



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIAPAS

FACULTAD EN CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

**DESARROLLO EXPERIMENTAL DE
UN LÁSER DE FIBRA DOPADA CON
TULIO USANDO FIBRAS TAPER**

T E S I S

PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRÍA EN CIENCIAS FÍSICAS

PRESENTA:

NORIBETH FUENTES GONZÁLEZ

ASESOR DE TESIS:

DR. MANUEL DURÁN SÁNCHEZ

CO-ASESOR:

DR. ARIEL FLORES ROSAS

TUXTLA GUTIÉRREZ, CHIAPAS, DICIEMBRE DE

2017



*¿Saben acaso qué les pasará mañana?,
porque su vida es como el humo, que
aparece un momento y luego se disipa.*

Santiago 4:14



Universidad Autónoma de Chiapas
Facultad de Ciencias en Física y Matemáticas
Dirección



Tuxtla Gutiérrez, Chiapas
 24 de noviembre de 2017
Oficio No. FCFM/0357/16

Dr. Manuel Durán Sánchez
Dr. Ariel Flores Rosas
Presidente y Director de Tesis
Presente

Por este medio me permito informarle que una vez efectuada la revisión de la tesis denominada:

“DESARROLLO EXPERIMENTAL DE UN LÁSER DE FIBRA DOPADA CON TULIO USANDO FIBRAS TAPER”.

Ha sido aceptada para sustentar el Examen de Grado de Maestra en Ciencias Físicas de la **Lic. Noribeth Fuentes González** con matrícula escolar: X100009.

Se autoriza su impresión en virtud de cumplir con los requisitos correspondientes.

Atentamente
“Por la conciencia de la necesidad de servir”


Dr. Sendic Estrada Jiménez
Director



DIRECCIÓN
FCFM

C.c.p. Dr. Florencio Corona Vázquez, Secretario Académico de la FCFM.
 Lic. Ana Gabriel Aguilar Avendaño - Encargada de Servicios Escolares de la FCFM
 Archivo / Minutario
 SEJ/jmag

Agradecimientos

Agradezco en primer lugar a Dios y a mi familia por guiarme en todo momento y estar incondicionalmente. Al Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE), por abrirme sus puertas, permitirme llevar a cabo mi trabajo en sus instalaciones y poder hacer uso de sus materiales y equipos de experimentación, de gran relevancia para el trabajo. A mis asesores el Dr. Ariel Flores Rosas por ser el vínculo que me llevó al lugar donde desarrollé mi trabajo de investigación y al Dr. Manuel Durán Sánchez por recibirme en el laboratorio de fibras ópticas del INAOE para la realización de esta tesis, y sobre todo por bríndame su apoyo de principio a fin. A mis sinodales, por tomarse el tiempo para revisar esta tesis. Al equipo de fibras ópticas del INAOE que con sus aportaciones enriquecieron el desarrollo de este trabajo. A CONACYT por otorgarme la beca para realizar mi estancia en la institución que he mencionado, además por brindarme el apoyo económico durante la realización de mis estudios a lo largo del posgrado. A mi institución, la Facultad de Ciencias en Física y Matemáticas de la Universidad Autónoma de Chiapas (UNACH) por la formación académica que me brindó en esta etapa tan importante. Y por último, a Leonardi por motivarme a la realización de este posgrado y acompañarme durante todo este proceso de formación, con su apoyo en todo momento.

Índice general

1. Introducción	1
1.1. Fibras Ópticas	2
1.2. Láser	4
1.3. Configuraciones de Cavidades de Fibra Óptica	7
1.4. Filtros Ópticos	8
1.4.1. Filtro Sintonizable	9
2. Instrumentación para Fibras Ópticas	10
2.1. Empalmadora Fujikura FSM-100P+	10
2.2. Empalmadora Fitel S175 V.2000	16
2.3. OSA Yokogawa AQ6375	20
2.4. Cortadora de Fibra Óptica Fitel S323	26
2.5. Peladora Micro Strip MS1RB06S	28
2.6. Sensor de Potencia Térmica Thorlabs S314C	30
3. Análisis Teórico	33
3.1. Teoría del Tulio	34
3.1.1. Láseres de Fibra	34
3.1.2. Láseres de Fibra Dopada con Tulio Sintonizable	35
3.1.3. Niveles de Energía del Tulio	37
3.2. Teoría de los Tapers	42
3.2.1. Métodos de Fabricación	43

3.2.2. Características de una Fibra Taper	44
4. Desarrollo y Resultados Experimentales	46
4.1. Fabricación de los Tapers	47
4.2. Caracterización de los Elementos Básicos para la Construcción del Láser de Tulio	53
4.3. Caracterización de los Tapers	56
4.4. Construcción del Arreglo Experimental del Láser de Tulio	62
4.5. Resultados Experimentales	63
5. Conclusiones	68
Bibliografía	70

Índice de figuras

1.1. Estructura de una fibra óptica.	2
1.2. Reflexión total interna en una fibra óptica.	3
1.3. Tipos de fibra: (a) multimodo y (b) monomodo.	4
1.4. Procesos básicos en la generación de la emisión láser.	5
1.5. Estructura láser.	6
1.6. Proceso de emisión láser.	7
1.7. Esquemas de resonadores de fibra óptica.	8
1.8. Esquema de onda filtrada.	9
2.1. Empalmadora Fujikura FSM-100P+.	11
2.2. Pantalla secundaria de la SMF-100P+.	11
2.3. Pantalla principal de la FSM-100P+.	12
2.4. Vista por dentro de la FSM-100P+.	12
2.5. Herramientas de la pantalla principal FSP.	13
2.6. Aplicaciones de fabricación FPS.	14
2.7. Ventana de aplicación taper FPS.	14
2.8. Aplicación lentes de bola FPS.	15
2.9. Aplicación taper parabólico FPS.	15
2.10. Empalmadora Fitel S175.	16
2.11. Diferentes núcleos de fibras ópticas.	17
2.12. Diferentes revestimientos de fibras ópticas.	17
2.13. Diferentes NA de fibras ópticas.	17

2.14. Características de un empalme de fusión en la Fitel S175.	18
2.15. Funcionamiento de las teclas y LED de estado de la Fitel S175.	18
2.16. Vista dentro de la Fitel S175.	19
2.17. Monitor LCD de la Fitel S175.	20
2.18. Apariencia del OSA AQ6375.	21
2.19. Panel frontal del OSA.	22
2.20. Sección de funciones del OSA.	22
2.21. Apariencia de la Fitel S323.	26
2.22. Pasos para cortar la fibra óptica.	27
2.23. Apariencia de la peladora Micro-Strip.	28
2.24. Partes de la peladora Micro-Strip.	29
2.25. Paso 1 para usar la peladora.	29
2.26. Paso 2 para usar la peladora.	30
2.27. Paso 3 para usar la peladora.	30
2.28. Sensor de potencia térmica Thorlabs S314C.	31
2.29. Medidor de potencia óptica y sensor Thorlabs.	32
3.1. Espectro de absorción del estado fundamental de una fibra dopada con Tm.	38
3.2. Diagrama de los niveles de energía con esquemas de absorción y la transición láser.	38
3.3. Espectro de emisión de la transición ${}^3H_4 \rightarrow {}^3H_6$ de una fibra dopada con Tm.	39
3.4. Fibra taper indicando las regiones: región uniforme o de cintura, región estándar y región de transición.	43
3.5. Tipos de taper: (a) adiabático y (b) no-adiabático.	45
4.1. Perfil taper.	48
4.2. Variación de la longitud-taper.	50
4.3. Variación del diámetro-taper.	51
4.4. Variación del ángulo-taper.	52

4.5. Medición del OSA en la salida 3 del arreglo de caracterización.	53
4.6. Potencia del láser de bombeo, del WDM y de la TDF.	54
4.7. Medición del OSA en: (a) la salida 3 y (b) la salida 4.	55
4.8. Espectros del ASE de la TDF: (a) propagación y (b) contrapropagación. . .	56
4.9. Arreglo experimental para la caracterización de los tapers.	57
4.10. Respuesta espectral ASE en configuración de contrapropagación de la TDF. .	58
4.11. Respuesta espectral de los tapers para diferentes longitudes de cintura. . .	59
4.12. Respuesta espectral de los tapers para diferentes diámetros de la cintura. .	60
4.13. Respuesta espectral de los tapers para diferentes transiciones.	61
4.14. Configuración del TDFL.	62
4.15. Arreglo experimental en el laboratorio.	63
4.16. Sintonización por control de polarización.	64
4.17. Sintonización por caída en la fibra taper.	65
4.18. Sintonización por desplazamiento en el ángulo de traslación de manera perpendicular.	66

Índice de tablas

2.1. Especificaciones del OSA.	23
2.2. Especificación de la sección de funciones del OSA.	25
2.3. Especificación de la sección de funciones del OSA.	27
2.4. Características del sensor de potencia térmica Thorlabs S314C.	31
4.1. Primeros tapers fabricados.	49
4.2. Tapers con variación de la longitud-taper.	50
4.3. Tapers con variación del diámetro-taper.	51
4.4. Tapers con variación del ángulo-taper.	52

Capítulo 1

Introducción

En esta tesis se desarrolla un láser de fibra óptica dopada con Tulio (Tm), usando como filtro una fibra estrechada, que al mismo tiempo funge como método de sintonización. Debido a que este trabajo es un desarrollo experimental, se lleva a cabo de una manera sistemática, a la vez que se provechan conocimientos existentes en el campo de la investigación, además está dirigido a una nueva propuesta usando un dispositivo ya existente, como lo es la fibra óptica.

El trabajo se desarrolla en cinco capítulos, en el primer capítulo se presentan conceptos básicos y fundamentales, necesarios para la comprensión del funcionamiento de los elementos que fueron usados en este trabajo, como las fibras ópticas, los láseres y los filtros ópticos, en el segundo capítulo se detalla la instrumentación para las fibras ópticas que fueron útiles en la experimentación y la fabricación de los tapers, en el tercer capítulo se presenta un análisis teórico sobre los niveles de energía del Tm y las fibras estrechadas, en el cuarto capítulo se explica la forma en que se llevó a cabo el desarrollo experimental a la vez que se presentan los resultados de mediciones y gráficos obtenidos, por último en el quinto capítulo se da una conclusión sobre la información más relevante obtenida.

1.1. Fibras Ópticas

En el año de 1820 se dieron a conocer las ecuaciones por las que se rige la captura de la luz dentro de una placa lisa, pero no cobró tanta importancia sino hasta 90 años después, cuando se aplicaron a los llamados *cables de vidrio*, por labor de los físicos Demetrio Hondros y Peter Deybe en 1910 [1]. Posteriormente, en el año de 1870 el físico Irlandés John Tyndall presentó estudios de que la luz podía viajar curvándose por reflexión total interna [2], estos conocimientos fueron de suma importancia ya que en el año de 1952 el físico Narinder Singh Kapany realizó experimentos que condujeron a la invención de la fibra óptica.

La fibra óptica es un medio de transmisión, que consiste en un hilo muy fino de material transparente, ya sea vidrio o plástico, por donde se envían pulsos de luz que representan los datos a transmitir.

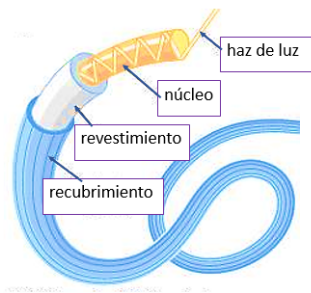


Figura 1.1: Estructura de una fibra óptica.

La fibra óptica es una guía de onda que está constituida por un recubrimiento plástico como se muestra en la figura 1.1, un núcleo en la zona central y una zona que lo rodea llamada revestimiento [3]. La función del núcleo de la fibra es guiar la luz a través de ella, mientras que el revestimiento se encarga de confinar el haz.

Una fibra óptica permite que la luz viaje de diversas formas a través del conjunto núcleo-revestimiento, a estas variaciones de la manera en que viaja la luz se les conoce

como *modos de propagación*, en términos comunes, rayos viajando en diferentes ángulos.

Para que se lleve a cabo el guiamiento del haz, se debe presentar un fenómeno de reflexión total interna o ángulo límite como se muestra en la figura 1.2. El ángulo límite en la ec. (1.1) se deduce a partir de la ley de Snell, esto sucede cuando el índice de refracción n_1 en el núcleo, es mayor que el índice de refracción n_2 en el revestimiento ($n_1 > n_2$) [4]

$$\theta_{\text{lím}} = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right). \quad (1.1)$$

La diferencia entre el índice de refracción del núcleo y del revestimiento determina la *apertura numérica* (NA, por sus siglas en inglés *numerical aperture*), la cual corresponde al ángulo máximo en el cual el rayo de luz incidente es atrapado por las paredes de la fibra, y está dada por la ec. (1.2)

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}. \quad (1.2)$$

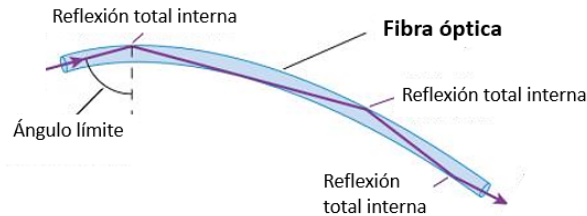


Figura 1.2: Reflexión total interna en una fibra óptica.

En su mayoría las fibras ópticas son hechas de vidrio, siendo el dióxido de silicio amorfo (SiO_2) el más utilizado, tanto en estado puro o con algunos dopantes [5].

En la figura 1.3 se muestran los dos tipos de fibras ópticas existentes, se clasifican en dos grandes grupos: fibras multimodo y fibras monomodo, respectivamente. Una fibra monomodo tiene el diámetro del núcleo muy pequeño, aproximadamente de 2 a 10 μm y en su mayoría un revestimiento de vidrio de 125 μm , este tipo de fibra sólo permite la propagación de un único modo, el cual se propaga directamente sin reflexión. Una fibra

multimodo tiene el diámetro del núcleo entre 50 y 62 μm aproximadamente, y normalmente un revestimiento de vidrio también de 125 μm , en este tipo de fibra pueden ser guiados varios modos de propagación, cada uno de los cuales sigue un camino diferente de la fibra. Este último tipo de fibras se usan comúnmente en aplicaciones de comunicación de corta distancia [6].

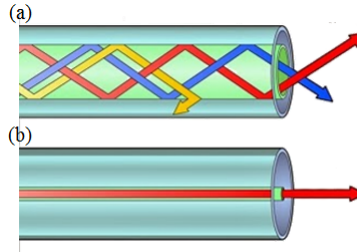


Figura 1.3: Tipos de fibra: (a) multimodo y (b) monomodo.

1.2. Láser

Láser viene del acrónimo en inglés *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, que traducido al español es Amplificación de Luz por Emisión de Radiación Estimulada, es un dispositivo que utiliza un efecto de la mecánica cuántica, la emisión inducida o estimulada, para generar un haz de luz coherente de un medio adecuado y con el tamaño, forma y pureza controlados.

En el año de 1916, el científico Albert Einstein estableció los fundamentos para el desarrollo de los láseres y de sus antecesores, los máseres (que emiten microondas), utilizando la ley de radiación de Max Planck, basado en los conceptos de emisión espontánea e inducida de radiación [7]. Luego, en 1958, el físico estadounidense Charles Hard Townes aplicó sus conocimientos con microondas a los rayos de luz y elaboró los principios básicos que permitirían crear un láser. Dos años después en 1960, otro físico norteamericano, Theodore Maiman construyó el primer láser eficiente [8,9], “láser de rubí”. Después de este descubrimiento Sorokin y Stevenso [10] y Kaiser y Garret [11], crearon un láser activado

por iones de elementos de tierras raras.

Existen cuatro procesos básicos en la generación de la emisión láser: el bombeo, la emisión espontánea de radiación, la emisión estimulada de radiación y la absorción. A continuación se describen estos procesos y en la figura 1.4 se ilustran las interacciones átomo-fotón entre ellos.

- **Bombeo:** Este proceso se realiza mediante una fuente de radiación, como el paso de una corriente eléctrica, o el uso de cualquier otro tipo de fuente energética que dé lugar a la transición energética de los electrones (de los átomos o moléculas) a un estado de excitación.
- **Absorción:** Durante este proceso, un átomo o molécula absorbe un fotón. El sistema atómico se excita a un estado de energía más alto, pasando un electrón al estado metaestable. Este fenómeno compete con la emisión estimulada de radiación.

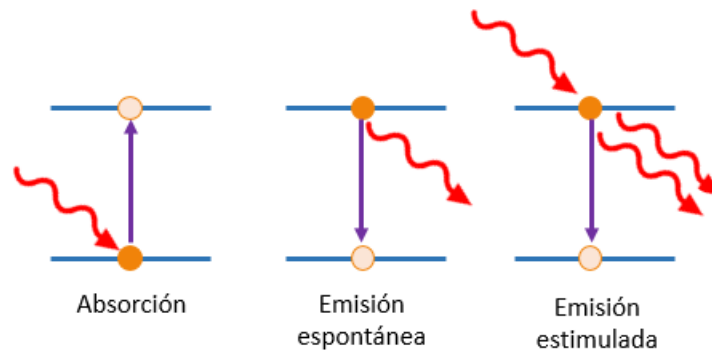


Figura 1.4: Procesos básicos en la generación de la emisión láser.

- **Emisión espontánea de radiación:** En este proceso, los electrones vuelven al estado fundamental, es decir el estado de energía más bajo posible, emitiendo fotones. Este proceso aleatorio y la radiación resultante se forman por fotones desplazándose por distintas direcciones y con fases distintas, dando paso a una radiación monocromática incoherente.

- **Emisión estimulada de radiación:** Este proceso es la base de la generación de radiación de un láser, se lleva a cabo cuando un átomo en estado excitado recibe un estímulo externo que lo lleva a emitir fotones, para luego volver a un estado de menor energía. Este estímulo se deriva de la llegada de un fotón con energía similar a la diferencia de energía entre los dos estados. De esta forma, los fotones emitidos poseen fase, energía y dirección similares a las del fotón externo que les dio origen. Esta interacción de la emisión estimulada, es el manifiesto de muchas de las características de la luz láser, no sólo porque produce luz coherente y monocromática, sino, porque también amplifica la emisión de luz, debido a que, por cada fotón que incide en el átomo excitado, se genera otro fotón.

La estructura de un láser, está compuesta de un medio activo, dos espejos que forman el *resonador óptico*, y un sistema de bombeo [12,13], como se muestra en la figura 1.5, la línea punteada indica el eje óptico del sistema.

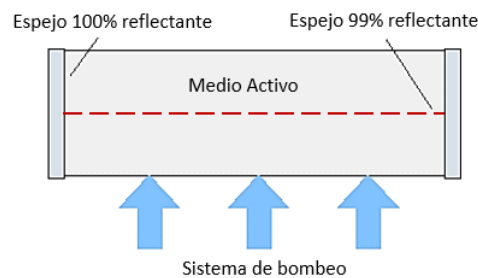


Figura 1.5: Estructura láser.

Cualquier fotón que es emitido en una dirección diferente a la definida por el eje óptico del resonador óptico se pierde, mientras que cualquier fotón emitido en la misma dirección del eje óptico del oscilador se amplifica por el proceso de emisión estimulada e inmediatamente se genera un enorme flujo de fotones confinados por el resonador óptico que se propaga a lo largo del eje óptico.

Si no existiera el resonador óptico, después de disparar el sistema de bombeo, los átomos o moléculas que hayan sido excitados pasarían a su estado fundamental debido

al proceso de emisión espontánea, emitiendo fotones en todas direcciones y perdiendo la energía recibida por el sistema de bombeo.

La función del resonador óptico, es extraer de forma eficiente la energía que el sistema de bombeo deposita en los átomos o moléculas contenidos en la cavidad amplificadora. Esto se debe a que uno de los espejos del resonador tiene una reflectancia de 99 %, y el 1 % de los fotones que inciden en él son transmitidos fuera del resonador óptico, formando un haz de luz muy intenso, monocromático (fotones de energía idéntica), coherente (fotones en fase por emisión estimulada) y altamente direccional. Este proceso que da paso a la generación de luz láser se ilustra en la figura 1.6, tomando en cuenta que la etapa (a) es inmediatamente después de que el sistema de bombeo fue disparado.

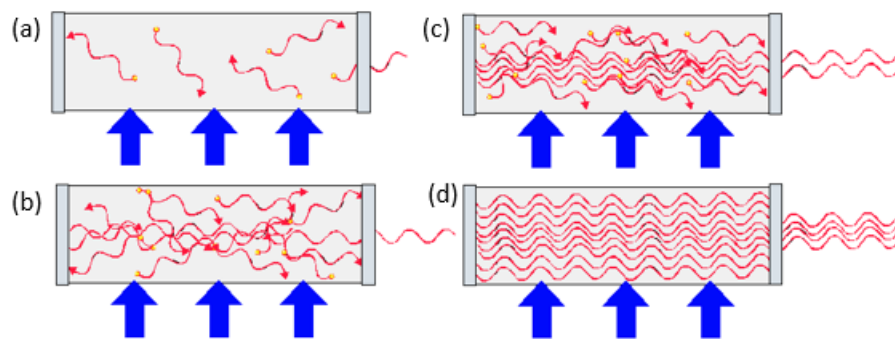


Figura 1.6: Proceso de emisión láser.

1.3. Configuraciones de Cavidades de Fibra Óptica

En la sección anterior vimos que un resonador óptico confina y almacena luz a ciertas frecuencias de resonancia. Un sistema de transmisión óptico donde la luz circula o es reflejado repetidamente dentro del sistema sin escapar. En términos comunes, un “contenedor de energía” del cual se genera luz láser.

La geometría y las propiedades espectrales de los espejos determinan las características de operación de los resonadores ópticos. Las fibras láser se pueden diseñar con una

variedad de resonadores ópticos basados en fibra óptica. El tipo más común es la cavidad Fabry-Perot, el cual se hace colocando el medio de ganancia entre dos espejos altamente reflectores que se encuentran en contacto con los extremos de la fibra [14], otra es la configuración en anillo que permite la realimentación necesaria de la señal estimulada, alcanzando mayores potencias de emisión a la salida del láser. En general, las cavidades de fibra óptica se clasifican con las siguientes configuraciones: (a) Fabry-Perot con dieléctricos reflectores, (b) Fabry-Perot con reflectores de fibra, (c) Fabry-Perot con rejillas de Bragg en fibra y por último, (d) cavidad de anillo. Estas configuraciones se muestran esquemáticamente en la figura 1.7.

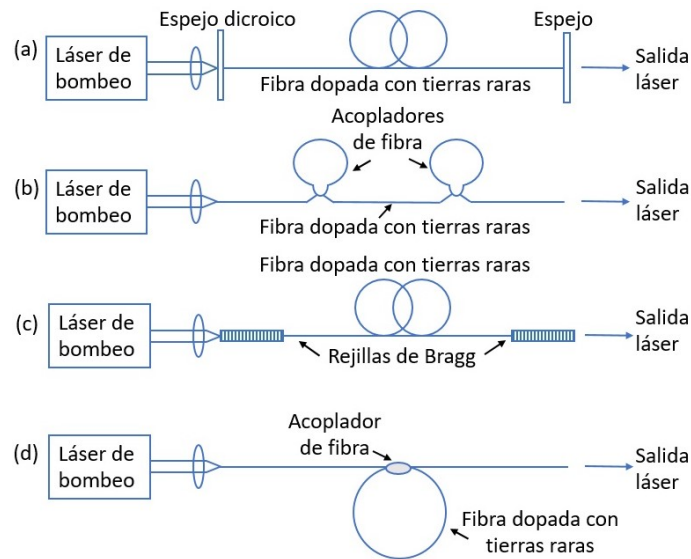


Figura 1.7: Esquemas de resonadores de fibra óptica.

1.4. Filtros Ópticos

Un filtro óptico es un dispositivo capaz de seleccionar una banda de longitudes de onda y eliminar el resto. Existen una amplia variedad de dispositivos ópticos que hacen la función de un filtro. Las principales características de los filtros ópticos, que los convierten en dispositivos de suma importancia en las comunicaciones ópticas son los siguientes.

- Selección de una determinada anchura espectral.

- Si son periódicos, los canales deben ubicarse dentro del FSR (Rango Espectral Libre) del filtro.
- Pueden ser sintonizables.
- Eliminación del ruido, introducido por los amplificadores ópticos.

Los filtros muestran una banda de paso rizada, es decir, una gama de frecuencias o longitudes que pasan a través del filtro sin ser atenuadas. En la figura 1.8 se muestra un esquema de una forma de onda que está siendo filtrada [15].

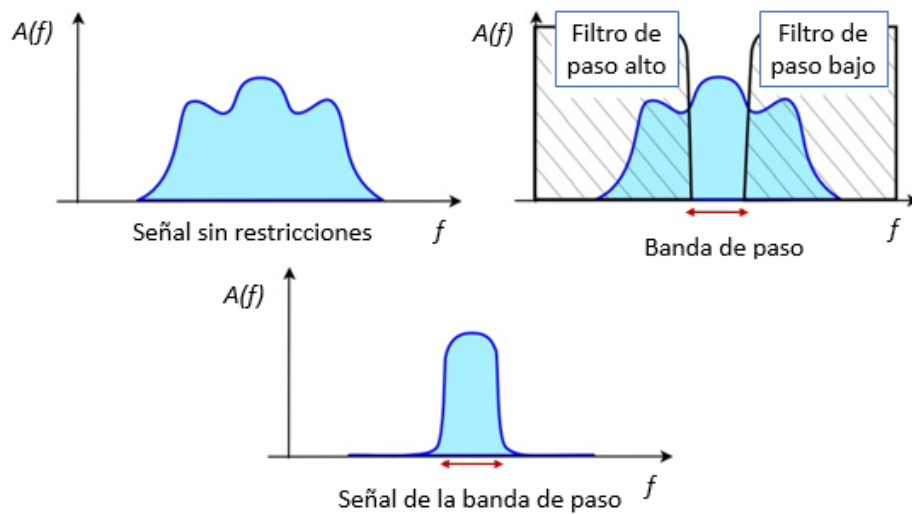


Figura 1.8: Esquema de onda filtrada.

1.4.1. Filtro Sintonizable

Un filtro sintonizable, es aquel con el que se introducen pérdidas muy elevadas para todas las longitudes de onda excepto en una pequeña región, la cual se puede controlar. Una vez que, empieza la emisión láser, este filtro consigue que ninguna longitud de onda (salvo las que permite el filtro) tenga la ganancia suficiente como para superar las pérdidas. Se obtiene un láser sintonizable simplemente con aplicar algún tipo de perturbación al filtro.

Capítulo 2

Instrumentación para Fibras Ópticas

Para la realización de este trabajo de tesis se necesitaron equipos y materiales adecuados. Algunos de los materiales necesarios para el arreglo experimental fueron: fibra óptica SMF-28 de $125\ \mu\text{m}$ de diámetro, láser de bombeo de 1567 nm, WDM, fibra óptica dopada con Tm, glicerina, alcohol isopropílico, paños para limpiar fibra óptica, control de polarización, dos bases móviles para mesas de laboratorio, acoplador y aislador de fibra óptica.

Por otro lado, los equipos que se emplearon y que requieren una explicación más detallada sobre su modo de empleo fueron: empalmadora Fujikura FSM-100P+, empalmadora Fitel S175 V.200, OSA Yokogawa AQ637, cortadora de fibra óptica Fitel S32, peladora de fibra óptica Micro-Strip MS1RB06S, detector o sensor de potencia térmica Thorlabs S314C y medidor digital de potencia y energía Thorlabs PM100D. Por lo que, en este capítulo se dará una breve descripción de cada uno de ellos, así como también se presentará un algoritmo básico para su funcionamiento adecuado.

2.1. Empalmadora Fujikura FSM-100P+

En la figura 2.1 se muestra la máquina Fujikura FSM-100P+, es una empalmadora de fusión que nos proporciona capacidades avanzadas, adecuadas para láseres de fibra, sensores, etcétera, y con esto realizar investigación y desarrollo de varios campos, como el

médico, con una multitud de características diseñadas para facilitar el empalme [16]. Tiene monitores LCD dobles que proporcionan datos e información gráfica que es seleccionable por el usuario durante cada etapa del proceso de empalme. Entre las principales funciones de esta máquina se encuentran la fabricación de tapers, tapers parabólicos, empalmes y lentes de bola.



Figura 2.1: Empalmadora Fujikura FSM-100P+.

En la figura 2.2 se observa la pantalla LCD derecha la cual muestra la información que puede proporcionar esta empalmadora acerca de las características de la fibra óptica, que se caracteriza por tener los datos principales de la fibra óptica, tales como diámetro de recubrimiento, diámetro de revestimiento, longitud de corte, tipo de fibra, etcétera.

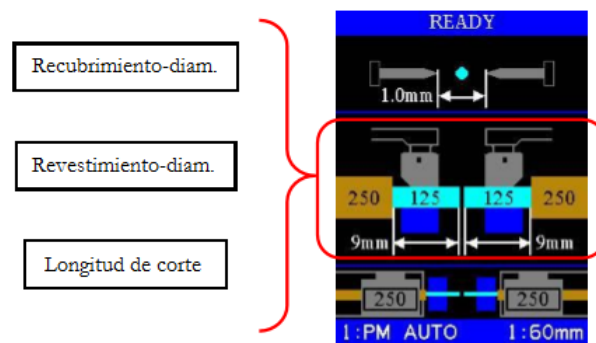


Figura 2.2: Pantalla secundaria de la SMF-100P+.

La otra pantalla (lado izquierdo), llamada pantalla principal, se muestra en la figura 2.3, con la información que ella contiene. Se ha dividido en tres partes para dar un breve explicación.

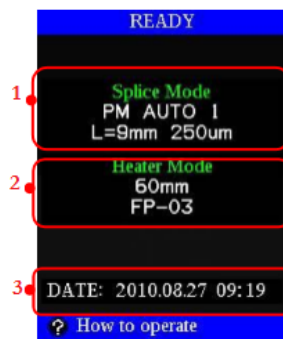


Figura 2.3: Pantalla principal de la FSM-100P+.

La parte número 1, corresponde al modo de empalme seleccionado actualmente, la número 2 es el modo de calentador seleccionado actualmente y la número 3 muestra la fecha y hora actual.

Estas pantallas pueden ajustarse para tener una visión en vivo del proceso que se está llevando a cabo dentro de ella, presionando manualmente el botón X/Y en la cubierta. Esto es útil para monitorear las etapas.

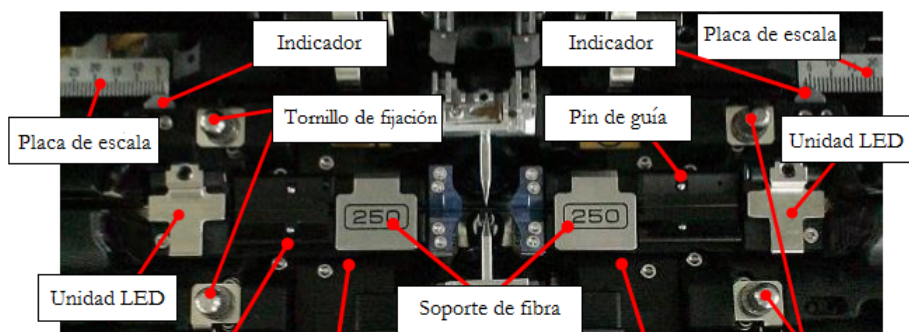


Figura 2.4: Vista por dentro de la FSM-100P+.

Al abrir la cubierta de aire nos encontramos con las partes internas de la máquina (ver figura 2.4), en esta parte es donde se coloca la fibra óptica para empezar con el proceso de fabricación.

Los pasos para cargar la fibra antes de empezar son:

1. Abrir la cubierta de aire.
2. Abrir las tapas de la unidad LED.
3. Abrir los pasadores del soporte de fibra.
4. Colocar la fibra óptica por el canal en forma-V.
5. Cerrar las tapas de la unidad LED.
6. Cerrar los pasadores del soporte de fibra.
7. Cerrar la cubierta de aire.

Es importante mencionar que la empalmadora también puede operar mediante su propio software de PC, FPS (*Fiber Processing Software*) [17], su función es dar la orden de fabricación a la empalmadora Fujikura SMF-100P+ y tomar mediciones, además permite obtener esta información a través de un archivo xls.

Inmediatamente después de entrar al entorno FPS nos encontramos con la pantalla principal que es una ventana con una barra de herramientas en la parte superior, la cual se muestra en la figura 2.5.

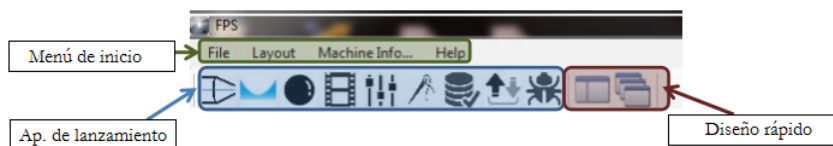


Figura 2.5: Herramientas de la pantalla principal FPS.

Los tres componentes de fibra óptica que puede fabricar la empalmadora Fujikura FSM-100P+ son: los taper adiabáticos y no adiabáticos, taper parabólico y lentes de

bola, los cuales se encuentran en las aplicaciones de lanzamiento, como se observa en la figura 2.6.

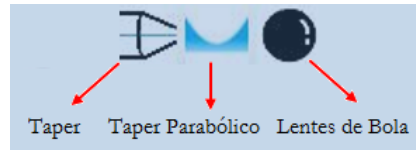


Figura 2.6: Aplicaciones de fabricación FPS.

El entorno de la aplicación taper contiene parámetros que deben ser establecidos por el usuario, una barra de menú, controles para llevar a cabo el proceso de fabricación y una barra de estado donde se muestra la información en base lo que se está ejecutando, tal como se observa en la figura 2.7.



Figura 2.7: Ventana de aplicación taper FPS.

Con el proceso automatizado de lente de bola, normalmente se deben completar los siguientes pasos: entrada de parámetros (por captura del usuario), iniciación de la máquina, fabricación del lente de bola y su medición. Para fabricar una lente de bola deseada, se debe determinar e introducir la geometría de la longitud de bola, la potencia de calentamiento, la velocidad de rotación, etcétera.

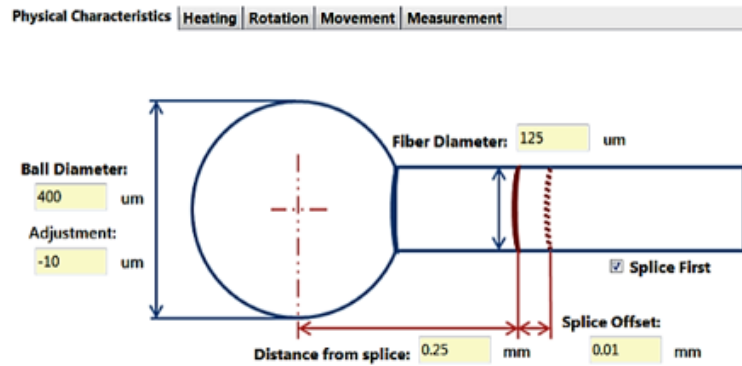


Figura 2.8: Aplicación lentes de bola FPS.

El entorno de la aplicación lente de bola es similar al de la aplicación taper, como se observa en la figura 2.8, hay una pestaña de las características físicas donde se modifican los parámetros de fabricación, una pestaña sobre el calentamiento donde pueden modificarse las características de temperatura aplicada, una pestaña que proporciona el control de rotación durante el proceso, una pestaña que permite configurar el modo de movimiento así como la velocidad y una pestaña que proporciona los datos de medición al finalizar el proceso.

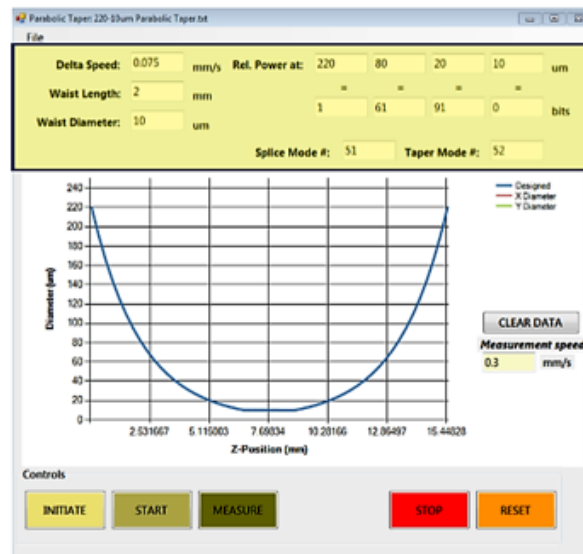


Figura 2.9: Aplicación taper parabólico FPS.

Finalmente, la aplicación taper-parabólico genera un modo especial basado en parámetros definidos por el usuario que son barridos sobre la misma longitud de fibra repetidamente hasta que se alcanza un ancho objetivo. El entorno FPS para esta aplicación se muestra en la figura 2.9.

2.2. Empalmadora Fitel S175 V.2000

El empalme de fusión se utiliza para unir físicamente dos extremos de fibra óptica. El proceso puede variar, dependiendo del tipo de empalmadora que se utiliza. La empalmadora de fusión de fibra óptica Fitel S175 V.2000 tiene un mecanismo de alineación de núcleo activo para alinear los extremos de las fibras y un arco eléctrico controlable para fundir el vidrio y unir los extremos. Esto resulta en una articulación fuerte, con muy baja pérdida y muy baja retro-reflexión [18].

Para lograr buenos resultados de empalme, es esencial conocer tanto el uso apropiado de la empalmadora de fusión como las características de la fibra óptica. Debido a que no todas las fibras son idénticas, pueden fundirse a diferentes temperaturas. Por lo tanto, para minimizar la pérdida de empalme, es importante que la potencia del arco y la duración del arco de fusión estén adecuadamente ajustadas.



Figura 2.10: Empalmadora Fitel S175.

Los siguientes casos de fibra óptica no están permitidos.

- **Diámetro del núcleo no coincide:**

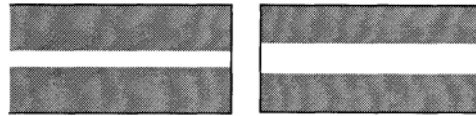


Figura 2.11: Diferentes núcleos de fibras ópticas.

- **Diámetro del revestimiento no coincide:**

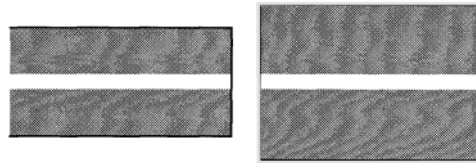


Figura 2.12: Diferentes revestimientos de fibras ópticas.

- **No coincide la apertura numérica:** Las diferentes fibras tienen diferentes aperturas numéricas. La apertura indica el ángulo de aceptación de la luz.

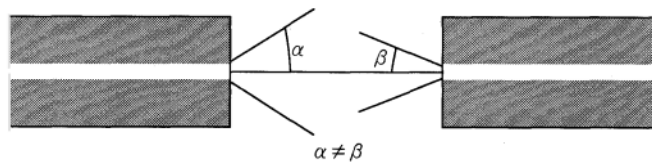


Figura 2.13: Diferentes NA de fibras ópticas.

Características Físicas de la Fibra Óptica para Empalme de Fusión:

Recubrimiento Diámetro estándar Material	250 μm , 900 μm resina acrílica, nylon	
Revestimiento Diámetro estándar Material	125 μm sílice, sílice dopada con fluoro, sílice recubierta de titanio	
Núcleo Diámetro estándar Material	8 – 10 μm (SM) 50 – 62.5 μm (MM) sílice dopada con germanio, sílice	

Figura 2.14: Características de un empalme de fusión en la Fitel S175.

Funcionamiento de las teclas y LED de estado:

Indica la condición de alimentación	POWER	Control de brillo para el monitor LCD
Cambia el valor del parámetro		Desplazarse hacia arriba
Cambia el valor del parámetro		Desplazarse hacia abajo
Escapa una operación y regresa al menú anterior		Confirma una selección
		Inicia y detiene la operación de calentamiento
		Inicia, pausa y reanuda el ciclo de empalme de fusión

Figura 2.15: Funcionamiento de las teclas y LED de estado de la Fitel S175.

En las figuras 2.14 y 2.15 se describen las características que debe tener la fibra para

el empalme y las teclas principales para el funcionamiento de la máquina, respectivamente.

El color del LED de estado puede cambiar como alerta según la condición de la potencia que se le induce a la empalmadora, estos pueden ser rojo para voltaje inapropiado, naranja para voltaje bajo y verde para voltaje apropiado [19].

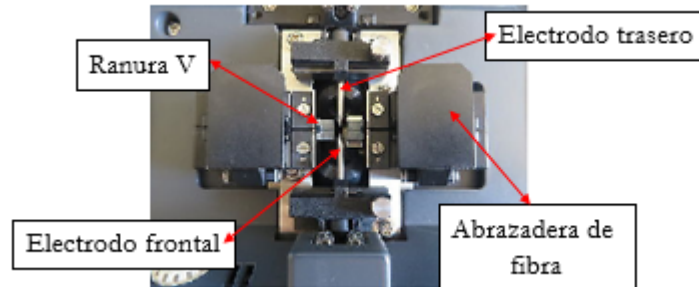


Figura 2.16: Vista dentro de la Fitel S175.

Antes de empezar a describir el algoritmo del empalme con la máquina Fitel S175, se muestra en la figura 2.16 un acercamiento al lugar donde se colocan las fibras, detallando cada parte. Los pasos que deben seguirse para hacer los empalmes son:

1. Abrir la cubierta de aire de la empalmadora Fitel S175.
2. Levantar las abrazaderas derecha e izquierda de la fibra.
3. Colocar la fibra óptica sin recubrimiento plástico y cortada de un lado derecho o izquierdo en la ranura V.
4. Colocar la otra fibra en el lado distinto a la anterior.
5. Bajar las abrazaderas de la fibra.
6. Presionar el botón de inicio.

En la figura 2.17 se observa el monitor LCD con un proceso en vivo, se trata de una visualización simultánea de dos imágenes con una pantalla dividida en dos partes X/Y.

Además, también se observa el nombre del proceso, un minutero, funcionamiento del horno de calor, contador de los ciclos de descarga, y mensaje auxiliar operativo.



Figura 2.17: Monitor LCD de la Fitel S175.

Cuando termina el empalme de fusión, se observa un mensaje de las pérdidas en el monitor. La estimación de la pérdida de empalme se realiza identificando las formas de los núcleos de fibra óptica mediante el procesamiento de imágenes. En ocasiones encontramos pérdidas que son debidas al mal corte previo al empalme de las fibras, una mala colocación, entre otras. El resultado más óptimo de las pérdidas es de 0.00 dB (decibelios), sin embargo, si resulta un valor cercano al cero también se puede utilizar la fibra empalmada siempre y cuando este valor se muestre en un color verde por el monitor y si se muestran en un color rojo, tendremos que realizar nuevamente el proceso.

2.3. OSA Yokogawa AQ6375

El OSA Yokogawa AQ6375 es un analizador de espectros ópticos “onda-larga”, de sobremesa que cubre la longitud de onda más larga de $2 \mu\text{m}$. Está diseñado para investigadores e ingenieros que han estado luchando con equipos inadecuadas para medir en estos rangos de longitudes de onda largas [20]. El OSA AQ6375 logra mediciones de alta velocidad con alta precisión, resolución y sensibilidad en una estructura compacta.



Figura 2.18: Apariencia del OSA AQ6375.

Algunas de sus características más importantes son:

- Longitud de onda larga de 1200 nm a 2400 nm.
- Alta sensibilidad de 20 dBm a 70 dBm.
- Alta resolución y amplio rango dinámico.
- Medición de alta velocidad.
- Entrada óptica de espacio libre: fibra monomodo y multimodo.
- Calibrador incorporado.

Con el OSA se puede tener un análisis sencillo de los resultados. También se puede elegir ejes-x, tales como nm, THz, cm^{-1} , y ofrece varias funciones para el análisis, el cual puede realizarse automáticamente y proporcionar resultados. Las funciones incluyen: anchura espectral, muesca, DFBLD, EDFA, filtro, y más.

Para entender cómo utilizar esta herramienta, es importante nombrar cada conjunto de elementos que componen su panel frontal y la función correspondiente a cada uno. Esto se describe en la tabla 2.1 con ayuda de la figura 2.19.

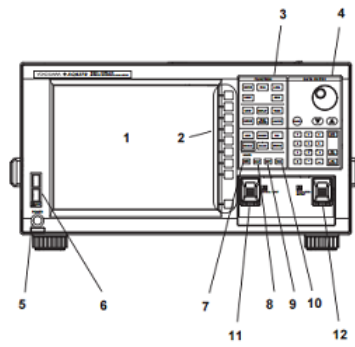


Figura 2.19: Panel frontal del OSA.

En la figura 2.20 se muestra un esquema para describir la sección de funciones, la cual, está compuesta por los botones principales del OSA, luego, estas funciones se describen en la tabla 2.2.

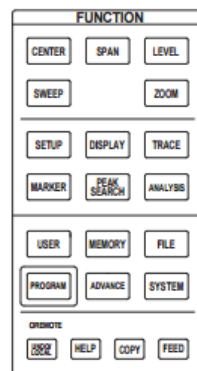


Figura 2.20: Sección de funciones del OSA.

No.	Nombre	Función
1	Pantalla LCD	Muestra la forma de onda medida, las condiciones de medición, los valores de medición, etc.
2	Sección de teclas programables	Se utiliza para ejecutar las funciones asignadas a las teclas programables en el lado derecho de la pantalla LCD.
3	Sección de funciones	Se utiliza para introducir los ajustes correspondientes a todas las mediciones (barrido, condiciones de medición, análisis de datos y varias funciones).
4	Sección de entrada de datos	Se utiliza para la entrada de parámetros de condición de medición, entrada de etiqueta, etc.
5	Energía	Se utiliza para arrancar y apagar el instrumento.
6	Puertos USB	Se utiliza para conectar medios de almacenamiento USB.
7	Deshacer/Local	
8	Ayuda	Se utiliza para comprobar el contenido del menú de la tecla programable que aparece en la pantalla.
9	Copia	Se utiliza para realizar copias impresas de la pantalla a través de la impresora interna (opcional).
10	Alimentar	Se utiliza para alimentar el papel de impresión.
11	Entrada óptica	Conector de entrada óptica.
12	Salida de calibración	Conector de salida óptica de fuente de luz de referencia utilizado para ajustes de alineación y calibración de longitud de onda.

Tabla 2.1: Especificaciones del OSA.

Botón	Especificación
CENTER	Esta tecla contiene funciones relacionadas con la configuración de la longitud de onda central y frecuencia central para las mediciones.
SPAN	Esta tecla contiene funciones relacionadas con los ajustes para el intervalo de longitud de onda o el intervalo de frecuencia que se está midiendo.
LEVEL	Cuando se presiona la tecla, aparece un menú programable para configurar el nivel de referencia.
SWEEP	Esta tecla contiene funciones relacionadas con el barrido.
ZOOM	Permite al usuario ampliar o reducir libremente una forma de onda medida.
SETUP	Contiene funciones relacionadas con los ajustes de la condición de medición.
DISPLAY	Esta tecla se utiliza para ajustar la pantalla.
TRACE	Contiene funciones relacionadas con los ajustes del modo de trazado.
MARKER	La tecla contiene funciones relacionadas con el marcador.
PEAK SEARCH	Esta tecla tiene funciones para buscar picos y fondos en formas de onda medidas.
ANALYSIS	Contiene funciones relacionadas con el análisis de forma de onda medido.
USER	Las teclas programables de uso frecuente se pueden registrar en el menú de función.
MEMORY	La tecla contiene funciones para escribir el contenido de la traza activa en la memoria interna de la unidad.
FILE	Esta tecla contiene funciones para guardar y cargar datos hacia medios de almacenamiento USB.

PROGRAM	Contiene las teclas programables relacionadas con las funciones para controlar las mediciones a través de un programa.
SYSTEM	La tecla contiene funciones relacionadas con el sistema tales como alineación óptica de ajuste de monocromador, ajuste de longitud de onda, configuración de hardware e inicialización de ajuste.
ADVANCE	Contiene funciones relacionadas con la configuración de la función de plantilla.

Tabla 2.2: Especificación de la sección de funciones del OSA.

Enseguida se describen las instrucciones de operación para obtener mediciones en el OSA. Estos pasos se ejecutan después de haber conectado al OSA la salida de la señal se quiere analizar.

1. Encender el OSA Yokogawa AQ6375 en el botón POWER.
2. Se configuran los ejes y el rango de medición.
3. Presionar el botón SWEEP.
4. En la sección de teclas programables presionar SINGLE.
5. Introducir USB.
6. Presionar el botón FILE.
7. En la sección de teclas programables leer el dispositivo USB.
8. En las teclas programables presionar EXECUTE para guardar.

Estos pasos se ejecutan las veces necesarias para obtener suficientes datos, luego se guardan en un dispositivo extraíble, este tipo de archivos tienen formato compatible con el Software Origin (útil para graficar y analizar los datos).

2.4. Cortadora de Fibra Óptica Fitel S323

En la figura 2.21 se muestra la cortadora de fibra óptica FITELE S323, es una cortadora de cuatro pasos de alta precisión, que puede cortar fibras a partir de $125\ \mu\text{m}$ hasta $900\ \mu\text{m}$ de diámetro. Deposita automáticamente la fibra de desecho en una cámara de recolección donde los almacena, incrementando la eficiencia y eliminando de la fibra residuos peligrosos en el área de trabajo. La cuchilla de corte se bloquea en su lugar después del corte, evitando la doble punción de la fibra y asegurando ángulos de corte mínimos.

La función de corte automático proporciona consistencia y mejora la calidad de corte. Es muy práctica y útil para llevar a cabo el proceso de corte de una fibra óptica. En la tabla 2.3 se muestran algunas especificaciones de la cortadora.



Figura 2.21: Apariencia de la Fitel S323.

Antes de hacer el corte en las fibras ópticas se preparan siguiendo estos pasos:

1. Pelar el revestimiento de la fibra por su extremo.
2. Mojar un paño para fibras ópticas con alcohol isopropílico.
3. Pasar el paño por la parte libre del revestimiento.

Después de este proceso se coloca la fibra óptica por el canal con forma-V de la cortadora y se baja el soporte para que esta no se mueva.

Especificaciones	
Diámetro del revestimiento	125 μm
Diámetro del recubrimiento	25 μm y 9 μm .
Longitud de corte	Tipo A: longitud fija de 16 mm. Tipo B: longitud fija de 10 mm.
Dimensiones	95 mm \times 63 mm \times 53 mm de altura.
Peso	570 g.

Tabla 2.3: Especificación de la sección de funciones del OSA.

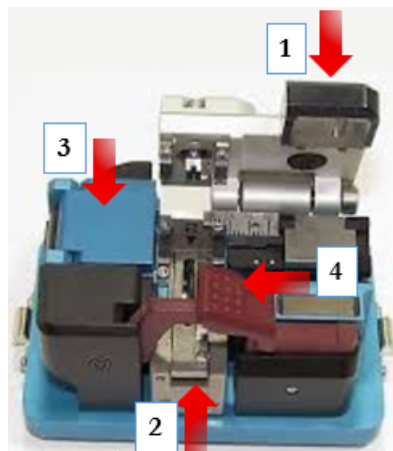


Figura 2.22: Pasos para cortar la fibra óptica.

En la figura 2.22 se muestran los 4 pasos para cortar la fibra óptica con la cortadora Fitel S323, los cuales se describen a continuación:

1. Cerrar la tapa.
2. Empujar la cuchilla.
3. Presionar para abrir la tapa.
4. Cerrar el rodillo de presión.

2.5. Peladora Micro Strip MS1RB06S

Este innovador separador de fibra Micro-Strip se muestra en la figura 2.23, el cual se utiliza para pelar el revestimiento de $250\ \mu\text{m}$ y dejar solo el núcleo de la fibra de $125\ \mu\text{m}$ de diámetro. Incorpora un sistema patentado de cuchillas de desmontaje opuestas que se autoalinean alrededor del cristal para asegurar la puntuación concéntrica y desnudar la fibra.



Figura 2.23: Apariencia de la peladora Micro-Strip.

Como en las secciones anteriores, a continuación se describen las componentes de la peladora Micro-Strip de fibra óptica y se da una breve explicación de la función que es destinada para cada una, basándonos en el diagrama de la figura 2.24.

- A. Funciona como manija para su manipulación.
- B. Asegura que el tamaño incorrecto del cable no se puede quitar y evita cortes y daños.
- C. Fuerza de desprendimiento aplicada longitudinalmente con la fibra. Esto elimina la posibilidad de arrastre dañino.
- D. Código de color de acuerdo al conjunto de cuchillas.
- E. Conjunto de cuchillas.
- F. Guía de longitud de banda calibrada en $1/16''$ para longitudes de banda deseadas.
- G. Canal de soporte de la fibra.

H. Resorte que mantiene separada la manija de la fibra en el canal.

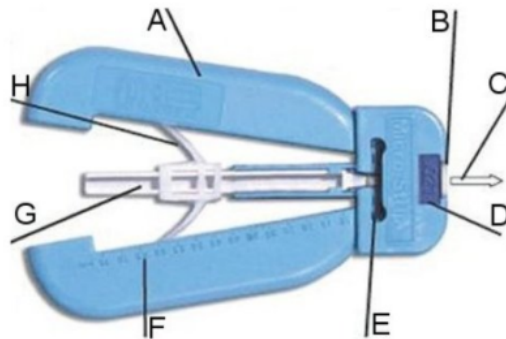


Figura 2.24: Partes de la peladora Micro-Strip.

El uso de esta herramienta nos facilita quitar el recubrimiento de la fibra de una manera eficaz. Otra alternativa menos técnica que existe es, usar nuestras propias uñas, pero, no es la manera más efectiva, debido a que se hacen cortes que no queremos en la fibra y no queda completamente desnuda, es decir, la fibra queda con residuos de polímero.

Para finalizar se muestra la serie de pasos que se siguen para hacer uso la peladora Micro-Strip MS1RB06. Esta peladora se usó en la fibra SMF-28 de $125\ \mu\text{m}$ de diámetro, pero hay una gama de peladoras del mismo tipo para diferentes diámetros de fibra óptica y las distinguiremos por el color en la parte D de la figura 2.24.

1. Se sujeta la peladora Micro-Strip en una mano y la fibra en la otra, luego se mantienen las manijas en posición completamente expandida y se inserta la fibra a través de la guía de fibra hasta que el extremo quede alineado con las marcas de regla.

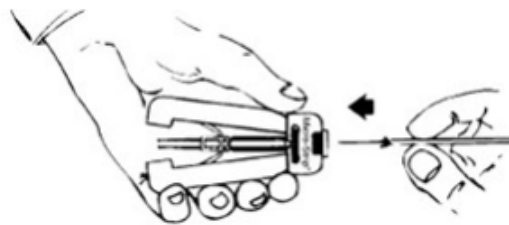


Figura 2.25: Paso 1 para usar la peladora.

2. Se aprietan las manijas cerrándolas. Las cuchillas de la cortadora ahora están incidiendo en el aislamiento de la fibra.

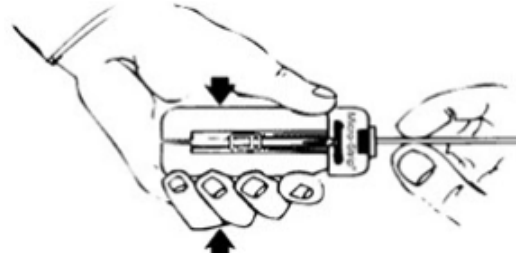


Figura 2.26: Paso 2 para usar la peladora.

3. Se mantiene una ligera presión para mantener la cuchilla cerrada y luego se retira la fibra de la herramienta, completando el proceso de separación.

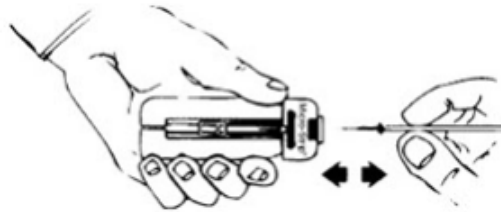


Figura 2.27: Paso 3 para usar la peladora.

2.6. Sensor de Potencia Térmica Thorlabs S314C

Los sensores térmicos Thorlabs de las series C (ver figura 2.28) son capaces de detectar rangos de potencia de $10 \mu\text{W}$ a 200 W y rangos de longitud de onda de 190 nm a $25 \mu\text{m}$. En comparación con los sensores de fotodiodo, los sensores térmicos generalmente tienen rangos de detección de longitud de onda y de potencia más amplios, pero con una resolución de potencia más baja y con tiempos de respuesta más largos. Estos sensores son adecuados para su uso en una amplia gama de aplicaciones, particularmente aquellas que requieren una respuesta espectral plana y detección de rangos de potencia de baja a media potencia. Además, son útiles para aplicaciones con pulsos de corriente ultrarrápida en los

que una potencia de pico alta podría saturar un sensor de fotodiodo. Los sensores térmicos de Thorlabs están diseñados para funcionar con consolas de medidores de potencia de modo que la potencia incidente puede determinarse después de una sola constante de tiempo del sensor. En la tabla 2.4 se describen las características principales del sensor.



Figura 2.28: Sensor de potencia térmica Thorlabs S314C.

Características	
Rango de longitud de onda	0.25 – 11 μm
Rango de Potencia	10 mW – 40 W
Tipo de detector	Absorbedor de superficie térmica
Linealidad	$\pm 1\%$
Resolución	1 mW
Incertidumbre de medición	$\pm 3\%$: 1064 nm, $\pm 5\%$: 250 – 2940 nm
Tiempo de respuesta	< 1 s
Dimensiones de la carcasa	100 mm \times 100 mm \times 55mm

Tabla 2.4: Características del sensor de potencia térmica Thorlabs S314C.

El sensor de potencia térmica, cuenta con un medidor de energía y potencia óptica Thorlabs PM100D, el cual realiza la lectura de potencia emitida por un sistema láser.

Para la lectura de temperatura en nuestro trabajo, se hizo uso de estos dos equipos de medición, justo como se observa en la figura 2.29. El instrumento virtual recibió la lectura por el sensor a través de un puerto de entrada.



Figura 2.29: Medidor de potencia óptica y sensor Thorlabs.

Capítulo 3

Análisis Teórico

En este capítulo se da un reseña histórica acerca de los láseres de fibra, de cómo se han ido desarrollando con el paso del tiempo, así mismo se presentan los conocimientos previos para comprender el funcionamiento de un láser de fibra dopada con Tm junto con algunos métodos de sintonización que han sido reportados a lo largo de varias investigaciones.

Se presentan también los niveles de energía del Tm, elemento químico descubierto por Per Teodor Cleve en Suecia en el año de 1879, perteneciente al grupo de los lantánidos, comúnmente llamados “tierras raras”, haciendo referencia a que se encuentran escasos en la corteza terrestre. Últimamente se le ha dado mucha importancia a la fabricación de fibras ópticas con la presencia de iones de estos elementos, tales como el Iterbio (Yb), Erblio (Er) o el Tulio (Tm), la razón es porque permiten mejorar sustancialmente el rendimiento y la eficacia de las fibras ópticas, obteniendo atenuaciones casi nulas de las señales que se propagan en su interior, con aplicaciones en el láser de fibra, por su propiedad de amplificar las señales cuando son excitados por un haz láser.

Por último se presenta la teoría alrededor de los tapers de fibras ópticas, como una introducción histórica sobre la investigación de este elemento, así como los métodos de fabricación y las características que presenta.

3.1. Teoría del Tulio

3.1.1. Láseres de Fibra

El desarrollo de las fibras ópticas comienza en los años 50's, mientras que las fibras especiales, en particular las fibras de vidrio activadas con iones de tierras raras, comienza en la década de los 60's, con este desarrollo viene también la invención de los láseres de fibra, es decir, una fibra óptica que bajo un arreglo logra tener el funcionamiento de un láser.

En el año 1961 el físico Elias Snitzer, quien es conocido como el pionero del láser de fibra, utilizó como medio activo un vidrio dopado (contaminado) con moléculas de neodimio (Nd), elemento químico de la familia de los lantánidos, y logró obtener oscilación láser, operando a temperatura ambiente. Las muestras de vidrio del experimento tenían forma de varillas con un revestimiento de silicato sodocálcico ordinario, con secciones transversales de 1.2×10^{-2} in y $32 \mu\text{m}$ de diámetro, además con índices de refracción del núcleo y el revestimiento: $n_n=1.54$ y $n_r=1.52$, respectivamente.

Las conclusiones más importantes acerca del uso de estas varillas de vidrio fueron que no se requiere una alta calidad en el vidrio del núcleo, que la selección del modo es proporcionada por una pequeña apertura numérica de la fibra si los índices de refracción del núcleo y del revestimiento están próximos entre sí, que la buena interfaz óptica entre el núcleo y el revestimiento puede proporcionar modos de onda superficial de alta-Q, que el uso de un revestimiento grueso facilita el manejo de diámetros pequeños y por último se sugiere una pequeña sección transversal para un bombeo óptimo [21].

Desde aquel momento, la investigación y desarrollo de los láseres de fibra dopadas de tierras raras como el Nd, Er, Yb, Tm, entre otros, se ha extendido. Existen diferentes arreglos para lograr el láser de fibra, en los cuales pueden existir elementos ópticos comunes; como espejos o ser completamente de fibra. Al estar basados en fibras ópticas tienen todas las ventajas que la tecnología permite: son más compactos, con gran capacidad para

disipar el calor, bajas pérdidas por dispersión, buena calidad del haz, no requieren una alineación exacta, pueden operar en diferentes modos, como onda continua, pulsados, con longitud de onda-dual, así como múltiples longitudes de onda y presentan pocas imperfecciones en el material, además de que se desarrollan con bajo costo.

Los diferentes diseños de láseres de fibra permiten obtener anchuras de línea muy estrechas y longitudes de onda sintonizables, operando con una potencia umbral de bombeo baja. La longitud de onda de emisión del láser viene determinada por el dopante y su característica espectral, por lo que al variar tanto la composición como la densidad de dopaje se podrá modificar el espectro de emisión del láser.

3.1.2. Láseres de Fibra Dopada con Tulio Sintonizable

El estudio de láseres de fibra dopada con iones de Tm como elemento activo ha ganado interés debido a la longitud de onda que emite en la región de $2 \mu\text{m}$, y su potencial en distintas aplicaciones. El primer artículo de investigación reportado sobre un láser de fibra dopada con Tm data del año 1988 [22], el cual fue bombeado por un láser de colorante o mejor conocido en inglés como *láser dye*, operando a una longitud de onda cercana a los 800 nm, y obtuvo un espectro de fluorescencia con longitudes de onda que iban desde 1700 nm hasta 2200 nm aproximadamente, lo que sugiere un rango de sintonización amplio, y una emisión láser cercana a $2 \mu\text{m}$ con una potencia de pocos mW. En el año de 1990 también se reportó un láser de fibra dopada con Tm con una potencia de salida de 1 W [23], utilizando un láser Nd:YAG (acrónimo del inglés *neodymium-doped yttrium aluminium garnet*), como fuente de bombeo.

Se logran ampliar las aplicaciones del láser al producir un haz coherente, por lo que, los láseres sintonizables suelen ser muy atractivos en la investigación. El primer láser sintonizable del que se tuvo conocimiento fue el *láser de colorante*, en el año de 1966, con el paso del tiempo se han estudiado sus propiedades físicas y las distintas aplicaciones que

tiene en áreas tales como, la espectroscopia, la medicina, procesamiento de materiales, sensado remoto, telecomunicaciones, entre otras muchas más [24].

En general, los sistemas todo-fibra tienen menor sensibilidad a las perturbaciones ambientales y un alta funcionabilidad, ya que una cavidad láser hecha completamente de fibra no se puede desalinear. Con todas estas ventajas, en las aplicaciones donde antes se empleaban láseres de estado sólido, se ha incrementado el uso de los láseres de fibras ópticas, además de que los amplificadores de fibra han ido alcanzado alta eficiencia y gran potencia brindando un modo simple de escalar la potencia de salida de los sistemas de láser de fibra sintonizables [24].

El primer trabajo reportado sobre un láser de fibra dopada con Tm fue a principio de los 90's por un grupo de investigadores encabezados por D. C. Hanna, en donde se hizo uso de una placa birrefringente como elemento de sintonización, se registraron longitudes de onda a partir de 1780 nm hasta 276 nm, es decir, se logró alcanzar un amplio rango de sintonización.

Mecanismos de sintonización

Para algunas aplicaciones, se requiere que la longitud de onda de un haz láser pueda ser ajustada de un cierto rango. En un láser de longitud de onda sintonizable, se usa a menudo algún tipo de filtro óptico ajustable. La sintonización de la longitud de onda es una de las ventajas más importantes de los láseres de fibra, debido a que ofrecen un amplio potencial en diversas aplicaciones, entre ellas están: sensores de fibra óptica, multiplexación por división de longitud de onda (WDM) y prueba de dispositivo de fibra.

Existen muchas técnicas que se aplican para la sintonización de la longitud de onda para láseres de fibra dopada de Yb y Er, tales como el uso de rejillas de volumen, cavidades tipo Fabry-Perot, rejillas de Bragg y filtros interferométricos Mach-Zehnder, entre otros más [25, 26]. Asimismo se pueden usar también cavidades en configuración lineal y

de anillo [24].

A la vez, han sido aplicadas técnicas de sintonización similares al láser de fibra dopada con tulio (LFDT), por ejemplo: el uso de filtros espectrales basados en una rejilla, rejillas de Bragg, rejillas de Bragg volumétricas, rejillas de difracción [27] en conjunto con un Amplificador de Potencia Oscilador Maestro (MOPA- Master Oscillator Power Amplifier) para escalar su potencia, arreglos de micro espejos programables [28], rejillas de Bragg de alta birrefringencia [29,30], el fenómeno de batimiento de modo espacial mediante una fibra taper [31,32], interferómetros Mach-Zehnder [33], filtros Fabry-Perot [34], interferómetros de Sagnac [35–37], controladores de polarización [36,38] y filtros de interferencia multimodal (MMI) [39].

3.1.3. Niveles de Energía del Tulio

En el año de 1999 Stuart D. Jackson y Terence A. King [39], reportaron que las fibras dopadas con Tm muestran tres bandas de absorción a diferentes longitudes de onda para el estado base 3H_6 de los iones del Tm, lo que hace que comúnmente se utilicen fuentes de bombeo con longitudes de onda alrededor de los siguientes valores: 790 nm, 1210 nm y 1630 nm. Esto puede verse gráficamente en la figura 3.1, los recuadros superiores muestran el espectro de absorción del estado excitado para las transiciones $^3H_4 \rightarrow ^3F_{2,3}$ y $^3F_4 \rightarrow ^1G_4$, respectivamente.

Para cada longitud de onda de la fuente de bombeo, se excitarán diferentes niveles de energía, esto es mostrado en la figura 3.2, donde se observa que el estado fundamental o estado base es el nivel 3H_6 (como ya habíamos adelantado antes) y el estado superior causante de la emisión de luz en la región de $2 \mu m$ es 3H_4 , los números entre paréntesis se refieren al tiempo de vida (en μs) para cada nivel de energía, debido a la proximidad de los niveles 3F_2 y 3F_3 , han sido tratados como uno solo. Las W_{ij} 's en el diagrama se refieren a la absorción del bombeo utilizado.

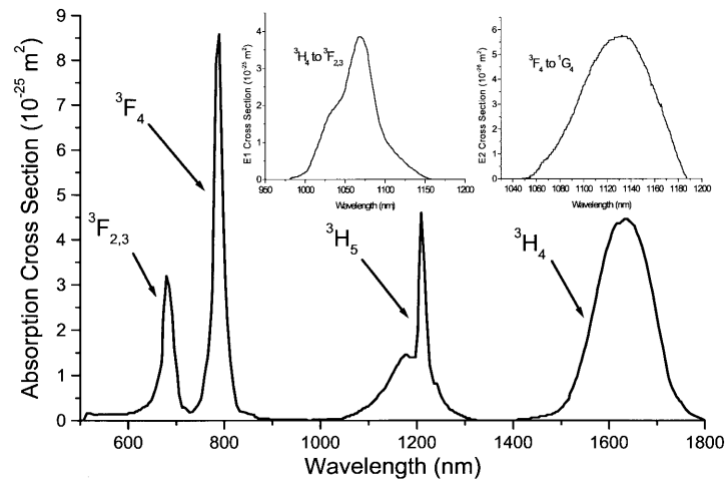


Figura 3.1: Espectro de absorción del estado fundamental de una fibra dopada con Tm.

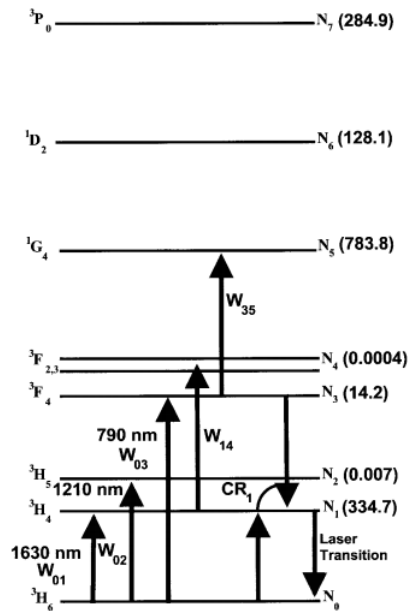


Figura 3.2: Diagrama de los niveles de energía con esquemas de absorción y la transición láser.

Por otro lado, el espectro de emisión es mostrado en la figura 3.3, donde se puede ver un amplio rango de emisión en la región espectral, de 1600 nm a 1200 nm. Así como también su ancho de banda en la mitad con longitud de onda de 300 nm aproximadamente.

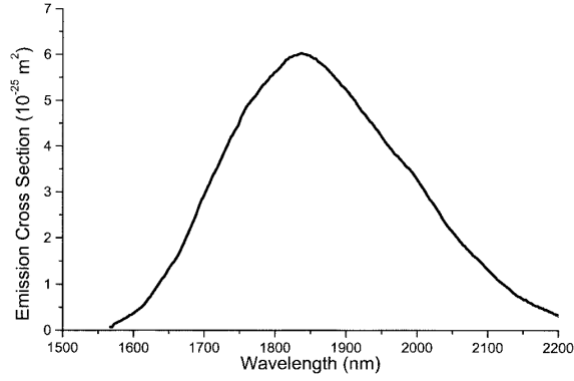


Figura 3.3: Espectro de emisión de la transición ${}^3\text{H}_4 \rightarrow {}^3\text{H}_6$ de una fibra dopada con Tm.

Esquema de Bombeo de ${}^3\text{H}_6 \rightarrow {}^3\text{F}_4$

Las ecuaciones del cambio en el tiempo para los 4 niveles de energía más bajos del Tm^{+3} (ver figura 3.2) en cualquier punto a lo largo de la longitud de la fibra cuando el nivel de energía ${}^3\text{F}_4$ es excitado, son las siguientes:

$$\begin{aligned} \frac{dN_0}{dt} = & \sum_{i=1}^3 A_{i0}N_i + \Gamma_1N_1 - W_{03} - CR_1 - CR_2 \\ & + c[S_f(z) + S_r(z)] [\sigma_e(\lambda_s)N_1 - \sigma_a(\lambda_s)N_0], \end{aligned} \quad (3.1)$$

$$\begin{aligned} \frac{dN_1}{dt} = & \sum_{i=2}^3 A_{i1}N_i + \Gamma_2N_2 - [A_{10} + \Gamma_1] + 2CR_1 + 2CR_2 \\ & + c[S_f(z) + S_r(z)] [\sigma_e(\lambda_s)N_1 - \sigma_a(\lambda_s)N_0], \end{aligned} \quad (3.2)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = A_{32}N_3 + \Gamma_3N_3 - \left[\sum_{j=0}^1 A_{2j}\Gamma_2 \right] N_2 - CR_2, \quad (3.3)$$

$$\frac{dN_3}{dt} = W_{03} - \left[\sum_{j=0}^2 A_{3j}\Gamma_3 \right] N_3 - CR_1, \quad (3.4)$$

donde

- W_{03} : Es la tasa de absorción del bombeo local, dada por la ecuación (3.5)

$$W_{03} = \sigma_a(\lambda_p) [P_f(z) + P_r(z)] N_0. \quad (3.5)$$

- A_{ij} : Es el termino que representa las razones de transición espontánea apropiadas para el Tm^{+3} cuando se dopa en vidrio de sílice.
- $\sigma_e(\lambda_s)$: Es la sección transversal de emisión estimulada de la transición láser a una longitud de onda de salida λ_s .
- $\sigma_a(\lambda_p)$: Es la sección transversal de absorción para la transición ${}^3H_6 \rightarrow {}^3F_4$ con longitud de onda de bombeo λ_p .
- $\sigma_a(\lambda_s)$: Es la sección transversal de absorción para la transición ${}^3H_6 \rightarrow {}^3H_4$ con longitud de onda de bombeo λ_s .
- Γ_i : Es la proporción de transición no radiactiva.
- c : Es la constante de la velocidad de la luz.

También se encuentran los mecanismos de relajación cruzada que funcionan cuando el nivel de energía 3F_4 es bombeado directamente y estos están dados por

$$CR_1 = k_{3101}N_3N_0 - k_{1310}N_1^2$$

(Relajación cruzada: ${}^3F_4, {}^3H_6 \rightarrow {}^3H_4, {}^3H_4$), (3.6a)

$$CR_2 = k_{2101}N_2N_0 - k_{1012}N_1^2$$

(Relajación cruzada: ${}^3H_5, {}^3H_6 \rightarrow {}^3H_4, {}^3H_4$), (3.6b)

donde k representa parámetros espectroscópicos.

Por otro lado, el avance y retroceso de la propagación de campos de bombeo, $P_{f,r}(z)$ (donde el subíndice f corresponde al avance por su palabra en inglés forward y el subíndice r corresponde al retroceso por su palabra en inglés reverse) se repiten a lo largo de la longitud de la fibra de acuerdo a

$$\frac{dP_{f,r}(z)}{dz} = \mp P_{f,r}(z) [\sigma_a(\lambda_p)N_0(z) + \delta_p], \quad (3.7)$$

donde δ_p representa la absorción intrínseca del vidrio patrón a la longitud de onda del bombeo (fijado en $1.2 \times 10^{-2} \text{ m}^{-1}$). Notar que el signo negativo en (3.7) se relaciona con la

dirección de avance (+z) y el signo positivo con la dirección de propagación en retroceso (-z).

La propagación de avance y retroceso de campo radiación láser $S_{f,r}(z)$ fueron iteradas a lo largo de la longitud de la fibra de acuerdo con:

$$\frac{dS_{f,r}(z)}{dz} = \pm S_{f,r}(z) [\sigma_e(\lambda_s)N_1(z) - \sigma_a(\lambda_s)N_0(z) - \delta_s], \quad (3.8)$$

donde δ_s es la absorción intrínseca por el vidrio huésped a la longitud de onda láser (fijado en $2.3 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1}$). El signo positivo en (3.8) está relacionado con la dirección de avance (+z) y el signo negativo a la dirección de propagación en retroceso (-z).

Los campos de radiación de bombeo fueron sujetos a las condiciones de contorno $P_r(L) = R_2 P_f(L)$ y $P_f(0) = R_1 P_r(0) + P_{\text{lanzada}}$ donde R_1 y R_2 son las reflectividades de los espejos de entrada y salida, respectivamente, a la longitud de onda de bombeo, y P_{lanzada} es la potencia de bombeo lanzada dentro del núcleo de la fibra. El campo dentro de la cavidad láser es sujeto a las condiciones de contorno: $S_r(L) = R_2 S_f(L)$ y $S_f(0) = R_1 S_r(0)$ donde en este caso, las reflectividades se refieren a aquellas a la longitud de onda del láser, L es la longitud de la fibra. Notar que se asumió que los campos de bombeo y láser se superponían entre sí y con la distribución de iones dopantes completamente.

Esquema de Bombeo de ${}^3\text{H}_6 \longrightarrow {}^3\text{H}_4$

En el caso donde el nivel superior del láser ${}^3\text{H}_4$ es bombeado directamente, el sistema de ecuaciones involucra a (3.1) y (3.2) sin los procesos de relajación cruzada.

La ecuación (3.1) ahora contiene los términos $-W_{01} + W_{10}$ (con W_{03} omitido) y donde W_{10} representa la desexcitación del nivel de energía ${}^3\text{H}_4$ porque el espectro de emisión de fluorescencia se solapa con una porción del espectro de absorción del bombeo, esto se puede consultar en las figuras 3.1 y 3.3.

$$\begin{aligned} \Rightarrow \frac{dN_0}{dt} = & A_{10}N_1 + \Gamma_1 N_1 - W_{01} + W_{10} \\ & + c[S_f(z) + S_r(z)] [\sigma_e(\lambda_s)N_1 - \sigma_a(\lambda_s)N_0]. \end{aligned} \quad (3.9)$$

Y la ecuación (3.2) contiene los términos $-W_{01} + W_{10}$,

$$\Rightarrow \frac{dN_1}{dt} = -[A_{10} + \Gamma_1] N_1 - c[S_f(z) + S_r(z)] [\sigma_e(\lambda_s)N_1 - \sigma_a(\lambda_s)N_0] + W_{01} - W_{10}. \quad (3.10)$$

Notar que:

- W_{10} : Es la razón de desexcitación local, dada por:

$$W_{10} = \sigma_e(\lambda_p) [P_f(z) + P_r(z)] N_1, \quad (3.11)$$

donde $\sigma_e(\lambda_p)$ representa la sección transversal de emisión a la longitud de onda de bombeo. Ya que ahora existe emisión a la longitud de onda de bombeo, la ecuación (3.7) se convierte en la siguiente expresión:

$$\frac{dP_{f,r}}{dz} = \mp P_{f,r}(z) \{[\sigma_a(\lambda_p)N_0(z) - \sigma_e(\lambda_p)N_1(z)]\}. \quad (3.12)$$

Lo que este desarrollo adicional representa es la emisión estimulada que empuja los fotones de bombeo nuevamente al campo de bombeo. Hay que notar que las ecuaciones anteriores toman en cuenta dos niveles de energía, pero estos son bandas de energía con subniveles; en N_1 estos subniveles actúan uno de ellos como el nivel superior y otro como el nivel metaestable, de lo contrario no se generaría la emisión láser.

3.2. Teoría de los Tapers

Los tapers son resultado de un proceso que se lleva a cabo en las fibras ópticas al cual se le llama *fibras taper*, esta palabra está en inglés, pero su mejor interpretación al español es “fibra óptica estrechada”, simplemente al escuchar esta palabra ya podemos darnos

una idea de lo que se trata. Las fibras taper tienen sus primeras investigaciones intensivas reportadas en el año 1986 [40,41], sin embargo, en años recientes se ha recuperado el interés en ellas, lo que ha llevado a reportar varios trabajos para su aplicación, como lo son el campo de los sensores [42], generación de supercontinuo [43], acopladores ópticos [44], y filtros [45].

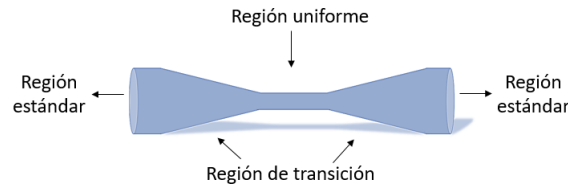


Figura 3.4: Fibra taper indicando las regiones: región uniforme o de cintura, región estándar y región de transición.

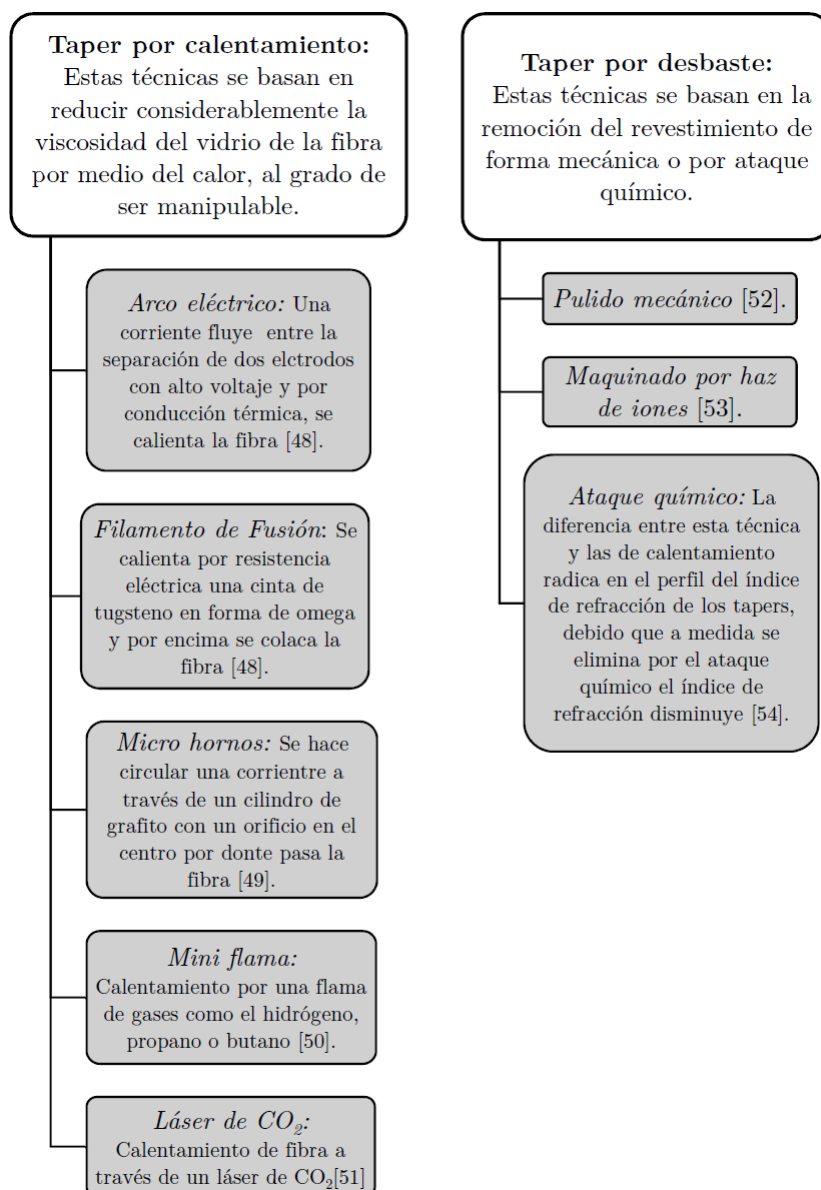
Las fibras ópticas estrechadas fundidas bicónicas o simplemente *tapers*, son fibras ópticas a las cuales se les ha reducido el diámetro considerablemente a lo largo de una sección. Es posible llegar a conseguir diámetros de cintura de hasta $1 \mu\text{m}$, sin embargo es importante tener presente que para diámetros que son cada vez más pequeños la fragilidad y la dificultad de manipular la fibra aumentan [46].

En el proceso tenemos en un inicio una fibra óptica de dimensiones estándar, y su geometría final (una vez que la fibra ha sido estrechada) se compone de 3 regiones: región uniforme o de cintura, región estándar y región de transición (transición para arriba en el lado izquierdo y transición para abajo en el lado derecho), como se ve en la figura 3.4. La finalidad de estrechar la fibra es alterar de forma pasiva la luz que se propaga en el interior de ella, por ejemplo: modificando la NA o alterando la densidad de potencia óptica en la superficie que rodea a la cintura taper [47].

3.2.1. Métodos de Fabricación

Con el paso del tiempo se han desarrollado diversas técnicas de fabricación de los tapers, que se clasifican en dos categorías: por calentamiento y por desbaste. En estas

categorías existen una variedad de métodos de fabricación, a continuación se describen brevemente.



3.2.2. Características de una Fibra Taper

Una fibra taper da un efecto de interferencia modal, esto ocurre en la transición para abajo del taper, en donde la propiedad de confinamiento de la luz en el núcleo se rompe y a partir de este hecho se generan dos modos guiados: uno sigue siendo el modo funda-

mental y otro modo de orden superior. La diferencia de fase entre estos modos genera el patrón de interferencia. En la región de la transición para arriba del taper, nuevamente los dos modos vuelven a acoplarse en uno solo, el haz que viaja de aquí en adelante lleva la información de la interferencia que se generó en la región uniforme del taper, cabe mencionar que es sensible a cambios en el medio [55].

La diferencia de fase se representa con el símbolo $\Delta\phi$ y es generada por la diferencia entre índice de refracción efectivo y los modos de propagación Δn_{eff} y por la distancia de interacción (longitud de la cintura) L [56]:

$$\Delta\phi = \frac{2\pi\Delta n_{eff}L}{\lambda}, \quad (3.13)$$

donde λ es la longitud de onda de propagación.

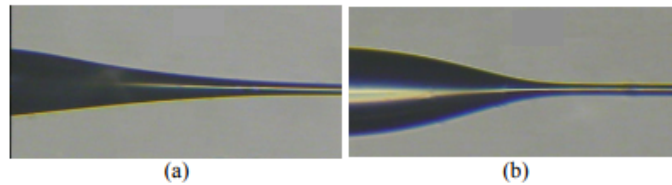


Figura 3.5: Tipos de taper: (a) adiabático y (b) no-adiabático.

Los tapers se dividen en dos categorías: adiabáticos y no-adiabáticos [59], como se observa en la figura 3.5. Los adiabáticos se caracterizan por que las regiones de transición presentan un ángulo muy pequeño, con el fin de que el acoplamiento se dé de forma muy suave, así de este modo se obtienen muy bajas pérdidas en el proceso, y la mayor parte de la radiación se mantiene en el modo fundamental de la fibra [57].

De lo contrario, en un taper no-adiabático, se genera un cambio abrupto del diámetro de la fibra (un ángulo considerablemente grande). Así el acoplamiento se da entre el modo fundamental y un modo de orden superior, generando un interferómetro modal que se puede comparar con un interferómetro de Mach-Zehnder [58].

Capítulo 4

Desarrollo y Resultados Experimentales

En este capítulo se detalla la caracterización y los resultados experimentales del láser de fibra óptica con emisión en la región de $1.8 \mu\text{m}$, usando como medio activo una fibra dopada con Tm (TDF, por sus siglas en inglés *thulium-doped fiber*). Una fibra taper es usada como filtro espectral en una cavidad de anillo.

La primera parte corresponde al procedimiento detallado sobre la fabricación de los tapers, con una fibra óptica convencional de tipo monomodo. También esta parte corresponde a la caracterización de los dispositivos que se utilizaron en la construcción del láser de fibra dopada con Tm (TDFL - *thulium-doped fiber laser*), tales como láser de bombeo y TDF. La caracterización de la potencia de bombeo provista por el láser de bombeo de 1567 nm (hecho en el laboratorio) en función de la potencia proporcionada por el láser de 1567 nm , constituyen un importante parámetro para la implementación del TDFL, ya que con ella se establece la potencia óptica necesaria para excitar los iones de la TDF. La caracterización de estos dispositivos permitirá comprender su funcionamiento dentro del arreglo experimental en relación con el desempeño del láser.

En la segunda parte, se muestran los resultados experimentales del desempeño del TDFL. La operación láser en la región de $1.8 \mu\text{m}$ se basa en un taper empleado como filtro espectral. Posteriormente, se presentan resultados de la sintonización del láser a través del desplazamiento de la longitud de onda de la línea láser, por medio de la aplicación

de curvatura en el filtro espectral (taper). Las mediciones se realizaron con un analizador de espectros ópticos (OSA) y un medidor de potencia. Las características de estos instrumentos de medición se detallaron en el capítulo 2. Este capítulo será base y fundamento para la escritura del último, donde se hablará acerca de las conclusiones que se obtuvieron con este trabajo experimental.

4.1. Fabricación de los Tapers

Para la fabricación de los tapers, se utilizó fibra óptica estándar (Corning SMF-28) monomodo de $125\ \mu\text{m}$ de diámetro. Para el taper de fibra se tomó un segmento de fibra aproximadamente de 90 cm, esto facilitó los empalmes, ya que entre más corto es el segmento de fibra seleccionado, más complicado es su manipulación, debido a la fragilidad del taper. Una vez cortado el segmento de fibra, se tiene que ubicar la mitad y retirar con delicadeza, con ayuda de nuestras uñas un segmento del polímero del revestimiento, con una medida de entre 1 a 2 cm aproximadamente, para que la máquina empalmadora realice el trabajo de estiramiento mediante el calor. El segmento de fibra libre de su revestimiento se limpió con un paño con alcohol isopropílico para remover la mayor cantidad de impurezas posibles.

Primero que nada, se conecta la empalmadora FSM-100P+ a la corriente, se enciende presionando en los botones la tecla de control ON/OFF, se coloca en la terminal USB de la empalmadora el cable de datos que va a la PC, con el Software FPS viene también una aplicación de nombre “data conection” la cual tiene la función de corroborar que haya conexión entre la máquina empalmadora y la computadora, si la aplicación muestra un video de lo que se está proyectando en las pantallas derecha e izquierda de la empalmadora, en efecto hay conexión.

El siguiente paso es ir a la aplicación taper que se encuentra en las barras de menú, en donde se muestra una ventana donde se observa un página con parámetros que se

pueden modificar para crear el perfil-taper deseado, el cual se muestra en la figura 4.1. El perfil-taper constituye las propiedades físicas del taper tales como, la transición para arriba a , la transición para abajo c , el diámetro de la cintura d , y la longitud del taper b . La elección del perfil taper es importante para la propagación de la luz en la fibra taper.

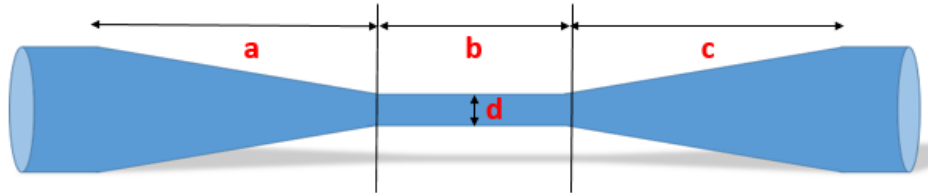


Figura 4.1: Perfil taper.

Siguiendo con el proceso de fabricación en la barra de controles con un clic en el botón “INITIATE” se comienza a crear el taper, se abre la cubierta de aire de la empalmadora, se ubican cuatro abrazaderas de la fibra, dos a un lado izquierdo de los electrodos, dos a un lado derecho, se levantan, luego se coloca la fibra justo en un canal con forma-V y se bajan las abrazaderas, se vuelve a cerrar la cubierta de aire, luego hay que dirigirse al menú de controles en FPS y dar clic en la opción TAPER para comenzar el proceso de estrechamiento en la fibra óptica.

Se puede observar en una las pantallas LCD de la máquina un video en vivo de lo que está sucediendo dentro de la empalmadora, cuando el proceso termina la pantalla derecha de la máquina da un aviso, entonces en FPS se hace la medición, dando clic en el botón “MEASURE” y de esta forma se comienza a ejecutar una medición punto por punto del taper final basado en la configuración actual, arrojando una gráfica con datos.

Posteriormente, luego de haber terminado con la medición se abre la cubierta de aire de la empalmadora, se levantan las cuatro abrazaderas, se saca la fibra, se vuelven a dejar las abrazaderas y la cubierta en su posición inicial, para poder llevar a cabo otro proceso de fabricación, en los botones de control de la aplicación Taper dando clic en “RESET” se reinicia la máquina para empezar una vez más el mismo proceso, por si es necesario una

nueva fabricación de fibra taper.

Cuando se empezó a llevar la manipulación de la máquina se fabricaron 6 tapers con parámetros que se muestran en la tabla 4.1, estos fueron como prueba para comprender todo el proceso de fabricación, así como de manipulación, ya que al ser fibras estrechas en una parte se vuelven sumamente frágiles, difíciles de manipular y trasladar. También con estos primeros tapers se observó cómo se iba modificando el perfil-taper al ir cambiando los valores de cada parámetro.

Primeros Tapers				
Transición para arriba: a (mm)	Longitud de la cintura: b (mm)	Transición para abajo: c (mm)	Diámetro de la cintura: d (μm)	Ángulo: Ω (grados)
4	2	4	50	0.537
2	2	2	50	1.074
1	1	1	50	2.148
1	1	1	20	3.005
2	2	2	20	1.504
4	2	4	20	0.752

Tabla 4.1: Primeros tapers fabricados.

Para investigar los efectos de los perfiles-taper, el estudio se dividió en tres partes, donde los parámetros principales para cada experimento son la longitud-taper b , el diámetro-taper de la cintura d , ángulo-taper Ω ; que dependen de las regiones de transición para arriba y para abajo a y c en la figura 4.1, donde el diámetro de la fibra disminuye y aumenta gradualmente.

Se fabricaron 3 fibras taper variando el parámetro b , para esto, se fijaron los parámetros

de transición $a = c = 4$ mm, y el diámetro de la cintura taper $d = 25 \mu\text{m}$. La variación fue de $b = 10, 8$ y 5 mm como se observa en la tabla 4.2.

Variando la longitud-taper				
a (mm)	b (mm)	c (mm)	d (μm)	Ω (grados)
4	10	4	25	0.716
4	8	4	25	0.716
4	5	4	25	0.716

Tabla 4.2: Tapers con variación de la longitud-taper.

A continuación en la figura 4.2 se muestra una foto de estas fibras taper con variación de longitud taper, que son casi imperceptibles, por varios factores; calidad de cámara, luz y estrechamiento abrupto de fibra.

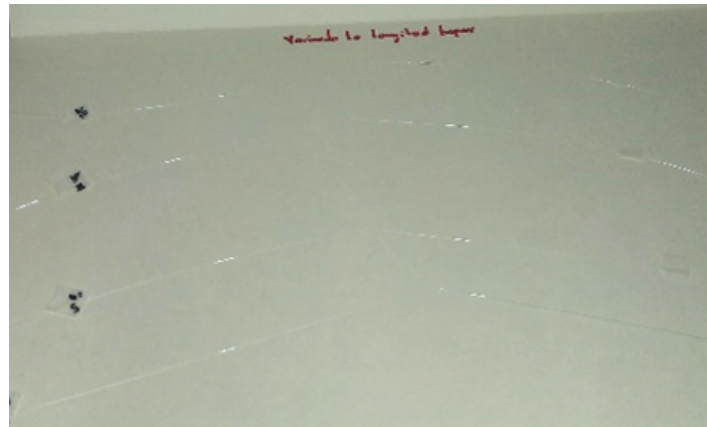


Figura 4.2: Variación de la longitud-taper.

Se fabricaron 6 tapers más variando el diámetro-taper, para esto se fijaron los parámetros $a = c = 4$ mm, $b = 10$ mm y se hizo una variación del parámetro d entre 35 hasta 13 μm , los valores se muestran en la tabla 4.3. Se intentó que el diámetro-taper más pequeño fuera de 10 μm , pero debido a que la empalmadora FSM100P+ trabaja en base a una

relación llamada *razón taper*, y esta relación según el manual de usuario está dada por:

$$\text{razón taper} = \frac{\text{diámetro de la fibra}}{\text{diámetro de la cintura}}, \quad (4.1)$$

donde la máxima razón taper tiene valor de 10 y el diámetro de la fibra un valor de $125 \mu\text{m}$, como se había mencionado anteriormente. Por lo tanto, el valor mínimo que puede tener el diámetro de la cintura es de $12.5 \mu\text{m}$. Así que se optó por poner el diámetro más pequeño de $13 \mu\text{m}$, en la tabla 4.3 se muestra a detalle el perfil de los tapers con estas variaciones. La fotografía de estos 6 tapers se puede observar en la figura 4.3.

Variando el diámetro-taper				
a (mm)	b (mm)	c (mm)	d (μm)	Ω (grados)
4	10	4	35	0.645
4	10	4	30	0.680
4	10	4	25	0.716
4	10	4	20	0.752
4	10	4	15	0.788
4	10	4	13	0.802

Tabla 4.3: Tapers con variación del diámetro-taper.

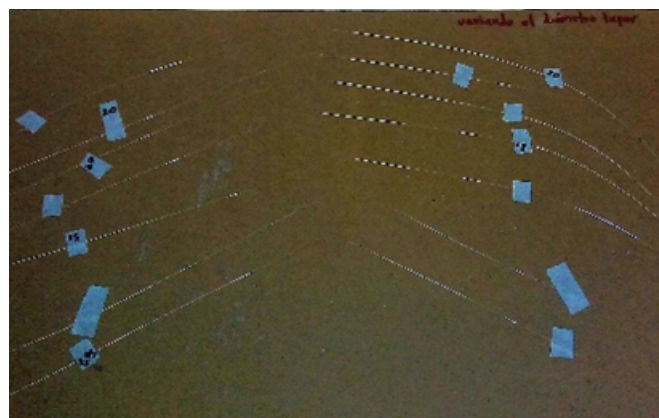


Figura 4.3: Variación del diámetro-taper.

Por último se fabricaron 5 filtros de fibra taper, variando el ángulo-taper. Para lograr esta variación se ajustaron los parámetros de transición a y c , ya que sólo se pueden modificar los parámetros que son parte del perfil-taper. Se hizo la variación con los siguientes valores: $a = c = 5, 4, 2, 1$ mm dejando fijos $b = 8$ mm y $d = 20$ μm , obteniendo los valores de los ángulos que se muestran en la tabla 4.4. La fotografía de estos tapers se puede observar en la figura 4.4.

Variando el ángulo-taper				
a (mm)	b (mm)	c (mm)	d (μm)	Ω (grados)
5	8	5	20	0.602
4	8	4	20	0.752
3	8	3	20	1.003
2	8	2	20	1.504
1	8	1	20	3.005

Tabla 4.4: Tapers con variación del ángulo-taper.

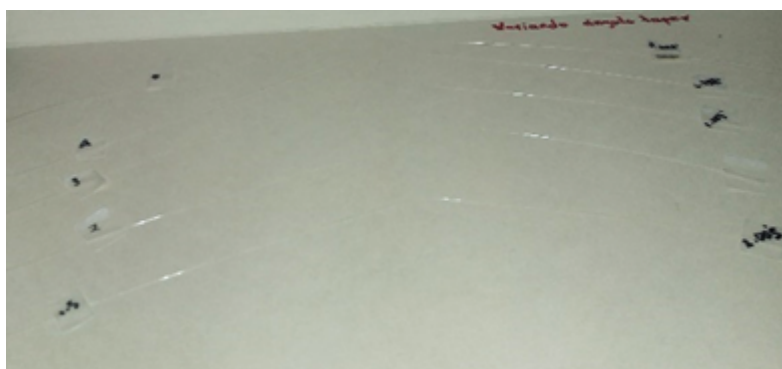


Figura 4.4: Variación del ángulo-taper.

4.2. Caracterización de los Elementos Básicos para la Construcción del Láser de Tulio

En este apartado se presentan los resultados experimentales de la caracterización de los componentes que forman la cavidad láser, tales como, láser de bombeo, WDM, TDF y taper.

Primeramente se caracterizó el láser de bombeo utilizado para excitar a los iones de la TDF, es un láser de fibra dopada con Er/Yb en configuración de anillo en onda continua hecho previamente en el laboratorio, el cual es bombeado por un láser de 1567 nm.

La figura 4.5 muestra el arreglo experimental para caracterizar la potencia de salida del láser de bombeo, a través del WDM y de la TDF. El láser de bombeo está empalmado con el WDM (multiplexor por división de longitud de onda) empleado para acoplar la señal de bombeo a la TDF. En el puerto de salida del WDM es empalmado 3.5 m de TDF.

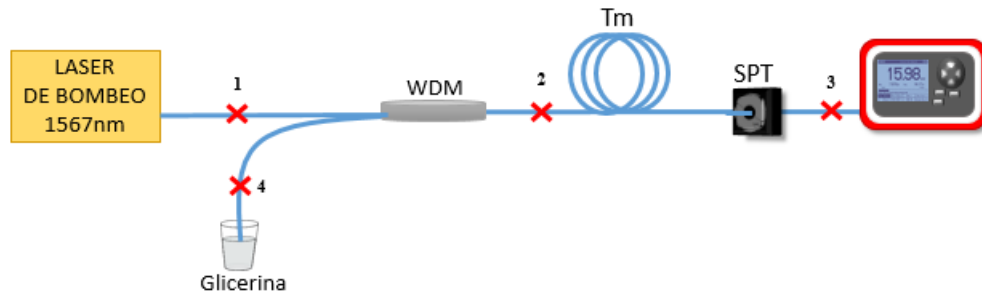


Figura 4.5: Medición del OSA en la salida 3 del arreglo de caracterización.

En la figura 4.6 se presentan tres gráficas que corresponden a los resultados experimentales de potencias de salida del láser de bombeo en función de la corriente de bombeo. Los resultados fueron obtenidos con el medidor de potencia en los puntos 1, 2 y 3 de la figura 4.5. La señal de bombeo que atraviesa la fibra dopada sufre una atenuación debido a que parte de ella es absorbida por los iones de Tm, lo que también depende de la longitud

de la fibra. En la figura 4.6 se puede observar que las curvas para 1 y 2 (cuadros negros y círculos rojos) tienen el mismo comportamiento, correspondientes a la entrada y salida en el WDM, teniendo una eficiencia de acoplamiento de bombeo de aproximadamente 94 %. La curva 3 (triángulos azules) es la señal de bombeo que pasa a través de la fibra dopada medida en el punto 3, la cual muestra una atenuación considerable, atribuible a la absorción de los iones de la fibra dopada, al empalme en 1, 2, y a las pérdidas intrínsecas del WDM.

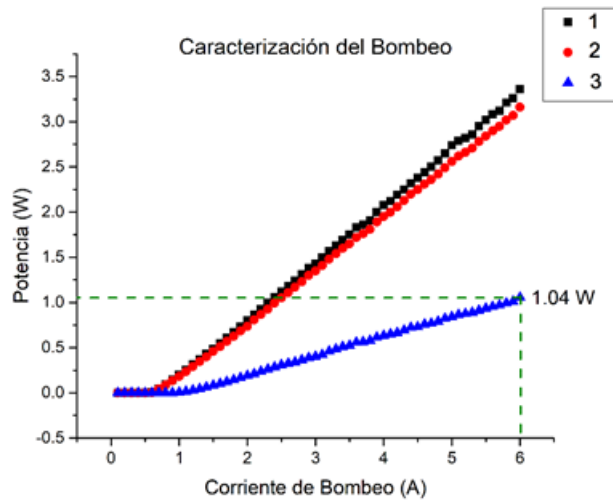


Figura 4.6: Potencia del láser de bombeo, del WDM y de la TDF.

Se midió el espectro óptico de la emisión espontánea amplificada (Amplified stimulated emission, ASE) en el punto 3 en propagación y en el punto 4 en contrapropagación. En la figura 4.7a se muestra el arreglo experimental para obtener el espectro del punto 3, se tuvo que hacer un empalme con un conector y la salida hacia el OSA y en la otra salida con el número 4, se hizo un corte transversal para luego sumergirla en un recipiente con glicerina, esto para evitar la reflexión, mejor conocida como *reflexión de Fresnel*, que es la porción de retorno de un ligero incidente de una interface entre dos medios con dos índices de refracción diferentes, el índice de refracción del vidrio es aproximadamente de 1.520 y el del aire es de 1.000, por lo que estos difieren significativamente, esta es la razón por la que se usa la glicerina, ya que tiene un índice de refracción de 1.473, que es más

cercano al del vidrio y sumado al corte con ángulo, se evita la reflexión del haz de luz en la fibra.

Análogamente para medir el espectro óptico en contrapropagación de la salida del punto 4 (ver figura 4.7b), se empalmó con un conector y la salida se conectó con el OSA y se sumergió el otro extremo de la salida 3 con un corte transversal en la fibra óptica en un recipiente con glicerina. Estas mediciones se muestran en la figura 4.8. Esta emisión depende de la potencia de bombeo y de la longitud de la fibra dopada. La curva de emisión muestra un pico centrado a longitud de onda de 1880 nm. Como se observa en la figura 4.8, el umbral de ASE es mostrada a partir de 198 mW, las gráficas de potencia ASE tienen un ancho de banda de 100 nm cuando es bombeado con 1.5 A equivalente a una potencia de 488 mW de bombeo de 1567 nm.

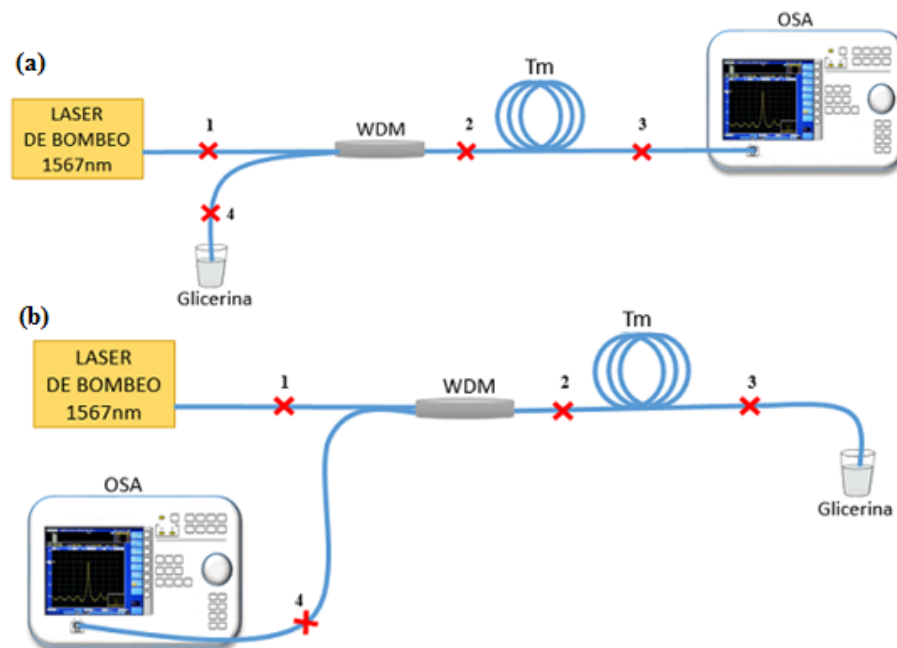


Figura 4.7: Medición del OSA en: (a) la salida 3 y (b) la salida 4.

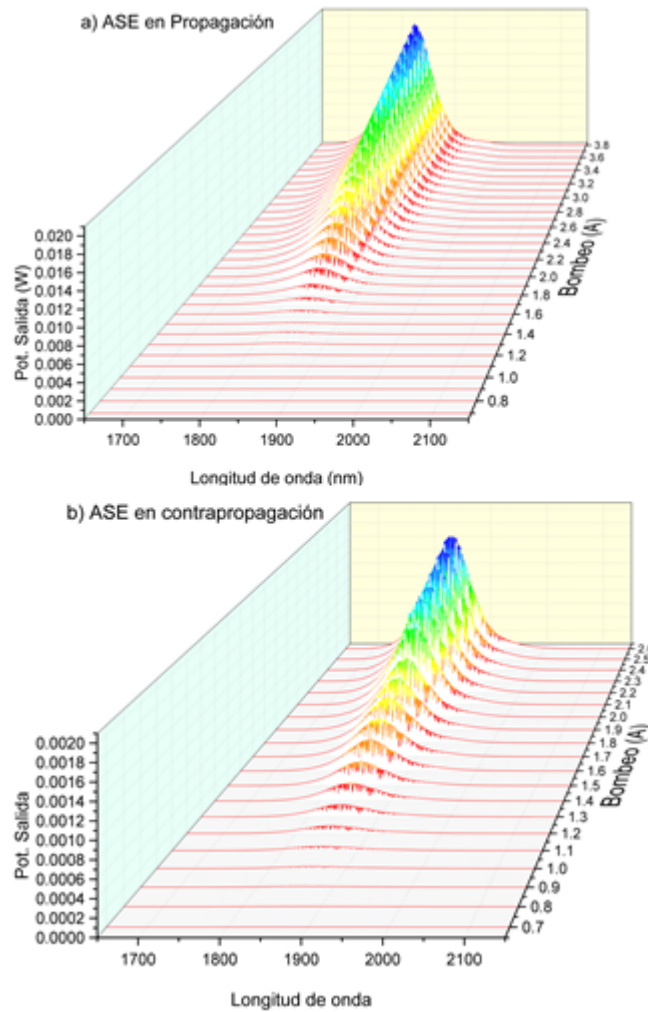


Figura 4.8: Espectros del ASE de la TDF: (a) propagación y (b) contrapropagación.

4.3. Caracterización de los Tapers

Como se vio en la sección de la fabricación de los tapers, se usó para nuestro experimento un filtro de fibra taper, fabricado con una fibra estándar monomodo SMF-28, mediante la empalmadora de fusión Fujikura FSM-100P+. Para el taper de fibra se tomó un pequeño segmento de la fibra estándar, al cual se le ha retirado el recubrimiento de polímero, este segmento es estrechado a manera de producir una fibra taper siguiendo cada uno de los pasos que se detallaron en el capítulo 2, en la sección del funcionamiento

de la empalmadora Fujikura FSM-100P+.

Para hacer un estudio más detallado de los efectos de distintos perfiles-taper, se fabricaron 3 fibras taper con diferente longitud-taper, 6 fibras taper con diferente diámetro-taper y 5 fibras taper con diferente ángulo-taper.

La caracterización se hizo mediante un arreglo experimental como el que se muestra en la figura 4.9, donde aún ha sido cerrado la cavidad de anillo láser, para tomar medidas del espectro de transmisión, esta medición es reportada a la salida de la señal en la fibra taper.

El arreglo experimental está compuesto por un fuente láser de bombeo de 1567 nm que va a un WDM de 1550/2000 nm, va conectado a la vez con 3.5 m de TDF, con su extremo en un recipiente que contiene glicerina, luego, la salida de la señal del WDM se fijó con un poco de cinta masking-tape a una plataforma de traslación micrométrica, donde se colocó el filtro taper y subsecuentemente se colocó la fibra con cinta masking-tape a otra plataforma de traslación micrométrica, con el fin de que el filtro quede suspendido en el aire para evitar el contacto con impurezas del entorno, también se dejó en medio de las dos bases de traslación al taper para una mejor manipulación, por último la salida de la señal del filtro se conectó al analizador de espectros ópticos (OSA, Yokogawa AQ6375).

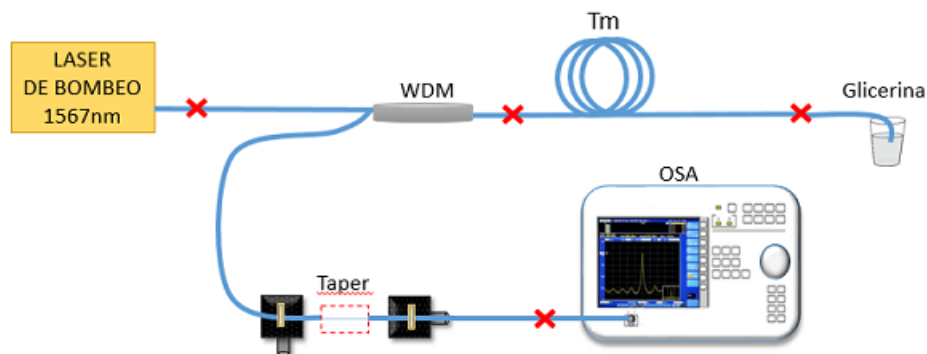


Figura 4.9: Arreglo experimental para la caracterización de los tapers.

La señal de entrada para caracterizar los filtros se muestra en la figura 4.10, esta señal

es la respuesta espectral de la ASE de la TDF en contrapropagación. Los valores obtenidos para el ancho de la amplitud a la mitad del máximo (FWHM, Full Width Half Maximum) son aproximadamente de 92 nm, para una potencia de bombeo de 564 mW. El espectro medido por el OSA es de 1675 nm a 2075 nm con longitud de onda de central de ~ 1850 nm.

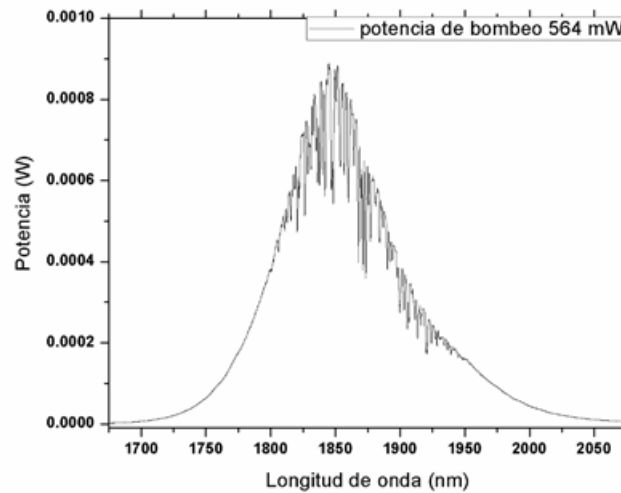


Figura 4.10: Respuesta espectral ASE en configuración de contrapropagación de la TDF.

Se caracterizaron primero los tapers correspondientes a la variación en la longitud de la cintura b del taper, cuyos valores corresponden con la tabla 4.2. En la figura 4.11 se observa la respuesta espectral del tapers. En la figura 4.11a se muestra la variación de longitud de cintura con $b = 10$ mm, en el cual se puede observar un FSR ~ 52.9 nm y una relación de extinción que va desde 0.25 dB hasta 1 dB aproximadamente. En la figura 4.11b se muestra la respuesta espectral del segundo taper con longitud de cintura de $b = 8$ mm, el cual tiene un FSR ~ 65.1 nm y una relación de extinción de 0.75 dB aproximadamente, por último en la figura 4.11c se muestra la respuesta espectral del tercer taper con longitud de cintura de $b = 5$ mm, el cual tiene un FSR ~ 85.18 nm y una relación de extinción aproximada de 1 dB. Se puede notar que, el periodo de transmitancia aumenta conforme se disminuye la longitud de la cintura del taper.

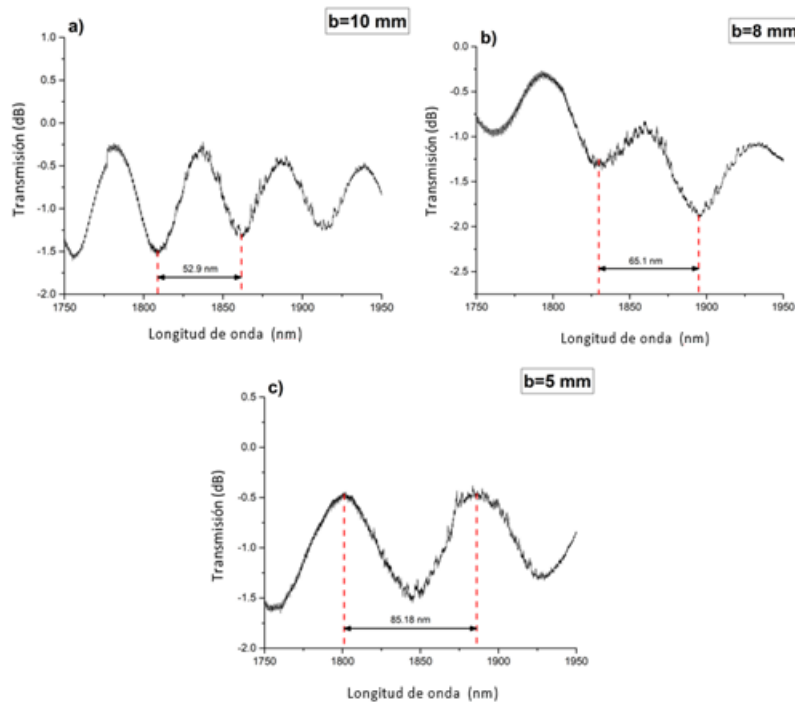


Figura 4.11: Respuesta espectral de los tapers para diferentes longitudes de cintura: (a) $b = 10$, (b) $b = 8$ y $b = 5$ mm.

Posteriormente se caracterizaron los tapers correspondientes a la variación del diámetro de la cintura d del taper, cuyos valores corresponden con la tabla 4.3. La figura 4.12a muestra la respuesta espectral con un diámetro de la cintura para el taper de $d = 35 \mu\text{m}$ se tiene un FSR ~ 120 nm y una relación de extinción aproximada de 1.5 dB. La figura 4.12b muestra la respuesta espectral del taper para un diámetro de cintura del taper $d = 30 \mu\text{m}$ donde se observa un FSR ~ 79 nm y una relación de extinción aproximada de 1.5 dB. La figura 4.12c muestra la respuesta espectral del taper con un diámetro de la cintura del taper $d = 25 \mu\text{m}$ se tiene un FSR ~ 58 nm y una relación de extinción aproximada de 0.75 dB. En la figura 4.12d se muestra la respuesta espectral del taper con un diámetro de cintura $d = 20 \mu\text{m}$ un FSR ~ 46 nm y una relación de extinción aproximada de 2.5 dB. En la figura 4.12e se muestra la respuesta espectral del taper con un diámetro de cintura $d = 15 \mu\text{m}$ un FSR ~ 20 nm y una relación de extinción de 1.5 dB aproximadamente. Por último, en la figura 4.12f se muestra la respuesta espectral del taper con un diámetro

de cintura $d = 13 \mu\text{m}$ se tiene un FSR $\sim 16 \text{ nm}$ y una relación de extinción de 2.5 dB.

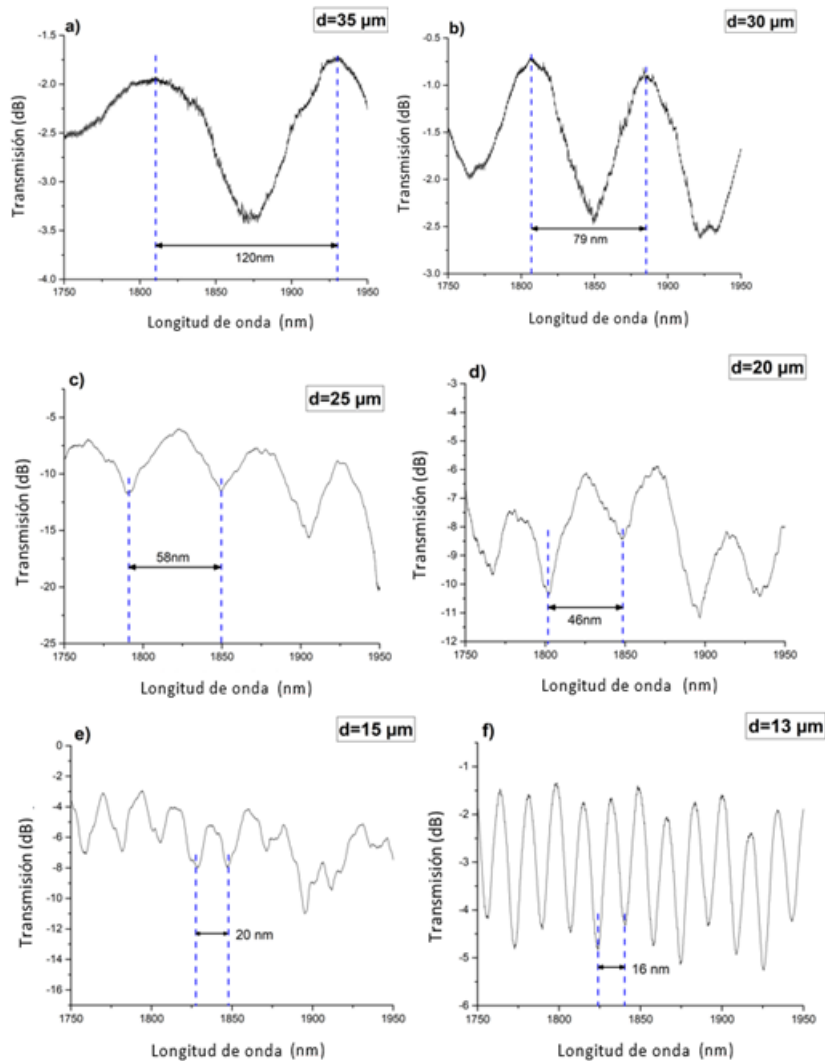


Figura 4.12: Respuesta espectral de los tapers para diferentes diámetros de la cintura:

(a) $d = 35$, (b) $d = 30$, (c) $d = 25$, (d) $d = 20$, (e) $d = 15$ y (f) $d = 13 \mu\text{m}$.

Finalmente, se caracterizaron los tapers correspondientes a la variación del ángulo de las transiciones a y c del taper, cuyos valores corresponden con la tabla 4.4. Las figuras 4.13a, b, c, d y e muestran la respuesta espectral del taper con transiciones de $\Omega = 0.602^\circ$, $\Omega = 0.752^\circ$, $\Omega = 0.1003^\circ$, $\Omega = 1.504^\circ$ y $\Omega = 3.005^\circ$, respectivamente. Con FSR $\sim 46.8 \text{ nm}$, FSR $\sim 44.24 \text{ nm}$, FSR $\sim 40.7 \text{ nm}$, FSR $\sim 38.2 \text{ nm}$, FSR $\sim 44.9 \text{ nm}$, respectivamente y una

relación de extinción aproximada de 0.8 dB, 2 dB, 2.5 dB, 4 dB, 2.5 dB, respectivamente. Con dichos resultados se observó que al variar los ángulos de las transiciones del taper se obtiene un pequeño cambio en el periodo, así como también se observó una mayor profundidad del espectro cuando se disminuyó la longitud de las transiciones a y c .

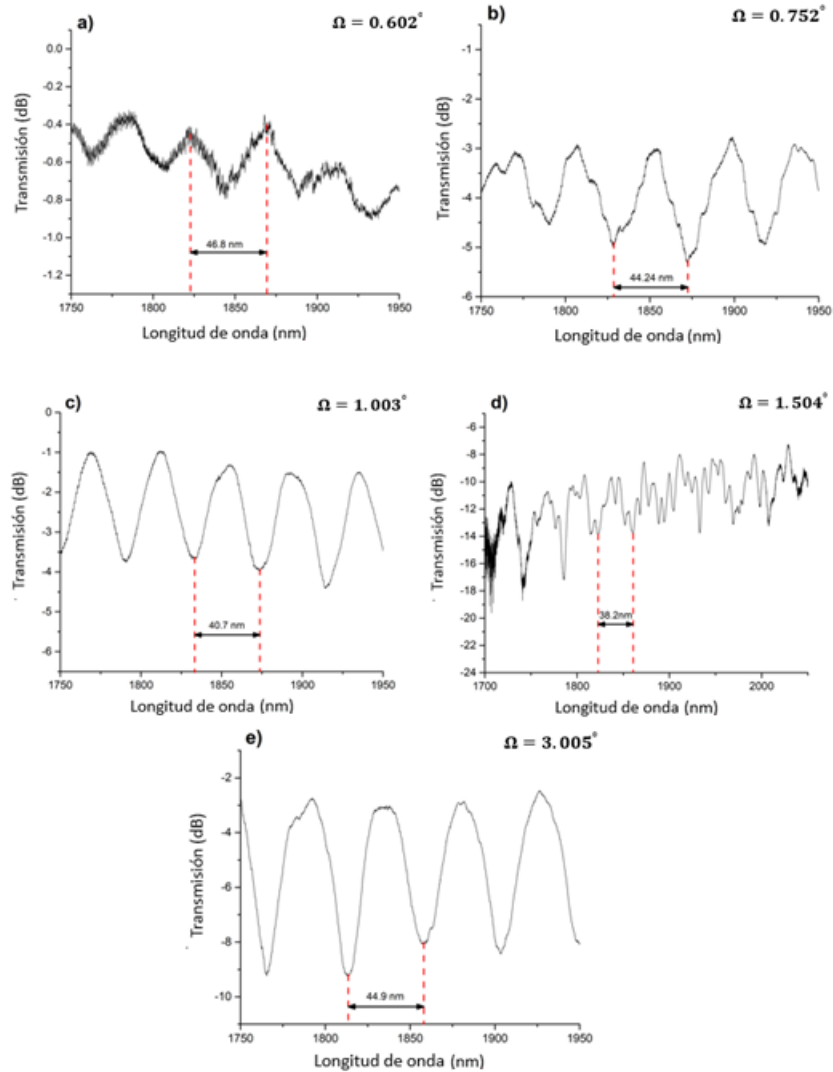


Figura 4.13: Respuesta espectral de los tapers para diferentes transiciones: (a) $a = c = 5$, (b) $a = c = 4$, (c) $a = c = 3$, (d) $a = c = 2$ y (e) $a = c = 1$ mm.

4.4. Construcción del Arreglo Experimental del Láser de Tulio

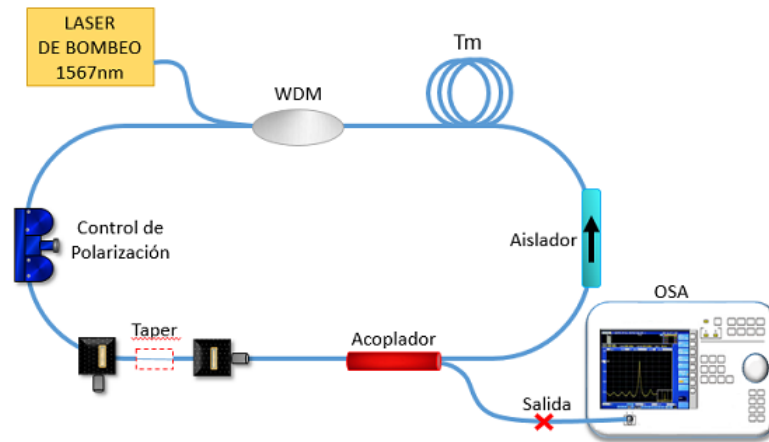


Figura 4.14: Configuración del TDFL.

La estructura del TDFL se muestra en la figura 4.14 en una configuración de cavidad de anillo. Un segmento de 3.5 m de TDF se utiliza como medio de ganancia y es bombeado por una fuente láser de 1567 nm a través de un WDM 1550/2000 nm. Para asegurar una propagación en contra de las manecillas del reloj en la cavidad, la FDT es empalmada a un aislador óptico de 2 μm independiente de la polarización para forzar el funcionamiento unidireccional del láser. Por el otro lado del WDM conectamos un control de polarización (PC) para ajustar la máxima transmisión del filtro durante la sintonización de longitud de onda, luego el PC va acoplado al filtro de fibra taper, el cual es colocado entre dos plataformas de traslación micrométricas con ambos extremos adheridos con cinta, de tal forma que el taper queda suspendido en el aire para evitar el contacto con impurezas. Posteriormente, el filtro es empalmado a un acoplador 50/50, uno de los puertos de salida cierra la configuración de anillo y para monitorear el láser, el otro puerto de salida del acoplador se conecta al OSA. El taper empleado para este arreglo experimental consiste en adelgazamiento de una fibra SMF-28 con los siguientes parámetros, 25 μm de diámetro, transiciones para arriba y abajo de 4 mm y una longitud de 10 mm, esto hace una longitud

total de 18 mm. En la figura 4.15, se muestra una fotografía del arreglo experimental en el laboratorio.

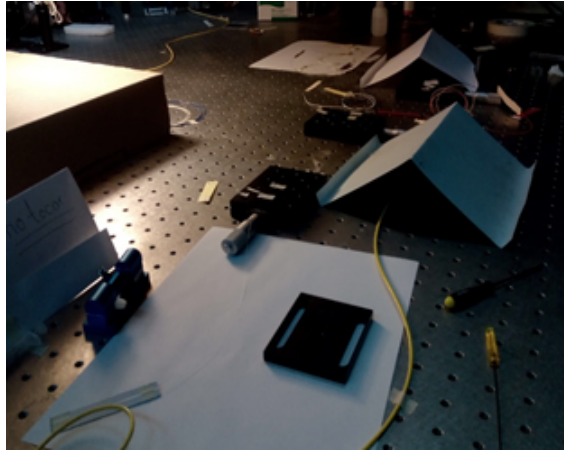


Figura 4.15: Arreglo experimental en el laboratorio.

4.5. Resultados Experimentales

La intención de esta propuesta es alcanzar el punto del mecanismo de sintonización, por lo que se ha contralado la sintonización de la configuración láser por medio de cuatro perturbaciones, que las clasificamos en sintonización por control de polarización (a través del PC) en la cavidad de anillo, sintonización por caída en la fibra taper y por último sintonización por traslación perpendicular en la plataforma taper, estos experimentos fueron realizados a temperatura ambiente.

El límite de elasticidad del taper está directamente afectado por el parámetro d del perfil-taper que corresponde al diámetro de su cintura, y con el objetivo de probar la sintonización de longitud de onda de nuestro filtro se ha optado por las últimas dos clasificaciones de sintonización mencionadas en el párrafo anterior como una forma de aplicar la tensión a nuestro filtro, ya que el punto de quiebre del taper se puede alcanzar cuando se estira directamente, así que en vez de tirar del filtro horizontalmente, se optó por un desplazamiento angular del mismo, ya que este movimiento permite recuperar la

propiedad elástica de la fibra taper, asegurando que la cantidad de deformación pueda ser controlada adecuadamente.

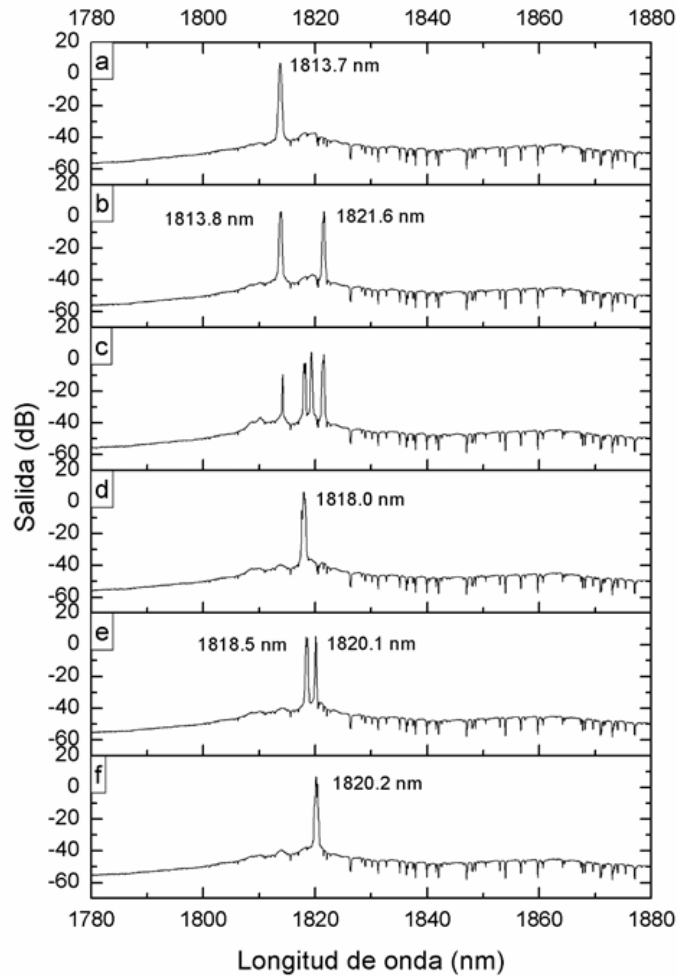


Figura 4.16: Sintonización por control de polarización.

La figura 4.16 presenta los espectros obtenidos a la salida del TDFL. Se observa la sintonización que se obtuvo mediante el uso del PC, este arreglo permite una perturbación física para inducir cambios en su interferencia multi-modal que se refleja como cambios de longitud de onda. Estos cambios se logran girando la perilla de la herramienta, partiendo con la sintonía en la figura 4.16a con una longitud de onda láser en 1813.7 nm, después de un pequeño movimiento en la perilla del PC se obtuvo longitud de onda-dual en 1813.8 y 1821.6 nm en la figura 4.16b, con otro movimiento de perilla en el mismo sentido se observa

un desplazamiento hacia longitudes de ondas más largas como se muestra en la gráfica 4.16c, como se puede ver en esta posición del PC, se obtienen varias longitudes de onda aproximadamente cerca del rango donde se encuentra la longitud de onda-dual anterior, posteriormente al continuar girando la perilla se volvió a obtener sólo una longitud de onda láser en 1818 nm como se muestra en la figura 4.16d, al girar nuevamente la perilla se obtuvo longitud de onda-dual en 1818.5 y 1820.1 nm tal como se muestra en la figura 4.16e, finalmente nuestro último dato se muestra en la figura 4.16f en la cual se obtuvo una señal láser con longitud de onda en 1820.2 nm. La sintonización que se logró debido a los cambios aplicados en el PC fue de 6.5 nm.

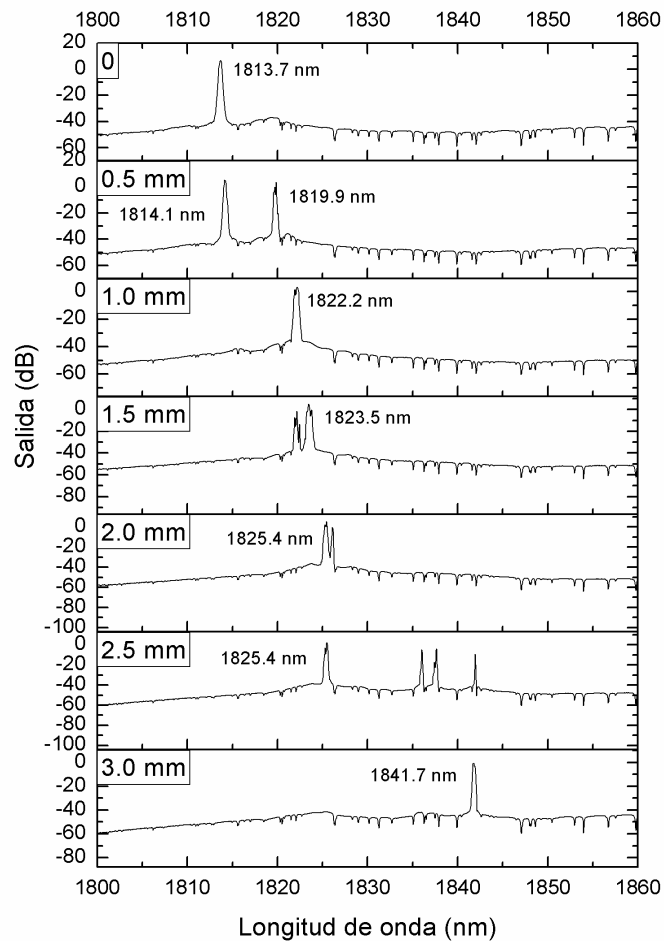


Figura 4.17: Sintonización por caída en la fibra taper.

Otra manera de lograr láser sintonizable es aplicando curvatura al taper, a continuación se muestran resultados dejando que el taper se curve con su mismo peso, moviendo las perillas de las plataformas de traslación a modo de acercar ambas, ubicadas en los extremos de la fibra taper, y con esto provocar la caída de la fibra taper deseada. En la figura 4.17 se muestran los resultados obtenidos debido al acercamiento de las bases micrométricas y con esto la caída del taper. Inicialmente en 0 mm es sin caída, donde se ubicó la sintonía en la longitud de onda de 1813.7 nm, con una caída de 0.5 mm se obtuvo longitud de onda dual en 1814.1 y 1819.9 nm, con caída de 1.0 mm una longitud de onda láser en 1822.2 nm de ahí en las caídas de 1.5, 2.0, y 2.5 mm se obtuvieron longitudes de onda dual desplazándose en longitudes de onda mayores hasta la caída de 3.0 mm con longitud de onda láser 1814.7 nm. La sintonización del láser debido a la caída del taper fue de 28 nm.

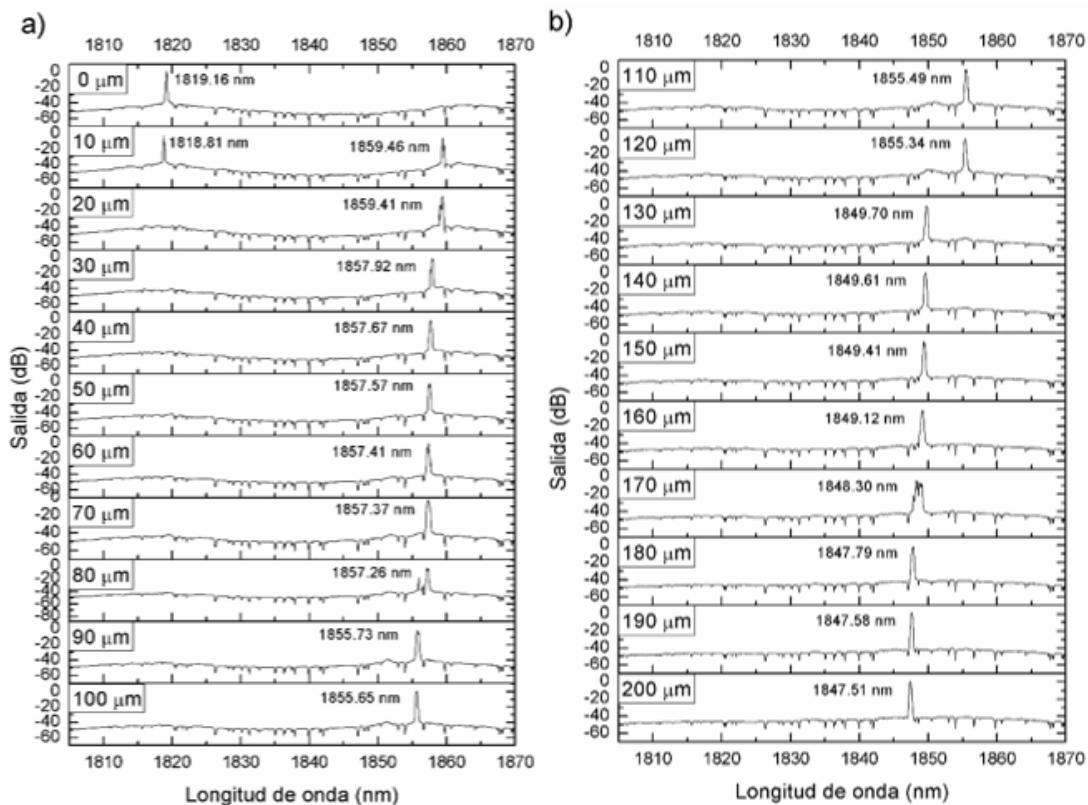


Figura 4.18: Sintonización por desplazamiento en el ángulo de traslación de manera perpendicular.

La figura 4.18 muestra el desplazamiento de la longitud de onda del TDFL respecto al desplazamiento angular del taper. El desplazamiento angular se logró moviendo las bases micrométricas perpendicularmente, a través de estos cambios aplicados en el taper se obtiene láser con una longitud de onda sintonizable o con longitud de onda dual. El punto inicial de sintonización empieza cuando el filtro es colocado en una posición recta, es decir a $0 \mu\text{m}$ de desplazamiento angular donde obtuvimos una longitud de onda láser de 1819.16 nm como es mostrado en la figura 4.18. Con la aplicación de desplazamiento angular de $10 \mu\text{m}$, se observa generación láser con longitud de onda dual en $1818.21 \text{ y } 1859.46 \text{ nm}$, debido a que con la curvatura se genera láser en dos picos máximos del periodo del filtro taper, la separación entre las dos líneas es de 41.25 nm . Al incrementar la curvatura la sintonización seguirá la línea láser de 1819.9 nm solamente. Es decir, al incrementar el desplazamiento angular a $20 \mu\text{m}$ sólo tenemos una sola línea láser correspondiente a 1859.41 nm . Se puede observar que la sintonización en una sola longitud de onda puede ir de 1859.14 nm hasta 1847.51 nm con la curvatura aplicada de $20 \mu\text{m}$ hasta $200 \mu\text{m}$, respectivamente. Con este resultado se muestra que la máxima sintonización lograda aplicando desplazamiento angular es de aproximadamente 12 nm .

Capítulo 5

Conclusiones

En este trabajo de tesis se reporta el desarrollo experimental de un láser de fibra óptica dopada con Tm con longitud de onda dual y en una sola longitud de onda sintonizable emitiendo en la región 1850 nm, basado en un filtro espectral construido a base de un taper.

La fabricación de los tapers se realizó en el laboratorio de fibras ópticas del INAOE, en el cual cuentan con los equipos, herramientas y materiales especializados para la fabricación de diferentes componentes de fibra óptica. A través de la fabricación de los tapers por medio de la empalmadora, se logró adquirir la experiencia necesaria para construir, manipular y entender el principio de funcionamiento de estos tapers. Se fabricaron tapers con distintos valores en los parámetros de su perfil y se midieron sus espectros de transmisión. En el caso particular de la construcción del láser, se decidió trabajar con un taper sencillo de manipular y con buena profundidad en su espectro de transmitancia por lo se eligió el taper con los parámetros: $a = 4$ mm, $b = 10$ mm, $c = 4$ mm y $d = 25$ μ m.

El taper se incorporó en una cavidad de anillo láser para llevar a cabo la sintonización de la señal. Se demostró que la sintonización puede presentarse mediante un control de polarización en la cavidad y una vez que el taper se coloca firme entre dos plataformas de traslación que lo suspenden en el aire, mediante perturbaciones como la caída del taper, y desplazamientos en el ángulo de traslación de manera perpendicular. Con el control

de polarización se logró obtener un rango de sintonización de 6.5 nm, con la caída del taper un rango de 28 nm y finalmente, con desplazamientos en el ángulo de traslación se obtuvo un rango de 12 nm. En conclusión las características que influyen directamente en la sintonización del láser son el perfil del taper y el modo de perturbación aplicado.

Bibliografía

- [1] National academy of sciences, *Las comunicaciones modernas: la revolución y la fibra óptica*, 2015.
- [2] Bates, Regis J., *Optical switching and networking handbook*, Nueva York, Mc Graw-Hill, p. 10.
- [3] G. P Agrawal, *Fiber-optic communication systems*, John Wiley and Sons, 1983.
- [4] Okamoto Katsunari, *Fundamentals of optical waveguides*, Academic Press Elsevier, 2006.
- [5] Sanghera J. S. and Aggarwal I. D., *Infrared fiber optics*, CRC Press, 1998.
- [6] Hecht E., *Óptica*, Addison-Wesley, 3ra. Edición, Oxford, 2000.
- [7] Einstein A., Zs. Phys., 18, 21, 1917.
- [8] Maiman T. H., *Optical and microwave-optical experiments in ruby*, Phys. Rev. Letters, vol. 4, pp. 564-566, 1960.
- [9] Maiman T. H., *Stimulated optical emission in fluorescent solids. i. theoretical considerations*, Phys Rev., vol. 123, num. 4, pp. 1145-1150, 1961.
- [10] Sorokin P. P., Sterenson M. J., *Stimulated infrared emission from trivalent uranium*, Phys. Rev. Letters, vol. 5, num. 12, pp. 557-559, 1960.
- [11] Kaiser W., Garret C. G. B., Wood D. L., *Fluorescence and optical maser effects in $CAF_2: Sm^{++}$* , Phys. Rev. Letters, vol. 123, num. 3, pp. 766-776, 1961.

- [12] O. Zuelto, *Principles of lasers*, Springer, 1988.
- [13] F. Kaczmarek, *Introducción a la física de láseres*, MIR, 1981.
- [14] Agrawal Govin P., *Applications of nonlinear fiber optics*, Academic Press, 1th edition, 2001.
- [15] Belle A. Sheno, *Introduction of digital signal procesing and filter desing*, John Wiley and Sons, p. 120, 2006.
- [16] *Speciality arc fusion splicer*, Fujikura, 10th edition, pp. 1-181.
- [17] FAFLS, *Fiber procesing software user's guide*, pp. 1-53.
- [18] Akio Tanabe, Kazanori Yamamoto and Hideyo Kawazoe, *Development of direct core monitoring fusion splicer S175*, Furukawa Review, 2000.
- [19] Fitel, *Single-fiber fusion splicer*, The Furukawa Electric CO., 2000.
- [20] *AQ6375 Optical spectrum analyzer*, Yokogawa Electric Corporation, 2nd edition, 2007.
- [21] Snitzer E., *Optical maser action of Nd^{+3} in a barium crown glass*, Physical Review Letters, vol. 7, num. 12, pp. 444- 446, 1961.
- [22] Hanna, D. C., *Continuous-wave oscillation of a monomode thulim-doped fibre laser*, Electronics Letters, vol. 24, num. 19, pp. 1222-1223, 1988.
- [23] [23] Hanna, D. C., Perry, I. R. and Lincoln J. R., *A 1-watt thulium-doped cw fibre laser operating at $2 \mu m.$* , Optics Communications, vol. 80, num. 1, pp. 52-56, 1990.
- [24] Duarte F. J., *Tunable laser applications*, New York, CRC Press Taylor and Francis Group, 2nd edition, 2009.
- [25] X. Ma., D. Chen, G. Feng and J. Yang, *Two kinds of novel tunable thulium-doped fiber laser*, Proc. Of SPIE, vol. 9274, 2014.

- [26] X. Ma., D. Chen, Q. Shi, G. Feng and J. Yang, *Widely tunable thulium-doped fiber laser based on multimode interference with a large no-core fiber*, Journal of Lightwave Technology, vol. 32, num. 19, pp. 3234-3238, 2014.
- [27] Timothy S. Mc Comb, *High-power widely tunable thulium fiber lasers*, Applied Optics, vol. 49, num. 32, pp. 6236-6242, 2010.
- [28] W. Shin, *Wavelength-tunable thulium-doped single mode fiber laser base don the digitally programable micro-mirror array*, Optical Fiber Technology, pp. 304-308, 2013.
- [29] S. Liu, *Tunable dual-wavelength thulium-doped fiber laser by employing a HB-FBG*, IEEE Photonics Technology Letters, vol. 26, num. 18, pp. 1809-1812, 2014.
- [30] W. J. Peng, *1.94 μm Switchable dual-wavelength Tm^{+3} fiber laser employing high-birefringence fiber Bragg grating*, Applied Optics, vol. 52, num. 19, pp. 4601-4607, 2013.
- [31] Mohd Faizal B. Ismail, *Tunable dual-wavelength thulium-doped fiber laser at 1.8 μm region using spatial-mode beating*, Journal of Modern Optics, vol. 62, num. 11, 2015.
- [32] M.V. Hernández-Arriaga, M. Durán-Sánchez, B. Ibarra-Escamilla, R. I. Álvarez-Tamayo, H. Santiago-Hernández, M. Bello-Jiménez, and E. A. Kuzin, *Tunable thulium-doped fiber laser based on an abrupt-tapered in-fiber interferometer*, Journal of Optics, vol. 19, pp. 115704, 2017.
- [33] H. Ahmad, *Tunable dual-wavelength ytterbium-doped fiber laser using a strain technique on microfiber Mach-Zehnder interferometer*, Applied Optics, vol. 55, num. 4, pp. 778-782, 2016.
- [34] Y. Wei, K. Hu, B. Sun and T. Wang, *All-fiber widely wavelength-tunable thulium-doped fiber ring laser incorporating a Fabry-Perot filter*, Laser Physics, vol. 22, num. 4, 2012.

- [35] Hanna D. C., *Efficient and tunable operation of a Tm-doped fibre laser*, Optics Communications, vol. 75, num. 3, pp. 283-286, 1990.
- [36] X. Ma., *Switchable and tunable thulium doped fiber laser incorporating a Sagnac loop mirror*, Applied Optics, vol. 53, num. 20, pp. 4382-4385, 2014.
- [37] B. Posada-Ramírez, M. Durán-Sánchez, R. I. Álvarez-Tamayo, B. Ibarra-Escamilla, M. V. Hernández-Arriaga, D. Sánchez-De la Llave, and E. A. Kuzin, *Tunable narrow linewidth all-fiber thulium-doped fiber laser in a 2 μ m-band using two Hi-Bi fiber loop mirrors*, vol. 27, num. 8, 2017.
- [38] K. Ying, *High-power all-fiber wavelength-tunable thulium doped fiber laser at 2 μ m*, Optics express, vol. 22, num. 17, pp. 19947-19952, 2014.
- [39] S. D. Jackson and T. A. King, *Theoretical modeling of Tm-doped silica fiber laser*, Journal of Lightwave Technology, vol. 17, num. 5, pp. 948-956, 1999.
- [40] J. D. Love and W. M. Henry, *Quantifying loss minimisation in single-mode fibre tapers*, Electron Lett, vol. 22, num. 1986, pp. 912-914.
- [41] S. Lacroix, *Tapered monomode optical fibers, understanding large power transfer*, Appl. Opt., vol. 25, num. 1986, pp. 4424-4429.
- [42] Z. Yu, L. Jin, L. Sun and B. Guan, *Highly sensitive fiber taper interferometric hydrogen sensors*, IEEE Photon, 2016.
- [43] F. Wang, *Tapered fluorotellurite microstructured fibers for broadband supercontinuum generation*, Opt. Lett, vol. 41, pp. 634-637, 2016.
- [44] M. V. Hernández-Arriaga, *High sensitivity refractive index sensor based on highly overcoupled tapered fiber-optic couplers*, IEEE Sens. J., vol. 17, pp. 333-339, 2017.
- [45] L. Huang, *All-fiber tunable laser based on an acousto-optic tunable filter and a tapered fiber*, Opt. Exp., vol. 24, pp. 7449-7455, 2016.

-
- [46] D. Monzón Hernández, *Fibras ópticas microestructuradas estrechadas para fabricar sensores*, Gaceta Ideas CONCYTEG, 2007.
- [47] J. P. Clarkin, *Tapered fibers and speciality fiber microcomponents*, Speciality Optical Fibers Handbook, San Diego, Academic Press, p. 582, 2007.
- [48] B. Wang and E. Mies, *Review of fabrication techniques for fused fiber components for fiber lasers*, SPIE LASE, pp. 71950A-71961A, 2009.
- [49] G. Bambrilla, *Optical fibre nanowires and microwires*, IOP Publishing, pp. 1-19, 2010.
- [50] R. J. Black, *Tapered fibers: an overview*, OE Fibers, pp. 2-19, 1988.
- [51] V. Berikashvili, *CO₂-laser-fused biconical couplers*, Telecommunications and radio engineering, vol. 46, num. 1, pp. 13-15, 1991.
- [52] Y. K Cheong, *Note: Fabrication of tapered fibre tip using mechanical polishing method*, Review Of Scientific Instruments, vol. 82, num. 8, p. 86115, 2011.
- [53] V. Hodzic, *Periodic structures on biconically tapered optical fibers using ion beam milling and boron implantation*, Journal of Lightwave Technology, vol. 22, num. 6, pp. 1610-1614, 2004.
- [54] H. J. Kabashi, *Fabrication of submicron-diameter and taper fibers using chemical etching*, Journal of Materials Science and Technology, vol. 28, num. 4, pp. 308-312, 2012.
- [55] V. P. Minkovich, *Modeling of holey fiber tapers with selective transmission for sensor applications*, Journal of Lightwave Technology, pp. 4319-4328, 2006.
- [56] F. Gonthier, *Investigation of power oscillations along tapered monomode fibers*, Appl. Opt., vol. 26, pp. 444-449.
- [57] C. A. Gouveia, *Refractometric optical fiber platforms for label free sensing*, Current Developments in Optical Fiber Technology, pp. 345-373, 2013.

-
- [58] J. Lu, *Photonic bandgap fiber tapers and in-fiber interferometric sensors*, Optics Letters, vol. 34, num. 12, pp. 1861-1863, 2009.
- [59] Hamid LATIFI, *Nonadiabatic tapered optical fiber for biosensor applications*, Photonic Sensors, vol. 2, num. 4, pp. 340-356, 2012.