



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

CENTRO DE FÍSICA APLICADA Y TECNOLOGÍA
AVANZADA

SISTEMA ÓPTICO CON MICRO-RESONADOR
ESFÉRICO

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

LICENCIADO EN TECNOLOGÍA

P R E S E N T A :

GUILLERMO ISRAEL DELGADILLO GARCÍA

DIRECTOR DE TESIS

DR. JORGE LUIS DOMINGUEZ JUÁREZ



UNAM CAMPUS JURIQUILLA, QUERÉTARO., 2020



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

El presente trabajo está dedicado a mis papas. A mi mama que con mucho amor y cariño me ha motivado en mis estudios desde pequeño, ha sido piedra angular en cada uno de mis logros y nunca ha perdido la esperanza en mí. Así mismo le dedico este trabajo a mi papa porque sus consejos, enseñanzas y buen humor me han forjado en la persona que ahora soy y sin su apoyo esto no habría sido posible.

Agradecimientos

Quiero agradecer a Dios en primer lugar.

A la Universidad Nacional Autónoma de México por permitirme ser parte de ella y con ello prepararme para los retos del presente y del futuro.

Le agradezco al Dr. Jorge Luis Domínguez Juárez por dirigir mi trabajo de tesis, enseñarme y guiarme a lo largo de este proyecto, además de motivarme y mostrarme lo fascinante que es la óptica.

A todos mis profesores de la Licenciatura en Tecnología por su dedicación, paciencia y enseñanzas.

Finalmente quiero agradecer a cada una de las personas que laboran en la Universidad Nacional Autónoma de México cuyo trabajo contribuye a la calidad de la educación.

Resumen

El presente trabajo de tesis pretende, en la medida de lo posible, describir de forma clara las tareas necesarias para la construcción de un Sistema Óptico con Resonador Esférico. Nuestro objetivo es transmitir la experiencia de la fabricación de microdispositivos ópticos, así como la visualización de cada etapa en el montaje. Todo esto que sirva de guía para los miembros futuros de laboratorios de fotónica que enfrenten este reto. El primer capítulo es introductorio, se desglosa la justificación de este proyecto, sus aplicaciones, el sistema como pieza esencial dentro de la fotónica y su contribución a las demás ciencias. El segundo capítulo consiste en una explicación detallada de la metodología experimental implementada para la construcción de acopladores y resonadores esféricos ocupando herramientas disponibles en el laboratorio de Óptica y Fotónica del CFATA. Podemos resumir nuestra metodología en seis partes clave para la elaboración del sistema óptico en conjunto, como se muestra en el diagrama siguiente.

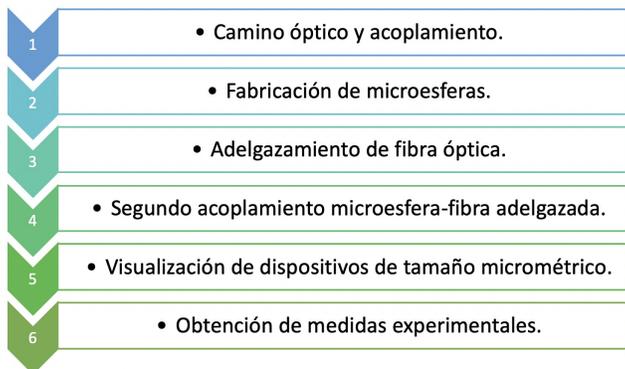


Figura 1: El sistema óptico se obtiene a partir de la ejecución de seis tareas fundamentales

Encontramos que el proceso de adelgazamiento de fibra óptica es una de las tareas que demandan un mayor reto técnico con las herramientas disponibles, al tener que adelgazar la fibra en el orden de una micra, sin embargo, también es parte crucial para obtener un acoplamiento óptico adecuado. El tercer capítulo resalta los resultados obtenidos al fabricar tanto las esferas, como los acopladores. Aquí también se muestra la señal obtenida de dispositivos de detección al acoplar luz pulsada a nuestro sistema óptico. El cuarto capítulo señala las conclusiones obtenidas de la experiencia, habilidades y retos con la descripción y realización de las tareas presentadas.

Abstract

The present thesis work aims, as far as possible, to clearly describe the necessary tasks for the construction of an Optical System with Spherical Resonator. Our goal is to transmit the experience of the manufacture of micro optical devices, as well as the visualization of each stage in the assembly. All this to serve as a guide for future members of photonics laboratories facing this challenge. The first chapter is introductory, it breaks down the justification of this project, its applications, the system as an essential piece within photonics and its contribution to the other sciences. The second chapter consists of a detailed explanation of the experimental methodology implemented for the construction of couplers and spherical resonators using tools available in the CFATA Optics and Photonics laboratory. We can summarize our methodology in five key parts for the development of the optical system as a whole: optical path and fiber coupling, manufacture of microspheres, fiber optic thinning, microsphere-thinned fiber coupling, visualization and obtaining experimental measurements. We found that the fiber optic thinning process is one of the tasks that demands a greater technical challenge with the available tools, having to thin the fiber in the order of one micron, however, it is also a crucial part to obtain an optical coupling. suitable. The third chapter highlights the results obtained when manufacturing both the spheres and the couplers. The signal obtained from detection devices by coupling pulsed light to our optical system is also shown here. The fourth chapter indicates the conclusions obtained from the experience, skills and challenges with the description and completion of the tasks presented.

Índice general

Agradecimientos	II
Resumen	III
Abstract	V
Prólogo	XIII
Planteamiento del problema	XV
Justificación del trabajo de investigación	XVIII
Objetivos e hipótesis	XIX
1. Introducción	1
1.1. Antecedentes históricos	1
1.2. Marco teórico	5
2. Metodología experimental	19
2.1. Camino óptico y primer acoplamiento a la fibra óptica	21
2.2. Fabricación de las micro-esferas	24
2.3. Adelgazamiento de fibra óptica	27
2.4. Acoplamiento de fibra adelgazada a microesfera.	31
2.5. Visualización y detección	35

<i>ÍNDICE GENERAL</i>	VII
3. Resultados	40
3.1. Fabricación de acopladores ópticos	40
3.2. Fabricación de microesferas para resonadores	53
4. Conclusiones	61

Índice de figuras

1.	El sistema óptico se obtiene a partir de la ejecución de seis tareas fundamentales	III
1.1.	Galerías susurrantes por reflexión total interna. Imagen adaptada de "Foreman, M. R., Swaim, J. D., Vollmer, F. (2015). Whispering gallery mode sensors. <i>Advances in optics and photonics</i> , 7(2), 168-240.	2
1.2.	Diferentes resonadores WGM. Imagen adaptada de:"Mishra, Ramapati, Laxmikant Singh, and Rohit K. Ramakrishnan. "Optical micro-ring amplifier."2009 International Conference on Emerging Trends in Electronic and Photonic Devices Systems. IEEE, 2009.	4
1.3.	Se muestra la esfera y la distribución de la intensidad radial y angular	6
1.4.	Cambio de fase para la reflexión de luz polarizada perpendicularmente	11
1.5.	Microesfera construida de dióxido de silicio	16
2.1.	Diagrama de flujo, se resumen las etapas del proceso para la elaboración del sistema óptico	20
2.2.	a) Camino óptico que sigue un láser continuo de 532 nm para acoplar la luz a la fibra óptica con luz visible. b) Camino óptico de luz infrarroja (las líneas rojas son para guiar el ojo). Se pueden apreciar los elementos ópticos utilizados para acoplar la luz del láser a la fibra óptica.	22

2.3. Las plataformas de desplazamiento son controladas con los controladores de servos, existen dos fotodetectores, un fotomultiplicador, el osciloscopio para la obtención de señales en el sistema óptico.	23
2.4. El rollo de fibra óptica se ilumina en color verde después de haber maximizado la luz entrante a la fibra óptica y de cuantificarla con ayuda de un medidor de potencia a la salida de la fibra óptica.	23
2.5. muestra la forma como se coloca la fibra óptica en la fusionadora óptica previamente limpiada y sin el recubrimiento polimérico también es posible ver el electrodo donde se genera el arco eléctrico.	24
2.6. Forma que se debe tener de la fibra óptica antes de comenzar a generar los arcos eléctricos para formar microesferas.	25
2.7. La fotografía de la izquierda muestra la fibra adelgazada en la fusionadora óptica y la fotografía de la derecha muestra la fibra ya transformada en una microesfera.	25
2.8. Adaptada de “An In-Line Fiber Optic Fabry–Perot Sensor for High-Temperature Vibration Measurement”. El proceso para la fabricación de las microesferas se resume en tres partes fundamentales: ajuste en distancia de la fibra óptica, generación del arco eléctrico y formación esférica debida a la tensión superficial.	26
2.9. Sistema dramatizado para representar el sistema de plataformas motorizadas sobre la que se pone la porta fibra para colocar la microesfera.	27
2.10. Se ponía la fibra óptica lo mas tensa posible en las agarraderas y se reforzaba el agarre con cinta adhesiva.	28
2.11. La micro flama tenía un diámetro aproximado de 2 mm y una temperatura de 1250 °C	28
2.12. El sistema de estiramiento consiste en una micro flama controlada por plataformas motorizadas, dos microscopios, dos servomotores a pasos que estiran de forma continua la fibra mientras la micro flama oscila para calentarla.	29

2.13. se pueden apreciar distintos colores en la fotografía justo en la parte donde la fibra óptica se encuentra más adelgazada.	31
2.14. Esfera fabricada para acoplar a la fibra óptica adelgazada	32
2.15. Se pueden apreciar más detalles de la esfera amplificada	32
2.16. El diámetro del vástago de la esfera es de 125.49 micrómetros	33
2.17. Esfera de la cual se obtuvo la señal, tiene un radio de 82.82 micrómetros y un perímetro de 520.43 micrómetros	33
2.18. La señal obtenida del fotomultiplicador y los fotodetectores, la grafica con un pico negativo corresponde a la señal medida por el fotomultiplicador mientras que las que tienen un pico positivo corresponden a los fotodetectores.	34
2.19. Muestra el acoplamiento entre la microesfera y la fibra adelgazada de la luz proveniente de un láser con una longitud de onda de 532 nm	34
2.20. La luz que viaja por la fibra óptica pasa por la sección adelgazada, parte de la radiación es acoplada a la microesfera donde la luz queda atrapada un instante	35
2.21. Se distingue el microscopio, la lente y el fotodetector ocupado al final de la fibra óptica, así como la lente ocupada para focalizar con la segunda cámara.	36
2.22. El arreglo para la segunda cámara consiste en una lente, un espejo a 45° y un objetivo de 20X	36
2.23. visualización en el display de la cámara. se puede distinguir la micro flama y la fibra adelgazada.	37
2.24. Sistema implementado con dos camaras para el adelgazamiento de la fibra óptica	38
2.25. Actividades realizadas para la obtención de un sistema óptico, con resonador esférico WGM	39
3.1. Cilindro antes de ser estirado y después de ser estirado al someterse a una fuente de calor	42

3.2. Fibra doblada T1, al comienzo de las pruebas experimentales de ahusamiento	46
3.3. Fibra óptica T2, ahusada y deformada	47
3.4. Una de las primeras fibras ópticas T3, que se intentó adelgazar pero que al igual que las anteriores sufrió una ruptura	48
3.5. Fibra óptica T4, ahusada y deformada por la micro flama	48
3.6. T5 como la fibra óptica inicial que se intentó adelgazar cuyo diámetro medido fue de 124.8 micrómetros	49
3.7. Esta fibra óptica T6 tiene un diámetro de 42.29 micrómetros y fue uno de los primeros resultados que se obtuvieron al mejorar la técnica para su ahusamiento. También es posible ver que parece estar regular y limpia es decir, el estiramiento conseguido de forma uniforme a lo largo de la fibra óptica	50
3.8. Esta fibra óptica T7, convertida en cono se obtuvo con la fusionadora óptica para posteriormente fabricar la esfera.	50
3.9. Este cono T8 tiene un diámetro de 45.26 micrómetros en la parte mas estrecha y un diámetro de 80.91 micrómetros en la parte menos estrecha	51
3.10. T9, esta fibra tiene un diámetro de 5.63 micrómetros en la parte más adelgazada que conseguimos fabricar al mejorar nuestro sistema de visualización.	52
3.11. Fibra adelgazada donde incluso es posible observar diferentes colores sobre la fibra óptica ahusada	52
3.12. Microresonador E1, con radio de 97.75 micrómetros, un área de 30,019.82 micrómetros cuadrados y un perímetro 614.20 micrómetros.	53
3.13. Esfera E2, fabricada con un radio de 60.28 micrómetros, un área de 11,415.93 micrómetros cuadrados y un perímetro de 378.76 micrómetros	54
3.14. Resonadores ópticos con diferentes tamaños e incluso diferentes excentricidades fueron fabricados, centrándonos más en las esferas sin embargo la figura de en medio corresponde a un elipsoide.	54

3.15. Esfera E3, fabricada con un radio de 93.73 micrómetros, un área de 27602.81 micrómetros cuadrados y un perímetro de 588.95 micrometros.	55
3.16. Esfera E4, con un radio de 48.03 micrómetros y área de 7247.46 micrómetros cuadrados	55
3.17. Esfera E5, construida con un radio es de 68.70 micrómetros, área de 14828.11 micrómetros cuadrados y un perimetro de 431.67 micrómetros	56
3.18. Esfera E6 con un con radio de 62.88 micrómetros, 12421.73 micrómetros cuadrados	56
3.19. Esfera E7 con un radio de 90.09 micrómetros y un área de 25499.09 micrómetros cuadrados	57
3.20. Esfera E8 con un radio de 103.01 micrómetros y un área de 33,336.31 micrómetros cuadrados	57
3.21. Ocupamos el programa ISCapture para determinar las medidas de las esferas y las fibras adelgazadas.	58
3.22. Datos obtenidos al hacer incidir luz a una longitud de onda de 680 nm	59
3.23. En la curva gris podemos ver que esta ligeramente más ensanchada que la curva roja, por lo que el tiempo de decaimiento es mayor en la curva gris que en la roja	59
3.24. Pulso de referencia	60
4.1. Proceso de ahusamiento de fibra óptica	64

Prólogo

Los microresonadores ópticos son pieza esencial y fundamental en una variedad de aplicaciones dentro de la fotónica. Se pueden implementar para aplicaciones tan diversas como láseres, amplificadores, sensores, filtros ópticos, interruptores, rúters, puertas lógicas y medios artificiales.

La gran importancia se debe a la recirculación de la luz en los microresonadores, como es el caso de microesferas de SiO_2 , dicha luz se queda atrapada dentro de la esfera debido a la reflexión total interna. Con ellos, es posible alcanzar grandes cantidades de luz confinada circulando. La recirculación atrapada donde se asoma un poco de campo electromagnético en la superficie de estas esferas micrométricas tiene un valor importante en sistemas de detección. Estos microresonadores esféricos se caracterizan porque pueden tener un factor de calidad óptico alto (llamado factor Q), es decir, mayor capacidad de recirculación de luz, y por lo tanto, también pueden cubrir una anchura espectral de forma muy estrecha en la resonancia de la cavidad. Mientras más luz se quede circulando en la cavidad mayor es el factor de calidad. Los dispositivos pueden ser pasivos, típicamente cuando pequeños cambios en las propiedades de la superficie del resonador darían lugar a desplazamientos detectables en la frecuencia de los modos de luz resonantes de la cavidad. Estos modos resonantes son llamados modos Whispering Gallery (WGMs).

En el caso de estos resonadores ahora como dispositivos activos, si se confina la luz en pequeños volúmenes, cerca de la superficie de la cavidad y al mismo tiempo se tienen altos valores en los factores Q , dicha luz circulante en modos WGMs, con una alta potencia concentrada en un área muy pequeña, da como resultado la observación de los procesos ópticos fácilmente detectables, que dependen de la intensidad y que

solo se alcanzarían observar con láseres muy potentes. Cuando a los micro resonadores se les puede depositar o contaminar cerca de la superficie, por donde circula la luz, materiales inorgánicos u orgánicos, como por ejemplo, nanopartículas, algunas moléculas colorantes como la rodamina 6G, el cristal violeta o nanocristales con tierras raras, los efectos de la interacción de la luz con esta materia depositada puede generar nuevas frecuencias respecto a la luz incidente. Las aplicaciones de estos dispositivos pasivos o activos han sido relevantes en los últimos años para empujar el límite del conocimiento de diferentes áreas de la ciencia y la tecnología.

Planteamiento del problema

El sistema óptico para excitar los modos WGMs consiste en introducir luz a la cavidad esférica. Esta cavidad esférica, de dimensiones de decenas o cientos de micras, debe ser de un material ultrapuro. La pureza está relacionada con la cantidad de pérdidas al propagarse la luz en dicha cavidad, donde se requieren valores mínimos. En la actualidad, si se busca que la luz se quede atrapada por mucho tiempo propagándose, o recirculando en una cavidad, las pérdidas que se encuentran en los materiales de que están hechas las fibras ópticas estándar, tienen valores muy pequeños, ya que han mejorado bastante en los últimos tiempos. El factor de calidad de esferas hechas de dióxido de silicio SO_2 , con el que están hechas las fibras ópticas estándar, puede llegar a ser del orden de 10^{11} .

Por otro lado, existen diferentes elementos ópticos para acoplar dichos modos, entre los que aparecen la inducción de un campo directo, es decir, la inducción de luz directa mediante un haz. También se puede utilizar un prisma o fibras ópticas para el acoplamiento de luz en la forma de onda evanescente. Se observa un mejor acoplamiento usando el prisma con respecto a la inducción directa, pero se ha ido mejorando al utilizar fibras ópticas en los últimos años. Este acoplamiento al utilizar una fibra ha evolucionado, desde usar una fibra cortada a un ángulo específico, hasta una inmersa en un bloque pulido, pero el mejor acoplamiento obtenido ha sido con las fibras adelgazadas.

Tanto la fabricación de la esfera como del acoplador presentan un verdadero reto técnico por la manipulación espacial en el orden de las micras. La fabricación de un

micro-resonador óptico WGMs puede ser posible utilizando diferentes técnicas: por ablación láser, usando el calor de una micro-flama de hidrógeno oxígeno o como aquí mostraremos, con la descarga de un arco eléctrico.

En el caso del estiramiento de una fibra óptica estándar para lograr una fibra adelgazada en el orden de unas pocas micras, se usa frecuentemente a los láseres con alta potencia para su calentamiento o con una microflama de hidrógeno-oxígeno. Usar la microflama suele ser más económico en comparación un sistema láser de alta potencia. Pero para la elaboración es necesario tener control sobre diversas variables tales como: temperatura, contaminación del aire, presión de la micro-flama, área de la energía térmica radiada sobre la fibra, entre otros.

En resumen, el sistema óptico esta constituido principalmente por estos dos elementos, la microesfera y la fibra adelgazada y la manera de combinarlos. Para el sistema óptico completo, es necesario incluir la selección adecuada de la entrada, en este caso la luz del láser y el camino óptico de este, a través de diferentes elementos ópticos. Debido a la manipulación micrométrica, es común usar sistemas mecánicos o motorizados de movimiento en esas dimensiones. Por lo que el sistema requiere programación si se necesita automatización y control de servo-motores para la manipulación. Otro punto importante es la selección del material y las dimensiones del dispositivo, pero en este caso se usa la fibra óptica estándar. La manera de combinarlos y el acoplamiento óptico por medio de la fibra adelgazada a partir de una onda evanescente al microresonador óptico es otro desafío importante. El decaimiento de la onda evanescente es de tipo exponencial, además del diámetro de la fibra adelgazada, por lo que tienen que ser en el orden de la longitud de onda incidente, o múltiplos para la fibra adelgazada. Estas son algunas de las características para obtener un acoplamiento óptico y eficiente.

En este trabajo se ha adquirido experiencia para la fabricación tanto de microresonadores WGMs, como de la fibra óptica adelgazada y al mismo tiempo su acoplamiento. Este sistema puede ser utilizado para proyectos donde se quiera aprovechar el

alto factor de calidad de los resonadores fabricados de fibra óptica estándar. Nuestro objetivo es la obtención de un sistema óptico con micro-resonador WGMs para futuras aplicaciones dentro del laboratorio de óptica y fotónica del CFATA, y así establecer las bases para su funcionamiento.

Justificación del trabajo de investigación

Hoy en día, los dispositivos ópticos y en especial, los microresonadores ópticos juegan un papel muy importante en la integración de diversas aplicaciones necesarias en el desarrollo tecnológico y científico que repercutirá en la calidad de vida de las personas. Esta calidad de vida de las personas puede ser incrementada gracias al uso efectivo de: biosensores, láseres, generadores paramétricos, desarrollo de refractómetros, efectos y fenómenos ópticos nuevos lineales y no lineales, entre muchos más. La información generada en esta tesis puede ser aplicada a diferentes resonadores con diferentes geometrías como los toroides, los cilindros, o discos con diferentes configuraciones, que favorecen la propagación de diferentes modos. En nuestro caso, la fabricación de sistemas ópticos micrométricos, como el sistema fibra adelgazada-microresonador esférico, nos permite tener control en los modos de propagación y acoplamiento. Existen laboratorios que manufacturan microresonadores ópticos, o sistemas comerciales, pero la inversión en la infraestructura para el desarrollo de dichos microresonadores ópticos ha sido muy costosa. En nuestro caso queremos adquirir experiencia con la caracterización de dispositivos totalmente ópticos y para la demostración de principios físicos usando metodologías más económicas.

Objetivos e hipótesis

Objetivo general

Describir las tareas necesarias para fabricar un sistema óptico con micro-resonador esférico WGMs.

Objetivos específicos

1. Fabricación de esferas con arco eléctrico usando fusionadora de fibra óptica.
2. Fabricación de fibras adelgazadas por microflama hidrogeno-oxigeno como acopladores
3. Caracterización del microresonador.

Hipótesis

Al tener tareas descritas de los procesos se permitirá tener una guía de referencia para fabricar acopladores ópticos y micro cavidades esféricas, así como el sistema de acoplamiento con los equipos del laboratorio de óptica y fotónica del CFATA.

Identificación del problema de investigación

Construir un sistema óptico con un microresonador esférico WGMs.

Limitaciones y alcances

Las limitaciones que tenemos es el desarrollo de esta guía para la fabricación de microresonadores son las siguientes:

- Tiempo: nos hemos propuesto como meta desde un comienzo a desarrollar esta guía de fabricación y experiencia con los microresonadores en un plazo no mayor a un año.
- Recursos: construir un microresonador óptico con herramientas e instrumentos básicos.

El alcance que pretendemos tener es el de la terminación de un sistema con microresonador óptico.

Capítulo 1

Introducción

1.1. Antecedentes históricos

El Templo del Cielo es el máximo exponente que ha quedado del arte Ming, y durante más de 500 años fue el corazón del imperio chino. Este majestuoso templo presenta un fenómeno acústico que ha cautivado la atención de varias mentes desde tiempos inmemorables. Cuando alguien en su interior habla, el sonido viaja a lo largo del muro circular de tal forma que el sonido vuelve a quien ha emitido las palabras, causándole la sensación de que alguien le susurra por atrás exactamente lo mismo que ha pronunciado[1]. En la galería del domo de la catedral de San Pablo en Londres encontramos otro fenómeno acústico igualmente interesante y es que aquí, cuando alguien susurra junto al muro del domo las personas cercanas podrían no escuchar lo que la persona ha susurrado, sin embargo las personas que se encuentran del otro lado del domo a 32 metros de distancia que es lo que mide el diámetro de la circunferencia que comprende la galería del domo son capaces de escuchar lo que la persona ha dicho.

El fenómeno fue estudiado por John William Strutt, tercer barón de Rayleigh, también conocido como Lord Rayleigh y en 1910 publicó un artículo titulado “The problem of the whispering gallery”[2][3]. El nombre con el que se le designa actualmente a los microresonadores de galería susurrante es: Whispering Gallery Modes Microresonators (WGMs) e históricamente el nombre se le ha acuñado a partir de la publicación del trabajo de Rayleigh. Rayleigh se dio cuenta de que el fenómeno

podía ser explicado por el principio de reflexión interna total. Cuando las ondas de sonido colisionan contra las fronteras curvas de la galería, estas ondas son mínimamente difractadas y eficientemente reflejadas por lo que vuelven a golpear el borde de la galería con el mismo ángulo y de esta forma viajan a lo largo de la superficie[4]. La figura 1.1 muestra por un lado la forma en como el sonido viaja a lo largo de la galería y por otro lado como la luz puede también estar recirculando en un resonador Whispering Galery Mode por el mismo principio de reflexión interna total.

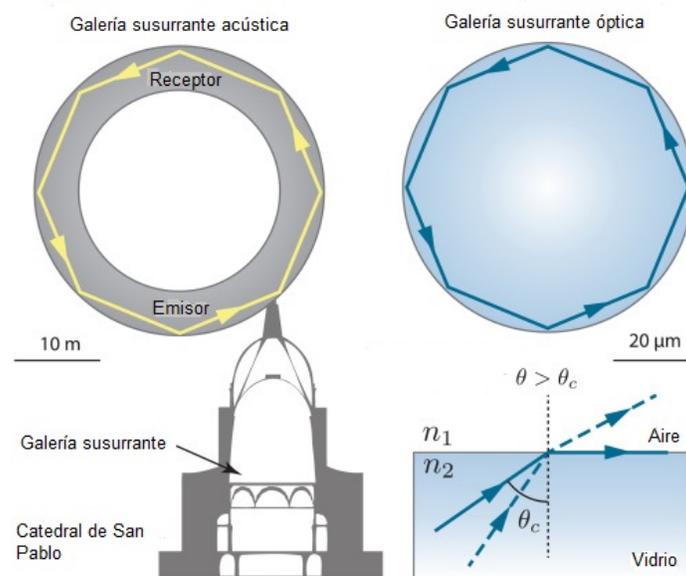


Figura 1.1: Galerías susurrantes por reflexión total interna. Imagen adaptada de "Foreman, M. R., Swaim, J. D., Vollmer, F. (2015). Whispering gallery mode sensors. *Advances in optics and photonics*, 7(2), 168-240.

La idea de que una onda de luz puede ser guiada por reflexión interna total fue demostrada primero por Daniel Colladon y Jacques Babinet en París en 1840[5] y el efecto fue popularizado por John Tyndall[6] quien demostró que podía guiar la luz, haciendo uso de un chorro de agua proveniente de una fuente. La luz es guiada por reflexión interna total y este es el principio detrás de la fibra óptica moderna usada hoy en día en las comunicaciones. Si ahora, la guía de onda de luz son las paredes cerca de su ecuador de una esfera de vidrio cuyo radio está definido en los cientos de micrómetros, la posición del modo óptico de propagación se vuelve una galería de

modos susurrantes o comúnmente llamado en inglés whispering gallery modes (WGM) y la guía de onda será llamada en adelante como whispering gallery waveguide.

Resonancias ópticas en cavidades esféricas fueron estudiadas por Gustav Mie en 1908[7], usó las ecuaciones de Maxwell para determinar el espectro de dispersión de ondas electromagnéticas planas por pequeñas partículas que fueron consideradas de forma esférica. Gustav Mie encontró líneas delgadas en el espectro de dispersión correspondientes al WGMs de las esferas.

La luz en el WGM es momentáneamente atrapada dentro de la esfera por reflexión interna total. Las cavidades esféricas resonantes pueden tener altos factores de calidad óptica (factores Q), es decir tienen anchos de línea espectral muy estrechos ($<100\text{Khz}$ en 1550 nm) y muy altas intensidades circulantes. Las cavidades ópticas que soportan estas resonancias WGMs son llamadas Whispering Gallery Resonators (WGR).

En la actualidad, los WGR son hechos de una gran variedad de materiales desde polímeros hasta diamante. Uno de los materiales más comúnmente utilizado por sus aplicaciones fotónicas, es el dióxido de silicio (SiO_2) debido a la experiencia obtenida, de las redes de comunicaciones ópticas.

Los materiales poliméricos también se han utilizado para formar micro resonadores de microesferas. La necesidad de WGR más pequeños está impulsada por el deseo de excitar solo los modos de galería susurrante con alto confinamiento espacial. Las cavidades más pequeñas también tienen densidades de modo mas bajas, pero esto no significa acceso a anchos de banda en el espectro. Un volumen de modo más pequeño aumenta la densidad de los fotones en los WGR que a su vez, pueden reducir el umbral de muchos efectos ópticos no lineales como el láser Raman o la dispersión de Brillouin. Además de esto, siempre es alta la necesidad de desarrollar dispositivos más pequeños para la integración de circuitos fotónicos. Todas estas propiedades motivan hoy en día una intensa investigación sobre micro resonadores ópticos.

Weber y Ulrich construyeron el primer resonador de guiado óptico de anillo en 1971[8],[9] El dispositivo de Weber y Ulrich consistió en un camino de vidrio de 5 mm de diámetro ($n=1.47$) recubierto con poliuretano dopado con Rodamina-6G ($n=1.55$), para una circunferencia de $31,4\text{ mm}$. La luz entraba y salía del resonador con

un prisma. Al bombear el polímero con luz de un láser N_2 ($\lambda = 337,1$ nm) obtuvieron la operación de un láser efectuada por el resonador: luz monocromática, coherente y direccional. La siguiente demostración relevante fue realizada por Haavisto y Pajar en 1980 [11]. Su dispositivo fue el primero en incorporar guías de onda de bus integradas hechas con película de metacrilato de polimetilo dopado (PMMA) sobre sustrato de cuarzo. Una característica importante de su trabajo fue que el dispositivo fue fabricado sin litografía mediante el uso de escritura directa con un láser He-Cd de 325 nm. Aunque demostraron guías de ondas y anillos de baja pérdida, el anillo era bastante grande (circunferencia de 28,3 cm). Sin embargo, el acoplamiento al anillo se realizó a través de un acoplamiento evanescente para integrar guías de ondas, y así quedó establecida la idea básica de acoplamiento evanescente. La figura 1.2 muestra algunos de los primeros resonadores ópticos que existieron y sus distintas formas que van desde toroides hasta esferas y discos.

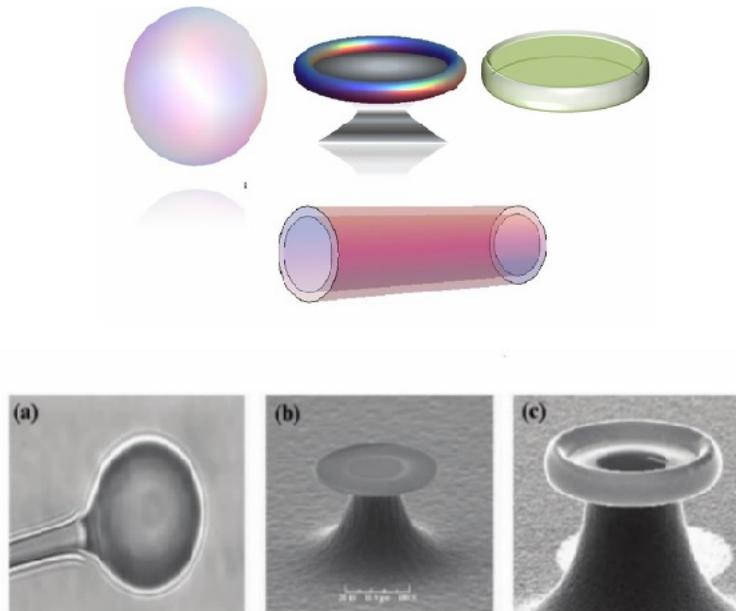


Figura 1.2: Diferentes resonadores WGM. Imagen adaptada de: "Mishra, Ramapati, Laxmikant Singh, and Rohit K. Ramakrishnan. "Optical micro-ring amplifier." 2009 International Conference on Emerging Trends in Electronic and Photonic Devices Systems. IEEE, 2009."

1.2. Marco teórico

Onda evanescente y reflexión interna total

Matemáticamente, las ondas se describen en términos de campos que varían en el tiempo, siendo un “campo” una función de la ubicación en el espacio. Una onda en propagación requiere un campo de “esfuerzo” y un campo de “flujo”, siendo este último un vector (si estamos trabajando en dos o tres dimensiones). El producto del esfuerzo y el flujo está relacionado con la potencia. Por ejemplo, para ondas sonoras en un fluido no viscoso, podríamos tomar el campo de esfuerzo como presión (un escalar) y el campo de flujo como la velocidad del fluido (un vector). El producto de estos dos es la intensidad (potencia por unidad de área)[10]. Para ondas electromagnéticas, tomaremos el campo de esfuerzo como el campo eléctrico \mathbf{E} , y el campo de flujo como el campo de magnetización \mathbf{H} . Ambos son vectores, y su producto vectorial es nuevamente la intensidad.

Cuando una onda en el medio 1 se refleja en la interfaz entre el medio 1 y el medio 2, el campo de flujo en el medio 1 es la suma vectorial de los campos de flujo debidos a las ondas incidente y reflejada. Si la reflexión es oblicua, los campos incidente y reflejado no están en direcciones opuestas y, por lo tanto, no pueden anularse en la interfaz; incluso si la reflexión es total, el componente normal o el componente tangencial del campo combinado (en función de la ubicación y el tiempo) debe ser distinto de cero adyacente a la interfaz. Además, las leyes físicas que gobiernan los campos generalmente implicarán que uno de los dos componentes es continuo a través de la interfaz (es decir, no cambia repentinamente cuando cruzamos la interfaz); por ejemplo, para las ondas electromagnéticas, una de las condiciones de la interfaz es que la componente tangencial de \mathbf{H} sea continua si no hay corriente superficial. Por tanto, incluso si la reflexión es total, debe haber alguna penetración del campo de flujo en el medio 2; y esto, en combinación con las leyes relativas a los campos de esfuerzo y flujo, implica que también habrá alguna penetración del campo de esfuerzo. La misma condición de continuidad implica que la variación (ondulación) del campo en el medio 2 estará sincronizada con la de las ondas incidente y reflejada en el medio 1.

El tipo de acoplamiento entre la esfera y la fibra ahusada se hizo mediante una onda evanescente. Una onda evanescente es una onda estacionaria en un campo cercano con una intensidad que muestra un decaimiento exponencial con distancia desde el límite en el cual la onda se produjo. Las ondas evanescentes son una propiedad general de las ecuaciones de ondas, y en principio pueden ocurrir en cualquier contexto en el cual las ecuaciones de una onda apliquen. Estas son formadas en el límite de un medio con diferentes propiedades de movimiento y son más intensas con un tercio de su longitud de onda desde que empieza su formación. En la figura [1.3] se muestra un esquema con su distribución de la intensidad radial y angular.

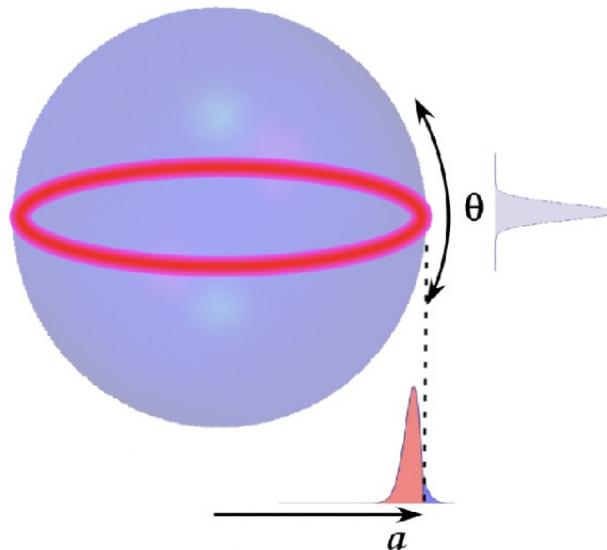


Figura 1.3: Se muestra la esfera y la distribución de la intensidad radial y angular

Ecuaciones de Maxwell en un material dieléctrico.

Un dieléctrico es un aislante eléctrico, un medio que no contiene cargas o corrientes libres. Sin embargo, contiene cargas en forma de dipolos que pueden reaccionar en respuesta al campo. Por lo tanto, un dieléctrico se puede polarizar en respuesta a un campo electromagnético (aquí la polarización se refiere a una alineación y separación de las cargas del dipolo debido al campo, no confundirse con la polarización del campo entrante). La polarización \mathbf{P} del dipolo que es inducida por un campo \mathbf{E} es una función del propio material. Esta polarización está relacionada con la intensidad

de campo aplicada en un medio con una respuesta lineal a través de la susceptibilidad y permitividad eléctrica χ del medio de acuerdo con

$$\mathbf{P} = \varepsilon_0 \chi_e \mathbf{E}$$

La magnitud de la susceptibilidad depende de las propiedades microscópicas del medio. La polarización del material es en sí misma una fuente de un campo eléctrico, que luego polariza el material, etc. Para describir el campo efectivo en un medio, por lo tanto, usamos una cantidad modificada, el desplazamiento \mathbf{D} ,

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P} = \varepsilon_0 (1 + \chi_e) \mathbf{E} = \varepsilon \mathbf{E}.$$

La constante de proporcionalidad se llama permitividad eléctrica del material. En el vacío, simplemente vuelve a la permitividad del vacío, ya que la susceptibilidad del vacío es $\chi_e = 0$. Sin entrar en demasiados detalles, se puede encontrar que el campo magnético \mathbf{B} es similarmente transformado. El campo magnético en el material es ahora denotado \mathbf{H} , y se relaciona con \mathbf{B} a través de la permeabilidad magnética μ que describe la capacidad del material para magnetizarse en respuesta a un campo magnético,

$$\mathbf{H} = \frac{1}{\mu} \mathbf{B}.$$

Si el medio de hecho tiene una respuesta lineal como se discutió anteriormente, y también es homogéneo, es decir, la susceptibilidad eléctrica y la permitividad no varían espacialmente, las ecuaciones de Maxwell en el material se reducen a las del espacio libre, excepto por

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu \varepsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}.$$

En el espacio libre tenemos $\mu = \mu_0$ and $\varepsilon = \varepsilon_0$ entonces vemos, al comparar esta ecuación con la misma ecuación en el espacio libre, que

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}}.$$

La ecuación modificada para el rotacional de \mathbf{B} implica que la velocidad de la luz en el material difiere de la velocidad de la luz en el vacío según

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu\varepsilon}} = \frac{c}{n},$$

por lo tanto $n = \sqrt{\frac{\varepsilon\mu}{\varepsilon_0\mu_0}}$.

Así que finalmente llegamos a la ecuación para el índice de refracción n . Vemos que está directamente relacionado con la respuesta del material a los campos eléctricos y magnéticos. La permeabilidad magnética de la mayoría de los dieléctricos es pequeña y suele estar cerca de la permeabilidad en el vacío. $\mu \sim \mu_0$ entonces, lo podemos simplificar a:

$$n \simeq \sqrt{\varepsilon_r},$$

Donde el subíndice r indica que esta es ahora la permitividad eléctrica relativa (la permitividad del material dividida por la permitividad del vacío).

Dispersión

La derivación anterior nos ha dicho que las ondas electromagnéticas se propagan a una velocidad reducida en un material dieléctrico, pero no nos dice nada más sobre la dependencia funcional del índice de refracción del material. Para hacer esto de manera clásica, consideramos que los dipolos consisten en un electrón (ligero) conectado a un núcleo (pesado) con una fuerza restauradora como un resorte (el desplazamiento desde el equilibrio es proporcional a la fuerza aplicada). Considere un dipolo que interactúa con una onda electromagnética que se propaga. La magnitud del campo eléctrico de la onda en la ubicación del dipolo y paralela al eje del dipolo está representada por $E(t)$. La ecuación de movimiento (segunda ley de Newton) del dipolo es

$$\frac{d^2x}{dt^2} = \frac{qE(t)}{m_e} - \frac{\gamma}{m_e} \frac{dx}{dt} - \omega_0^2 x.$$

Aquí x describe el cambio en la separación de las dos cargas del dipolo (en relación con su longitud de equilibrio), q_e y m_e son la carga y la masa de un electrón respectivamente, γ describe pérdidas (absorción del campo) y ω_0 es la frecuencia de

resonancia del dipolo (exactamente análoga a la frecuencia natural de un resorte).

Para N dipolos podemos relacionar la polarizabilidad de un material con x de acuerdo con $P = q_e N x$. Resolver nuestra ecuación de movimiento para x permite obtener la expresión,

$$|\mathbf{P}| = \frac{Ne^2/m_e}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \omega^2\gamma^2}} |\mathbf{E}|$$

donde ω es la frecuencia angular del campo de luz incidente.

Para frecuencias alejadas de la frecuencia de resonancia, el término de pérdida se puede ignorar y las ecuaciones de Maxwell se pueden usar para mostrar que el índice de refracción es

$$n^2 = 1 + \frac{Ne^2}{m_e \varepsilon_0^2} \left(\frac{1}{\omega_0^2 - \omega^2} \right).$$

Vemos en esta ecuación que el índice de refracción es una función de la frecuencia de la luz entrante. El fenómeno se llama dispersión y es una consideración importante en el diseño de componentes ópticos.

- Una onda electromagnética en un material dieléctrico polariza dipolos en el material generando un nuevo campo
- El nuevo campo se suma con el campo entrante, lo que da como resultado un nuevo campo de propagación que viaja más lentamente que el campo entrante (es decir, la velocidad de fase es más lenta) como se describe en el índice de refracción.
- Las oscilaciones del dipolo tienen resonancias, lo que significa que la polarización del dipolo depende de la frecuencia de la luz entrante.
- El índice de refracción del material depende, por tanto, de la frecuencia de la luz.

Para las ondas electromagnéticas en el espectro visible (400 nm - 700 nm) que se propagan a través de materiales transparentes (vidrio, agua), las frecuencias de resonancia se encuentran principalmente en frecuencias mucho más altas que la frecuencia de la luz. Por lo tanto, a medida que aumenta la longitud de onda (ω disminuye) en

todo el espectro, el índice de refracción disminuye. Esta es la razón por la que un prisma genera un espectro de colores de arco iris (y de hecho, por qué un arco iris es multicolor). Además, la variación del índice de refracción con la longitud de onda es mayor en la parte más azul del espectro (longitudes de onda más bajas).

Campos electromagnéticos en una interfaz

Ahora que entendemos un poco mejor el índice de refracción, podemos revisar lo que sabemos sobre la reflexión y refracción de ondas en una interfaz. La onda incidente se propaga hacia el material dando como resultado una polarización del material. Esta polarización genera ondas secundarias. El componente de estas ondas secundarias que se propagan en el material se suma a la onda incidente para formar la onda transmitida. También se crea una onda reflejada debido a esta polarización que se propaga fuera del material.

En un ejemplo cotidiano con la luz, primero, busque una ventana a través de la cual mirar. Preferiblemente, párese en el lado más brillante de la ventana para que pueda ver mejor la luz reflejada. Mire su propio reflejo: esta es la luz que incide en la ventana y se refleja directamente en usted. Decimos que el ángulo de incidencia θ_i es cero al estar frente a frente de su reflejo. Al mirar a un cierto ángulo de reflejo cuyo máximo son 90 grados es posible que los reflejos sean más brillantes generalmente, la intensidad reflejada de la luz no polarizada aumenta con el ángulo de incidencia. El efecto con la luz transmitida puede ser más difícil de ver, pero la conservación de la energía nos dice que si la intensidad reflejada ha aumentado, entonces la intensidad transmitida debe haber disminuido. La observación de la reflexión y la transmisión con luz polarizada introduce un nivel adicional de complicación: tanto las intensidades de reflexión como de transmisión también dependen del estado de polarización. Esto se debe a cómo los dipolos dispersan la luz polarizada. Para dar cuenta de esto, debemos especificar la polarización de la luz en relación con el plano de incidencia. Considere un rayo de luz que incide sobre una superficie con un ángulo de incidencia θ_i . Habrá un haz transmitido en el ángulo θ_t y un haz reflejado en el ángulo θ_r . Hay vectores de onda correspondientes k para cada haz. Este plano de incidencia se define como el plano en el que se propagan los tres haces que se muestra en la figura 1.4.

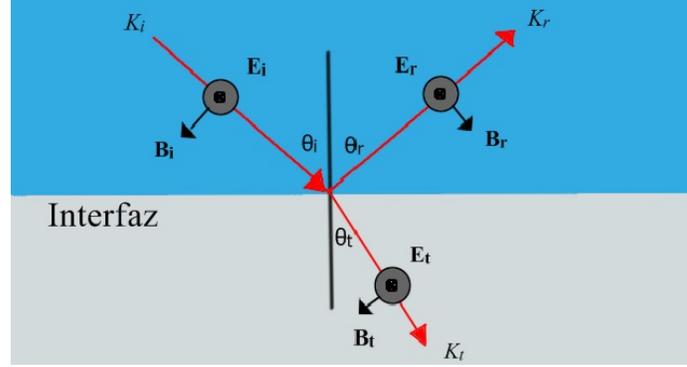


Figura 1.4: Cambio de fase para la reflexión de luz polarizada perpendicularmente

Definimos nuestras polarizaciones en relación con este plano; esto puede ser confuso, así que tómese el tiempo para comprender cómo se define. Para una superficie horizontal, como en la figura 1.4, una polarización que consideramos es la polarización horizontal que vemos es perpendicular a la dirección de propagación. Esto 'sobresale' o es perpendicular al plano de incidencia, por lo que se llama polarización 's' (la s en realidad proviene de la palabra alemana para perpendicular, 'senkrecht'). Es perpendicular al plano de incidencia.

Ahora intentemos construir un modelo matemático del proceso de transmisión/reflexión. Comenzaremos escribiendo tres ondas de luz planas monocromáticas: el incidente \mathbf{E}_i , el reflejado, \mathbf{E}_r y el campo transmitido, \mathbf{E}_t :

$$\mathbf{E}_i = \mathbf{E}_{0i} \cos(\mathbf{k}_i \cdot \mathbf{r} - \omega_i t), \quad \mathbf{E}_r = \mathbf{E}_{0r} \cos(\mathbf{k}_r \cdot \mathbf{r} - \omega_r t + \phi_r), \quad \mathbf{E}_t = \mathbf{E}_{0t} \cos(\mathbf{k}_t \cdot \mathbf{r} - \omega_t t + \phi_t),$$

con factores de fase ϕ_r y ϕ_t . Tenga en cuenta que cada onda tiene un vector de onda \mathbf{k} que apunta en la dirección de propagación y tiene una magnitud de $2\pi n/\lambda_0$ y donde λ_0 es la longitud de onda de la onda en el vacío.

Las ecuaciones de Maxwell nos dan la condición de límite de que los componentes del campo E y B paralelos a la interfaz deben ser continuos a través de ella, es decir, el componente del campo tangencial por encima y por debajo de la superficie debe ser igual. Esta condición se puede formalizar tomando el producto cruzado de los tres campos con un vector unitario que se encuentra en el plano del campo incidente, $\mathbf{u}_n \times \mathbf{E}_i + \mathbf{u}_n \times \mathbf{E}_r = \mathbf{u}_n \times \mathbf{E}_t$. Esta relación debe mantenerse en todos los puntos de

la superficie y en todo momento. De la dependencia temporal, obtenemos que $\omega_i = \omega_r = \omega_t$, es decir, la frecuencia de los campos no cambia por reflexión o transmisión. Eso no nos sorprende, porque el proceso de dispersión que hace que la luz se refracte es elástico. Lo que queda es

$$\mathbf{k}_i \cdot \mathbf{r} = \mathbf{k}_r \cdot \mathbf{r} + \phi_r = \mathbf{k}_t \cdot \mathbf{r} + \phi_t,$$

en la interfaz. Para el incidente y la onda reflejada obtenemos $(\mathbf{k}_i - \mathbf{k}_r) \cdot \mathbf{r} = \phi_r$. Dado que $(\mathbf{k}_i - \mathbf{k}_r)$ no tiene ningún componente en el plano de la interfaz, los componentes tangenciales deben ser iguales, $k_i \sin(\theta_i) = k_r \sin(\theta_r)$. Dado que el índice de refracción para la onda incidente y reflejada es igual, obtenemos la ley de reflexión, $\theta_i = \theta_r$.

Para el incidente y los campos transmitidos, tenemos de manera similar $(\mathbf{k}_i - \mathbf{k}_t) \cdot \mathbf{r} = \phi_t$. Nuevamente, las componentes tangenciales de los campos involucrados deben ser iguales, $k_i \sin(\theta_i) = k_t \sin(\theta_t)$. Sin embargo, ahora tenemos que tener en cuenta que el incidente y el campo transmitido se propagan en los medios con diferentes índices de refracción n_i y n_t , respectivamente. Obtenemos la Ley de Snell, $n_i \sin(\theta_i) = n_t \sin(\theta_t)$.

Cavidades ópticas

Las microcavidades ópticas [11] consisten en estructuras resonantes donde las dimensiones de la cavidad están en el orden de un pequeño múltiplo de la longitud de onda de la luz. Las principales propiedades de interés en las microcavidades son las siguientes:

Factor de calidad Q: La pérdida en una cavidad resonante es un parámetro importante, ya que determina fuertemente la aplicabilidad potencial de una cavidad para muchas áreas diferentes. La pérdida en la cavidad se expresa comúnmente en términos de factor de calidad Q, que se relaciona tanto con el ancho de línea $\Delta\lambda$ de la resonancia ubicada en λ , como con la vida útil del fotón de la cavidad τ a través de la ecuación: $Q = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = \omega\tau$ donde ω es la frecuencia óptica resonante ($\omega = 2\pi c/\lambda$). Esta relación intrínseca entre el tiempo de vida del fotón de la cavidad y el ancho de banda ilustra

el papel que desempeña el factor de calidad en la determinación del ancho de banda resonante y la pérdida para el filtrado pasivo de la cavidad, y también en la determinación de los umbrales para procesos activos como la generación de ondas ópticas láser y procesos no lineales. El tiempo de decaimiento τ se puede expresar matemáticamente como: $\tau = \frac{1}{c\alpha}$ donde c es la velocidad de la luz y α representa el coeficiente de absorción del material. El factor de calidad total de una cavidad en modo galería susurrante se debe a muchos mecanismos[12] , que pueden ser descompuestos en la siguiente ecuación: $\frac{1}{Q_{total}} = \frac{1}{Q_{mat}} + \frac{1}{Q_{WGM}} + \frac{1}{Q_{super}} + \frac{1}{Q_{contam}} + \frac{1}{Q_{acoplamiento}} = \frac{1}{Q_{intrinsec}} + \frac{1}{Q_{acoplamiento}}$

donde Q_{total} denota el factor de calidad total de la cavidad. El factor de calidad de la cavidad intrínseco $Q_{intrinsec}$ se debe a las contribuciones de la pérdida de material del resonador (Q_{mat}), la pérdida de radiación presente en una cavidad dieléctrica curva (Q_{WGM}), dispersión de imperfecciones de la superficie (Q_{super}) y cualquier contaminante en la superficie de la cavidad o dentro del dieléctrico (Q_{contam}). $Q_{acoplamiento}$ representa la pérdida de energía debido al acoplamiento de entrada / salida. Estrictamente hablando, esta separación de cada contribución a la pérdida de cavidad solo es válida cuando cada pérdida es débil, de modo que solo una pequeña fracción de la energía óptica se pierde en cada viaje de ida y vuelta en la cavidad y desde luego también en el acoplador de fibra óptica [13].

Rango Espectral Libre (FSR): el (FSR) de una cavidad representa el espaciado de frecuencia (longitud de onda) entre modos longitudinales sucesivos. Esta definición, comúnmente utilizada para las cavidades Fabry-Perot (FP), es algo ambigua para las cavidades en este trabajo, ya que el espectro de modo es altamente complejo. Sin embargo, al usar la analogía más directa con un FP, un microresonador puede considerarse una cavidad FP envuelta sobre sí misma, de modo que la periferia del resonador corresponde a la separación del espejo FP. Al hacer esto, los modos que determinan la FSR son los modos sucesivos que tienen la misma estructura de modo transversal. Para un resonador simétrico azimutal de radio R e índice de refracción η , el FSR puede ser aproximado como:

$$\Delta\nu_{FSR} = \frac{c}{2\pi\eta R} \quad (1.1)$$

$$\Delta\lambda_{FSR} = \frac{\lambda^2}{2\pi\eta R} \quad (1.2)$$

Para una microcavidad típica con un diámetro de 30 micras y un índice de refracción de $\eta=1,45$ a una longitud de onda de $\lambda = 1550$ nm, esta expresión proporciona un FSR de 17,6 nm, muy cerca de la respuesta exacta de 17,9 nm.[14]

Finura: Finura \mathcal{F} es la relación entre el espacio del modo de cavidad y el ancho de banda de la cavidad. Esta definición tiene en cuenta tanto la pérdida de cavidad (Q) como el espaciado del modo de cavidad (FSR) para obtener un parámetro único adimensional que caracteriza la capacidad de resolver la estructura de resonancia de la cavidad, según lo dado por:

$$\mathcal{F} = \frac{\Delta\lambda_{FSR}}{\Delta\lambda} = \frac{\lambda Q}{2\pi\eta R} \quad (1.3)$$

Donde λ es la longitud de onda, Q es el factor de calidad, η índice de fracción efectivo que determina el índice de refracción que experimenta un modo de propagación en razón a su velocidad de grupo y R es el radio.

El conocimiento de la finura de la cavidad es útil para una amplia gama de temas, ya que determina varias propiedades, por ejemplo, la cantidad de ruido, la potencia espectral que pasa un filtro resonante y la cantidad de amplificación de energía en un sistema resonante.

Modos de volumen: El volumen que ocupa cada modo de cavidad depende de la distribución de campo resonante de la cavidad, que a su vez depende de la geometría particular de la cavidad. El volumen modal juega un papel fundamental en muchas aplicaciones de microcavidades[15], lo que resulta en energía óptica que está estrechamente limitado a volúmenes físicos del orden de cientos a un par de miles de micras cúbicas (en algunos casos, incluso por debajo de una micra cúbica[16][17][18]. Esto, junto con la baja pérdida posible en microcavidades de alta Q da como resultado una densidad de energía muy grande en la cavidad. Estas utilizan grandes densidades de energía para áreas que van desde la generación de ondas ópticas no lineales hasta la óptica cuántica, donde el gran campo eléctrico por fotón puede permitir una fuerte

interacción con un sistema atómico. El volumen de modo está dado por la siguiente ecuación:

$$V_m = \frac{\int_{V_Q} \epsilon(\vec{r}) |\vec{E}|^2 d^3\vec{r}}{|E_{max}^2|} \quad (1.4)$$

donde $|\vec{E}|$ representa el campo eléctrico de la cavidad, $\epsilon(\vec{r}) = \eta^2(\vec{r})$ el índice de refracción al cuadrado, y V_Q denota el volumen de integración. Estos se denominan así porque la ecuación 1.4 se usa para determinar la interacción cuántica de un átomo y un campo electromagnético[19].

Potencia circulante: Uno de los beneficios del largo tiempo de almacenamiento de fotones en microcavidades de alta Q es que pueden generar una potencia de circulación interna significativa con bajas potencias de bombeo. Este factor de acumulación de cavidades se expresa mediante:

$$\frac{P_{circ}}{P_{entrada}} = \frac{\lambda Q_0}{\pi^2 \eta R} \frac{\kappa}{(1 + \kappa)^2} \quad (1.5)$$

donde Q_0 denota la cavidad intrínseca Q y $\kappa = Q_0/Q_{acoplamiento}$ es la relación de la vida útil del fotón de la cavidad intrínseca (equivalente Q) a la vida útil del fotón debido al acoplamiento. Esta fórmula indica que el factor de acumulación de cavidad es proporcional a Q, lo que explica por qué las cavidades de factor de calidad ultra-alta pueden dar como resultado una amplificación sustancial de la energía de campo resonante de entrada.

Microesferas de dióxido de silicio.

Las microcavidades esféricas son el tipo más común de estructuras que poseen factores de calidad ultraalta. Sus propiedades ópticas han atraído mucho interés, que van desde el diagnóstico óptico de microgotas líquidas [20], hasta el estudio de muy bajo umbral de láser y procesos no lineales en microesferas de sílice sólida[21]. Desde un punto de vista práctico, el uso de microesferas de sílice como una cavidad de alto Q es ventajoso, ya que se han estudiado ampliamente y se producen fácilmente.

La belleza de las microesferas de sílice es que se producen muy fácilmente en un entorno de laboratorio. Al calentar el extremo de una preforma de sílice, como una

varilla de cuarzo o fibra óptica (como se usa en esta tesis), el extremo refluye para formar un volumen esférico bajo la influencia de la tensión superficial. Debido a la alta viscosidad de la sílice, la estructura refluida es altamente esférica (excentricidades del orden del 1-2%) y extremadamente uniforme. La superficie esférica tiene una rugosidad intrínseca muy baja (medida del orden de 1 nm) y, por lo tanto, tiene una pérdida de dispersión superficial muy pequeña[19]. Para el trabajo en esta tesis, el proceso de reflujo se realizó con una máquina fusionadora de fibra óptica, que permite la creación de pequeñas cavidades esféricas, que van desde menos de 20 micras hasta más de 200 micras. La figura 1.5. muestra una microesfera de sílice. La esfera está unida al vástago de fibra a partir del cual se formó. La presencia del vástago de fibra generalmente se puede ignorar, ya que los modos ópticos excitados generalmente se encuentran en el plano ecuatorial y, por lo tanto, tienen una superposición insignificante con esta región perturbada.

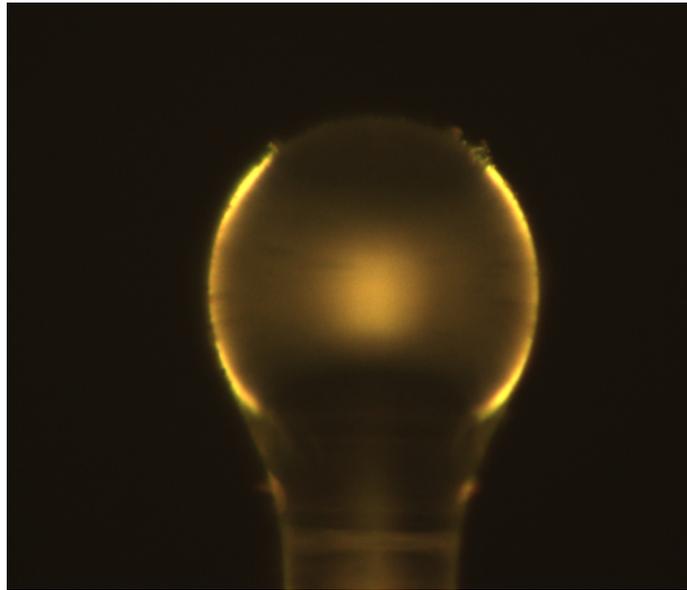


Figura 1.5: Microesfera construida de dióxido de silicio

Propiedades ópticas

Los modos ópticos de una cavidad dieléctrica esférica son muy conocidos y pueden derivarse explícitamente considerando la ecuación de Helmholtz en coordenadas esféricas[22][23]. Los modos se caracterizan por un conjunto de cuatro números cuán-

tivos (q, l, m, p) , donde q denota el orden de modo radial, l y m los números cuánticos angulares, y p la polarización (TE o TM). Para una cavidad dieléctrica de radio R e índice de refracción n (se supone que el índice externo es la unidad) los campos ópticos están dados por:

$$\vec{E}^{TE}(r, \theta, \phi) = \begin{cases} j_l(\eta kr) \vec{X}_{lm}(\theta, \phi) & \text{si } r < R \\ j_l(\eta kR) h_l^{(1)}(kr) / h_l^{(1)}(kR) \vec{X}_{lm}(\theta, \phi) & \text{si } r > R \end{cases}$$

$$\vec{B}^{TE}(r, \theta, \phi) = -\frac{1}{k} \nabla \times \vec{E}(r, \theta, \phi) \quad (1.6)$$

$$\vec{B}^{TM}(r, \theta, \phi) = \begin{cases} j_l(\eta k r) \vec{X}_{lm}(\theta, \phi) & \text{si } r < R \\ j_l(\eta k R) h_l^{(1)}(kr) / h_l^{(1)}(kR) \vec{X}_{lm}(\theta, \phi) & \text{si } r > R \end{cases}$$

$$\vec{E}^{TM}(r, \theta, \phi) = -\frac{1}{\epsilon(\vec{r})k} \nabla \times \vec{B}(r, \theta, \phi) \quad (1.7)$$

Donde $\vec{X}_{lm} = [l(l+1)]^{-\frac{1}{2}} \vec{L} Y_{lm}$ denota los armónicos esféricos (con $\vec{L} = \vec{r} \times \nabla$), y_{jl} y $h_l^{(1)}$ representa las funciones esféricas de Bessel (Hankel) respectivamente. La posición de resonancia y el ancho se obtienen resolviendo la ecuación característica.

$$n^{1-2b} \frac{[nkR j_l(nkR)]'}{nkR j_l(nkR)} = \frac{[kRh_l^{(1)}(kR)]'}{kRh_l^{(1)}(kR)} \quad (1.8)$$

donde b representa la polarización del modo óptico (1 para TM y 0 para TE). La prima denota diferenciación con respecto al argumento. Esta ecuación explica la radiación a través del uso de una condición de límite de onda saliente de la cavidad, según lo dado por la función compleja de Hankel del primer tipo. La solución de esta ecuación da como resultado un número de onda complejo, $k = k_r + ik_i$, que determina tanto la longitud de onda de resonancia ($\lambda = 2\pi/k_r$) como el factor de calidad de radiación ($Q_{rad} = k_r/(2k_i)$).

Ubicaciones resonantes

La solución numérica de la ecuación 1.9 da directamente la longitud de onda resonante para un conjunto dado de números de modo. Si bien esto se puede resolver fácilmente con una computadora, una aproximación analítica es útil para una comprensión rápida. Ha habido una serie de expresiones aproximadas para las ubicaciones de resonancia de la esfera[24] , todas basadas en expansiones asintóticas de la ecuación característica, válidas para l números.

Capítulo 2

Metodología experimental

Este capítulo está destinado a la descripción de la experiencia experimental y de los pasos necesarios para conseguir modos ópticos guiados, atrapados en un resonador esférico.

Nuestro sistema óptico con resonadores WGM lo podemos dividir en seis partes fundamentales para su construcción y caracterización:

- Camino óptico y acoplamiento
- Fabricación de microesferas
- Adelgazamiento de fibra óptica
- Segundo acoplamiento microesfera-fibra adelgazada
- Visualización de dispositivos de tamaño micrométrico.
- Obtención de medidas experimentales

El siguiente diagrama de flujo, resume el proceso realizado en esta etapa experimental:

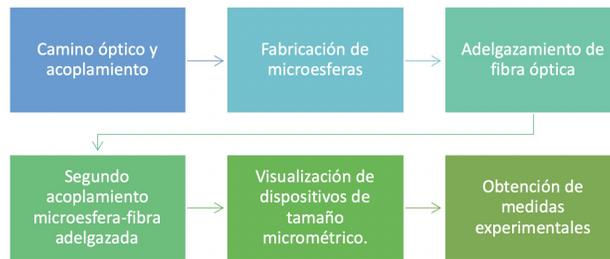


Figura 2.1: Diagrama de flujo, se resumen las etapas del proceso para la elaboración del sistema óptico

La metodología llevada a cabo se sintetiza en las siguientes tareas realizadas para su finalización:

1. Optimizamos el camino óptico del láser hasta el punto donde se encuentre la fibra óptica de acoplamiento y se introduce la luz en dicha fibra óptica. Se verifica que y detecta dicha luz a la salida.
2. Se limpia y monta sobre los motores de estiramiento la fibra óptica a adelgazar y se prepara la microflama de hidrógeno-oxígeno. El sistema para adelgazamiento de fibra óptica consiste en tres motores principalmente de los cuales dos sirven para estirar la fibra óptica y uno para el movimiento de la microflama. Además, es necesario visualizar el proceso de adelgazamiento.
3. Para el adelgazamiento de la fibra óptica. Se determina el espesor de la fibra adelgazada y se usan esos valores en los motores.
4. Se requiere adelgazar controlando la distancia a estirar, la velocidad de los dos motores que estiran, así como la velocidad y la distancia de la oscilación de la micro-flama.
5. Se efectúa el adelgazamiento de la fibra óptica de forma controlada y sistemática.
6. Fabricamos las microesferas utilizando la fusionadora en la punta de una fibra óptica. Mediante una serie de descargas eléctricas es posible formar

cavidades esféricas en dicha punta.

7. Se coloca la esfera fabricada en la zona de acoplamiento. Se acopla la luz proveniente de la fibra adelgazada a la micro-esfera y se optimizó la señal detectada.
8. Analizamos la señal obtenida con la caracterización del micro-resonador.

A continuación se describe el sistema óptico.

2.1. Camino óptico y primer acoplamiento a la fibra óptica

El primer paso fue utilizar un láser de 532 nm que corresponde al color verde, con la intención de acoplar la luz proveniente del láser a la fibra óptica. Para conseguirlo se limpiaba la fibra óptica, se retiraba 1 cm del recubrimiento de la fibra con unas pinzas, se volvía a limpiar con alcohol, hisopos y se cortaba mediante una cortadora de fibra óptica. La calidad del corte era de suma importancia, así como la limpieza de la fibra, ya que la existencia de algún contaminante o un corte con un ángulo distinto a 90° repercutía en pérdidas de luz y dificultaba el acoplamiento. Aprender acoplar luz visible a la fibra óptica fue una tarea importante, ya que esta permitió familiarizarse con elementos ópticos y mecánicos del laboratorio. La experiencia obtenida con el acoplamiento con luz visible fue aplicada posteriormente para facilitar el acoplamiento con luz infrarroja. La figura 2.2 muestra un esquema general del arreglo óptico utilizado para el acoplamiento de luz visible.

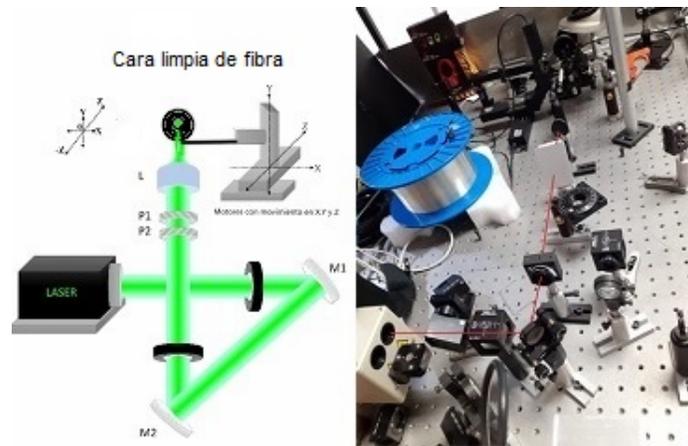


Figura 2.2: a) Camino óptico que sigue un láser continuo de 532 nm para acoplar la luz a la fibra óptica con luz visible. b) Camino óptico de luz infrarroja (las líneas rojas son para guiar el ojo). Se pueden apreciar los elementos ópticos utilizados para acoplar la luz del láser a la fibra óptica.

Finalmente, con la ayuda de unas plataformas de desplazamiento motorizado que sujetaban el acoplador de fibra óptica nos permitía colocar la cara limpia cortada a 90° de la fibra enfrente del foco de la lente. La entrada de la fibra óptica en tres dimensiones se manipulaba con una gran precisión debido a que estos motores tienen un paso de decenas de nanómetros. Cuando tenemos el máximo de luz entrando a la fibra observábamos a la salida la luz acoplada. Fue posible cuantificar con un medidor de potencia o con un detector dicho acoplamiento, además del tipo y geometría de modo acoplado. Este medidor de potencia estaba conectado al final de la fibra óptica y podía determinar cuanta luz estaba acoplando con la intención de maximizar la cantidad de luz acoplada mediante el movimiento de los motores. Incluso en la figura 2.3 se puede apreciar en color verde el camino óptico con el haz ya acoplado a la fibra.

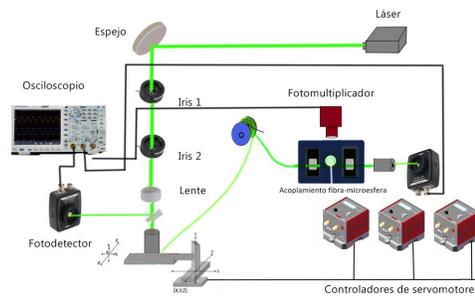


Figura 2.3: Las plataformas de desplazamiento son controladas con los controladores de servos, existen dos fotodetectores, un fotomultiplicador, el osciloscopio para la obtención de señales en el sistema óptico.

La figura 2.4 muestra el montaje real en el laboratorio de óptica y fotónica con los elementos ópticos empleados para el acoplamiento de luz proveniente del láser a la fibra óptica. Se muestra un rollo de fibra óptica iluminado después de realizar el acoplamiento y maximizar la luz entrante. Se consiguió tener una potencia máxima de $1 \mu\text{W}$.

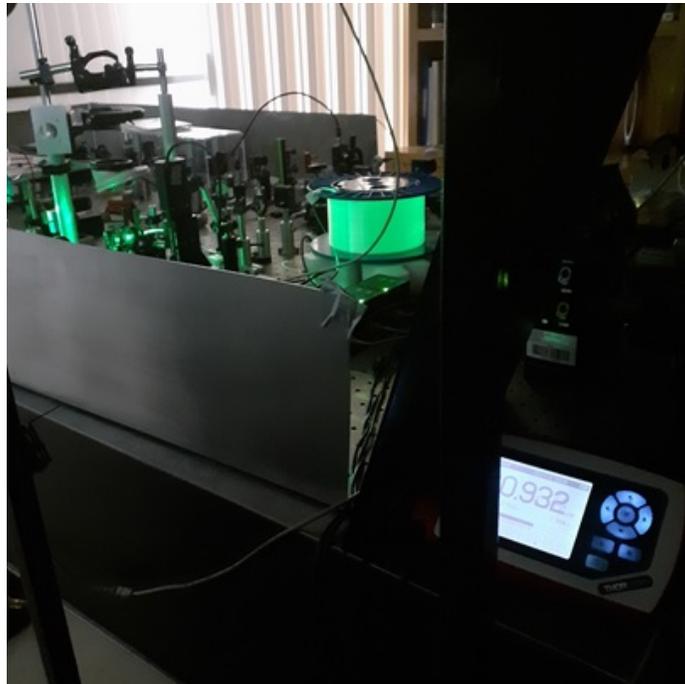


Figura 2.4: El rollo de fibra óptica se ilumina en color verde después de haber maximizado la luz entrante a la fibra óptica y de cuantificarla con ayuda de un medidor de potencia a la salida de la fibra óptica.

2.2. Fabricación de las micro-esferas

Para fabricar las micro-esferas se limpiaba la fibra óptica con alcohol y acetona con la finalidad de ablandecer el recubrimiento plástico de la fibra, el cual se retiraba posteriormente con el uso de unas pinzas, dejando al descubierto el centro de la fibra a lo largo de 1 cm. En seguida se colocaba la fibra óptica en una fusionadora como se muestra en la figura 2.5



Figura 2.5: muestra la forma como se coloca la fibra óptica en la fusionadora óptica previamente limpiada y sin el recubrimiento polimérico también es posible ver el electrodo donde se genera el arco eléctrico.

Para adelgazar la fibra óptica se utilizaba la fusionadora en modo manual de esta manera podíamos manipular ambas fibras y generar la cantidad de arcos eléctricos deseados con la finalidad de obtener una micro cavidad esférica. En el modo manual comenzábamos a generar las descargas eléctricas hasta conseguir abombar el extremo de la fibra adelgazada. La visualización de la esfera abombada por los arcos eléctricos y la tensión superficial era posible verla gracias a las dos cámaras que posee la fusionadora. Además la fusionadora óptica sostenía la fibra con dos abrazaderas

manuales y mediante un arco eléctrico y la fuerza aplicada por dos motores es capaz de ir adelgazando la fibra e incluso formar esferas de dióxido de silicio por tensión superficial.

La fusionadora óptica volvía a limpiar la fibra y también determinaba que tan sucia podía estar aun la fibra. Esta fusionadora tiene una cámara que nos permite visualizar que tan tensa se encuentra la fibra óptica y tiene dos motores que se pueden controlar de forma manual o automática para mover o ejercer más o menos tensión sobre la fibra óptica según se desee. Así que una vez se fijaba la fibra en la fusionadora se procedía a generar descargas eléctricas sobre esta mientras que al mismo tiempo se iba estirando, obteniendo una geometría como la que se muestra en la figura 2.6

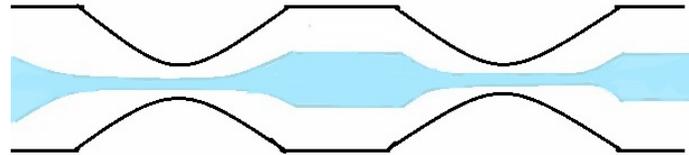


Figura 2.6: Forma que se debe tener de la fibra óptica antes de comenzar a generar los arcos eléctricos para formar microesferas.

Una vez se conseguía la forma que tiene la fibra en la figura centrábamos en la fusionadora la región más estrecha y con descargas eléctricas conseguíamos abombar la fibra adelgazada hasta obtener una esfera, el proceso se repetía múltiples veces para obtener esferas de diferentes diámetros o elipsoides con distintas excentricidades. En las figuras 2.7 se puede ver como se forma la micro-esfera por tensión superficial.



Figura 2.7: La fotografía de la izquierda muestra la fibra adelgazada en la fusionadora óptica y la fotografía de la derecha muestra la fibra ya transformada en una microesfera.

El esquema que se muestra en la figura 2.8 resume en tres partes fundamentales

en la fabricación de las microesferas. En la parte I se ilustra como los motores separan la fibra óptica una distancia considerable para evitar la fusión de la fibra en una sola pieza, sino por el contrario lo que se desea es generar dos esferas al mismo tiempo.

En la etapa II se genera un arco eléctrico el cual aumenta la temperatura y se comienza a fusionar de tal forma que adquiere una geometría cóncava debido a la tensión superficial. En la etapa III se siguen genrando arcos eléctricos y con ayuda de la cámara de la fusionadora podemos determinar que tan abombada se encuentra el elipsoide. El proceso se repite varias veces hasta obtener una cantidad suficiente de microesferas, las cuales serán usadas en los experimentos siguientes.

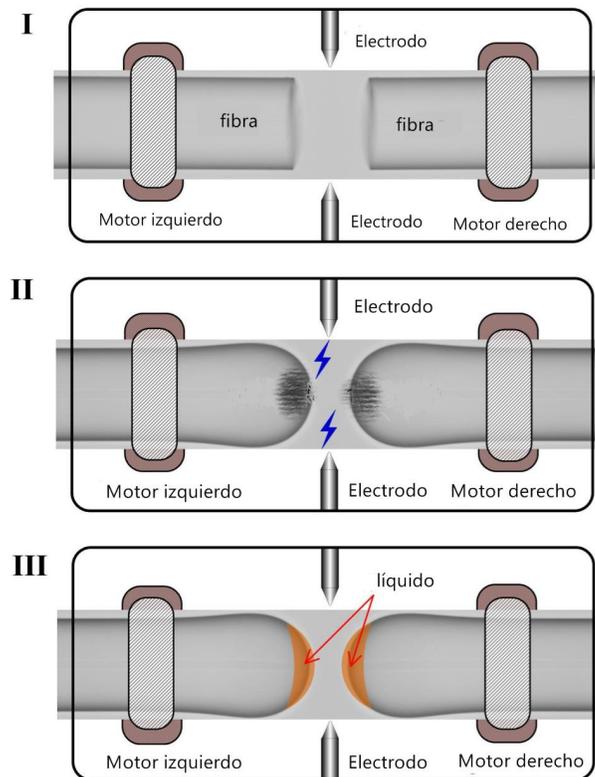


Figura 2.8: Adaptada de “An In-Line Fiber Optic Fabry–Perot Sensor for High-Temperature Vibration Measurement”. El proceso para la fabricación de las microesferas se resume en tres partes fundamentales: ajuste en distancia de la fibra óptica, generación del arco eléctrico y formación esférica debida a la tensión superficial.

Después de fabricar las microesferas estas tenían la forma de una esfera unida a un vástago como se muestra en la figura 2.9 dicho vástago lo ocupábamos para manipular la esfera y colocarla en una montura la cual era fijada a su vez en un brazo móvil que

se podía mover en las tres direcciones espaciales.

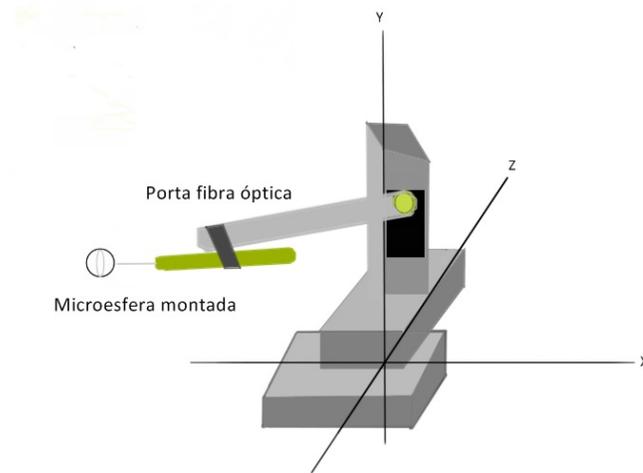


Figura 2.9: Sistema dramatizado para representar el sistema de plataformas motorizadas sobre la que se pone la porta fibra para colocar la microesfera.

2.3. Adelgazamiento de fibra óptica

La metodología que usamos para acoplar luz a nuestra microesfera consiste en hacer uso de una onda evanescente que decae de forma exponencial al salir de la fibra óptica adelgazada. Esta metodología ha mostrado ser eficiente y mucho más económica que otras formas de acoplamiento de luz sin embargo ha sido uno de los mayores retos a los que nos hemos enfrentado en este proyecto debido a que se necesita que el diámetro de la fibra óptica sea del orden de la longitud de onda de la onda evanescente y esto en el orden de una micra.

El procedimiento experimental para utilizar una fibra óptica estándar y sobre ella, fabricar en una zona a lo largo de su trayectoria, el acoplador de fibra ahusada. Se escoge una zona a lo largo de los metros de la fibra ahusada y seleccionamos 3 cm para remover la cubierta de polímero que la protege.

Después se fijaba la fibra óptica en las agarraderas y sobre estas se ponía cinta adhesiva con el objetivo de fijarlas con mayor fuerza y que durante el estiramiento

estas no se recorrieran. En la figura 2.10 se puede ver uno de los extremos de las agarraderas.

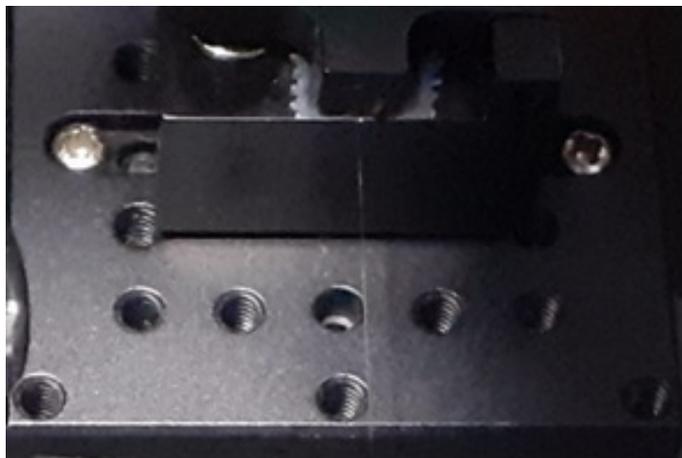


Figura 2.10: Se ponía la fibra óptica lo mas tensa posible en las agarraderas y se reforzaba el agarre con cinta adhesiva.

Con una micro-flama de hidrogeno-oxigeno se empezaba a calentar la fibra descubierta tras haber dejado durante cinco minutos que la micro-flama se estabilizará. El motivo por el cual se ocupo hidrogeno-oxigeno era porque con esta combinación se obtenía la temperatura idónea para adelgazar la fibra óptica. La figura 2.11 muestra la micro-flama utilizada en los experimentos.

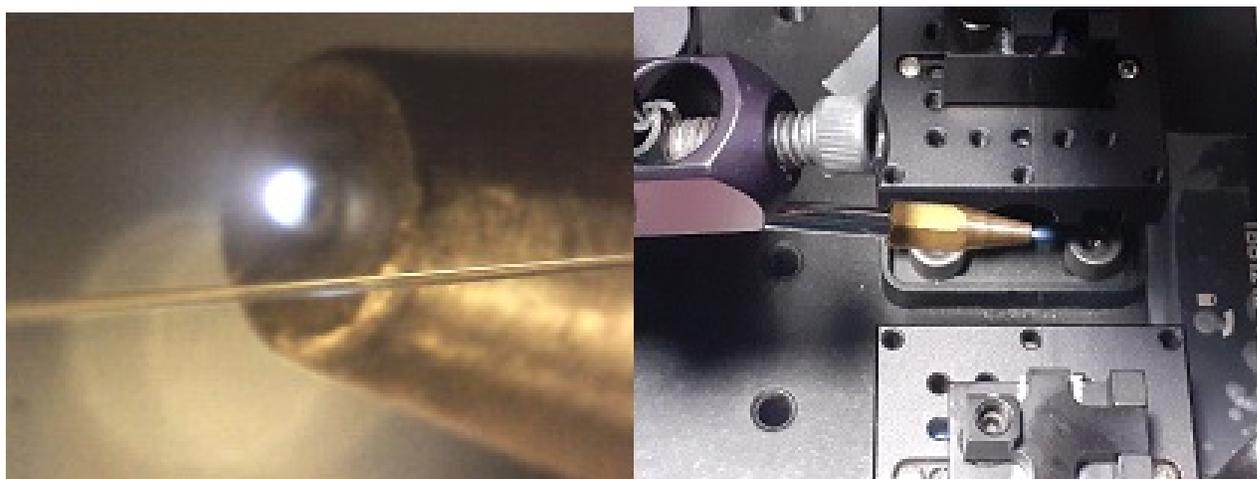


Figura 2.11: La micro flama tenía un diámetro aproximado de 2 mm y una temperatura de 1250 °C

Con la ayuda dos cámaras podíamos visualizar la ubicación tridimensional de la micro flama de tal forma que la longitud de la flama y la distancia a la que esta se encontraba de la fibra óptica fuera la apropiada para calentarla la suficiente y comenzarla a estirar con los servo-motores. En la figura 2.12 se muestra el arreglo con las dos cámaras y el espejo para el estiramiento de la fibra óptica.

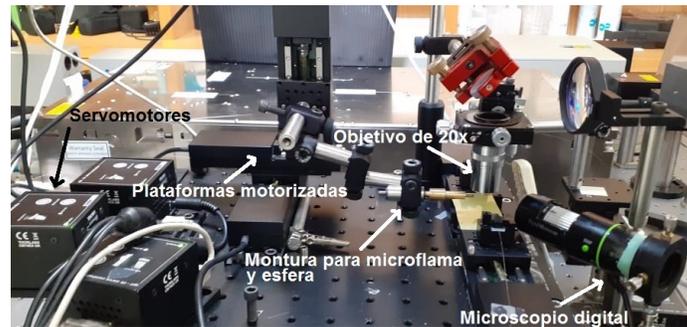


Figura 2.12: El sistema de estiramiento consiste en una micro flama controlada por plataformas motorizadas, dos microscopios, dos servomotores a pasos que estiran de forma continua la fibra mientras la micro flama oscila para calentarla.

Las fibras ópticas adelgazadas se fabricaron calentando una fibra óptica con un soplete de oxígeno-hidrógeno. El proceso para adelgazar la fibra óptica tiene un control de llama limpio y preciso que la hace adecuada para la fusión de fibras ópticas. Debido a que el control de la temperatura de la llama es lo más importante en el proceso de reducción. La máquina produce un gas de oxígeno-hidrógeno al pasarlo a través de una unidad de llena de una solución que cambia el poder calorífico y la temperatura de la llama del gas. El tamaño de la llama también se ajusta fácilmente mediante la combinación de una gama de puntas de antorcha de ajuste sencillo.

La fibra adelgazada se montó en dos plataformas motorizadas conectadas a los bloques con dos abrazaderas de fibra. El sistema para estiramiento consiste en dos monturas con agarraderas para fibra óptica donde cada una está sobre una plataforma motorizada. Una plataforma motorizada permitió tensar la fibra para acoplar la luz a la microesfera. Durante el proceso de tracción, los motores actúan simultáneamente y la fibra de la que se quitó el revestimiento se calentó con un soplete de hidrógeno-oxígeno.

La transmisión se controló continuamente con un medidor de potencia óptica y se obtuvieron imágenes de la conicidad con dos cámaras desde la vista lateral y superior. La ecuación [2.1] describe aproximadamente la relación entre diámetro de la fibra adelgazada, el diámetro de la fibra sin adelgazar, la distancia de la fibra a la micro flama y su distribución en la sección de resultados se explica la forma en como se obtiene dicha expresión. Donde r_w es el diámetro de la fibra adelgazada, r_0 es el diámetro de la fibra, x es la distancia de estiramiento del motor y L_0 es la distancia a la flama con velocidad de oscilación constante, el diámetro de la flama fue aproximadamente de 2 mm, con una temperatura aproximada de 1250 °C.

$$r_w(x) = r_0 \exp\left[-\frac{x}{2L_0}\right] \quad (2.1)$$

La micro flama en forma de micro antorcha estaba montada en una plataforma de traslación de tres ejes, que a su vez descansaba sobre un soporte deslizante accionado por un motor paso a paso. Por un lado, la configuración permite un posicionamiento preciso de la llama que se le permite oscilar con velocidad constante en una distancia L_0 . Este proceso asegura que la llama se calienta de manera idéntica en cada sección de la fibra que se estrecha en cada ciclo de oscilación. La distancia L_0 se puede controlar con precisión en un paso de 40 nm, por lo tanto; la longitud de la cintura uniforme de la fibra ahusada es muy controlable, el desarrollo de la ecuación 2.1 se especifica en la sección de resultados.

Dist/Pos [μm]	Min Vel [$\mu m/s$]	Acc [$\mu m/s^2$]	Max Vel [$\mu m/s$]
26	0	0.1	0.01

Dist/Pos [μm]	Min Vel [$\mu m/s$]	Acc [$\mu m/s^2$]	Max Vel [$\mu m/s$]
22	0	5	2
18	0	5	2

En cuanto a las velocidades y estiramiento se comenzaba a una distancia de 50 mm y terminaba en la posición 26, por lo que la distancia que recorría el motor para fabricar el taper era de 24 mm, a una velocidad de 100 $\mu m/s$ y una aceleración de

$10\mu\text{m}/\text{s}^2$. La flama realizaba un movimiento oscilatorio con una amplitud de 4 mm a una velocidad de 2 mm/s y una aceleración de $5\text{ mm}/\text{s}^2$

Durante la etapa de adelgazamiento era posible ver en la fibra adelgazada secciones de diferentes colores los cuales eran generados por las interferencia constructiva y destructiva de la luz incidente proveniente de la lampara de luz blanca de la mesa óptica. La luz que produce la imagen de la fibra óptica se ha reflejado en parte en la superficie, en parte ha atravesado la fibra, refractada, y parte la ha rodeado, difractada. Sin embargo, la fibra es tan fina que los tres efectos no se pueden separar. Estos colores se pueden ver en la figura 2.13.

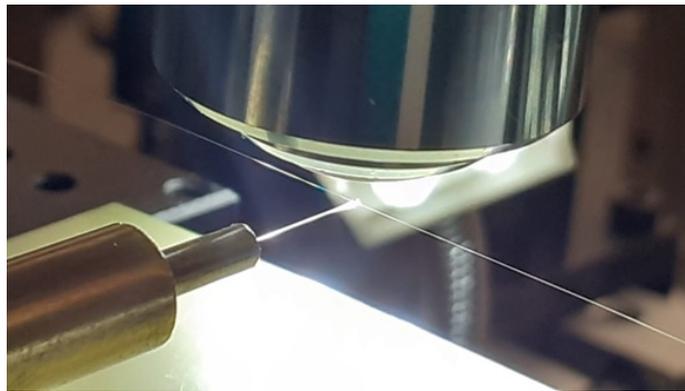


Figura 2.13: se pueden apreciar distintos colores en la fotografía justo en la parte donde la fibra óptica se encuentra más adelgazada.

2.4. Acoplamiento de fibra adelgazada a microesfera.

Una vez que la microesfera se montaba en la porta fibra, con ayuda de dos microscopios y controlado por un sistema de plataformas motorizadas se movía en tres direcciones espaciales el microresonador justo como se muestra en la figura 2.13. Buscamos el punto sobre la fibra adelgazada donde se acoplará la mayor cantidad de luz a nuestra microesfera.

La esfera a partir de la cual se calculo es factor de calidad y se obtuvo la señal mostrada en el osciloscopio se muestra de la figura 2.14 a la figura 2.17

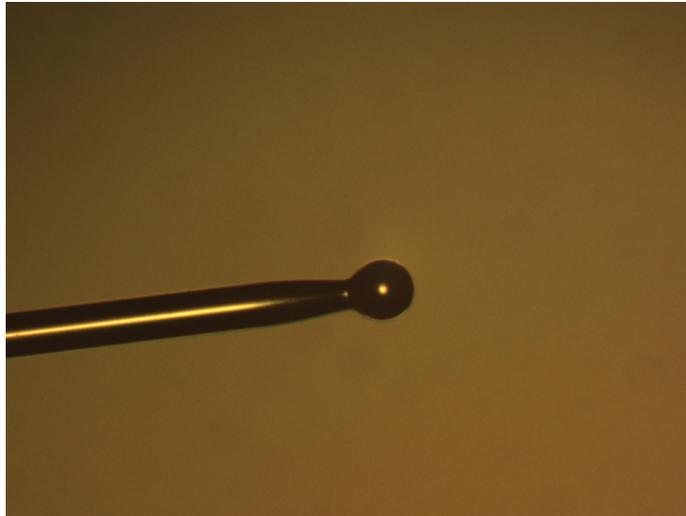


Figura 2.14: Esfera fabricada para acoplar a la fibra óptica adelgazada

Observando la esfera ampliada en la figura 2.15, podemos notar un cinturón que se forma debido a la luz reflejada del exterior, la esfera se muestra limpia y homogénea, así mismo el vástago esta recto en contraste con los primeros resonadores que se fabricaron y se mostraron anteriormente.

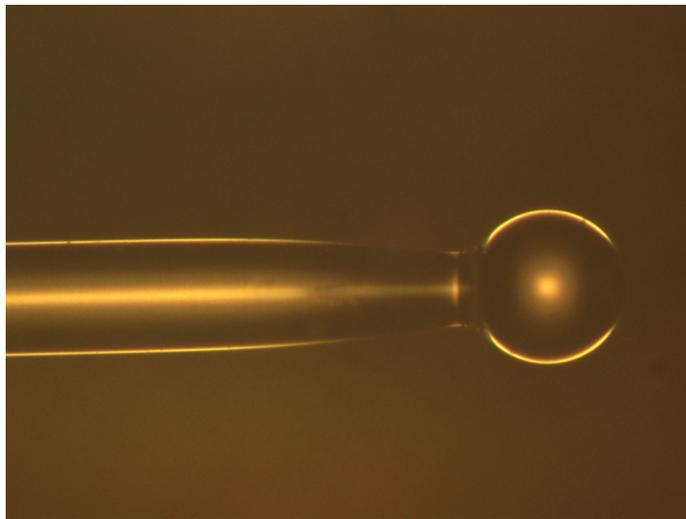


Figura 2.15: Se pueden apreciar más detalles de la esfera ampliada

El diámetro del vástago de la esfera es de 125.49 micrómetros, en la figura 2.16 se puede apreciar.

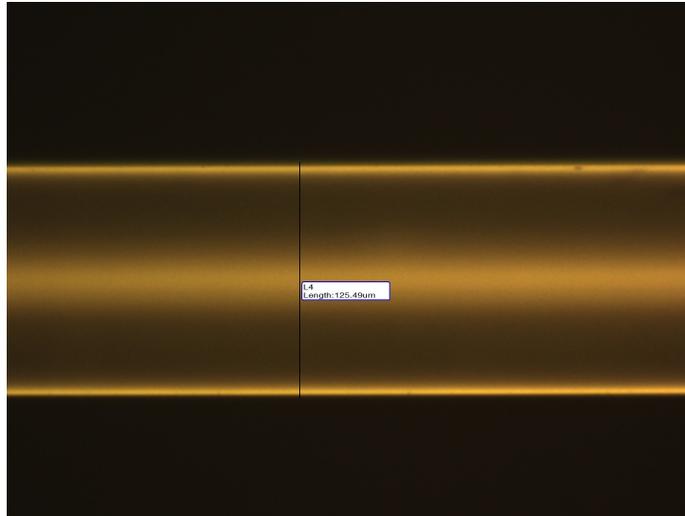


Figura 2.16: El diámetro del vástago de la esfera es de 125.49 micrómetros

Finalmente podemos ver que la esfera tiene un radio de 82.83 micrómetros, un área de 21553.22 micrómetros cuadrados y un perímetro de 520.43 micrómetros.

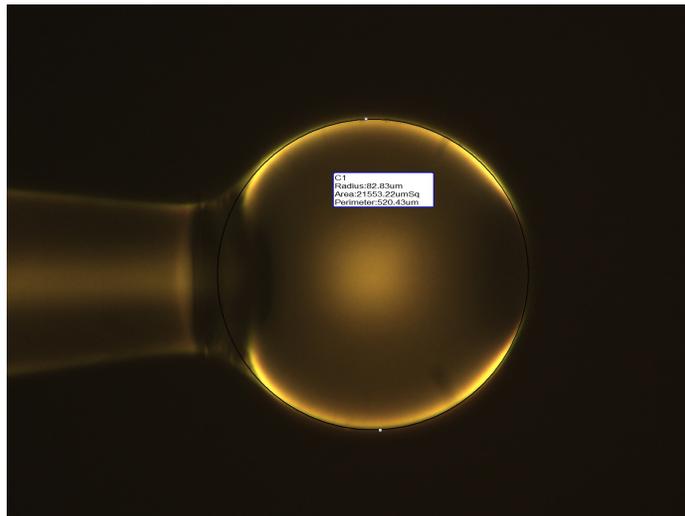


Figura 2.17: Esfera de la cual se obtuvo la señal, tiene un radio de 82.82 micrómetros y un perímetro de 520.43 micrómetros

Era posible detectar el punto de mayor acoplamiento sobre la fibra óptica adelgazada gracias a la detección de un fotomultiplicador acoplado en la parte superior de una lente, La señal obtenida del fotomultiplicador y los fotodetectores se muestra en la figura 2.18

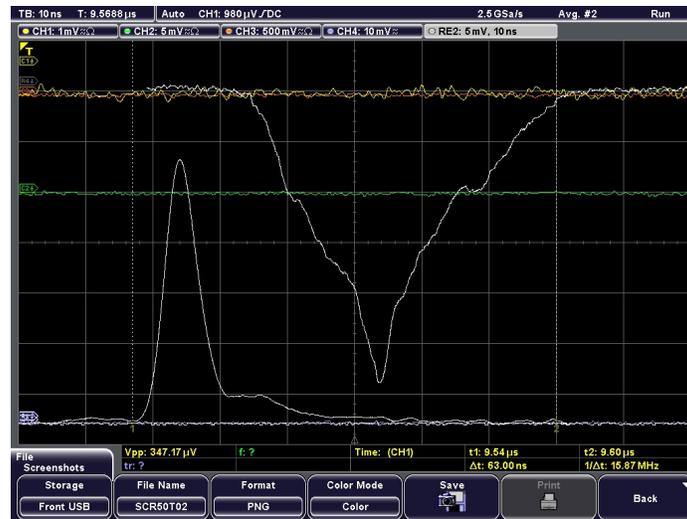


Figura 2.18: La señal obtenida del fotomultiplicador y los fotodetectores, la grafica con un pico negativo corresponde a la señal medida por el fotomultiplicador mientras que las que tienen un pico positivo corresponden a los fotodetectores.

La luz viajaba en el interior de la fibra óptica hasta llegar a la sección adelgazada y donde se acopla la onda evanescente a la microesfera. El acoplamiento de luz entre la fibra adelgazada y la microesfera se puede ver en la figura 2.19



Figura 2.19: Muestra el acoplamiento entre la microesfera y la fibra adelgazada de la luz proveniente de un láser con una longitud de onda de 532 nm

El acoplamiento de luz de la fibra adelgazada tenia lugar justamente en la parte más estrecha de la fibra, donde el radio cónico de la cintura de la fibra era menor. El

diagrama de la figura 2.20 ilustra este proceso.

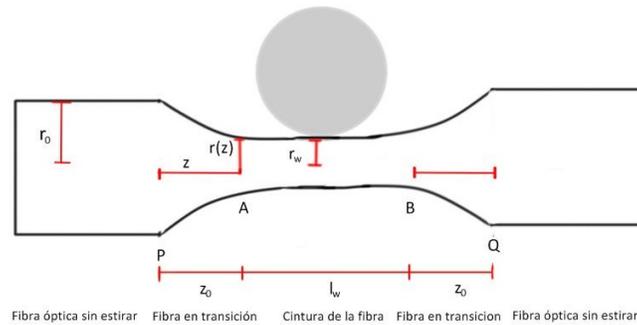


Figura 2.20: La luz que viaja por la fibra óptica pasa por la sección adelgazada, parte de la radiación es acoplada a la microesfera donde la luz queda atrapada un instante

2.5. Visualización y detección

Debido a que la manipulación del sistema demanda una alta presión al tratarse de componentes del orden de micras y en algunos casos de decenas de nanómetros fue fundamental tener un sistema de visualización que nos permitiera manipular el sistema en sus diferentes etapas. Dicho sistema fue esencialmente el mismo que se ocupó tanto para el adelgazamiento de la fibra óptica, como para el acoplamiento de la microesfera a la fibra adelgazada. En el caso de la fabricación de las microesferas se ocuparon las cámaras ya integradas a la fusionadora óptica.

El sistema de visualización consiste en dos cámaras, una de ellas esta focalizada en el eje x paralelo a la fibra óptica y perpendicular a la micro flama mientras que la segunda cámara permitía tener una imagen por arriba del sistema. En la figura 2.21 se muestra el microscopio y la lente, la cual es focalizada a una segunda cámara.

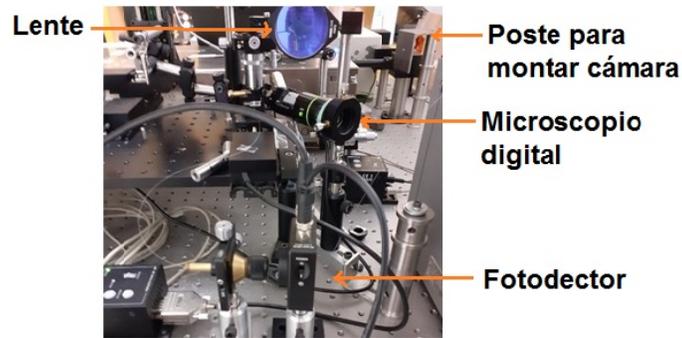


Figura 2.21: Se distingue el microscopio, la lente y el fotodetector ocupado al final de la fibra óptica, así como la lente ocupada para focalizar con la segunda cámara.

La segunda cámara se focalizaba a una lente y a un espejo a 45° el cual a su vez estaba focalizado en un objetivo de 20X sobre la fibra adelgazada, como se puede ver en la figura 2.22. Este mismo arreglo se empleaba para adelgazar la fibra óptica y acoplar la fibra a la microesfera. El primer microscopio estaba conectado directamente a un monitor mientras que en la segunda cámara era posible ver la imagen en su mismo display mostrado en la figura 2.23

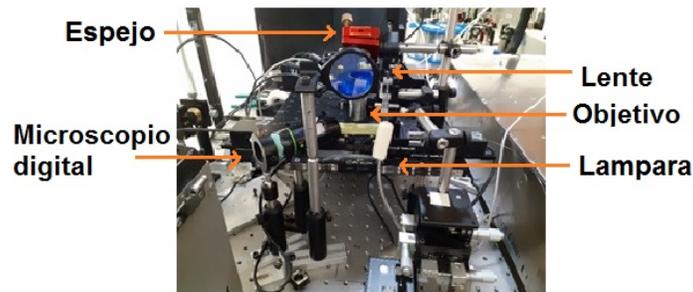


Figura 2.22: El arreglo para la segunda cámara consiste en una lente, un espejo a 45° y un objetivo de 20X



Figura 2.23: visualización en el display de la cámara. se puede distinguir la micro flama y la fibra adelgazada.

Con ayuda de una micro-flama de hidrogeno-oxigeno se empezaba a calentar la fibra descubierta tras haber dejado durante 5 minutos que la micro-flama se estabilizara. El motivo por el cual se ocupo hidrogeno oxigeno era porque con una combinación se obtenía la temperatura idónea para adelgazar la fibra óptica.

Con la ayuda dos cámaras podíamos visualizar la ubicación tridimensional de la micro-flama de tal forma que la longitud de la flama y la distancia a la que esta se encontraba de la fibra óptica fuera la apropiada para calentarla la suficiente y comenzarla a estirar con los servo-motores. En la figura 2.24 se muestra el arreglo con las dos cámaras y el espejo para el estiramiento de la fibra óptica.



Figura 2.24: Sistema implementado con dos camaras para el adelgazamiento de la fibra óptica

Ya que se tenía la microesfera sobre la fibra óptica adelgazada se conectaba un fotomultiplicador y dos fotodetectores y se visualizaba la señal en el osciloscopio de manera que se movía la microesfera sobre la fibra adelgazada y se podía ver donde se atrapaba más luz.

Finalmente resumimos la etapa experimental en el siguiente cuadro.

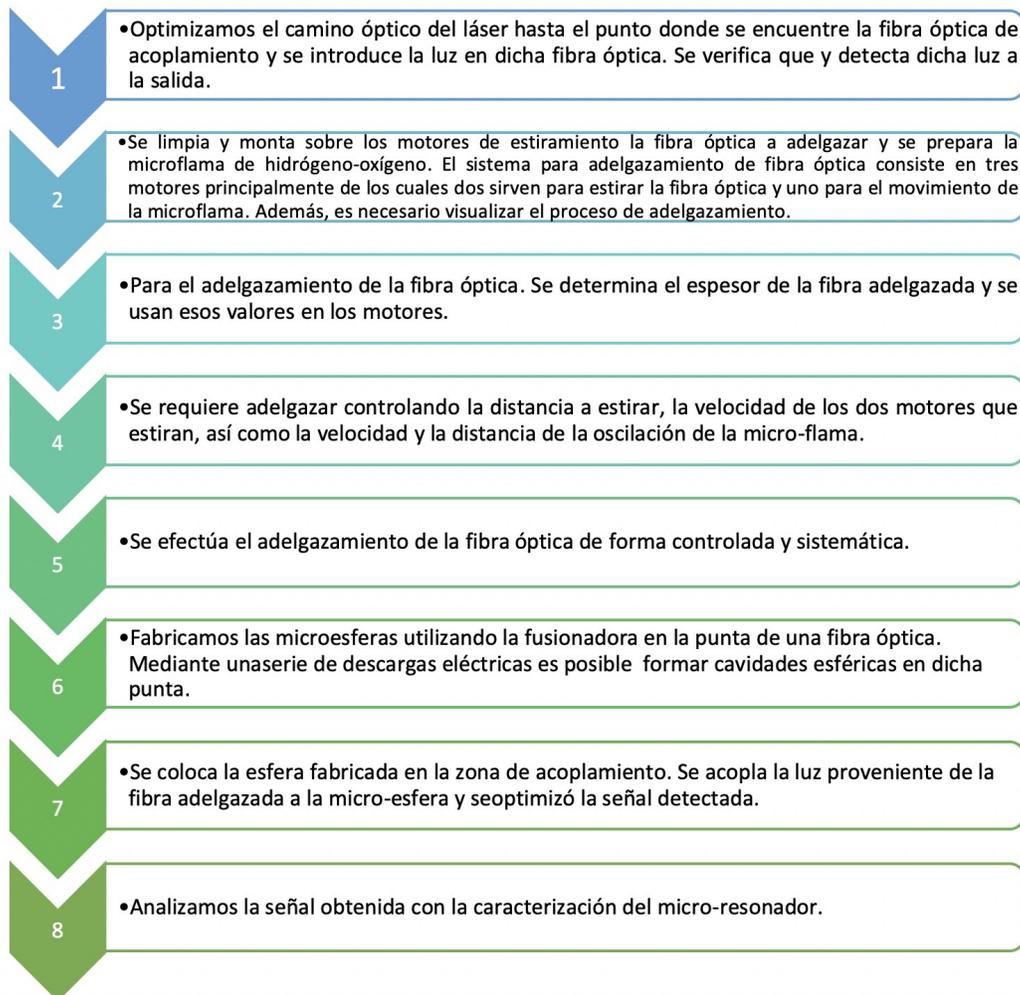


Figura 2.25: Actividades realizadas para la obtención de un sistema óptico, con resonador esférico WGM

Capítulo 3

Resultados

Los resultados experimentales que se presentan en este capítulo se basan en los dos componentes principales: la fabricación de acopladores y la fabricación de microesferas en la punta de una fibra óptica que representa a los micro resonadores WGM. Por lo tanto, el sistema óptico está constituido por una fibra óptica adelgazada que representa al acoplador y la esfera formada en la punta de una fibra. Todo esto en conjunto lo llamaremos sistema óptico fibra adelgazada-esfera. Al final de este capítulo mostraremos la medida experimental del acoplamiento de luz sobre la esfera.

3.1. Fabricación de acopladores ópticos

Sobre las fibras adelgazadas, ópticamente, la transición cónica transforma el modo fundamental local de un modo de núcleo en fibra no cónica a un modo de revestimiento en la cintura cónica, y esta es la base de muchas de sus aplicaciones.

Sin embargo, si esta transformación va acompañada de una pequeña pérdida de luz del modo fundamental, la forma de las transiciones de ahusamiento debe ser lo suficientemente gradual para satisfacer un criterio de adiabaticidad en todos los puntos.

La forma del cono también es importante en situaciones donde el ahusamiento

debe deformarse de forma controlable; por ejemplo, para producir dispositivos en miniatura o sensores. Por lo tanto, una forma cónica con una cintura larga y estrecha, pero con transiciones cortas se prefiere.

El rendimiento óptico de los componentes cónicos ha sido modelado asumiendo perfiles parabólicos, sinusoidales, polinomiales y algunos otros perfiles cónicos. Estos han sido ya bien estudiados en varios artículos como el descrito por Love and Henry[25]

El problema de encontrar qué perfil de ahusamiento particular resulta del estiramiento de una fibra en una fuente de calor particular, con su propia distribución de temperatura, es un problema más o menos complicado en la mecánica de fluidos. Ha sido abordado por Dewynne et al., Quienes estaban más interesados en el efecto de las perturbaciones de las fibras en la conicidad resultante[26]

Sin embargo, describen un modelo de estrechamiento simple en el que una sección cilíndrica de fibra de longitud fija se calienta a una temperatura uniforme y se estira. Eisenmann y Weidel[27] también describen un modelo similar y en ambos casos se predice un perfil de conicidad exponencial, cuyas dimensiones dependen únicamente de la longitud de la zona caliente y la extensión de la conicidad.

La idea de que la sección de fibra que se calienta siempre es cilíndrica y siempre se calienta a una temperatura uniforme (y por lo tanto se le da una viscosidad uniforme) se mantiene, de modo que las técnicas de mecánica de fluidos todavía no son necesarias. Se derivan expresiones para la forma de la conicidad resultante de cualquier variación dada de la longitud de la zona caliente, como es la solución para el problema inverso en el que se da la forma de la conicidad y se encuentra la variación de la zona caliente que producirá esta forma.

La figura 3.1 ilustra las cantidades utilizadas para describir la forma de un ahusamiento de fibra completo. Se supone que el ahusamiento se forma simétricamente (es decir, los extremos del ahusamiento se separan a velocidades iguales y opuestas

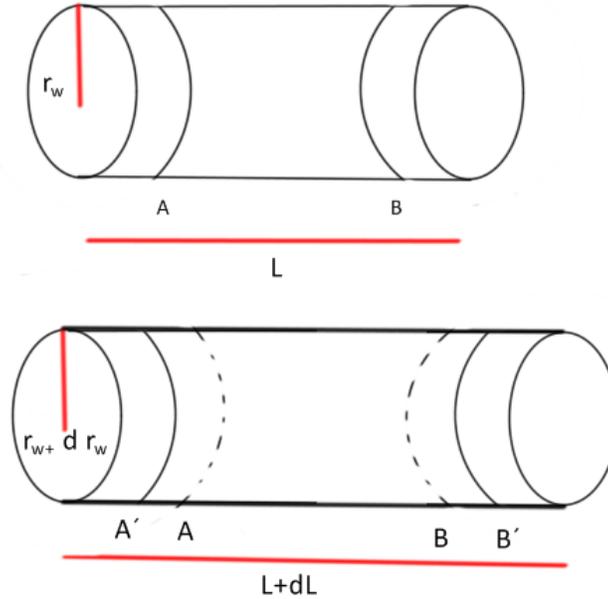


Figura 3.1: Cilindro antes de ser estirado y después de ser estirado al someterse a una fuente de calor

con respecto al centro de la fuente de calor) de modo que las dos transiciones del ahusamiento son idénticas. El radio de la fibra sin ahusar es r_0 , y la cintura ahusada uniforme tiene una longitud l_w (que puede ser cero) y un radio r_w . Cada transición cónica idéntica tiene una longitud z_0 , y una forma descrita por una función de radio local decreciente $r(z)$, donde z es una coordenada longitudinal. El origen de z comienza al inicio de cada transición cónica; por lo tanto $r(0)=r_0$ y $r(z_0)=r_w$.

La extensión del ahusamiento x es la distancia neta a través de la cual se ha estirado el ahusamiento; es igual a la distancia actual PQ menos la distancia PQ antes de que comenzara el ahusamiento. Típicamente, la variación de x con el tiempo t está determinada directamente por la velocidad relativa de las dos etapas de traslación que separan los extremos del cono durante su fabricación. Se supone que x es una función creciente de t ; no se considera la compresión cónica. Todas estas cantidades pueden aplicarse al ahusamiento terminado y también a los estados instantáneos del ahusamiento a medida que se alarga. La extensión final cuando se termina el ahusamiento y cesa el alargamiento se indica con x_0 .

Con referencia a la figura 3.1, en cualquier instante t durante el alargamiento ahusado, una longitud L colocada simétricamente de la cintura ahusada (la zona caliente AB) se calentó uniformemente y es un cilindro deformable de vidrio de baja viscosidad. Los valores particulares de temperatura y viscosidad no son importantes, aunque se supone que el vidrio caliente siempre es lo suficientemente blando para estirarse, sin ser tan blando como para que el cono se combara por su propio peso. Fuera de la zona caliente, el vidrio estaba frío y sólido. Los extremos del cono se separaron constantemente, de modo que en el tiempo $t + dt$ el cilindro de vidrio caliente se estiro para formar un cilindro AB más estrecho de longitud $L + dx$, donde dx es el aumento de la extensión durante el intervalo dt . La longitud de la zona caliente se cambia a $L + dL$ al mismo tiempo, donde dL puede ser negativo. A medida que se alarga la conicidad, los extremos AA' y BB' del cilindro calentado estirado abandonan la zona caliente y se solidifican, formando nuevos elementos de las transiciones de la conicidad.

L se cambia mediante el control apropiado de una fuente de calor y puede variar arbitrariamente. Sin embargo, para que la descripción anterior del modelo sea válida, la variación de L está sujeta a dos restricciones:

$$L \geq 0 \quad (3.1)$$

$$\frac{dL}{dx} \leq 1 \quad (3.2)$$

La primera restricción es obvia. La segunda asegura que la sección de vidrio calentada sea siempre cilíndrica, es decir, que la zona caliente no supere las transiciones cónicas en retroceso. Está claro que la longitud instantánea l_w , de la cintura ahusada en el tiempo t es igual a la longitud de la zona caliente en ese momento.

$$l_w(t) = L(t) \quad (3.3)$$

Por lo tanto, la longitud final de la cintura es igual a la longitud final de la zona caliente (es decir, en el momento en que se detiene el alargamiento). Además de esta ecuación

bastante simple y las condiciones sobre la variación de L dadas en las desigualdades (3.1) y (3.2). El volumen del vidrio estirado del cilindro AB en el tiempo $t + dt$ debe ser igual al volumen del cilindro AB calentado en el tiempo t

$$\pi(r_w + \delta r_w)^2(L + \delta x) = \pi r_w^2 L \quad (3.4)$$

Donde r_w es el cambio en el radio del cilindro y es negativo. En el límite $\delta t \rightarrow 0$ esto se puede arreglar para dar una ecuación diferencial - la "ley del volumen que gobierna la variación del radio de cintura r_w , con extensión x .

$$\frac{dr_w}{dx} = -\frac{r_w}{2L} \quad (3.5)$$

L puede variar y, en general, puede considerarse como una función de x , ya que x es una función creciente del tiempo t .

La segunda ecuación fundamental relaciona la longitud instantánea de transición cónica z_0 , a la extensión cónica x .

Comparando la longitud total PQ de la fibra ahusada con la distancia inicial PQ en $t = 0$, obtenemos la "ley de la distancia"

$$2z_0 + L = x + L_0 \quad (3.6)$$

Donde L puede ser una función de x y L_0 es su valor inicial, en $x = 0$. Ahora, de acuerdo con el modelo, el radio local $r(z)$ en un punto general z a lo largo de la transición cónica es igual al radio de cintura $r_w(x)$, (z) cuando ese punto fue sacado de la zona caliente. La extensión $x(z)$ correspondiente a esta etapa esta dada por la ley de la distancia con $z_0 = z$

$$2z = x + L_0 - L \quad (3.7)$$

Donde x en esta expresión es específicamente la extensión en que el punto z fue sacado de la zona caliente. Este es el ley de distancia generalizada.

La solución $x(z)$ de esta ecuación depende de cómo varía L con x . Por lo tan-

to, el perfil de ahusamiento $r(z)$ se puede determinar sustituyendo $x(z)$ por $r_w(x)$ encontrado de la ley del volumen.

La validez de la ley del volumen no depende de si el cono se forma simétricamente. Por otro lado, los enunciados anteriores de la ley de la distancia son específicos para el caso en el que el cono se forma simétricamente. Otros modos de formación de ahusamientos requieren sus propias versiones de la ley de la distancia, distinguiendo las coordenadas z izquierda y derecha.

Tenga en cuenta que el tiempo t no aparece explícitamente en ninguna de las dos leyes. Por tanto, cantidades dependientes como r_w y L pueden expresarse como funciones de x , independientemente de la velocidad de alargamiento o de cualquier variación de la misma, y el modelo predice que la forma cónica no dependerá de la velocidad de alargamiento.

El problema consistió en que dado $L(x)$ y x_0 , encontraríamos l_w , r_w , z_0 , y $r(z)$. $L(x)$ debe satisfacer las condiciones 3.1 y 3.2. La longitud de la cintura cónica se da directamente de la ecuación 3.3.

$$l_w = L(x_0) \quad (3.8)$$

La variación del radio de la cintura r_w con respecto a x se puede obtener al integrar la ley de volumen de la ecuación 3.5 con la condición inicial $r_w(0) = r_0$

$$\int_{r_0}^{r_w} \frac{dr'_w}{r'_w} = -\frac{1}{2} \int_0^x \frac{dx'}{L(x')} \quad (3.9)$$

Obtenemos la expresión general:

$$r_w(x) = r_0 \exp\left[-\frac{1}{2} \int_0^x \frac{dx'}{L(x')}\right] \quad (3.10)$$

Como $L(x)$ la conocemos, $r_w(x)$ puede ser encontrada y la cintura del radio cónico es simplemente $r_w(x_0)$. La ecuación 3.7 da la transición de la fibra de longitud z como función de x

$$z(x) = \frac{1}{2}[x + L_0 - L(x)] \quad (3.11)$$

Si la zona de calor es constante como en nuestro caso, $L(x) = L_0$ de ahí que $l_w = L_0$ y de la ecuación 3.8 y 3.10 obtenemos:

$$r_w(x) = r_0 \exp\left[-\frac{x}{2L_0}\right] \quad (3.12)$$

Recordando que r_0 es el diametro inicial de la fibra óptica estándar de 125 micrómetros. Las velocidades y distancia de estiramiento que recorría el motor para fabricar el taper era de 24 mm, a una velocidad de 100 $\mu\text{m}/\text{s}$ y una aceleración de $10\mu\text{m}/\text{s}^2$. La flama realizaba un movimiento oscilatorio con una amplitud de 4 mm a una velocidad de 2 mm/s y una aceleración de $5\text{ mm}/\text{s}^2$. Al comienzo de nuestra etapa experimental la flama de nuestra fuente de calor era demasiado grande, por lo que al comenzar con el ahusamiento, la presión que ejercía la flama sobre la fibra adelgazada hacia que esta se doblara como se muestra en la figura 3.2 donde se ilustra la fibra T1.

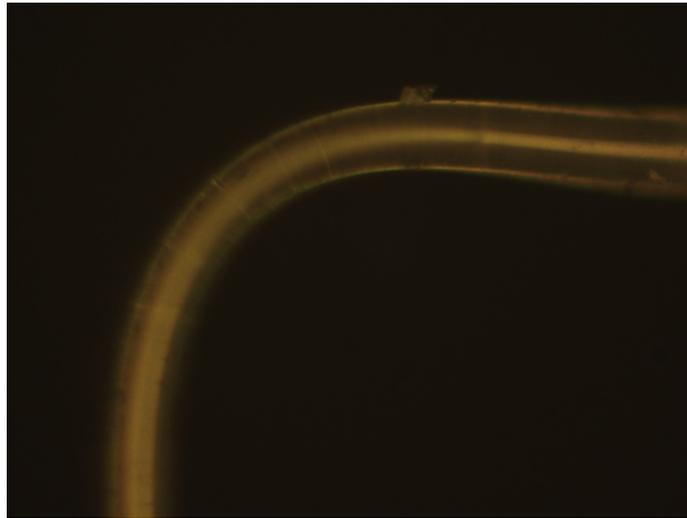


Figura 3.2: Fibra doblada T1, al comienzo de las pruebas experimentales de ahusamiento

Las primeras fibras ópticas que se intentaron adelgazar durante el proceso de estiramiento se rompían fácilmente, se despegaban de las agarraderas movidas por los

servomotores, la flama fusionaba la fibra óptica y esta se doblaba debido a su propio peso. Como resultado obteníamos fibra adelgazadas irregulares y no lo suficientemente delgadas, imágenes de nuestros primeros resultados se muestran de la figura 3.2 a la 3.5.

En la figura 3.3 se aprecia la fibra óptica T2 deformada y la sección justo donde esta doblada se encuentra ahusada.

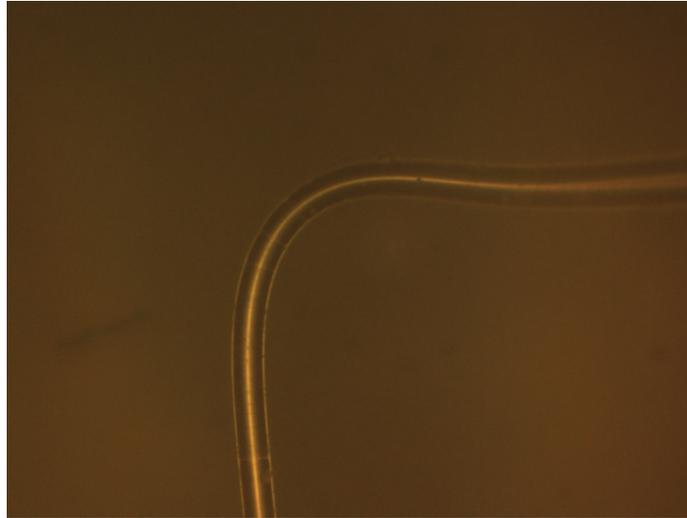


Figura 3.3: Fibra óptica T2, ahusada y deformada

Se puede apreciar en la figura 3.4 una parte de la fibra T3, más delgada que la otra e incluso un color negro en el contorno, como si hubiese sido quemada por la micro-flama.



Figura 3.4: Una de las primeras fibras ópticas T3, que se intentó adelgazar pero que al igual que las anteriores sufrió una ruptura

En la figura 3.5 se muestra la fibra T4, podemos ver mucha suciedad sobre la superficie de la fibra óptica, esta suciedad afectaba el proceso de adelgazamiento ya que estos contaminantes afectaban la distribución de calor a lo largo de la fibra.

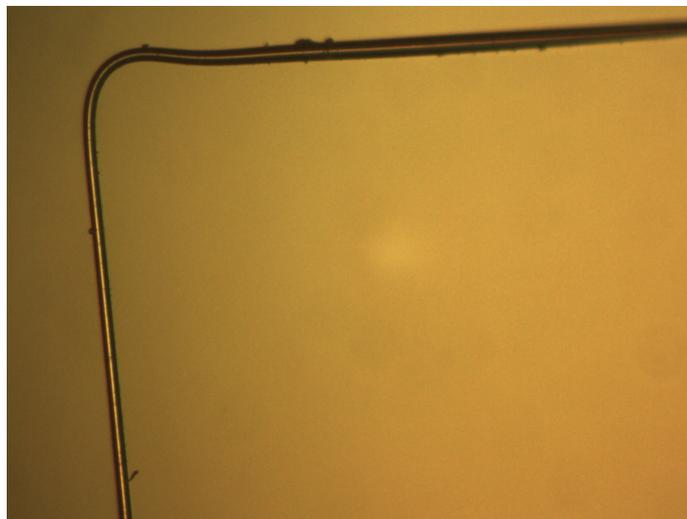


Figura 3.5: Fibra óptica T4, ahusada y deformada por la micro flama

Eventualmente con ayuda del modelo de adelgazamiento descrito anteriormente y perfeccionando la técnica, el adelgazamiento se mejoro para obtener fibras adelgazadas a partir del diámetro de la fibra óptica estandar del orden de 124.8 micrómetros hasta

alcanzar fibras del orden de 5.63 micrómetros. La figura 3.6 muestra la fibra T5, como la fibra óptica estándar.

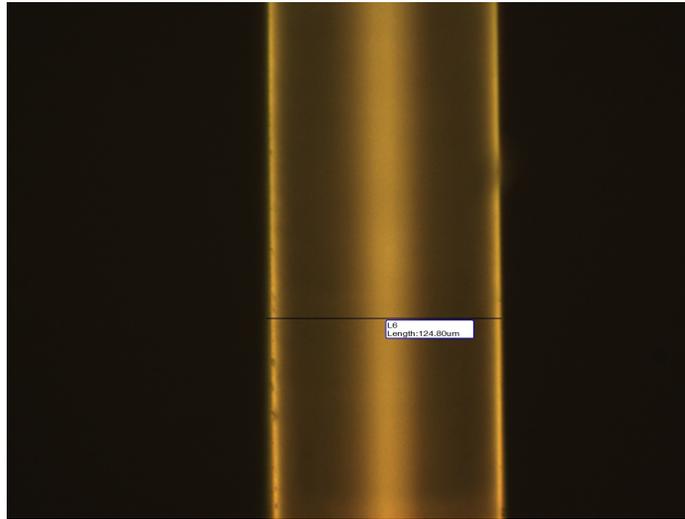


Figura 3.6: T5 como la fibra óptica inicial que se intentó adelgazar cuyo diámetro medido fue de 124.8 micrómetros

Afinando pequeños detalles técnicos logramos adelgazar la fibra óptica para tener un diámetro de 42.29 micrómetros. Alejamos un poco más la micro-flama, dejábamos encendida la flama durante cinco minutos antes de comenzar a fusionar ya que nos dimos cuenta de que al inicio la micro-flama tenía pequeñas explosiones y después de los primeros cinco minutos esta se estabilizaba y la longitud de la flama se mantenía constante, también usamos una cinta adhesiva diferente para conseguir mayor adhesión entre la fibra y las agarraderas. La figura 3.7 muestra la fibra T6 adelgazada, que conseguimos obtener con un diámetro de 42.29 micrómetros.

Durante el proceso para la fabricación de microesferas generamos diferentes conos, los cuales posteriormente adquieren la forma esférica usando la fusionadora óptica. La figura 3.8 ilustra la fibra T7, uno de los diversos conos obtenidos para la fabricación de los micro resonadores

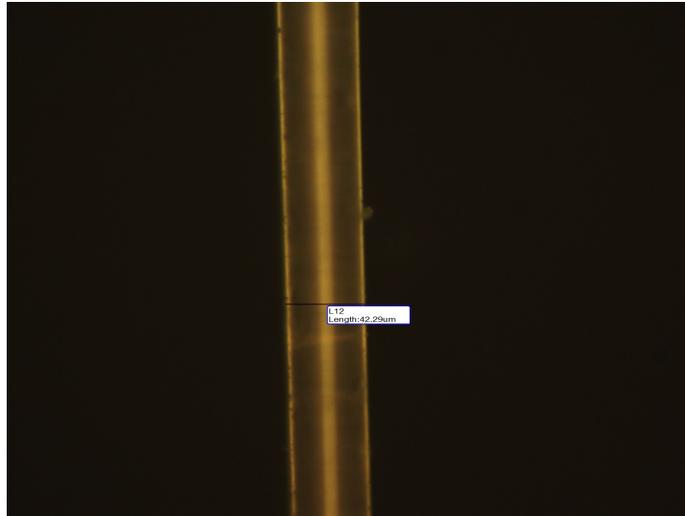


Figura 3.7: Esta fibra óptica T6 tiene un diámetro de 42.29 micrómetros y fue uno de los primeros resultados que se obtuvieron al mejorar la técnica para su ahusamiento. También es posible ver que parece estar regular y limpia es decir, el estiramiento conseguido de forma uniforme a lo largo de la fibra óptica

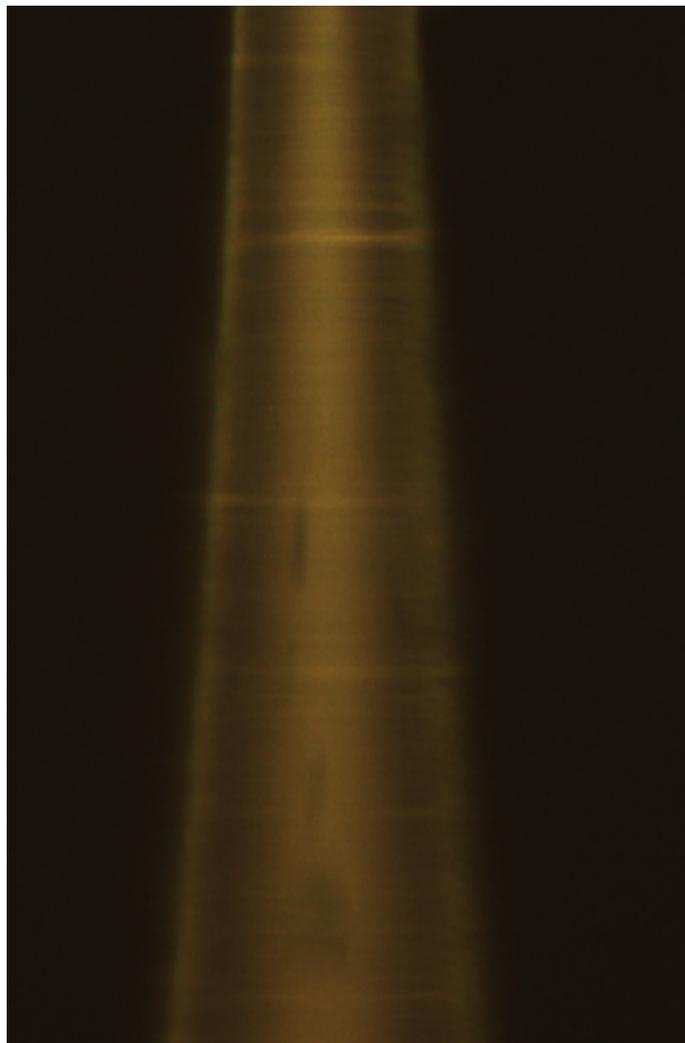


Figura 3.8: Esta fibra óptica T7, convertida en cono se obtuvo con la fusionadora óptica para posteriormente fabricar la esfera.

En la figura 3.9 se muestra el cono T8 de los fabricados con medidas, este cono tiene un diámetro de 45.26 micrómetros en la parte mas estrecha y un diámetro de 80.91 micrómetros en la parte menos estrecha.

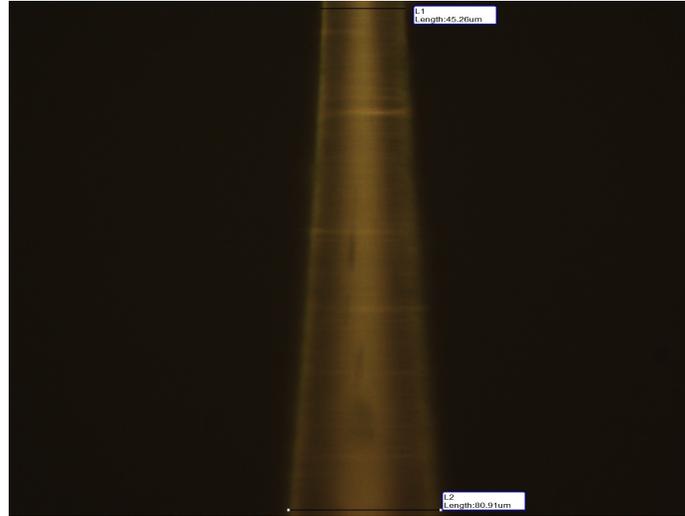


Figura 3.9: Este cono T8 tiene un diámetro de 45.26 micrómetros en la parte mas estrecha y un diámetro de 80.91 micrómetros en la parte menos estrecha

Aunque ya habíamos lograda adelgazar la fibra óptica hasta un diámetro de 42.29 micrómetros aun estábamos lejos de nuestra meta que era estar cercanos o por debajo de un micrómetro. Nos dimos cuenta de que durante el proceso de adelgazamiento había una etapa que era crucial poder controlar. A medida que la fibra se adelgazaba más y más esta también se volvía inestable, pues la presión de la flama la hacia moverse en varias direcciones y el siguiente desafío se presentaba al ya no poder ver la fibra en nuestras cámaras. La combinación de la inestabilidad de la fibra debido a su delgadez y la imposibilidad de ver la fibra a través de nuestras cámaras dificultaba mucho el control de la fibra en esta etapa. Así que pensando en una solución se nos ocurrió mejorar la iluminación con una pequeña lampara led permitiera ver un punto de la fibra adelgazada por contraste. Fijamos una lampara led y el contraste de la luz en la fibra nos permitía tener el control de la fibra adelgazada, aunque fuera en un solo punto. Ese punto tenia que ser el centro de la fibra adelgazar y por lo tanto el más delgado y con mayor movilidad e inestabilidad. Arreglando la visualización por contraste conseguimos adelgazar varias fibras ópticas a un diámetro

de 5.63 micrómetros. Siendo esta el diámetro más pequeño que logramos obtener. La figura 3.10 muestra una de las fibras con el diámetro más pequeño que logramos fabricar, la fibra T9.

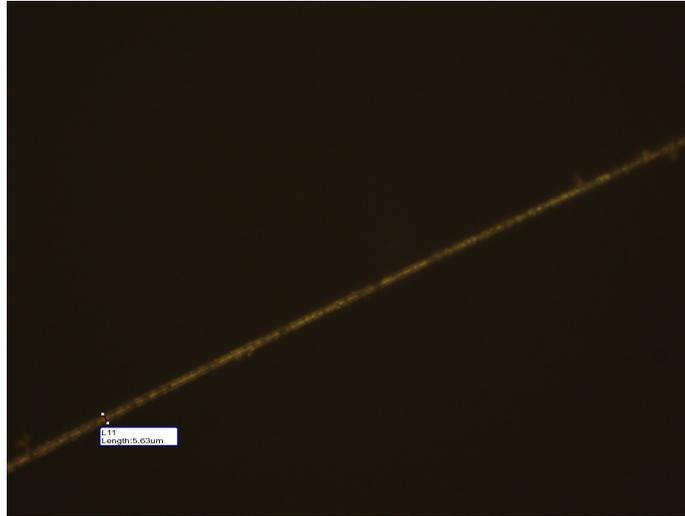


Figura 3.10: T9, esta fibra tiene un diámetro de 5.63 micrómetros en la parte más adelgazada que conseguimos fabricar al mejorar nuestro sistema de visualización.

En la figura 3.11 podemos observar la fibra adelgazada así como diferentes colores provenientes de la parte más adelgazada de la fibra óptica. Este tipo de fenómenos de interferencia constructiva, destructiva y refracción se apreciaron en varios de los experimentos hechos al adelgazar la fibra óptica.



Figura 3.11: Fibra adelgazada donde incluso es posible observar diferentes colores sobre la fibra óptica ahusada

3.2. Fabricación de microesferas para resonadores

Para la fabricación de los micro resonadores hicimos esferas con diferentes diámetros con la intención de hacer pruebas variadas. En figura 3.12 podemos ver la esfera E1, fabricada con la fusionadora óptica con un radio de 97.75 micrómetros, un área de 30,019.82 micrómetros cuadrados y un perímetro 614.20 micrómetros.



Figura 3.12: Microresonador E1, con radio de 97.75 micrómetros, un área de 30,019.82 micrómetros cuadrados y un perímetro 614.20 micrómetros.

En la figura 3.13 se muestra la esfera E2, fabricada con un radio de 60.28 micrómetros, un área de 11,415.93 micrómetros cuadrados y un perímetro de 378.76 micrómetros

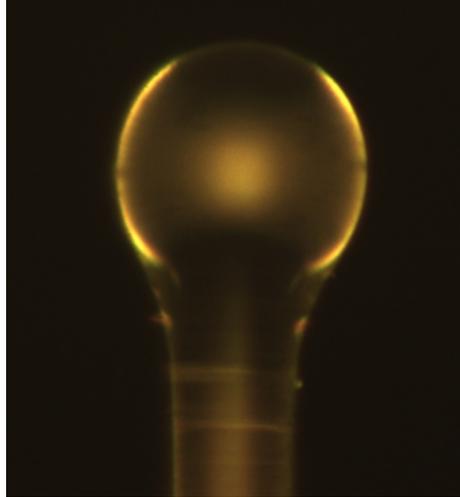


Figura 3.13: Esfera E2, fabricada con un radio de 60.28 micrómetros, un área de 11,415.93 micrómetros cuadrados y un perímetro de 378.76 micrómetros

La figura 3.14 muestra tres esferas fabricadas con diferentes dimensiones, es posible ver que la segunda esfera no es propiamente una esfera sino un elipsoide, la geometría que mejor parecía acoplar la luz era la esfera debido a que la luz queda recirculando en el ecuador mientras que en un elipsoide la recirculación no se daría propiamente en el ecuador sin embargo no se estudiaron las propiedades que podría tener un resonador con geometría elíptica.

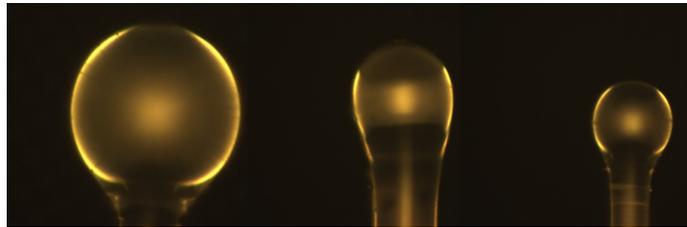


Figura 3.14: Resonadores ópticos con diferentes tamaños e incluso diferentes excentricidades fueron fabricados, centrándonos más en las esferas sin embargo la figura de en medio corresponde a un elipsoide.

La figura 3.15 muestra la esfera E3, con un radio de 93.73 micrómetros, un área de 27602.81 micrómetros cuadrados y un perímetro de 588.95 micrometros.

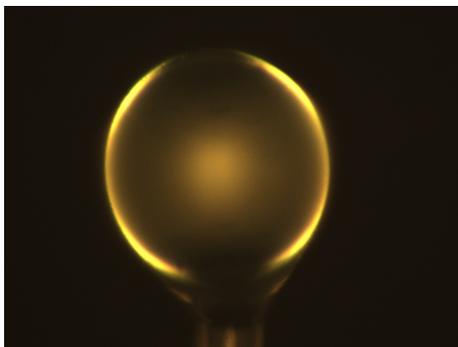


Figura 3.15: Esfera E3, fabricada con un radio de 93.73 micrómetros, un área de 27602.81 micrómetros cuadrados y un perímetro de 588.95 micrometros.

Otra de las esferas obtenidas, la esfera E4, se muestra en la figura 3.16 y esta esfera tiene un rádio de 48.03 micrómetros, un área de 7247.46 micrómetros cuadrados y un perímetro de 301.79 micrómetros.

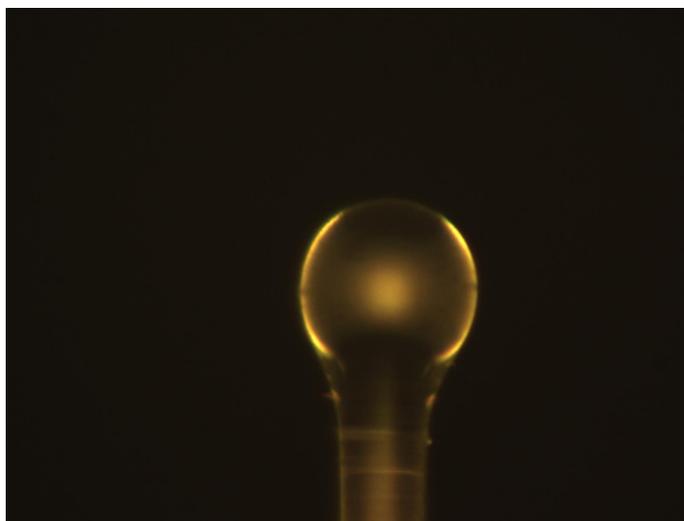


Figura 3.16: Esfera E4, con un radio de 48.03 micrómetros y área de 7247.46 micrómetros cuadrados

La figura 3.17 mestra la esfera E5, cuyo radio es de 68.70 micrómetros, área de 14828.11 micrómetros cuadrados y un perimetro de 431.67 micrómetros

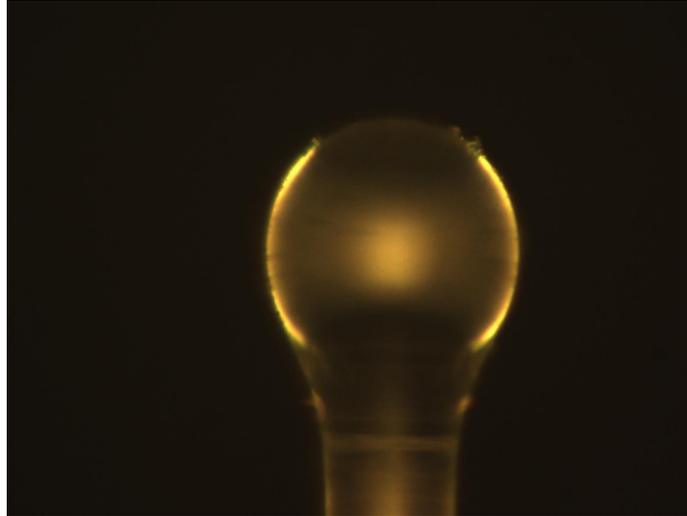


Figura 3.17: Esfera E5, construida con un radio es de 68.70 micrómetros, área de 14828.11 micrómetros cuadrados y un perímetro de 431.67 micrómetros

La construcción de esferas con volúmenes diferentes nos permitió hacer pruebas de acoplamiento variando el tamaño del resonador. La figura 3.18 muestra la esfera VI fabricada con un radio de 62.88 micrómetros, 12421.73 micrómetros cuadrados y un perímetro de 395.09 micrómetros.

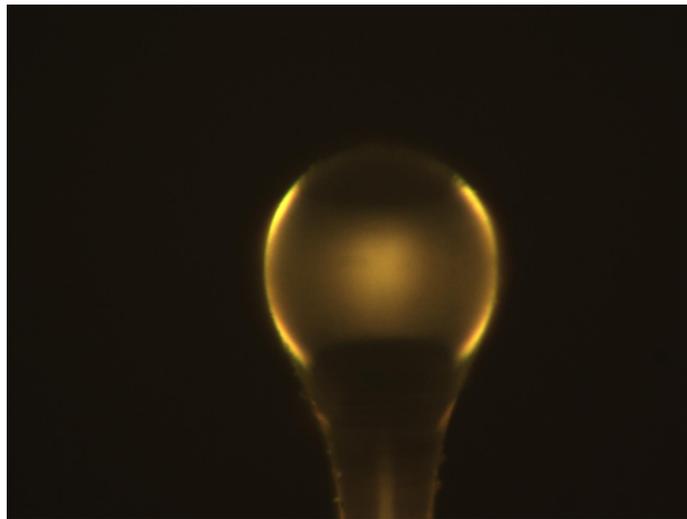


Figura 3.18: Esfera E6 con un con radio de 62.88 micrómetros, 12421.73 micrómetros cuadrados

En la figura 3.19 se muestra la esfera E7 con un radio de 90.09 micrómetros, un área de 25499.09 micrómetros cuadrados y un perímetro de 566.07 micrómetros. Se

puede notar que el vástago al que esta unida la esfera se encuentra doblado.

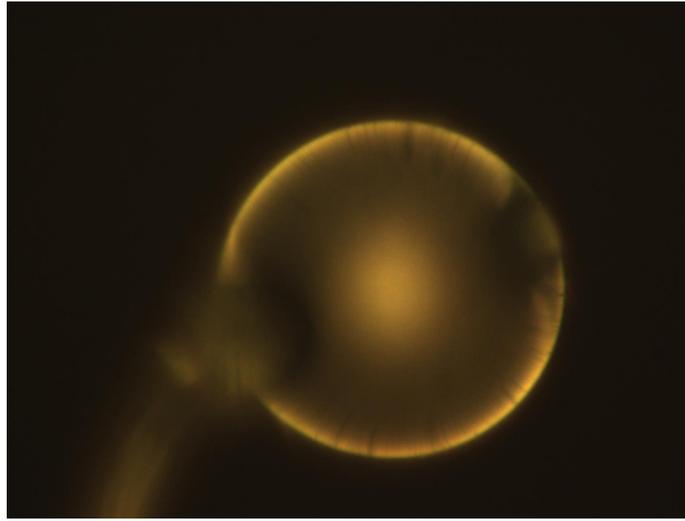


Figura 3.19: Esfera E7 con un radio de 90.09 micrómetros y un área de 25499.09 micrómetros cuadrados

La esfera más grande que fabricamos es la esfera E8 y tiene un radio de 103.01 micrómetros, un área de 33,336.31 micrómetros cuadrados y un perímetro de 647.24 micrómetros

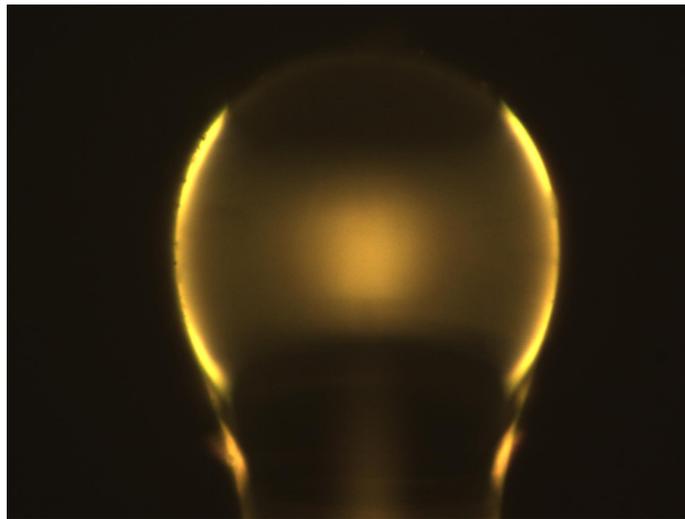


Figura 3.20: Esfera E8 con un radio de 103.01 micrómetros y un área de 33,336.31 micrómetros cuadrados

Las imágenes se tomaron usando un microscopio óptico con una magnificación de 20x. Las fibras y las esferas fueron medidas con el programa ISCapture, tomando como

referencia el diámetro de una fibra óptica estándar y de ahí el programa determina las medidas con base a un conteo de píxeles. La figura 3.21 muestra la fibra óptica que ocupada como referencia para medir las esferas y las fibras adelgazadas.

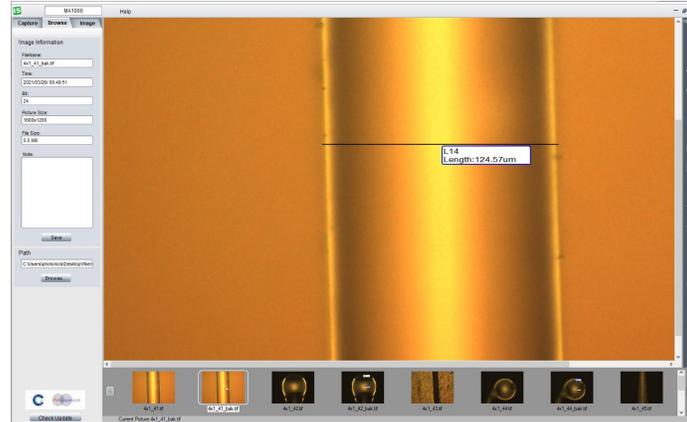


Figura 3.21: Ocupamos el programa ISCapture para determinar las medidas de las esferas y las fibras adelgazadas.

En la figura 3.22 se muestran las señales obtenidas del osciloscopio de la detección de 2 fotodetectores y un fotomultiplicador. El sistema de detección consistía en un fotodetector conectado en el primer acoplamiento de la luz proveniente del láser a la fibra óptica, esta luz tenía una frecuencia de repetición de 400 fs a una longitud de onda de 680 nm. Esta primera señal era ocupada como referencia y era conectada al canal 1 del osciloscopio. El segundo fotodetector se encontraba a la salida de la fibra óptica, justo después de la sección de la fibra adelgazada y esta se ve con un desplazamiento en el tiempo debido a la distancia que la luz ya habría recorrido al ser detectada y esta se conectaba al canal 2 del osciloscopio. Finalmente, justo en la parte superior del resonador se tenía un fotomultiplicador que en el osciloscopio podemos ver como una curva cuyo punto de inflexión se lo caliza en la parte inferior y este fotodetector estaba conectado al canal 3.

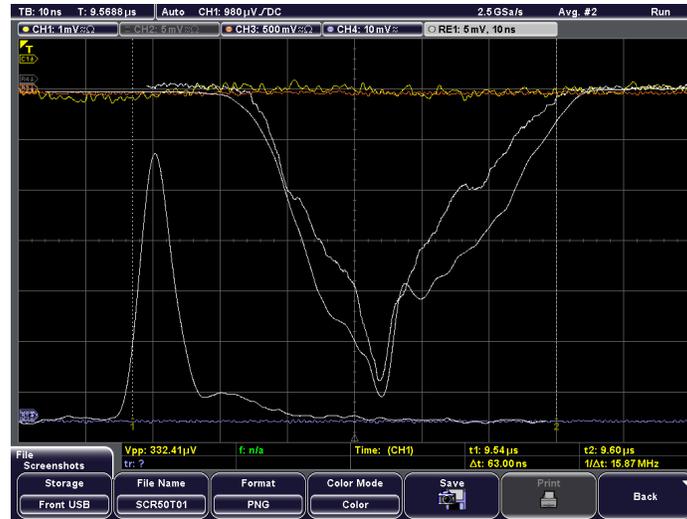


Figura 3.22: Datos obtenidos al hacer incidir luz a una longitud de onda de 680 nm

La grafica mostrada en la figura 3.23 muestra dos curvas: una en color rojo y otra en color gris. Podemos apreciar que el grafico en color gris esta ligeramente más ensanchado que el color gris, esto se debe a que hay un mayor atrapamiento de luz en el grafico gris que en el rojo. La microesfera se movía a lo largo de la fibra óptica ahusada (escaneábamos) y justamente donde el tiempo de decaimiento fuera mayor nos indicaba que esa era la sección donde había un mejor acoplamiento debido a que era la zona más ahusada.

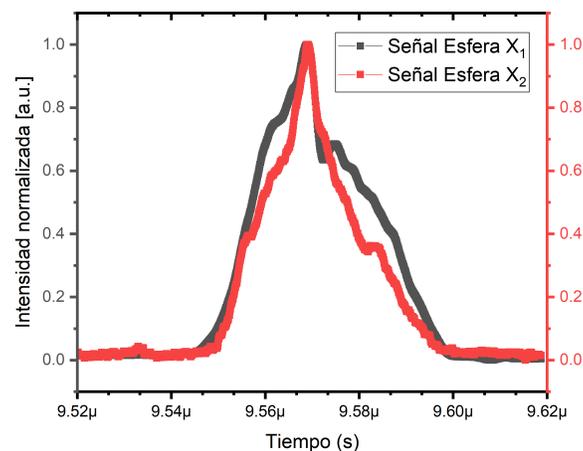


Figura 3.23: En la curva gris podemos ver que esta ligeramente más ensanchada que la curva roja, por lo que el tiempo de decaimiento es mayor en la curva gris que en la roja

El gráfico de la figura 3.24 muestra un pulso ocupado como referencia donde podemos apreciar su tiempo de decaimiento en el orden de microsegundos.

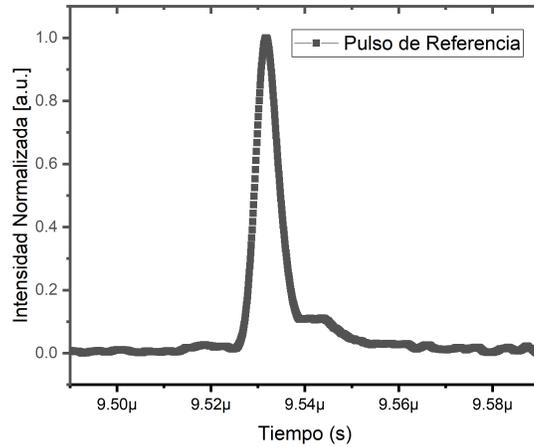


Figura 3.24: Pulso de referencia

Para una esfera de 82.83 micrómetros de radio, la diferencia en el tiempo de decaimiento entre el pulso en color gris y el pulso en color rojo es de $7,7 \times 10^{-9}$ s con un error de $0,2 \times 10^{-9}$ del fotodetector. Sabemos que el factor de calidad se define como: $Q = \omega \tau$, donde $\omega = 2\pi f$, la frecuencia es $f = \frac{c}{n\lambda}$, donde $c = 3 \times 10^8$ m/s, el índice de refracción n para una fibra estándar es 1.5 y ocupamos una longitud de onda $\lambda = 680 \text{ nm}$, al hacer los cálculos encontramos que la frecuencia $f = 2,94 \times 10^{14}$ Hz y la frecuencia de resonancia $\omega = 1,84 \times 10^{15}$ Hz, teniendo finalmente que el factor de calidad es $Q = 14,16 \times 10^6 \pm 0,368$

Capítulo 4

Conclusiones

Desde un punto de vista de entrenamiento, la fabricación de fibras adelgazadas y microsferas, así como en el acoplamiento de luz y la manipulación de herramientas y dispositivos ópticos ha permitido adquirir experiencia y habilidades.

Con la fabricación de resonadores, dicha experiencia nos muestra la importancia de trabajar en condiciones de limpieza en el área de trabajo. Si lo que se desea es un dispositivo de dióxido de silicio puro para la propagación, se entiende que esta limpieza afecta la fabricación de esferas, a tal grado que pueda ser imposible propagar luz en la esfera, si el material se encuentra contaminando provocando pérdidas por scattering, o bien, la presencia de contaminantes en el material puede repercutir en la señal obtenida al atrapar la luz.

El corte preciso de la fibra óptica para la fabricación y conseguir uniformidad, es otro punto importante cuando se trata de fabricar esferas simétricas, ya que, si no se realiza un corte preciso, la simple imperfección del corte puede generar una geometría diferente a la de una esfera. Incluso dicha elaboración con la fusionadora puede hacer que el vástago de la esfera quede torcido y provoque dificultades para el contacto controlado con el acoplador. La fusionadora óptica, es la herramienta usada por compañías de telecomunicaciones para fusionar fibras ópticas y es un sistema que permite empalmar diferentes tipos de fibra sin tener grandes pérdidas de luz. En nues-

tro caso, nosotros empleamos esta maquina para fabricar micro esferas ayudándonos de la tensión superficial y también para generar zonas adelgazadas sobre dicha fibra.

La manipulación de piezas mecánicas y algunos dispositivos ópticos fue otra de las habilidades adquiridas a lo largo de este proyecto. En su mayoría estos dispositivos nos ayudaban a acoplar luz, obtener señales, mejorar nuestra visualización, medir, calentar y limpiar. Debido a que los elementos fabricados son de dimensiones del orden de micrómetros, resultó importante tener este tipo de herramientas que facilitaban la ejecución de tareas de alta precisión. Como, por ejemplo, una vez que estaba fabricada la microesfera esta era retirada de la fusionadora con unas pinzas y se montaba en un acoplador el cual a su vez estaba montado en una de las plataformas controladas por los servomotores, la colocación de la microesfera al acoplador era una tarea de mucha precisión y cuidado ya que se tenia que evitar el contacto de nuestros dedos con la microesfera y esta tenia que ser metida en un canal tan solo un poco mayor que el diámetro del vástago.

En cuanto al sistema de visualización, este ayudaba principalmente en la fabricación de microesferas y en el adelgazamiento de fibras ópticas, así como en el acoplamiento fibra adelgazada-microesfera. En el caso del sistema de visualización para el ahusamiento de la fibra era importante poder visualizar tanto la fibra óptica como la flama ya que esto nos permitió determinar la distancia entre la flama y la fibra óptica. Había un momento en que la fibra era tan delgada que ya no era posible verla en la cámara por lo que teníamos que mover una lampara para reflejar la luz sobre la fibra adelgazada y guiarnos con esta luz reflejada por la fibra ahusada. Este es el paso mas critico y complicado al adelgazar la fibra óptica. El sistema de visualización no solo era de suma importancia para el ahusamiento de la fibra óptica sino también lo era para el acoplamiento fibra adelgazada-microesfera ya que, al tener dos cámaras, una que enfocaba desde arriba y otra lateral, la primera nos ayudaba a encontrar el ecuador y asegurarnos de que la fibra estuviera justo en el ecuador de la esfera y la segunda camara nos guiaba para saber si la esfera estaba en efec-

to en contacto con la fibra ahusada. El ingenio y la manipulación de espejos, lentes, cámaras, microscopio y luz son experiencias adquiridas en esta etapa de visualización.

Acopladores: al igual que en la fabricación de las esferas la limpieza de la fibra es muy importante. Limpiar con acetona para reblandecer el recubrimiento polimérico y posteriormente con alcohol resulto ser muy efectivo. Para retirar el recubrimiento debemos asegurarnos de que las pinzas este bien afiladas de lo contrario podrían dejar restos del recubrimiento lo que dificulta el adelgazamiento y al momento de acercar la flama este polímero se quema y la fibra ya no se calienta de forma homogénea. Fue útil utilizar cinta adhesiva para fijar la fibra a los canales de las agarraderas que estiraban la fibra ya que en muchas ocasiones estas se desprendían de las agarraderas y la fibra ser recorría y dificultaba el ahusamiento. Dejar que la flama se estabilizara al comienzo ayudaba a tener una flama más controlada de lo contrario la longitud de la flama era muy variante al comienzo por lo que algunas partes al calentarse más se adelgazaban más al grado que podían romperse fácilmente durante el proceso de ahusamiento. Así mismo la distancia de la flama a la fibra quedo bien establecida gracias al sistema de visualización, siendo la longitud de la flama de 2 milímetros. Una buena guía para reconocer que estábamos llegando al diámetro deseado era ver un patrón de colores que se reflejaban sobre la fibra óptica ahusada sin embargo antes de llegar a estar parte la fibra ya es tan delgada que resulta muy complicada verla por las cámaras por lo que encontramos que era útil mover una lampara para hacer contraste y ver en la fibra la luz reflejada de la lampara y con este reflejo ubicar la fibra para evitar que esta sea calentada. Este proceso es crítico y complicado, también porque al ser tan delgada la fibra esta se mueve muy fácilmente por lo que puede ser de gran ayuda evitar corrientes de viento para que no tenga tanto movimiento y podamos evitar que este cruce la flama y pueda ser quemada. En la figura 4.1 se muestra la flama y la fibra, la fibra siempre permanece una cierta distancia por debajo de la flama de tal manera si hay un pequeño aumento de la flama debido a la combustión esta no sea quemada.

En cuanto a las velocidades y estiramiento se comenzaba a una distancia de 50

mm y terminaba en la posición 26 mm, por lo que la distancia que recorría el motor para fabricar el “taper” era de 24 mm, a una velocidad de $100 \mu\text{m}/\text{s}$ y una aceleración de $10\mu\text{m}/\text{s}^2$. La flama realizaba un movimiento oscilatorio con una amplitud de 4 mm a una velocidad de $2 \text{ mm}/\text{s}$ y una aceleración de $5 \text{ mm}/\text{s}^2$.



Figura 4.1: Proceso de ahusamiento de fibra óptica

En cuanto a los nueve acopladores obtenidos, podemos ver que el acoplador T1 a pesar de estar ahusado en una sección, no es posible utilizarlo como acoplador debido a que esta curvo, lo mismo sucede con T2, T3 y T4, estos fueron a algunos de los primeros intentos por ahusar la fibra óptica y debido a que la flama estaba demasiado cerca y era mayor a dos milímetros, la fibra se rompía y se doblaba. Al controlar detalles como la longitud de la flama, la distancia de esta a la fibra y dejar que la flama se estabilizara al comienzo, comenzamos a obtener mejores resultados a partir del diámetro de la fibra T5. La fibra estandar tiene 125 micrómetros, sin embargo, nuestras medidas muestran un diámetro de 125 micrómetros, que encuentra dentro del error estandar. Con la fabricación de T6 conseguimos tener un diámetro de 42.29 micrómetros un resultado muy similar al obtenido con T8, con un diámetro de 45.26 micrómetros, uno de los mejores acopladores fue T9 con un diámetro de 5.63 micrómetros, además de que muestra ser homogéneo. Con este diámetro se comenzó a acoplar luz a las esferas.

Esferas: se fabricaron ocho esferas cuyas radios tienen dimensiones que van desde los 48.03 micrómetros para la E5 hasta los 103.01 para la esfera E8. La esfera E1 con un radio de 97.75 tiene buen aspecto, incluso el vástago esta completamente derecho. La esfera E2 con radio de 60.28 pareciera tener el vástago ligeramente más

inclinado al lado izquierdo y se notan unas líneas en el mismo vástago. La esfera E3 con radio de 93.73 micrómetros tiene muy buen aspecto ya que se puede ver un tanto iluminada en partes de su perímetro debido a la luz que refleja. La esfera E4 es la más pequeña mostrada en este trabajo, teniendo un radio de 48.03 micrómetros e incluso su vástago pareciera ser muy grande comparado con la esfera. Tanto la esfera E5 y E6 tiene características muy similares en cuanto a tamaño refiere: 68.70 para E5 y 62.88 para E6 respectivamente. La esfera E7 resalta por tener el vástago demasiado doblado teniendo un radio de 90.9 micrómetros. La esfera E8 es la esfera más grande que se reporta con un radio de 103.01 micrómetros.

Resultado crucial tener un acoplamiento óptico óptimo a la entrada de la fibra óptica para que pudiera tenerse la mayor cantidad de luz dentro de la fibra y que al momento de pasar por la fibra adelgazada gran cantidad de esta luz pudiera ser acoplada a la esfera de manera que se tuviera una buena recirculación con altos factores de calidad. Nuestro acoplamiento de luz inicial paso a través de la fibra óptica para que a la salida del medidor de potencia logramos registrar $1 \mu W$. El hecho de poder mover la fibra en tres direcciones x,y y z además del ángulo con la ayuda de los servomotores facilitó y sistematizo el proceso de acoplamiento ahorrando tiempo.

Conseguimos fabricar esferas de muy diversos tamaños utilizando únicamente las herramientas con las que cuenta el laboratorio de óptica y fotónica abriendo una nueva posibilidad para fabricar microesferas con un bajo presupuesto. Las dimensiones y la calidad de las esferas obtenidas son buenas como lo muestran las fotografías. El tamaño de las esferas depende de la delgadez de la fibra utilizada, de esta manera se puede seleccionar el tamaño de la esfera en función de la delgadez de la fibra óptica. Así mismo la excentricidad de la figura depende de la cantidad de descargas por lo que es posible fabricar desde elipsoides hasta esferas.

El adelgazamiento o ahusamiento de la fibra óptica resulto ser una de las etapas más complicadas ya que este proceso demandó una gran precisión y control de variables como: temperatura, velocidad de estiramiento, velocidad de oscilación de la

micro flama, longitud de la flama, la capacidad de visualización aun cuando la fibra ya estaba cercana a un diámetro de 5 micrómetros y la coordinación de todas estas variables. Para acoplar más luz necesariamente la fibra óptica debe tener un diámetro de un micrómetro en la parte más estrecha sin embargo lo mas cercano que estuvimos en el ahusamiento de la fibra fue de 5 micrómetros lo cual no es lo mejor para tener el mayor acoplamiento, sin embargo logramos acoplar luz. Se sugiere continuar perfeccionando el procedimiento para el ahusamiento de la fibra óptica hasta alcanzar diámetros de un micrómetro o menos.

El acoplamiento fibra adelgazada-esfera, que consistía en poner la microesfera sobre la parte de la fibra más adelgazada también presentaba un reto ya que era necesario poner la fibra adelgazada justo en el ecuador de la esfera y para ello se hacía uso también del sistema de visualización sin embargo, fue gracias a los servomotores que permitían tener pasos del orden de micras que esta tarea pudo realizarse de forma más precisa. No solo era el sistema de visualización el que nos orientaba donde poner la microesfera sino también el fotomultiplicador y los fotodetectores; a medida que movíamos la esfera sobre la fibra ahusada podíamos en el osciloscopio visualizar donde de acoplo la mayor cantidad de luz.

En cuanto a la visualización y detección resulto ser muy eficiente el sistema implementado con dos cámaras, el microscopio y el objetivo de 20X. Logramos mejorar el sistema de visualización en una de las partes más críticas. En el ahusamiento de la fibra óptica cuando esta estaba muy delgada resultaba difícil ver en nuestras cámaras la fibra, sin embargo, poniendo un lampara de led logramos generar un contraste que permitía ver a la fibra brillar en nuestra cámara y con esto resolver el problema de la escaza visualización de la fibra en las cámaras.

Nuestro objetivo general fue describir las tareas realizadas para la fabricación del sistema óptico con microresonador esférico y lograr modos resonantes WGM, lo cual se consiguió de forma detallada. También podemos decir que los objetivos específicos se consiguieron al lograr fabricar: las esferas con el arco eléctrico de la fusionadora

de fibra óptica, los acopladores ópticos con una microflama de hidrógeno-oxígeno y terminamos con la caracterización del microresonador. Se describieron las tareas de los procesos que permitirá tener una guía de referencia para fabricar acopladores ópticos y microcavidades esféricas, así como el sistema de acoplamiento con los equipos del laboratorio de óptica y fotónica del CFATA. Finalmente fuimos capaces de construir un sistema óptico con resonador esférico WGM.

La fabricación del sistema óptico con resonador esférico WGM sugiere la posibilidad de continuar con una segunda etapa donde la microesfera sea contaminada con nanopartículas para la generación de luz a diferentes longitudes de onda, así como la posibilidad de estudios de óptica no lineal y sus efectos en sistemas ópticos como este.

Bibliografía

- [1] A. N. Oraevsky, “Whispering-gallery waves,” *Quantum electronics*, vol. 32, no. 5, p. 377, 2002.
- [2] L. Rayleigh, “Cxii. the problem of the whispering gallery,” *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, vol. 20, no. 120, pp. 1001–1004, 1910.
- [3] A. Bate, “Note on the whispering gallery of st paul’s cathedral, london,” *Proceedings of the Physical Society*, vol. 50, no. 2, p. 293, 1938.
- [4] J. Ward and O. Benson, “Wgm microresonators: sensing, lasing and fundamental optics with microspheres,” *Laser & Photonics Reviews*, vol. 5, no. 4, pp. 553–570, 2011.
- [5] J.-D. Colladon, J.-D. Colladon, J.-D. Colladon, S. Physicien, F. Suisse, J.-D. Colladon, S. Physicist, and F. Switzerland, *Notes sur les inconvénients et les difficultés du tunnel étudié sous le Mont-Blanc et de ses lignes d’accès projetées: avantages incontestables d’un chemin de fer international par le Simplon*. C. Schuchardt, 1880.
- [6] A. S. Eve, C. H. Creasey, and C. S. baron Schuster, *Life and work of John Tyndall*. Macmillan & Company Limited, 1945.
- [7] G. Mie, “Beiträge zur optik trüber medien, speziell kolloidaler metallösungen,” *Annalen der physik*, vol. 330, no. 3, pp. 377–445, 1908.

- [8] H. Weber and R. Ulrich, “A thin-film ring laser,” *Applied Physics Letters*, vol. 19, no. 2, pp. 38–40, 1971.
- [9] R. Ulrich and H. Weber, “Solution-deposited thin films as passive and active light-guides,” *Applied Optics*, vol. 11, no. 2, pp. 428–434, 1972.
- [10] F. Jacobsen, “On the uncertainty in measurement of sound power using sound intensity,” *Noise control engineering journal*, vol. 55, no. 1, pp. 20–28, 2007.
- [11] R. K. Chang and A. J. Campillo, *Optical processes in microcavities*, vol. 3. World scientific, 1996.
- [12] M. L. Gorodetsky, A. D. Pryamikov, and V. S. Ilchenko, “Rayleigh scattering in high-q microspheres,” *JOSA B*, vol. 17, no. 6, pp. 1051–1057, 2000.
- [13] H. A. Haus, *Waves and fields in optoelectronics*. Prentice-Hall, 1984.
- [14] B. Little, H. Haus, E. Ippen, G. Steinmeyer, E. Thoen, J. Foresi, L. Kimerling, S. T. Chu, and W. Greene, “Microresonators for integrated optical devices,” *Optics and Photonics News*, vol. 9, no. 12, p. 32_1, 1998.
- [15] J. M. Ward, D. G. O’Shea, B. J. Shortt, and S. N. Chormaic, “Optical bistability in er-yb codoped phosphate glass microspheres at room temperature,” *Journal of Applied Physics*, vol. 102, no. 2, p. 023104, 2007.
- [16] K. Srinivasan, P. E. Barclay, O. Painter, J. Chen, A. Y. Cho, and C. Gmachl, “Experimental demonstration of a high quality factor photonic crystal microcavity,” *Applied Physics Letters*, vol. 83, no. 10, pp. 1915–1917, 2003.
- [17] Y. Akahane, T. Asano, B.-S. Song, and S. Noda, “High-q photonic nanocavity in a two-dimensional photonic crystal,” *nature*, vol. 425, no. 6961, pp. 944–947, 2003.
- [18] J. Vučković, M. Lončar, H. Mabuchi, and A. Scherer, “Design of photonic crystal microcavities for cavity qed,” *Physical Review E*, vol. 65, no. 1, p. 016608, 2001.

- [19] D. Vernooy and H. Kimble, “Quantum structure and dynamics for atom galleries,” *Physical Review A*, vol. 55, no. 2, p. 1239, 1997.
- [20] S.-X. Qian and R. K. Chang, “Multiorder stokes emission from micrometer-size droplets,” *Physical review letters*, vol. 56, no. 9, p. 926, 1986.
- [21] V. Braginsky, M. Gorodetsky, and V. Ilchenko, “Quality-factor and nonlinear properties of optical whispering-gallery modes,” *Physics letters A*, vol. 137, no. 7-8, pp. 393–397, 1989.
- [22] J. A. Stratton, *Electromagnetic theory*, vol. 33. John Wiley & Sons, 2007.
- [23] B. E. Little, J.-P. Laine, and H. A. Haus, “Analytic theory of coupling from tapered fibers and half-blocks into microsphere resonators,” *Journal of lightwave technology*, vol. 17, no. 4, p. 704, 1999.
- [24] C. Lam, P. T. Leung, and K. Young, “Explicit asymptotic formulas for the positions, widths, and strengths of resonances in mie scattering,” *JOSA B*, vol. 9, no. 9, pp. 1585–1592, 1992.
- [25] J. Love and W. Henry, “Quantifying loss minimisation in single-mode fibre tapers,” *Electronics Letters*, vol. 22, no. 17, pp. 912–914, 1986.
- [26] J. Dewynne, J. Ockendon, and P. Wilmott, “On a mathematical model for fiber tapering,” *SIAM Journal on Applied Mathematics*, vol. 49, no. 4, pp. 983–990, 1989.
- [27] M. Eisenmann and E. Weidel, “Single-mode fused biconical couplers for wavelength division multiplexing with channel spacing between 100 nd 300 nm,” *Journal of lightwave technology*, vol. 6, no. 1, pp. 113–119, 1988.