento óptico como es la lente es que aumentan las distancias entre estos elementos y también estamos colocando más elementos así que no lograríamos que nuestro arreglo sea lo más compacto posible por lo tanto se opta por fabricar una microlente en el extremo de la fibra así tener un arreglo compacto.

Para la fabricación de la microlente en el extremo de la fibra se utilizó una técnica llamada fusión y estiramiento, esta técnica se realizó con la ayuda de una empalmadora FITEL S175; se realizaron varias pruebas utilizando diferentes potencias y diferentes tiempos de exposición, cabe señalar que aun reutilizando las mismas potencias y mismos tiempos de exposición del arco eléctrico las microlentes no son reproducibles porque no podemos controlar la forma en que se funde el silicio.

Ahora bien, se inicia el procedimiento con la preparación de la fibra óptica el cual consiste en quitar el revestimiento a la fibra para lo cual se utilizan una pinzas especiales, una vez que se quita el revestimiento se limpia la fibra con alcohol isopropílico para evitar que queden rastros de grasa o alguna impureza; ya limpia la fibra se prosigue a montarla en la empalmadora como se muestra en la figura 4.6, se toma un tramo de fibra aproximadamente de 1 m de largo y se coloca en la empalmadora entre los dos electrodos asegurándonos que quede un tramo de 50 cm de cada lado de la empalmadora. Una vez colocada la fibra, se cierra la cubierta para poder observar a través de la pantalla la posición donde se dará la descarga eléctrica, la cual hará el proceso de fundición del sílice. Como se puede observar, se coloca al final de la fibra un peso de 14g aproximadamente para que al momento de mandar el arco eléctrico, el peso estire la fibra y pueda producirse un adelgazamiento que al llegar al punto de fusión del silicio, forme una microlente en la punta de la fibra. Cabe señalar que se realizó un adelgazamiento con bajas

pérdidas con la ayuda de una procesadora de vidrio llamada VYTRAN, que es un equipo que cuenta con un proceso de fusión y estiramiento sin necesidad de colocar un peso.

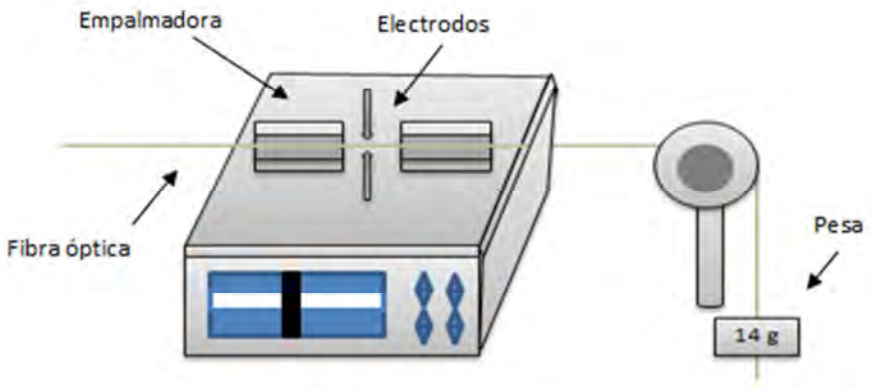


Figura 4.6: Arreglo utilizado para la fabricación de la microlente.

Una vez realizada la microlente en la punta de la fibra, se tomaron imágenes utilizando un microscopio que cuenta con un programa que nos permite medir el radio de curvatura de la microlente y el ancho de la fibra al realizarle el adelgazamiento. Se midió la cintura del haz a la salida de la fibra utilizando una cámara CCD como se mencionó en la sección 4.1.2.

Capítulo 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Este capítulo muestra los resultados obtenidos de la caracterización de las guías de onda y de las fibras con terminación en lente así como una propuesta de láser de guía de onda compacto basado en las guías estudiadas. Es necesario mencionar que los valores mostrados en este capítulo son valores promedios de cada uno de los conjuntos de guías de onda que se fabricaron en el cristal de Nd:YAG.

5.1 Dimensiones de las guías

Las microfotografías tomadas con el microscopio nos muestran la interfaz aire-sustrato así como la barrera óptica formada por la implantación de los protones y la región donde se formó la guía de onda (figura 5.1). Como se mencionó, se calculó el grosor de la guía utilizando como referencia una rejilla de Ronchi de 2500 LPI, el valor resultante varía entre los 4.8 – 4.2 µm; se midió también el ancho de las guías y se observó que tenían una variación de 0.1 – 0.3 µm en comparación con las de la mascarilla con la cual se implantaron. Estos resultados se observan en la tabla 5.1.

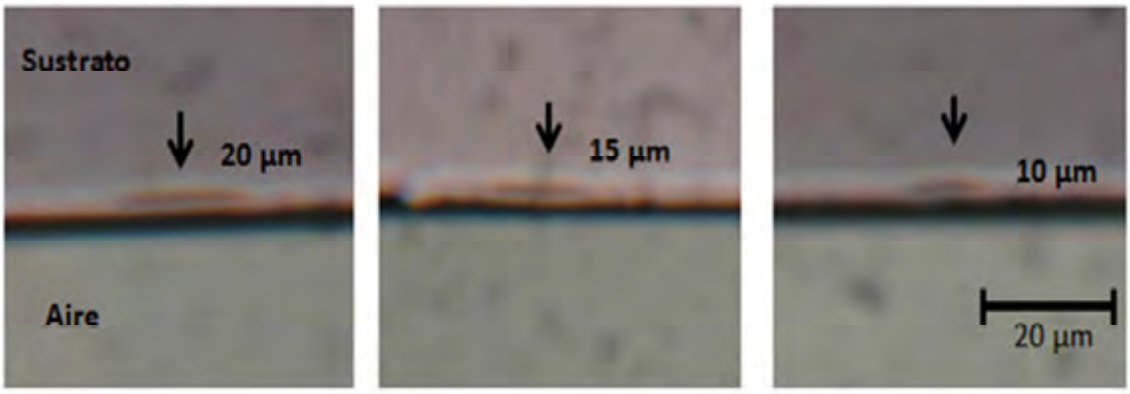


Figura 5.1: Microfotografías de las guías de onda que se formaron en el cristal por implantación de protones.

Tabla 5.1: Dimensiones obtenidas con las microfotografías y los valores esperados.

Grupo de Guías	Ancho (µm)		Grosor (µm)	
	Medido	Esperado	Medido	Esperado
20 µm	20.3	20	4.78	4.80
15 µm	16.7	15	4.57	4.80
10 µm	10.74	10	4.35	4.80

Se realizó una simulación utilizando el programa SRIM para obtener una estimación inicial del alcance proyectado por los iones, es decir el grosor aproximado de las guías de onda. Éste es el valor esperado que se muestra en la tabla 5.1. Los parámetros utilizados en esta simulación se pueden observar en la tabla 5.2 así como el valor del alcance proyectado que obtuvimos.

Tabla 5.2: Parámetros de implantación utilizados para obtener el alcance proyectado promedio esperado (Rp).

Cristal	Ion	Masa atómica (uma)	Energía (MeV)	Ángulo (°)	Número de Iones	Densidad del Cristal (gr/cm^3)	R_p (µm)
Nd:YAG (1% at.)	Protones (H^+)	1.008	1	61	3000	4.56	4.80

5.2 Modos transversales de las guías de onda

Los modos transversales que se obtuvieron con la cámara CCD muestran que las guías de onda de 20 µm llegan a tener hasta modos TEM_{30}, lo que no ocurre en las de 10 µm o 15 µm. Para las guías de 10 µm se observa sólo el modo TEM_{00} y para las de 15 µm se observan los modos TEM_{00} y TEM_{10} (figura 5.2). Todas las guías son monomodales en la dirección vertical y multimodales en la dirección horizontal. Cabe señalar que es útil conocer si las guías son multimodales o monomodales, ya que se relaciona con la eficiencia de acoplamiento, esto es, al ser compatibles la fibra óptica y la guía de onda logramos un mejor acoplamiento y por lo tanto menos pérdidas de acoplamiento.

Dadas las características de las guías el haz se supone simétrico en ambas direcciones (vertical y horizontal). La tabla 5.3 nos muestra los valores del tamaño del haz que se propagó en cada conjunto de guías. Todas las mediciones de haz que se realizaron fueron a partir de la imagen del modo fundamental de cada guía.

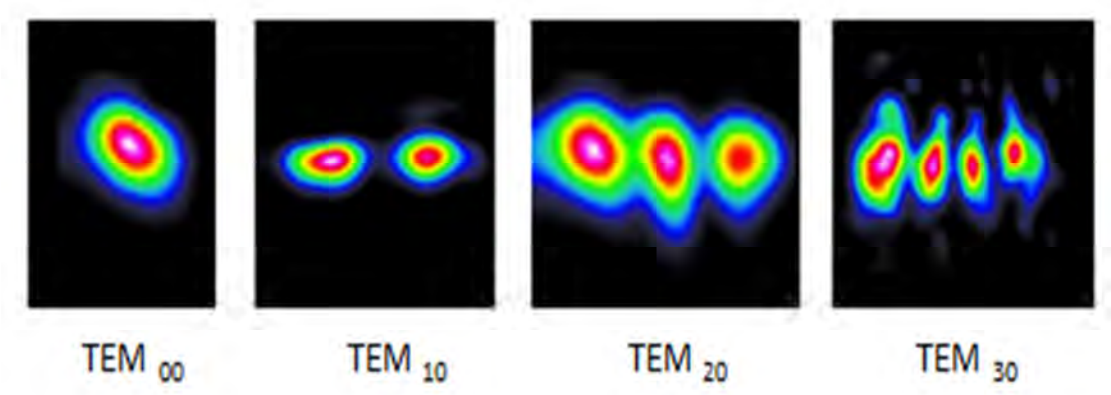


Figura 5.2: Modos transversales típicos de las guías de canal en Nd: YAG.

Tabla 5.3: Tamaño de la distribución transversal de luz a la salida de las guías.

Conjunto de guías	Tamaño del haz (µm)	
	$2\omega_1$	$2\omega_2$
20 µm	3.25	19.35
15 µm	2.91	14.90
10 µm	3.23	11.94

Realizando una comparación entre los valores obtenidos con las microfotografías (tabla 5.1) y los valores obtenidos con las imágenes de los modos transversales (tabla 5.3), podemos observar que las variaciones entre ellos son mínimas; por lo tanto podemos aceptar estos resultados como válidos para el cálculo de pérdidas por propagación que se presenta en la siguiente sección.

5.3 Pérdidas por propagación

Las pérdidas por propagación α_p se calcularon con la ecuación 4.2 y los valores obtenidos utilizando un láser de He-Ne que opera a 633 nm y un diodo láser que opera a 806 nm se muestran en la tabla 5.4, cabe señalar que los resultados mostrados en esta tabla son sólo de una de las fibras, la cual se eligió al considerar que con ella obteníamos un mejor coeficiente de acoplamiento, recordemos que a la fibra aquí mencionada se le fabricó una microlente en uno de sus extremos, sus características se muestran en la sección 5.8.

Tabla 5.4: Valores de las pérdidas por propagación a 633 nm y 806 nm en las guías de onda de canal.

Lambda (nm)	Guías (μm)	α_p (dB/cm)
633	20	16.18
	15	18.98
	10	20.26
806	20	25.12
	15	27.29
	10	29.77

Como se puede observar en la tabla 5.4, las guías que mostraron menores pérdidas son las de 20 μm en las dos longitudes de onda con que se realizaron las pruebas, se observa también que si comparamos entre conjuntos de ancho de guías, existe un incremento de aproximadamente más de una unidad entre los valores de pérdidas registrados, lo cual ocurre en ambas longitudes de onda con las que se trabajó. Si comparamos el valor de las pérdidas obtenidas en las dos longitudes de onda en las que se realizaron las pruebas, podemos observar que a una longitud de onda de 633 nm las guías de los tres conjuntos muestran menores pérdidas que cuando se trabajó a 806 nm, ya que existe una mayor absorción generada porque el Nd posee un coeficiente de absorción intrínseco significativo a esta longitud de onda como se observa en la figura 5.3.

Debido a la implantación iónica se generan centros de color, los cuales consisten en un electrón atrapado en una vacancia aniónica que puede ser generada por un exceso de iones metálicos en la estructura cristalina. El electrón atrapado tendrá un espectro de niveles de energía que producirá una serie de líneas ópticas de absorción, para eliminar los centros de color se realizan tratamientos térmicos, uno de ellos es el proceso de recocido que consiste en calentar el cristal hasta eliminar estos centros de color; este proceso se ha realizado en trabajos anteriores [3, 20, 21, 22] y observamos que las guías de onda desaparecieron después del proceso de recocido, por lo tanto no es un método viable para la reducción de pérdidas en este tipo de guías.

Si comparamos las pérdidas obtenidas en trabajos previos [3], podemos observar que a menores dosis tenemos menores pérdidas, por lo tanto una opción para reducir pérdidas por propagación en la guías de onda es modificando la dosis de implantación de protones en el cristal.

5.4 Espectros de absorción

En la figura 5.3 podemos observar los picos característicos de absorción para el Nd^{3+} en YAG, los cuales fueron obtenidos mediante el espectrofotómetro Perkin Elmer; los espectros de absorción nos sirven para conocer las longitudes de onda de bombeo con la cual se pueden excitar los átomos del material.

Como podemos observar en la figura 5.3 el espectro nos muestra que existe una región prominente de absorción entre 720 y 840 nm, generada por la transición $^4I_{9/2} \rightarrow {}^4F_{3/2}$, por lo tanto se eligió una fuente de bombeo que emitiera a ~ 808 nm para poder excitar los iones de neodimio para las mediciones de luminiscencia y emisión láser, ya que a esta longitud de onda el cristal presenta la máxima absorción.

El espectro de absorción del Nd: YAG es originado por transiciones radiativas que llevan a los átomos de los niveles del estado base ($^4I_{9/2}$) a los niveles de los estados excitados ($^4F_{3/2}$, $^4F_{5/2}$, $^4H_{9/2}$, $^4F_{7/2}$, $^4S_{3/2}$, y superiores).

Para el YAG dopado con neodimio al 1% at., el coeficiente de absorción a la longitud de onda de bombeo (λ = 808 nm) es de ~ 6 cm^{-1}; esto significa que, a potencias bajas, un cristal de 1.0 cm de longitud absorberá aproximadamente el 99.75% de la potencia acoplada a la guía de onda [3].

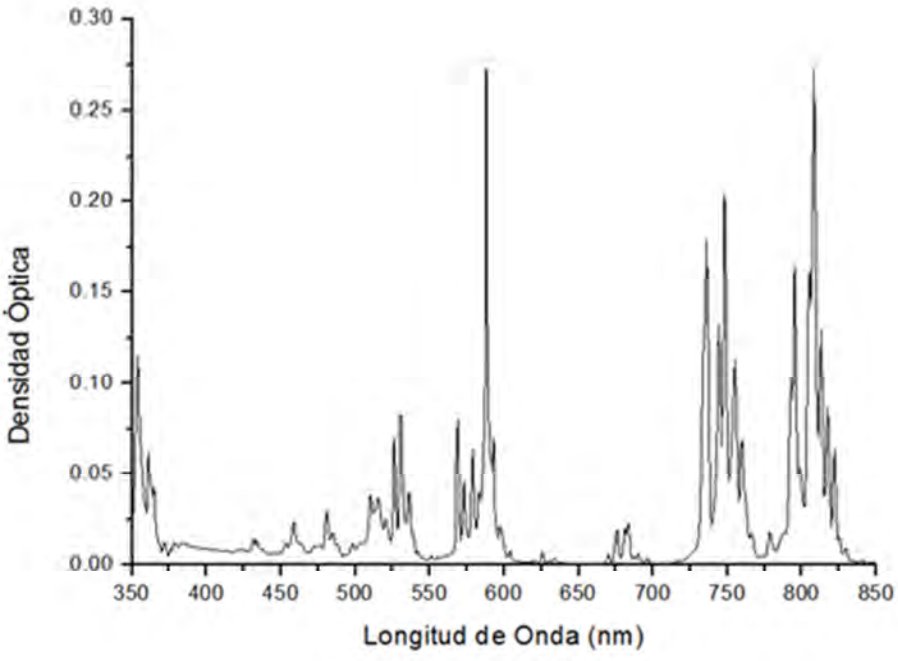


Figura 5.3: Espectro de absorción del Nd^{3+} en YAG.

5.5 Espectros de luminiscencia

El espectro de luminiscencia a temperatura ambiente presenta tres regiones dominantes y una muy débil originadas por el decaimiento radiativo del estado $^4F_{3/2}$ a los estados $^4I_{9/2}$, $^4I_{11/2}$, $^4I_{13/2}$ y $^4I_{15/2}$, respectivamente. Como se puede observar en las figuras 5.4, 5.5 y 5.6, los picos característicos son exactamente iguales tanto para los espectros de la guía después de la implantación de iones así como para los espectros del cristal en volumen, el único cambio que se observa es en el valor de la intensidad pero es relativamente pequeño. Este cambio de intensidad en los espectros de luminiscencia se debe a que la implantación de iones modifica la red del cristal, generando esfuerzos, vacancias, intersticiales o amorfización, todas estas modificaciones afectan las propiedades activas del cristal [1]. Ahora bien, como podemos observar en las figuras 5.4, 5.5 y 5.6, las posiciones de los picos y los anchos de banda de las guías de onda con respecto al volumen se mantienen en todos los casos, lo cual es importante en aplicaciones de emisión láser.

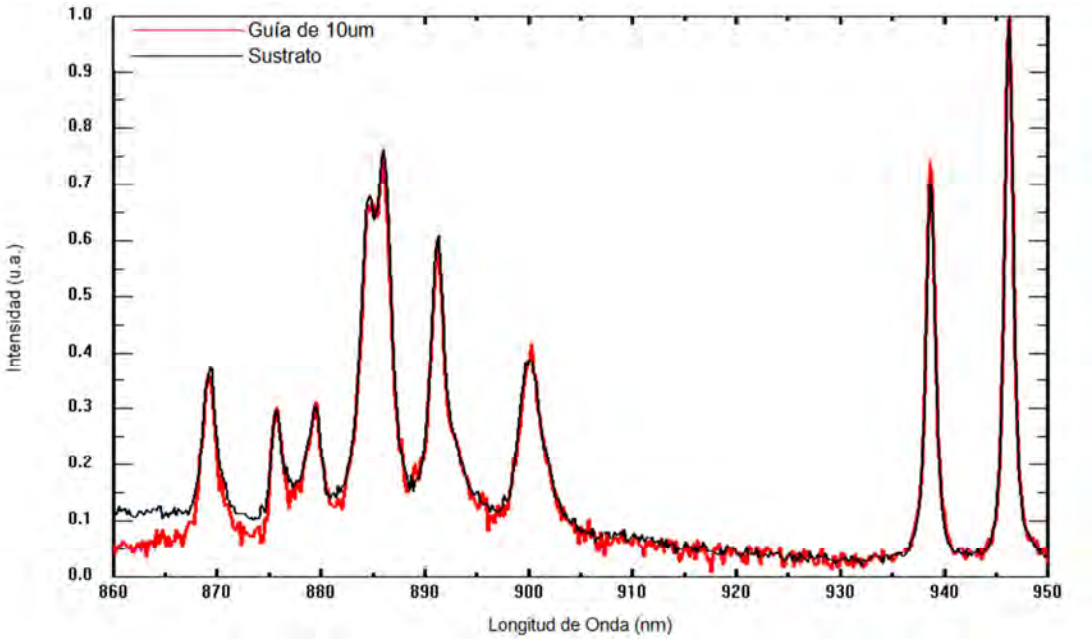


Figura 5.4: Espectro de luminiscencia típico del Nd^{3+} en YAG en el rango de 860 a 950 nm generado por la transición $^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$. El espectro del cristal en volumen es comparado con el espectro de luminiscencia de las guías de 10 µm.

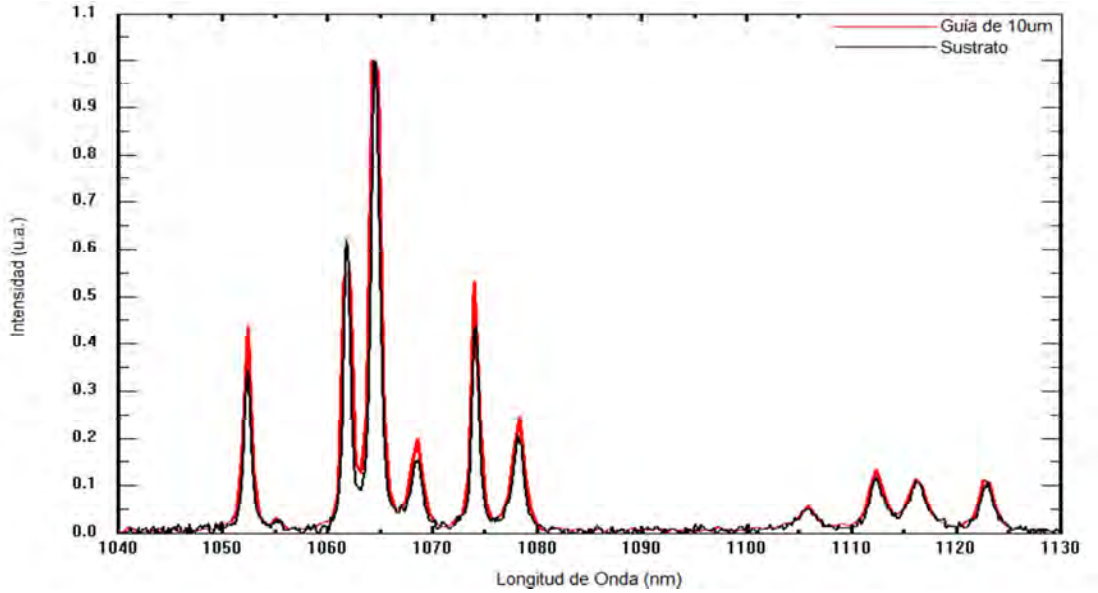


Figura 5.5: Espectro de luminiscencia típico del Nd^{3+} en YAG en el rango de 1040 a 1130 nm generado por la transición ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$. El espectro del cristal en volumen es comparado con el espectro de luminiscencia de las guías de 10 µm.

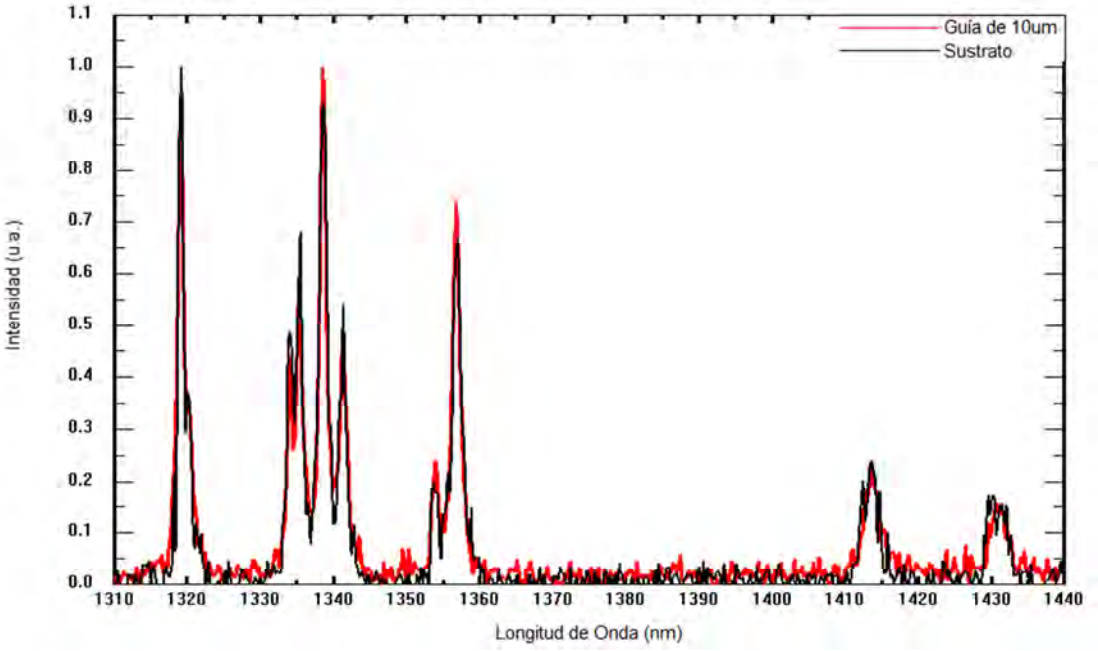


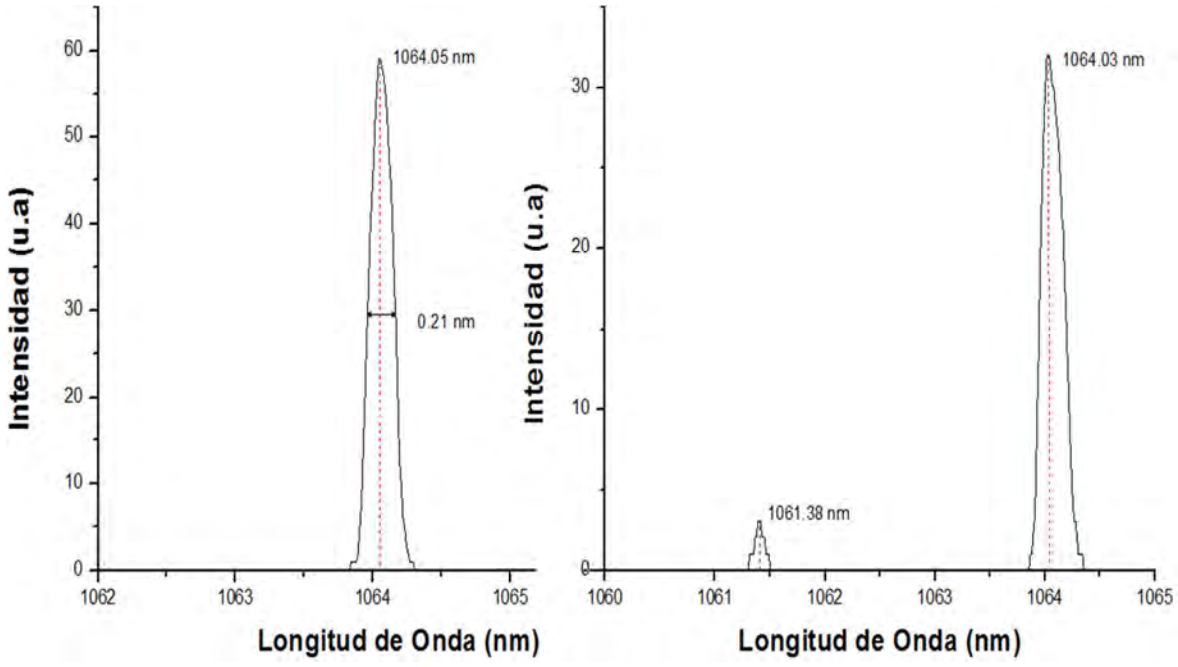
Figura 5.6: Espectro de luminiscencia típico del Nd^{3+} en YAG en el rango de 1310 a 1440 nm generado por la transición ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$. El espectro del cristal en volumen es comparado con el espectro de luminiscencia de las guías de 10 µm.

5.6 Emisión láser

La emisión estimulada es la base de la generación de la radiación láser que se produce cuando un átomo en estado excitado recibe un estímulo externo, el cual hace que emita fotones y lo lleve a un estado menos excitado, los fotones así emitidos por el átomo estimulado poseen fase, energía y dirección similares a las del fotón externo que les dio origen [15].

5.6.1 Espectro de emisión láser

El espectro típico de emisión láser de las guías de canal en Nd:YAG se muestra en la figura 5.7a. La longitud de onda de emisión más predominante se obtuvo alrededor de 1064 nm que es característica del láser de Nd:YAG, aunque como podemos observar obtuvimos también una longitud de onda de emisión con menos intensidad alrededor de 1061.4 nm (figura 5.7b), cabe señalar que varias guías de los conjuntos de 15 µm y 20 µm nos mostraron este comportamiento, para las guías de 10 µm sólo se obtuvo el pico principal como se observa en la figura. Ambas líneas de emisión corresponden a las bandas de mayor ganancia en el espectro de luminiscencia, lo cual puede conducir a que las ganancias de ambas bandas excedan las pérdidas de la cavidad y que puedan oscilar simultáneamente [3].



a) b)

Figura 5.7: a) Espectro de emisión láser típico en las guías de Nd:YAG. b) Espectro de emisión láser donde se muestra un pico con menor intensidad.

5.6.2 Eficiencia láser

Para el cálculo de la eficiencia láser y las curvas de eficiencia de emisión láser se debe calcular la potencia absorbida, la cual es igual al producto de la potencia incidente por dos factores de transmisión y un factor de acoplamiento como se puede observar en la ecuación 5.2:

$$P_a = P_i * 0.71 * 0.75 * Fac \tag{5.2}$$

Donde P_i es la potencia incidente, 0.71 es la transmisión del objetivo de microscopio a 809nm, 0.75 es la transmisión del espejo de entrada que se utilizó a 809 nm y finalmente Fac es un factor de acoplamiento que depende del ancho de la guía, por lo tanto para las guías de 10 µm se utilizó un valor de ~0.67, para las guías de 15 µm se utilizó ~ 0.55 y para las guías de 20 µm un valor de ~ 0.50.

Finalmente, como podemos observar en las figuras 5.8, 5.9 y 5.10, se grafica la potencia absorbida contra la potencia de salida (ie. la curva de eficiencia láser) para obtener la pendiente de la recta que es la eficiencia láser para cada grupo de guías de acuerdo al ancho.

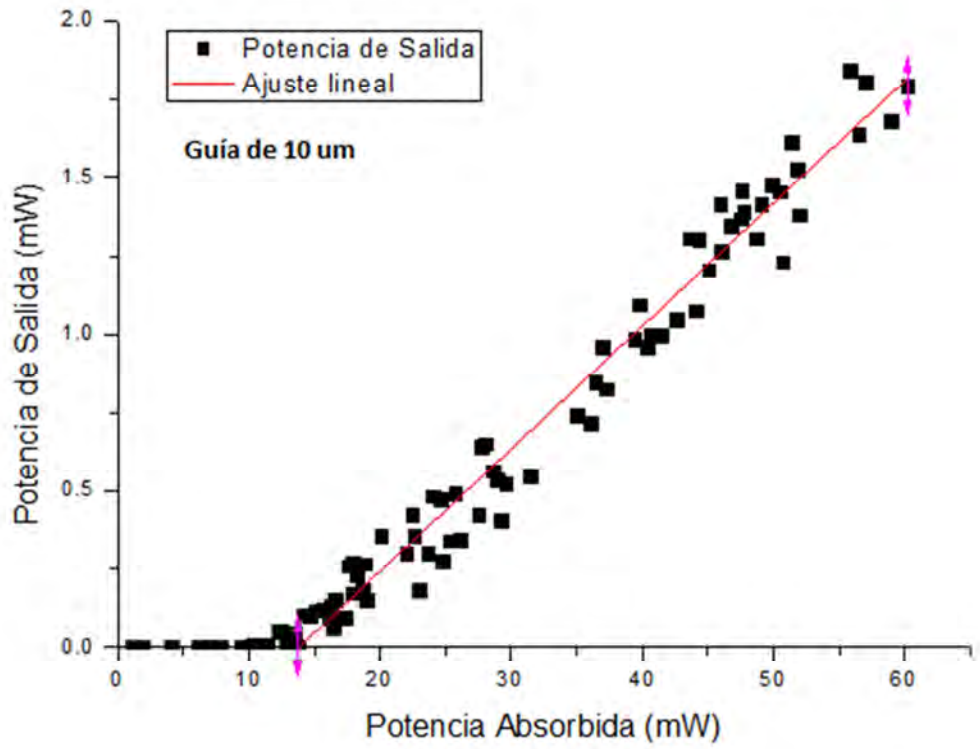


Figura 5.8: Curva de eficiencia típica para la emisión láser de las guías de canal de 10 µm en Nd:YAG.

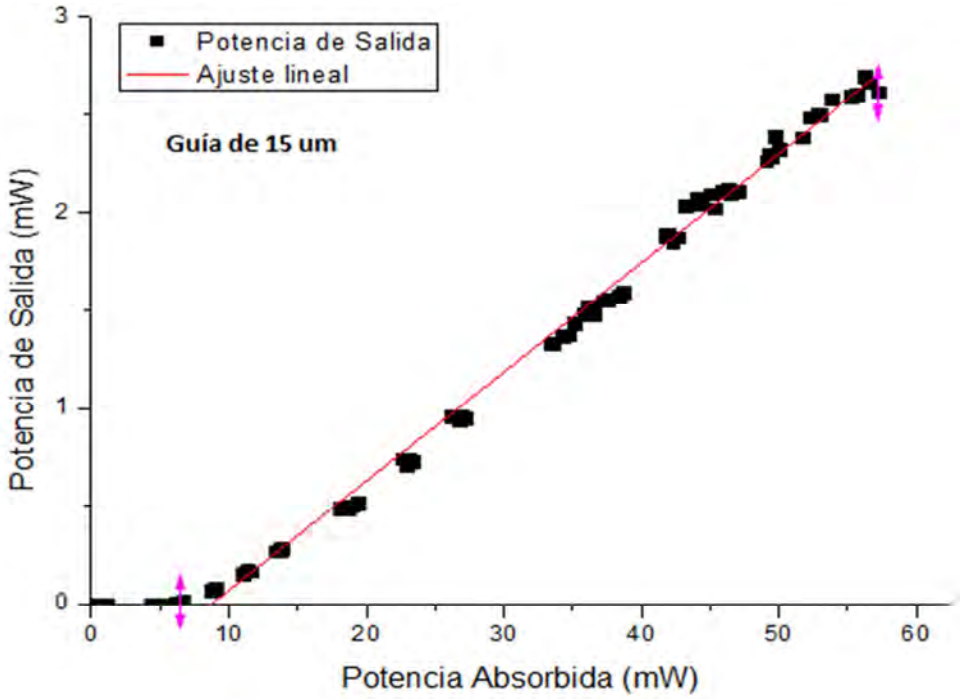


Figura 5.9: Curva de eficiencia típica para la emisión láser de las guías de canal de 15 µm en Nd:YAG.

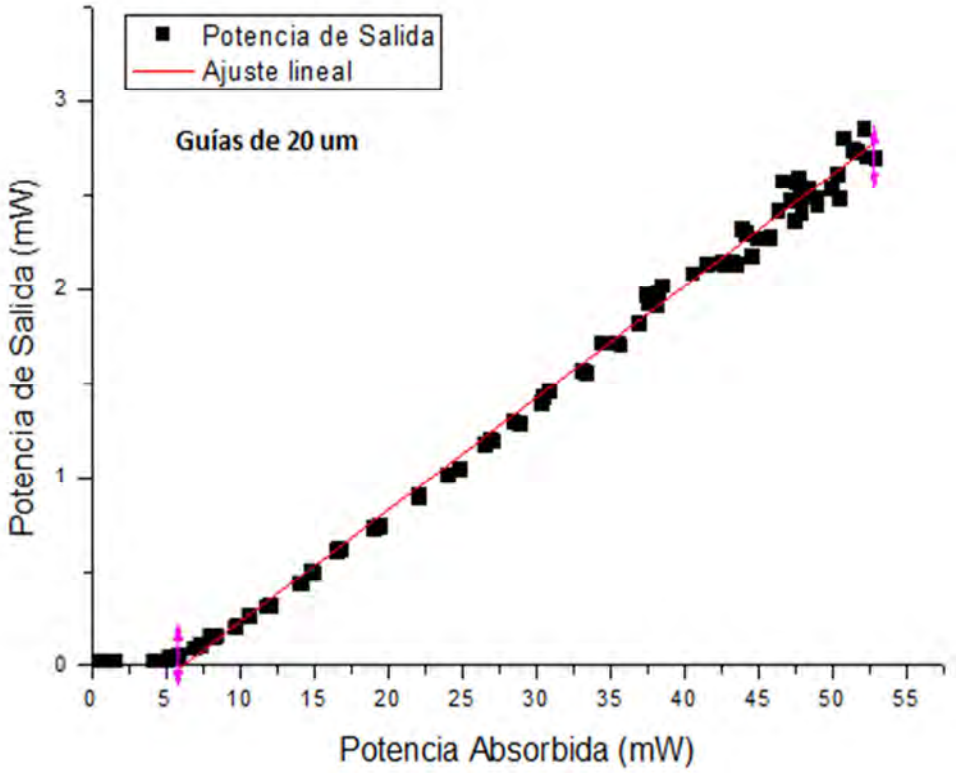


Figura 5.10: Curva de eficiencia típica para la emisión láser de las guías de canal de 20 µm en Nd:YAG.

Tabla 5.5: Resultados de eficiencia láser y potencia umbral obtenidos de las curvas de eficiencia láser.

Conjunto de guías (µm)	Eficiencia láser (%)	Potencia umbral (mW)
20	6	9.22
15	5	12.77
10	4	13.8

5.6.3 Potencia umbral

La potencia umbral se obtuvo de la curva de eficiencia láser, ésta se calculó con la ecuación 5.3, en donde *intercep* es la intersección que se originó al hacer el ajuste lineal en la curva de eficiencia láser, los valores obtenidos se muestran en la tabla 5.5 y como podemos observar, las guías de 10 µm mostraron tener una menor eficiencia láser con una potencia umbral mayor y concluimos que las guías de 20 µm son las más eficientes ya que tienen una mayor eficiencia láser y menor potencia umbral en comparación con las guías de 10 y 15 µm.

$$Potencia\ Umbral = intercep\ /pendiente\ de\ la\ recta \tag{5.3}$$

5.7 Fibra óptica con terminación en forma de lente

Se fabricaron microlentes en uno de los extremos de 12 fibras con diferentes radios de curvatura, los cuales fueron producidos por la potencia y el tiempo de duración del arco eléctrico como se mencionó en la sección 4.2.2. Cabe señalar que no se logra fabricar el mismo radio de curvatura aunque se utilicen los mismos parámetros ya que no podemos controlar el proceso de fundición del sílice.

Una vez fabricadas las lentes, se utilizó un microscopio que tiene un software que nos permitió tomar las dimensiones de las fibras para poder determinar el radio de curvatura de las lentes. En las figuras 5.11, 5.13 y 5.15 se muestran las características de 3 de las fibras modificadas con las cuales obtuvimos la mejor eficiencia de acoplamiento.

LENTE 1: Esta lente se fabricó con una potencia de 15 mW y una duración de arco eléctrico de 750 ms.

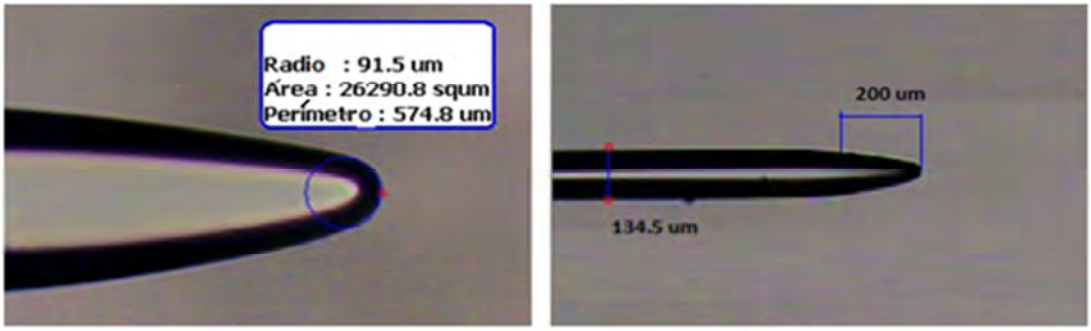


Figura 5.11: Dimensiones de la lente 1.

La figura 5.12 muestra una imagen de la distribución de intensidad a la salida de la fibra, la cintura del haz medido fue de ~1.46 µm.

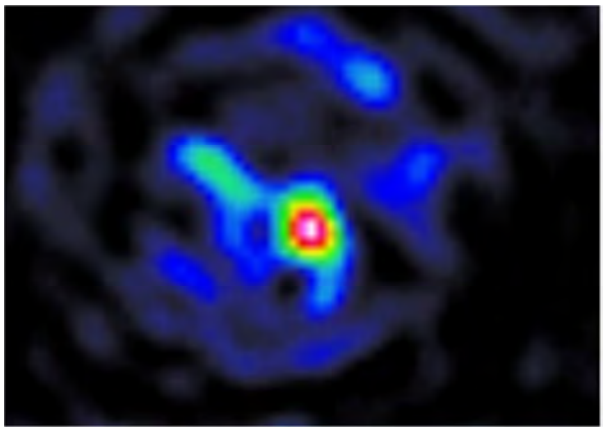


Figura 5.12: Distribución de intensidad a la salida de la fibra.

Lente 2: Esta lente se fabricó con una potencia de 10 mW y una duración de arco eléctrico de 800 ms.

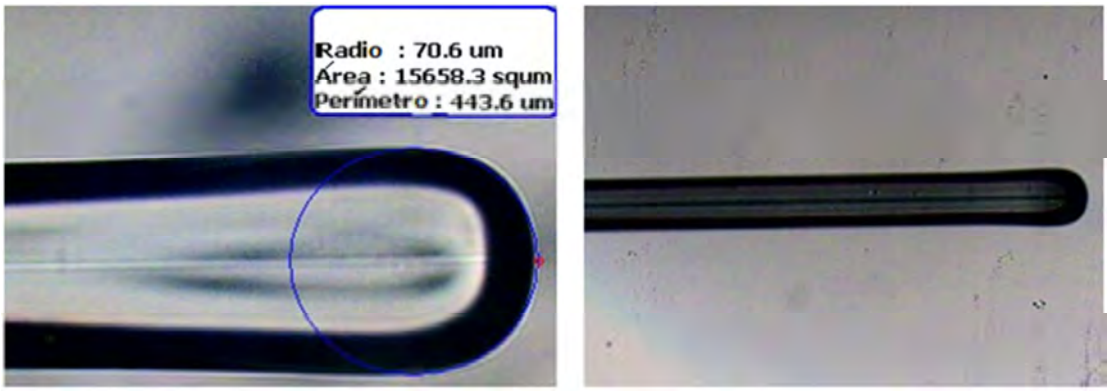


Figura 5.13: Dimensiones de la lente 2.

La figura 5.14 nos muestra la distribución de intensidad a la salida de la fibra 2 y con esto obtuvimos un valor de cintura de haz de ~ 2.58 µm.

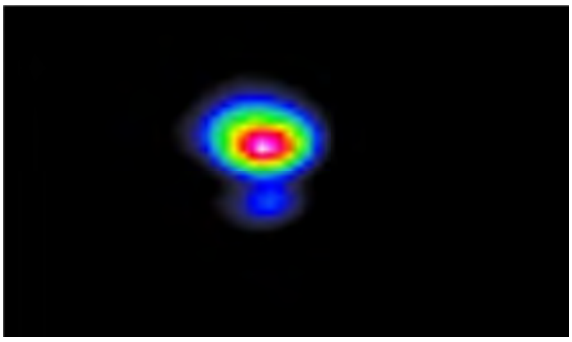


Figura 5.14: Distribución de intensidad de la salida de la fibra 2.

LENTE 3: Para la fabricación de esta lente se realizó inicialmente un adelgazamiento de la fibra hasta llegar a 91.1 µm con la ayuda de una procesadora de vidrio llamada VYTRAN, una vez adelgazada se realizó el mismo proceso que con las demás fibras, en este caso utilizando una potencia de 15 mW y 750 ms el tiempo de duración del arco eléctrico. En la figura 5.15 se muestran las dimensiones de la fibra adelgazada y del radio de curvatura que se obtuvo.

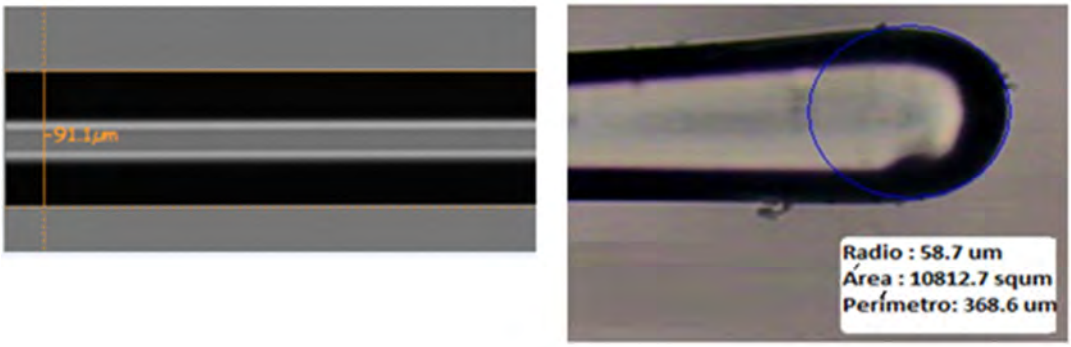


Figura 5.15: Dimensiones de la lente 3.

Como en los casos anteriores, la figura 5.16 muestra la distribución de intensidad a la salida de la fibra mediante una cámara CCD. El valor de la cintura del haz medido fue de 2.26 µm.

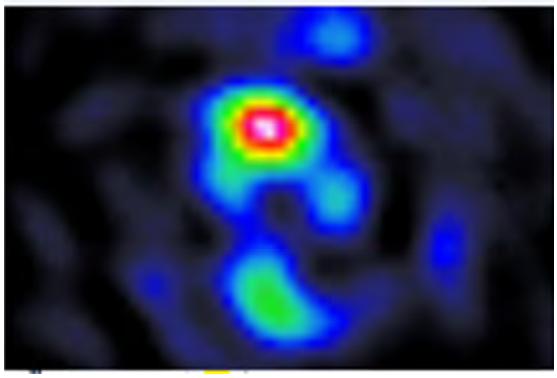


Figura 5.16: Distribución de la intensidad a la salida de la fibra 3.

Una vez fabricadas las fibras con terminación en lente, se realizaron pruebas de acoplamiento para poder obtener la mayor intensidad a la salida de la fibra y elegir la que tenga menores pérdidas, otro parámetro que se toma en cuenta al elegir la fibra es que la eficiencia de traslape de modos transversales entre la fibra y la guía y la eficiencia de acoplamiento sea lo más cercano a 1, ya que esto demostraría que una buena cantidad de luz está siendo acoplada a la guía de onda.

Para el cálculo de la eficiencia de acoplamiento se utilizaron los siguientes parámetros y consideraciones: la longitud del cristal utilizado fue de 1.0 cm; los valores de la transmisión de Fresnel ($\eta_{fresnel}$) se calcularon de la ecuación (2. 15 y 2.16). La eficiencia por desalineación (η_{des})se tomó del 100% porque el acoplamiento fibra – guía se realizó con la ayuda de microposicionadores con los cuales se maximizó la potencia de entrada a la guía de onda, se consideró que no hubo una desalineación por lo tanto ésta no contribuyó a las pérdidas. Para el cálculo de la eficiencia de

traslape de modos (η_{modos}) se utilizó la ecuación 2.17. La eficiencia de acoplamiento η_{ac} se calculó con la ecuación (2.13), la cual fue utilizada para el cálculo de pérdidas por propagación que se muestra en la sección 5.3; las eficiencias para cada conjunto de guías se presentan en la tabla 5.6 utilizando el láser que opera a 806 nm.

Tabla 5.6: Eficiencias de acoplamiento fibra – guía a 806 nm.

Fibra con microlente	Conjunto de guías	Eficiencias				
		η_{des}	$\eta_{fresnel}$	η_{modos}	η_{ac}	η_{ac} (%)
1	20 µm	1.0	0.9298	0.2933	0.2718	27
	15 µm	1.0	0.9298	0.3763	0.3498	35
	10 µm	1.0	0.9298	0.4576	0.4255	43
2	20 µm	1.0	0.9624	0.4490	0.4322	43
	15 µm	1.0	0.9624	0.5292	0.5094	51
	10 µm	1.0	0.9624	0.6550	0.6305	63
3	20 µm	1.0	0.9847	0.4199	0.4135	41
	15 µm	1.0	0.9847	0.5057	0.4980	50
	10 µm	1.0	0.9847	0.6265	0.6169	62

Después de realizar las pruebas y los cálculos para las fibras a las cuales se les fabricó la microlente, se prosiguió a comparar cada uno de los resultados obtenidos y con base en esto se eligió la fibra con microlente 2, ya que como podemos observar en la tabla 5.6, mostró las mejores eficiencias para los tres conjuntos de guías.

Un factor importante a considerar en el acoplamiento fibra – guía es la apertura numérica (NA) de ambas partes, ya que para que pase la mayor cantidad de luz de la fibra a la guía es necesario que la fibra tenga una NA menor que la NA de la guía para poder asegurarnos que la luz que sale de la fibra se acople eficientemente a la guía de onda; no debemos olvidar también la desalineación, el traslape de modos transversales y las reflexiones de Fresnel, factores que influyen también en las pérdidas de acoplamiento.

5.8 Diseño del láser de guía

Un láser es un dispositivo que utiliza la emisión estimulada de radiación en un medio apropiado, para generar un haz de luz cuyas características especiales de monocromaticidad, coherencia y direccionalidad se encuentran perfectamente controladas. A continuación se muestran los elementos propuestos para la formación de nuestro láser de guía de onda.

Medio activo. En nuestro caso el medio activo es el cristal de Nd:YAG implantado con protones, el cual cuenta con 3 conjuntos de guías de diferentes anchos como se mencionó en la sección 4.1, este cristal se caracterizó y obtuvimos que las guías de 20 µm tienen mayor eficiencia láser por lo tanto se elegirían para la fabricación del láser de guía como trabajo futuro. Dentro de las 10 guías que se fabricaron del tamaño de 20 µm podemos optar por seleccionar la que tuvo una mayor eficiencia láser o bien colocar un dispositivo de posicionamiento para que se mueva en dirección horizontal y poder elegir una guía en particular.

Bombeo. Con el espectro de absorción mostrado en la sección 5.4 nos dimos cuenta que la mayor banda de absorción del cristal se encuentra entre los 720 – 840 nm, por lo tanto elegimos una fuente de bombeo a 808 nm que es comercial, cabe señalar que existen diodos láser de fibra los cuales tienen acoplada a la salida una fibra óptica y al utilizarlo evitaríamos las pérdidas por acoplamiento láser – fibra que se mencionó en la sección 4.2.1, el inconveniente es que la fibra óptica que viene con el diodo láser no contaría con la microlente que nosotros fabricamos a las fibras que utilizamos, por lo tanto se le tendría que fabricar la microlente a esta fibra. Se investigó en algunas empresas dedicadas a la fabricación de diodos láser y elegimos como mejor opción un diodo láser que opera a 808 nm, el cual trae acoplada una fibra óptica multimodal con una apertura numérica de 0.22. Este láser tiene una potencia de 4.5 W y es ideal como fuente de bombeo para materiales de estado sólido como el Nd:YAG. Su hoja de especificaciones se muestra en el apéndice B.

Cavidad. En este trabajo, la cavidad se formó utilizando dos espejos que se pegaron al cristal con una gota de aceite de inmersión, uno de total reflectividad y otro de 90% de reflectividad como se puede observar en la figura 4.4. Como el objetivo principal de este trabajo es el prototipo de un láser de guía compacto, podemos considerar la opción de depositar películas delgadas con las mismas reflectividades de los espejos utilizados en los cantos del cristal, ya que así tendremos menos elementos y por lo tanto un dispositivo más compacto.

La figura 5.17 muestra el prototipo del diseño de láser de guía de onda compacto propuesto. Cabe señalar que las dimensiones del tamaño del láser dependen de la fuente de bombeo que se utilice y si se optimizaran las guías de onda tomando en cuenta la dosis de implantación y las características de las guías, se obtendría una mejor eficiencia láser.

Ahora bien, como nuestra fuente de bombeo está en el orden de los watts nosotros esperaríamos que la potencia que obtendríamos a la salida de nuestro láser fuera del orden de los miliwatts de acuerdo con los resultados obtenidos en las pruebas realizadas anteriormente. Sin embargo, como ya se mencionó, es posible mejorar la eficiencia láser optimizando las características de las guías.

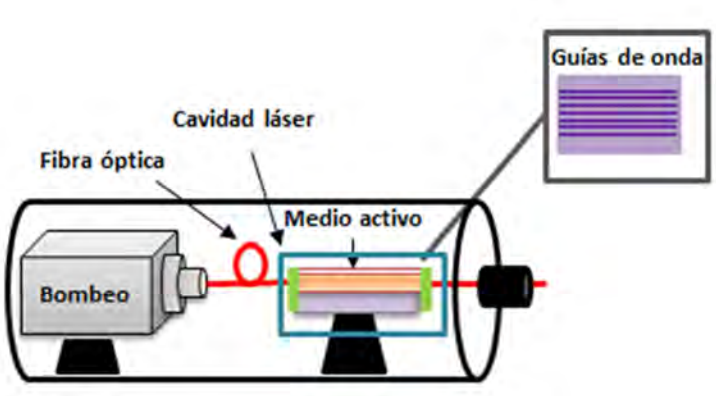


Figura 5.17: Diagrama del prototipo del láser de guía de onda propuesto.

CONCLUSIONES

Se fabricaron guías de onda de canal mediante la implantación de protones en un cristal de Nd: YAG, dicha implantación genera una disminución en la densidad física del cristal, lo cual provoca que exista una disminución del índice de refracción del sustrato apareciendo con ello una barrera óptica y formando la guía de onda que es una región de índice mayor rodeada por regiones de menor índice. Por otra parte, la caracterización óptica confirmó que las guías de onda tienen un buen confinamiento de la luz y potencia umbral baja para la oscilación láser.

Se determinaron las dimensiones de las guías de onda de canal en las que se comprobó que los valores estimados están de acuerdo con las dimensiones teóricas, lo cual permite confirmar la buena reproducibilidad del método de implantación iónica. Cabe señalar que se realizó una simulación con el programa SRIM con el cual corroboramos la profundidad de las guías de onda.

Mediante la obtención de los modos transversales observamos que las guías muestran un confinamiento bidimensional de la luz, ya que todas fueron monomodales en la dirección vertical y multimodales en la dirección horizontal, excepto por las guías de onda de 10 μm que fueron monomodales en ambas direcciones (vertical y horizontal). Los modos van desde TEM_{00} encontrados en las guías de 10 μm, hasta TEM_{30} que aparecieron en las guías de 20 μm.

Para obtener el valor de pérdidas por propagación se realizaron pruebas de transmitancia y se utilizó una fibra óptica con terminación en lente para el acoplamiento de luz a la guía de onda. Se realizó el cálculo de pérdidas en donde el valor mayor se observó en las guías de onda de 10μm de ancho, la cual fue producida por una deficiencia en el confinamiento de la luz, mientras que la menor pérdida se encontró en las guías de onda de 20μm de ancho. Comparando los resultados con los obtenidos en trabajos anteriores en donde se caracterizaron guías de onda fabricadas con una menor dosis de implantación, para este trabajo las pérdidas por propagación se encuentran entre 16.18 y 20.26 dB/cm mientras que en trabajos anteriores se registraron pérdidas entre 8.63 y 10.59 dB/cm utilizando una fuente de bombeo a 633 nm. Aunado a esto, al realizar la comparación de los resultados de emisión láser, nuestras guías mostraron menores eficiencias y mayor potencia umbral; los resultados obtenidos para guías de 20, 15 y 10 μm fueron los siguientes: las guías fabricadas con una dosis de 4×10^{16} protones/ cm^2 presentaron una eficiencia láser promedio de 6, 5 y 4 %, con una potencia umbral promedio de 9.22, 12.77 y 13.8 mW respectivamente, mientras que las guías de onda fabricadas con una dosis de 2×10^{16} protones/ cm^2 registraron una eficiencia láser de 9.2, 10.4 y 6.2 %, con una potencia umbral de 5.1,3.1 y 13.5mW respectivamente, por lo tanto podemos concluir que se obtienen guías de onda más eficientes si se utiliza una dosis de implantación menor porque de esta manera se produce menor daño en el cristal y obtenemos menores pérdidas en las guías, mayores eficiencias y menor potencia umbral.

Como ya mencionamos, se utilizó una fibra a la cual se le realizó una microlente en uno de sus extremos, cabe señalar que se realizaron varias fibras con las cuales se realizaron las mismas pruebas de acoplamiento y una vez realizados los cálculos se eligieron las que mostraron una mejor eficiencia de acoplamiento, la cual está entre 27 y 63%.Se tuvieron algunos inconvenientes debido a que el método de fusión y estiramiento no nos proporciona buena reproducibilidad, esto es porque aun si se utilizaran los mismos parámetros para una fibra u otra, la microlente no

tendría el mismo radio de curvatura ya que esta se somete a un calentamiento durante el proceso de fabricación que no puede ser controlado.

En los espectros de luminiscencia, los picos característicos y los anchos de banda tanto de las guías de onda después de la implantación de iones como del cristal en volumen se mantuvieron iguales en todos los casos, lo cual es importante en aplicaciones de emisión láser, el único cambio que se observa es el valor de la intensidad pero es relativamente pequeño. Con esto se demuestra que la implantación iónica es una técnica excelente para la fabricación de conjuntos de guías de onda en un solo paso y nos asegura que para fines prácticos aunque exista una implantación de protones, no habrá cambio en los picos característicos del espectro de luminiscencia.

TRABAJO A FUTURO

- Como trabajo a futuro se pretende fabricar un láser de guía compacto utilizando las especificaciones de diseño que se sugirieron en el capítulo 5.

- Se puede mejorar la eficiencia de acoplamiento fibra – guía utilizando un método de fabricación de microlentes en el que se pueda controlar las condiciones de fabricación así como los parámetros del mismo para que puedan ser reproducibles.

- Analizar los parámetros de implantación iónica para la fabricación de guías de onda ya que como vimos en este trabajo, se obtienen guías de onda más eficientes con la utilización de menor dosis de implantación; otro parámetro que se puede variar es el ángulo de implantación.

- Realizar la caracterización y las pruebas de emisión láser con el diodo láser que se sugirió en el capítulo 5 para poder comprobar que en realidad es una fuente de bombeo adecuada para la fabricación del láser de guía de onda compacto que se pretende fabricar.

REFERENCIAS

[1] Townsend, P.D., Chandler, P.J., y Zhang, L., "Optical Effects of Ion Implantation", Cambridge University Press, Cambridge 1994, 280 pp.

[2] Calvo, M.L. y Lakshminarayanan, V., "Optical Waveguides: From Theory to Applied technologies", CRC Press, Boca Raton 2007, 401 pp.

[3] Flores-Romero, E. 2008. "Estudio de guías de onda ópticas activas obtenidas por implantación de iones en cristales de YAG". Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada. México. Tesis de Doctorado. 135 pp.

[4] Rickards-Campbell, J., "La física de las radiaciones en materia", Universidad Nacional Autónoma de México, México, D.F 2001, p.p. 16.1-22.1.

[5] Ziegler, J.F., "The Stopping of energetic light ions in elemental matter". J. Appl. 1999, Phys 85: 1249-1272 p. Vea también http://www.srim.org/, consultado en abril de 2011.

[6] Sánchez-Morales, M.E. 2003. "Caracterización de guías de onda fabricadas mediante implantación iónica en cristales de Nd: YVO_4". Centro de investigaciones en óptica A.C. México. Tesis de Maestría. 87 pp.

[7] Kapany, N.S. y Burke, J.J., "Optical waveguides", Academic Press, Nueva York y Londres 1972, p.p. 7-88.

[8] Okamoto, K., "Fundamentals of optical waveguides", 2ª Ed, Academic Press, Estados Unidos 2006, p.p. 1-46.

[9] Millán, M.S., Escofet, J. y Pérez, E., "Óptica geométrica", 1ª Ed., Ariel Ciencia, España 2004, 312 pp.

[10] Rodríguez, J., Fernández, S. y Virgós, J.M., "Óptica integrada: Primeros pasos fundamentos teóricos y aplicaciones", Universidad Oviedo, 1993, p.p. 12-16.

[11] Sanchis, E. y Ejea, J.B., "Propagación de la luz en guías de onda", Universidad de valencia, España 2008, p.p. 3-18.

[12] Marcuse, D., "Quantum electronics principles and applications theory of dielectric optical waveguides", Academic Press, Nueva York y Londres 1974, p.p. 3-49.

[13] Vázquez, G.V., Márquez, H., Flores-Romero, E. y Sánchez-Morales, M.E., "Optical waveguides fabricated by ion implantation in laser crystals", Capítulo 4 del libro Recent Research in Photonics, Ed. Research Signpost, India 2009, 181 pp.

[14] Goure, J.P. y Verrier, I., "Optical fibre devices", Institute of Physics Publishing, Bristol y Filadelfia 2002, p.p. 31-63.

[15] Fernández, B.A., Borrego- Varillas, R., Hernández – García, C., Pérez-Hernández, J.A., y Romero- Vázquez, C., "El láser la luz de nuestro tiempo", Universidad de Salamanca, México 2010, p.p. 25-36 y 58-60.

[16] Díaz-Peña, M. y Roig – Muntaner, A., "Química física 1", Alhambra, 1ª Ed., España 1972, p.p. 99-102.

[17] García – Solé, J., Bausa, L.E. y Jaque, D., "An introduction to the optical spectroscopy of inorganic solids", Wiley, Inglaterra 2005, p.p. 2-6.

[18] Shimoda, K., "Introduction to laser physics", Springer – Veriag, 2ª Ed., Vol. 44, Alemania 1986, p.p. 93-109.

[19] Koechner, W., "Solid-State laser engineering", Springer, 5ª Ed., Vol. 1, Alemania 1999, p.p. 46-50.

[20] Salazar-Soto, A. 2009. "Estudio preliminar de optimización de guías de onda activas obtenidas por implantación de iones en cristales de Nd: YAG". Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada. México. Tesis de Maestría. 134 pp.

[21] Flores-Romero, E., Vázquez, G.V., Márquez, H., Rangel-Rojo, R., Rickards, J. y Trejo-Luna, R., "Laser emission in proton-implanted Nd:YAG channel waveguides", Opt. Express 15(26), 2007, 17874-17880 p.

[22] Flores-Romero, E., Vázquez, G.V., Márquez, H., Rangel-Rojo, R., Rickards, J. y Trejo- Luna, R., "Optical channel waveguides by proton and carbon implantation in Nd:YAG crystals", Opt. Express 15(14), 2007, 8513-8520 p.

[23] Flores–Romero, E., Vázquez, G. V., Márquez, H., Rangel-Rojo, R. y Trejo-Luna, R., "Planar waveguide lasers by proton implantation in Nd: YAG crystals", Optics Express. 12(10), 2004, 2264 – 2269 p.

APÉNDICE A

Especificaciones para la fibra Corning MMF 62.5 µm

Apertura numérica: 0.275 ± 0.015

Atenuación @ 850 nm: ≤ 2.9 dB/Km

Especificaciones dimensionales

Geometría del Vidrio

Diámetro del núcleo	62.5 ± 2.5 µm
Diámetro del revestimiento	125.0 ± 2.0 µm
Concentricidad (núcleo - revestimiento)	≤ 1.5 µm
No circularidad del revestimiento	≤ 1.0%
No circularidad del núcleo	≤ 5%

Referencia: http://pdf.directindustry.com/pdf/corning/infinicor-625-um-optical-fiber-product-information-sheet/12631-67063.html

APÉNDICE B

Hoja de especificaciones para el diodo láser con fibra acoplada

Marca JDSU (láseres comerciales)

Serie 2495 – L4

Características del láser a 808 nm

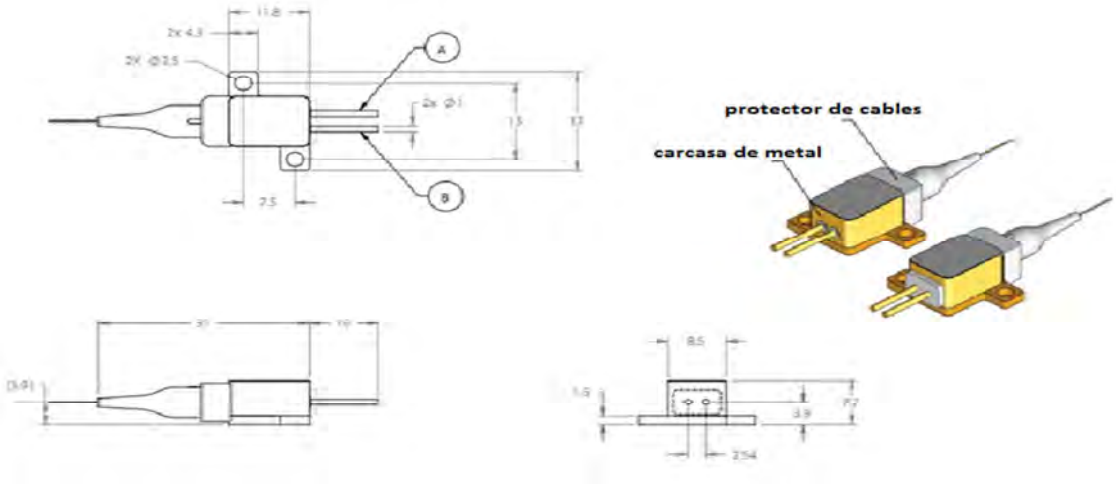
Parámetros	Mínimo	Típico	Máximo
CW potencia de salida (0.22 NA)	4.0 W		
Longitud de onda	805 nm	808 nm	811 nm
Ancho espectral (90% potencia integrada)		2 nm	5 nm
Pendiente de eficiencia		1.0 W/A	
Conversión de eficiencia		43%	
Corriente umbral		950 mA	1100 mA
Corriente de operación		4.8 A	5.7 A
Voltaje		2.0 V	2.1 V
Resistencia		0.07 □	
Temperatura recomendada	18 °C	25 °C	35 °C

Características de la fibra

Parámetros	Mínimo	Típico	Máximo
Diámetro del núcleo		105 □m	
Apertura numérica	0.2	0.22	0.24
Revestimiento		125 □m	
Longitud de la fibra	0.9 m	1 m	

Diagrama de dimensiones (especificaciones en mm)

A cátodo (-) **B** ánodo (+)



Referencia: http://www.jdsu.com/en-us/Lasers/Products/A-Z-Product-List/Pages/2495-l4.aspx

PLAN DE NEGOCIOS

“Mini Laser”

MARZO 2012

PLAN DE NEGOCIOS

Resumen Empresarial

Sección 1: Perfil Del Negocio

Descripción.

Una necesidad actual al hablar en términos de circuitos integrados, tales como circuitos electrónicos y óptica integrada es la miniaturización. El elemento fundamental en los dispositivos de óptica integrada son las guías de onda, las cuales tienen la ventaja de confinar en un pequeño volumen altas densidades de energía y por su tamaño pueden ser acopladas a láseres de fibra óptica y láseres semiconductores. Por lo tanto presentamos la propuesta del diseño de un laser de guía de onda en Nd:YAG enfocado a instituciones educativas para brindar apoyo en carreras como Ciencias Exactas e Ingenierías, dentro de las cuales se imparten materias relacionadas con las telecomunicaciones y la óptica integrada.

Una de las ventajas de utilizar nuestro mini Láser es que por ser compacto puede ayudar a la formación y entendimiento del funcionamiento de circuitos integrados que es un tema que se aprende en la materia de optoelectrónica, en telecomunicaciones es muy útil ya que el mini Láser cuenta con un medio activo formado por guías de onda las cuales nos ayudan a obtener una mayor eficiencia de acoplamiento al utilizar fibras ópticas y con esto se pueden fabricar moduladores y ayudar a entender al alumno como se comportan estas fibras al ser utilizadas en las comunicaciones.

Finalmente hablando en términos didácticos es un gran apoyo para la enseñanza de la óptica en temas como teoría de rayos, propagación de ondas, fuentes de luz, detectores, entre otros.

Servicios:

- Actividades Académicas.

ACADEMICAS

- Apoyo en instituciones educativas principalmente Universidades que ofrezcan carreras de Ingenierías y Ciencias Exactas en las cuales es necesario la utilización de la luz láser para obtener un aprendizaje global es decir teórico - practico ya que por ser compacto puede ser un apoyo en las prácticas de laboratorio.

- Utilización en el aprendizaje de materias como optoelectrónica, telecomunicaciones, óptica integrada, metrología óptica, taller de fallas, Física, entre otras impartidas en las carreras de Ingenierías y Ciencias Exactas.

Mercado y Clientes Meta.

Universidades:

- Ofrezcan carreras de Ingeniería o Ciencias Exactas.
- Carreras técnicas en las que necesiten la utilización de la luz laser.
- Instituciones en las que se dediquen a la investigación de la óptica integrada.

Personas o grupos de personas:

- Que necesiten aprender acerca de los circuitos integrados, metrología óptica, telecomunicaciones y óptica entre otras.
- Con ganas de aprender acerca de las aplicaciones de la luz laser y el funcionamiento de sistemas o dispositivos en miniatura en los que interviene la utilización de la misma.

Tendencias de Crecimiento del Negocio.

Se plantea que una vez iniciada la reproducción del prototipo inicial poder llevar este a promover a las Instituciones Educativas para tener clientes potenciales y fabricarlos para la satisfacción de los mismos.

Sección 2: La Visión y Las Personas

Misión:

Contribuir al aprendizaje de los futuros Ingenieros que se gradúen en nuestro país así como despertar en ellos el gusto por la investigación para que en un futuro sean Investigadores o Ingenieros con futuros prometedores.

Visión:

Lograr que el Laser de guía de onda compacto se encuentre en las principales Universidades públicas o privadas de nuestro país en los próximos 4 años.

Autor del Proyecto. Ing. Monserrat Alejandra López Urquieta.
Asesor. Dra. Gloria Verónica Vázquez García.

Sección 3: Organización

Mini Laser

Estructura Organizacional

DEPARTAMENTO DE DISEÑO

MISIÓN:

Ser un departamento que trabaje en el diseño y fabricación del Mini Laser a través de la realización de investigaciones buscando ser un medio para el desarrollo de nuevos productos.

VALORES:

- Responsabilidad
- Respeto
- Trabajo en equipo
- Originalidad
- Profesionalismo

DEPARTAMENTO ADMINISTRATIVO

MISIÓN:

Ser un departamento que trabaje en la administración de los recursos necesarios para la fabricación del Mini Laser a través del manejo adecuado de los mismos y la reinversión, buscando ser un medio para el desarrollo de nuestro personal, además de establecer estrategias de marketing, todo ello con el fin de colaborar en el logro de los objetivos generales del proyecto.

VALORES:

- Responsabilidad
- Honestidad
- Respeto
- Trabajo en equipo
- Búsqueda continua del bien común
- Profesionalismo
- Compromiso social

RECURSOS HUMANOS

Objetivos:

- Alinear políticas de trabajo para los colaboradores del Proyecto Mini Laser.
- Generar una adecuada cultura de trabajo.
- Llevar a cabo la comunicación organizacional.

ADMINISTRACIÓN Y FINANZAS

Objetivos:

- Administrar los recursos materiales y humanos con los que cuenta la institución.
- Administrar el presupuesto de ingresos y egresos.

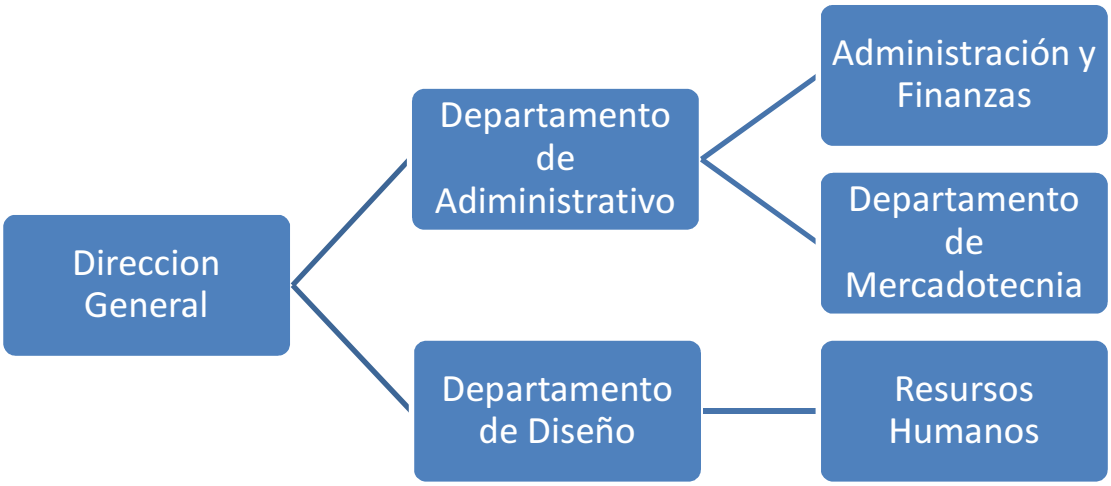
- Promover medidas de control y conservación de los recursos materiales.
- Llevar a cabo la contabilidad general del proyecto.
- Determinar políticas de reinversión del capital.

MERCADOTECNIA

Objetivos:

- Identificar oportunidades que den utilidad al proyecto.
- Colaborar en el crecimiento del desarrollo del prototipo del laser de guía de onda compacto.
- Lograr la satisfacción de nuestros clientes internos y externos.
- Emprender estrategias de servicio eficiente.

Organigrama



Sección 4: Razones que justifican a propuesta del Proyecto

Mini Laser es una innovación en el mercado ya que en México, pocos han sido los desarrollos científicos y tecnológicos que se enfoca en la realización de láseres compactos para apoyar a las universidades.

Objetivos y Estrategias:

- Ser una marca líder en el mercado: Ofreciendo contribuir en el aprendizaje de los alumnos que se encuentran en universidades dispuestas a brindarles educación práctica.

- Innovar con nuevos productos: Servir como una posibilidad de la creación de nuevos productos para óptica integrada.
- Lograr introducirme en el mercado. Haciendo publicidad en las instituciones dedicadas al aprendizaje de carreras como ingenierías o relacionadas con tecnología, y ofreciendo el producto a empresas relacionadas con óptica integrada.

Sección 5: Marketing

Plan de marketing

Estrategias de Ventas.

- Realizar un producto de buena calidad con las especificaciones obtenidas con la investigación y realización del prototipo para poder venderlo.
- Iniciaremos promoviéndolo en Instituciones que brinden carreras universitarias enfocadas al ámbito tecnológico impartiendo una breve presentación y demostración del producto.
- Se les ofrecerá un curso de capacitación para que aprendan el manejo del laser y tenga un tiempo de vida aceptable.

Estrategia de Posicionamiento y lealtad en los clientes.

- Se pedirá a los clientes que nos entreguen sus comentarios de clientes satisfecho para poder ser utilizados con otros futuros clientes.
- Mantener comunicación con el cliente le recordaremos permanentemente nuestra marca o empresa, lo haremos sentir importante, le haremos saber que nos preocupamos por él, y, eventualmente, nos permitirá hacerle saber de nuestros nuevos productos y promociones.
- Se entregara un instructivo en el cual se tenga un número o correo para que puedan seguir en comunicación con nosotros y así nosotros promover nuestro producto.

Nuevos mercados.

Se tiene contemplado que este laser compacto pueda ser utilizado para dispositivos de óptica integrada, así que se trataría de introducir a las empresas dedicadas a las comunicaciones o empresas que fabriquen estos dispositivos.

Sección 6: PRECIO

Precio.

"El verdadero concepto del precio no es el precio, es el Valor"

Consideraciones de precio.

- Las Universidades Privadas cuentan con buenos ingresos, en cambio las universidades privadas tienen bajos ingresos.
- Contribuye a que los alumnos obtengan mayor aprendizaje y tengan mejores oportunidades laborales ya que proporciona un aprendizaje práctico.

Sección 7: PROMOCIÓN

Objetivos de Promoción

- Informar
- Persuadir
- Potenciar la actitud positiva hacia la nueva marca e influenciar en las intenciones de compra.
- Establecer la imagen de la empresa.

Fundamentación:

Las estrategias eficientes ligadas a informar sobre la marca, logra diferenciar productos, difíciles de diferenciar, identifica y califica, es inmaterial e invisible lo que permite ser muy flexible en los medios para transmitir el mensaje, da un valor añadido a la mezcla. La marca se crea en la mente de los consumidores y permanece inalterable.

Publicidad

Relaciones Públicas

- Reuniones con grupos estratégicos de la Industria.
- Apoyo a eventos académicos. A cambio se adquieren los derechos de exhibir el nombre de una marca, logotipo o mensaje publicitario en el lugar del evento.
- Los eventos proporcionan un auditorio cautivo, llegan a recibir cobertura en directo por radio y televisión y a menudo los medios impresos informan acerca de ellos.

Sección 8: COMPETENCIA

Competidores más Fuertes.

- Empresas dedicadas a la fabricación de láseres que tengan convenios con Instituciones Educativas.
- Empresas dedicadas a la venta de láseres únicamente a instituciones educativas.

Manera de Competir.

- Proporcionar información acerca de las propiedades con las que cuenta el laser compacto.
- Una ventaja esencial es que el laser es compacto y es fácil de manejar y trasladar.

Conclusiones y recomendaciones.

Mini Laser permite contribuir al aprendizaje global de los alumnos que se encuentran cursando grados de educación Superior o Universitaria, ya que les brinda el conocimiento práctico del manejo de un laser compacto para poder realizar experimentos que les provean un mejor conocimiento, al ser fácil de trasladar puedes llevar el laser a la muestra y no la muestra hacia el laser.