

Excitación de cavidades optomecánicas mediante acopladores “grating” para procesado fotónico de señales de microondas

Adrián Castellá Montoro

Tutor: Alejandro Martínez Abietar

Cotutor: Laura Mercadé Morales

Trabajo Fin de Grado presentado en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación de la Universitat Politècnica de València, para la obtención del Título de Graduado en Ingeniería de Tecnologías y Servicios de Telecomunicación

Curso 2019-20

Valencia, 30 de Abril de 2020

Resumen

Una cavidad optomecánica permite confinar ondas de luz y vibraciones mecánicas en una región sub-micrométrica. Debido al elevado confinamiento, ambos tipos de onda se acoplan e intercambian energía mutuamente, por lo que es posible modular la luz con la vibración mecánica. Además, debido al tamaño de la cavidad, la vibración mecánica puede tener una frecuencia del orden de varios GHz, que una vez detectada la luz modulada, se convertiría en una señal eléctrica de microondas. Por tanto, este tipo de cavidades es muy interesante de cara al campo de la fotónica de microondas, que estudia el procesado de señales de microondas en el régimen óptico, y que tiene aplicación en numerosos campos de la ingeniería, desde las redes de comunicaciones inalámbricas hasta los enlaces inter-satélite.

En este TFG se aborda la excitación de cavidades optomecánicas mediante acopladores tipo “grating” que se usan en circuitos integrados de fotónica de silicio para acoplar luz fuera y dentro de un chip que pueda ser usado en el mundo real. El objetivo es demostrar que se puede generar una señal de microondas – modulando una portadora óptica – en una cavidad optomecánica accediendo a ella mediante un acoplador de “grating”. El uso de acopladores “grating” facilita el acoplo a fibras ópticas externas, lo que permitiría llevar los dispositivos optomecánicos del laboratorio a aplicaciones reales.

Resum

Una cavitat optomecànica permet confinar ones de llum i vibracions mecàniques en una regió sub-micromètrica. A causa de l'elevat confinament, tots dos tipus d'ona s'acoblen i intercanvien energia mútuament, per la qual cosa és possible modular la llum amb la vibració mecànica. A més, a causa de la grandària de la cavitat, la vibració mecànica pot tindre una freqüència de l'ordre de diversos GHz, que una vegada detectada la llum modulada, es convertiria en un senyal elèctric de microones. Per tant, aquest tipus de cavitats és molt interessant de cara al camp de la fotònica de microones, que estudia el processament de senyals de microones en el règim òptic, i que té aplicació en nombrosos camps de l'enginyeria, des de les xarxes de comunicacions inalàmbriques fins als enllaços inter-satèl·lit.

En aquest treball final de grau s'aborda l'excitació de cavitats optomecàniques mitjançant acobladors tipus “grating” que s'usen en circuits integrats de fotònica de silici per a acoblar llum fora i dins d'un xip que pugui ser usat en el món real. L'objectiu és demostrar que es pot generar un senyal de microones – modulant una portadora òptica – en una cavitat optomecànica accedint a ella mitjançant un acoblador de “grating”. L'ús d'acobladors “grating” facilita l'acoble a fibres òptiques externes, la qual cosa permetria portar els dispositius optomecànics del laboratori a aplicacions reals.

Abstract

An optomechanical cavity allows light waves and mechanical vibrations to be confined to a sub-micrometric region. Due to the high level of confinement, both types of waves are coupled and exchange energy with each other, so that it is possible to modulate light with mechanical vibration.

Furthermore, due to the size of the cavity, mechanical vibration can have a frequency of the order of several GHz, which once the modulated light is detected, it would be converted into an electrical microwave signal. Therefore, this type of cavities is very interesting for the field of microwave photonics, which studies the processing of microwave signals in the optical regime, and it has application in many fields of engineering, from wireless communications networks to inter-satellite links.

This final degree project addresses the excitation of optomechanical cavities by means of "grating couplers used in silicon photonics integrated circuits to couple light outside and inside a chip that can be used in the real world. The objective is to demonstrate that a microwave signal can be generated - by modulating an optical carrier - in an optomechanical cavity by accessing it through a grating coupler. The use of grating couplers facilitates coupling to external optical fibers, which would allow bringing optomechanical devices from the laboratory to real applications.

Índice general

1. Introducción	7
1.1. Objetivos	7
1.2. Metodología	8
1.3. Plan de Trabajo	8
2. Estudio Teórico	10
2.1. Cavidades Optomecánicas	10
2.2. Cristal Optomecánico	11
2.2.1. Cristal fotónico	13
2.2.2. Cristal fonónico	14
2.2.3. Acoplo de los modos ópticos y mecánicos	15
2.3. Gratings	16
2.3.1. Grating coupler	16
3. Caracterización Experimental	18
3.1. Acoplo evanescente con loop	18
3.1.1. Procedimiento	20
3.2. Acoplo vertical con gratings	23
3.2.1. Procedimiento	23
4. Experimentos y Resultados	26
4.1. Medidas Obtenidas	26
4.1.1. Resonancias Ópticas	26
4.1.2. Resonancias Mecánicas	30
4.1.3. Diseño de Gratings mediante simulación en Rsoft	32
4.1.4. Caracterización de gratings	34
5. Trabajo Futuro	37
Bibliografía	39

Índice de figuras

1.1. Muestra objetivo	8
1.2. Representación del plan de trabajo llevado a cabo	9
2.1. Representación gráfica de un sistema optomecánico Fabry-Perot	11
2.2. Desfase provocado por la excitación mecánica	12
2.3. Distintos tipos de cavidades optomecánicas	12
2.4. Imagen del tipo de cristal optomecánico que usamos	13
2.5. Perfiles del desplazamiento de ambos modos	13
2.6. Representación gráfica de un cristal fotónico en 1D,2D,3D	14
2.7. Diagramas de bandas óptico modos TE y TM	15
2.8. Representación gráfica del fenómeno de difracción	16
2.9. Representación de los rayos difractados constructivamente hacia la fibra óptica	17
2.10. Relación entre la periodicidad del grating y el ángulo de difracción de los rayos	17
2.11. Acoplo desde fibra a guía de onda	17
3.1. Esquema del set-up utilizado para medir con el loop de fibra óptica	19
3.2. Montaje utilizado para medir con el loop de fibra óptica	20
3.3. Muestra con cavidades optomecánicas	21
3.4. Cavidad optomecánica vista en el SEM	21
3.5. Imagen vista desde cámara lateral	22
3.6. Esquema del set-up de acoplo vertical	23
3.7. Set-up de acoplo vertical	24
3.8. Caracterización de acopladores grating	25
4.1. Función de Lorentz	27
4.2. Espectro completo de una de las resonancias ópticas medidas	28
4.3. Ejemplo de una de las resonancias ópticas medidas con el ajuste lorentz aplicado	28
4.4. Espectros de distintas resonancias ópticas medidas	29
4.5. Histogramas de las resonancias ópticas medidas	29
4.6. Ejemplo de efecto termoóptico medido en reflexión	30
4.7. Espectro de resonancias mecánicas de MHz y GHz	31
4.8. Espectro de una de las resonancias mecánicas medidas	32
4.9. Espectro de RF de una cavidad optomecánica.	33
4.10. Espectro de distintas resonancias mecánicas medidas	33
4.11. Eficiencia de acoplo en función de diferentes parámetros	35
4.12. Eficiencia de acoplo en función de la longitud de onda	36
4.13. Caracterización de acopladores grating en reflexión	36
5.1. Muestra de los acopladores grating	38

5.2. Acopladores Grating vistos en detalle 38

Capítulo 1

Introducción

Este proyecto surge a partir de la entrada del alumno al Instituto Universitario de Tecnología Nanofotónica (NTC) para la realización de prácticas curriculares en el área de investigación de la optomecánica y dentro de ésta, en colaboración con el proyecto europeo Phenomen. Phenomen es una iniciativa innovadora diseñada para aprovechar el potencial de las señales electrónicas combinadas de fonónica, fotónica y radiofrecuencia (RF) para sentar las bases de una nueva tecnología de la información. Concretamente se basa en la manipulación de fonones y su acoplo a los fotones y la electrónica de radiofrecuencia, coordinado por el Insituto Catalán de Nanociencia y Nanotecnología [1]. La interacción de las ondas de luz y sonido en la micro y nanoescala ha atraído un interés considerable en los últimos años, ya que esta, es la responsable de una amplia variedad de fenómenos físicos.

Esta interacción directa entre la radiación electromagnética y las vibraciones mecánicas de la materia es el fenómeno conocido como interacción optomecánica (OM), la cual se ve fuertemente mejorada si esta interacción se confina en una cavidad en la micro y nanoescala. La temática de la optomecánica de cavidades está orientada hacia el desarrollo e implementación de chips fotónicos en tecnología de silicio para ser empleados en una gran variedad de aplicaciones, desde biosensado hasta seguridad o telecomunicaciones [2]. Por tanto, es una línea de trabajo fundamental dentro del NTC y que augura resultados de gran impacto científico-tecnológico en los próximos años.

1.1. Objetivos

El objetivo principal es lograr excitar modos mecánicos de cavidades optomecánicas en silicio usando acopladores “grating” como interfaz de acoplo fibra-chip. La necesidad de desarrollar esta tecnología se debe a que otras técnicas de acoplo, como por ejemplo el uso de un loop de fibra, aunque son más eficientes resultan muy costosas respecto al tiempo invertido en ellas y además, sólo permiten excitar una cavidad individual en cada medida. Con acopladores “grating”, el acoplo es mucho más sencillo, y una vez tenemos la luz guiada en el chip, podríamos excitar distintas cavidades u otro tipo de estructuras no periódicas.

Para ello necesitamos realizar una muestra como se observa en la figura 1.1, consistente en cavidades optomecánicas con guías de onda y acopladores grating en un chip fotónico integrado de silicio, la cual mediríamos en reflexión mediante el montaje de acoplo vertical que se explicará

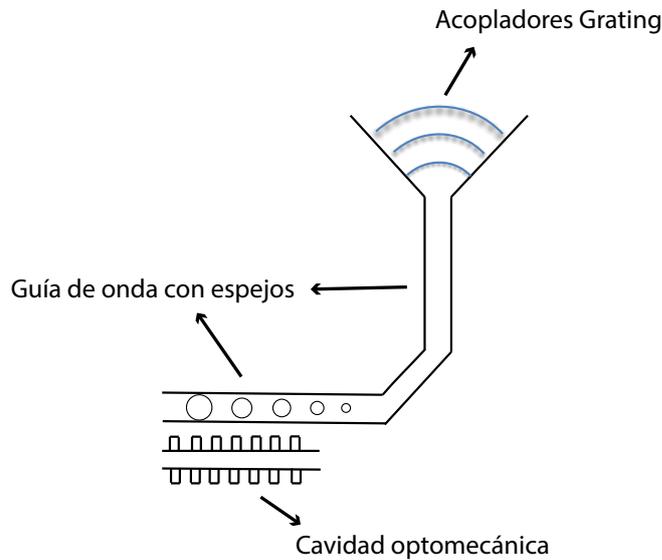


Figura 1.1: Muestra objetivo

mas adelante. Nuestros objetivos con esta muestra son:

- Acoplarnos desde las guías de onda hacia las cavidades optomecánicas.
- Usar un montaje de acoplo vertical que así nos permita aumentar la facilidad de caracterización.
- Medir resonancias mecánicas mediante excitación óptica de cavidades optomecánicas.

1.2. Metodología

Por un lado las herramientas principales que se han usado para llevar a cabo las mediciones de este proyecto han sido los sistemas experimentales mediante loop de fibra óptica y mediante acoplo vertical, que se explicaran en sus respectivos apartados. Por otro lado, para el análisis de las medidas óbtенidas se ha utilizado principalmente la herramienta de cómputo numérico Matlab. Conjuntamente, para las simulaciones realizadas se ha utilizado el programa Rsoft. Además para la edición de las figuras y gráficas se han utilizado los programas Illustrator y Photoshop.

1.3. Plan de Trabajo

A continuación, podemos ver cuál ha sido el tiempo aproximado dedicado a cada una de las tareas de este proyecto:

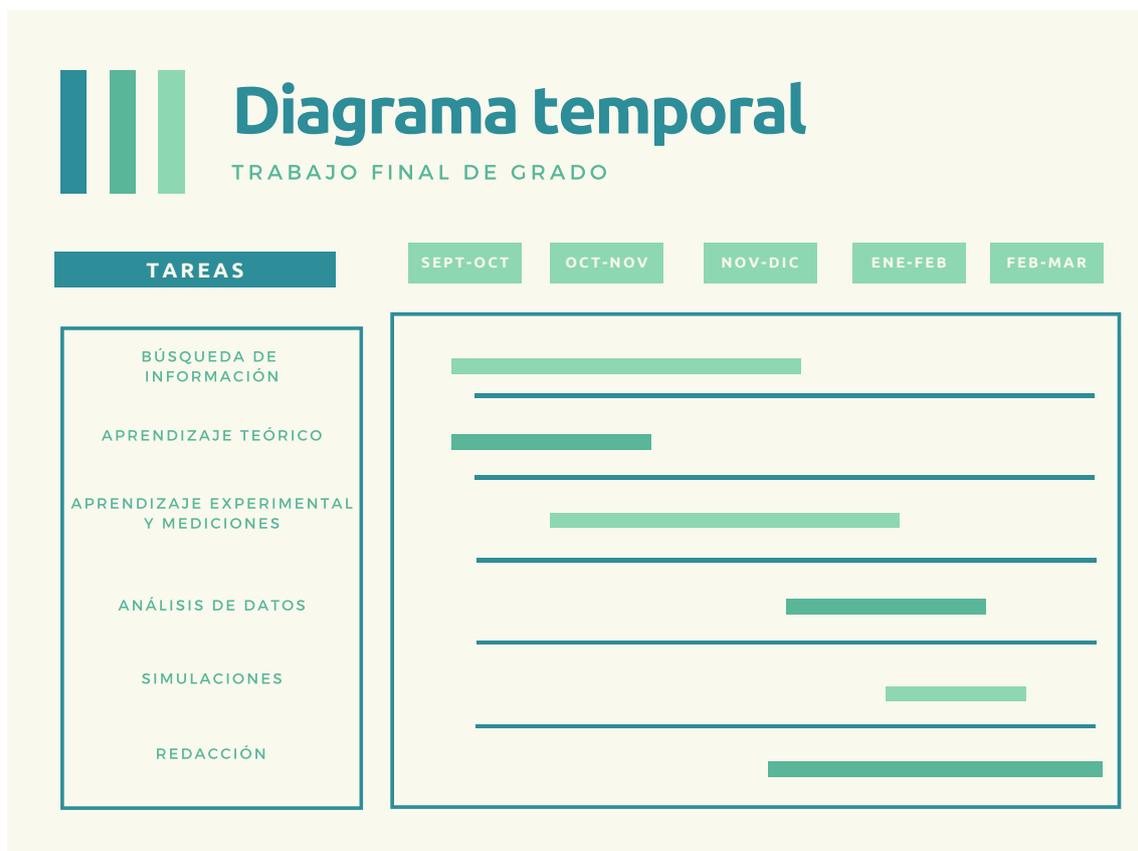


Figura 1.2: Representación del plan de trabajo llevado a cabo

Capítulo 2

Estudio Teórico

En este capítulo vamos a introducir los conceptos teóricos que componen el área de investigación de este trabajo final de grado. En concreto, el campo de la óptomecánica, que explora la interacción de la radiación electromagnética y el movimiento nanomecánico. Primero, definiremos qué es una cavidad optomecánica y expondremos los conceptos teóricos que nos permitirán diseñarla. Por último, una vez hayamos expuesto los conceptos teóricos referidos a nuestras cavidades, introduciremos qué es un grating coupler, que en nuestro caso serán los elementos que nos permitirán caracterizar la muestra final.

2.1. Cavidades Optomecánicas

Para introducir el concepto de una cavidad optomecánica, vamos a considerar el ejemplo de la Figura 2.1 la cual representa el sistema de funcionamiento clásico de una cavidad optomecánica, dado por un resonador Fabry-Perot. Podemos observar que se compone de dos espejos altamente reflectantes, en la cual uno de ellos se encuentra conectado a un muelle, permitiendo que de esta forma se desplace. Por un lado, primero mediante un láser, un haz de fotones entra a la cavidad y gracias a estos espejos reflectantes conseguimos que la luz esté confinada a cierta longitud de onda o frecuencia, Fig. 2.1 (a). Por otro lado, como uno de los espejos es móvil, y como a cierta longitud de onda los fotones se encuentran confinados, Fig. 2.1(a), se produce cierto desplazamiento en este espejo móvil debido a lo que se conoce como presión de radiación, Fig. 2.1(b).

La presión de radiación es descrita como la transferencia de momento de los fotones hacia un material cuando chocan con éste, dada por la ecuación 2.1, donde h es la constante de Plank y λ es la longitud de onda de un fotón [3] . Esta continua presión de radiación por los fotones que componen el haz de luz, permiten transducir movimiento hacia el material donde chocan, dando lugar a un modo mecánico (en este caso, la oscilación del espejo unido al muelle). De manera que, para un desplazamiento de uno de los cristales (móvil) se producirá un cambio en la frecuencia del modo óptico. Esta es la esencia del acoplo optomecánico: La presión de radiación debida a la presencia de un campo óptico confinado induce un desplazamiento mecánico y viceversa. Este cambio de frecuencia en la cavidad inducida por el acoplo optomecánico causará que los fotones que se encuentran confinados en la cavidad acumulen un cambio de fase o intensidad cuando son

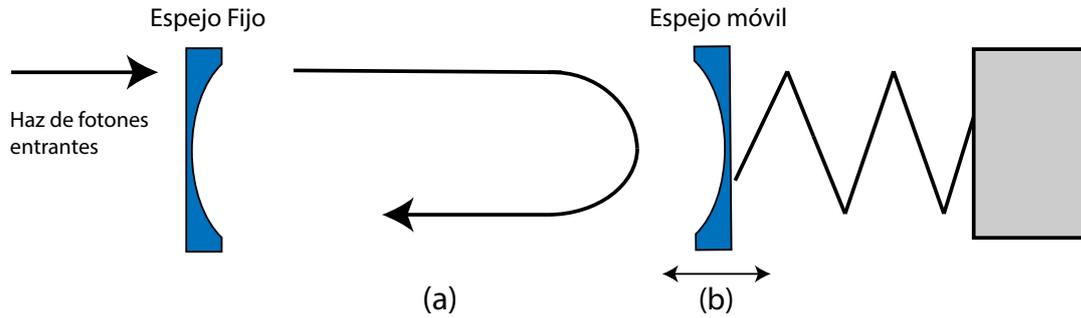


Figura 2.1: Representación gráfica de un sistema optomecánico Fabry-Perot

reflejados del espejo móvil y es aplicable a cualquier tipo de cavidad optomecánica [4].

$$|\Delta_p| = \frac{2 \cdot h}{\lambda} \quad (2.1)$$

Observando la figura 2.2, vemos como el desplazamiento mecánico (dx) del cristal móvil, causa un cambio de fase en la luz confinada en la cavidad ($d\theta$). Esto ocurre porque el movimiento del cristal produce un cambio en la longitud que existe entre ambos cristales (longitud de la cavidad) y, consecuentemente, cambia la frecuencia de resonancia óptica en la cavidad en un factor $\omega \times \frac{dx}{L}$ donde dx es, como hemos dicho, el desplazamiento del cristal, L la longitud entre ambos cristales y ω la frecuencia inicial de la luz confinada. Entonces, este cambio de fase que se produce en la luz es lo que utilizamos nosotros para detectar la excitación mecánica del material [5].

2.2. Cristal Optomecánico

Existen numerosos tipos de cavidades optomecánicas entre las que se encuentran membranas suspendidas [6], microtoroides [7], microesferas [8], entre otras, pero el tipo de cavidad que utilizamos nosotros se llama cristal optomecánico [9].

Un cristal optomecánico es un tipo de cavidad optomecánica compuesta simultáneamente de cristales fotónicos y fonónicos que confinan en la misma estructura fotones y fonones, las cuales diseñadas adecuadamente se acoplan dando lugar a una fuerte interacción fotón-fonón [9]. En nuestro caso acoplamos ambos cristales en una misma estructura periódica, es decir, no tenemos por un lado un cristal fotónico y por otro lado cristal fonónico, sino que utilizamos la misma estructura para confinar ambos modos como podemos apreciar en la Fig. 2.4.

En nuestro caso, para generar el confinamiento de la luz, creamos un pequeño defecto en el centro de la estructura y realizamos una transición adiabática para evitar pérdidas en este confinamiento, construyendo de esta manera toda la cavidad [4]. Como observamos en la Fig. 2.4, las alas de los extremos de la cavidad, con los agujeros en el centro, serían nuestros espejos de la Fig. 1, los cuales se repiten de forma quasi-periódica.

Esta estructura que se repite sería lo que llamamos nuestra celda unidad, la cual puede ser definida como la porción más simple de la estructura del cristal, en este caso de nuestra cavidad, que al repetirse produce toda la estructura. Conforme vamos recorriendo la cavidad hacia el centro de

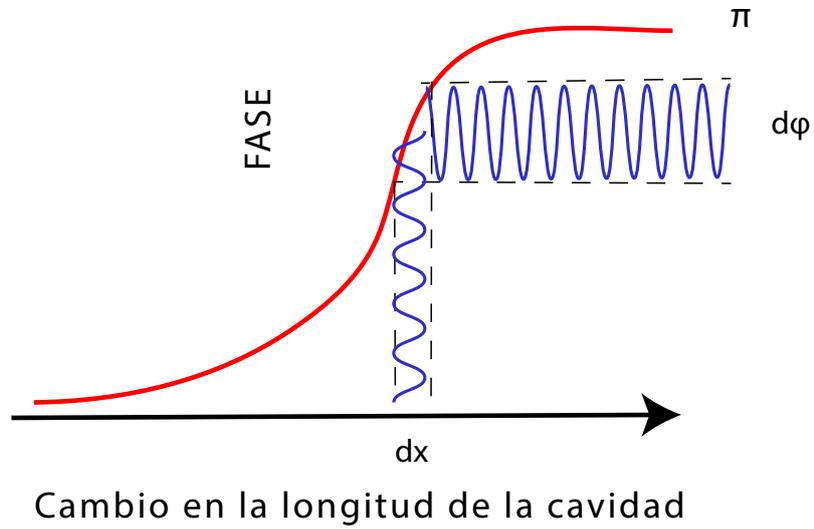


Figura 2.2: Desfase provocado por la excitación mecánica

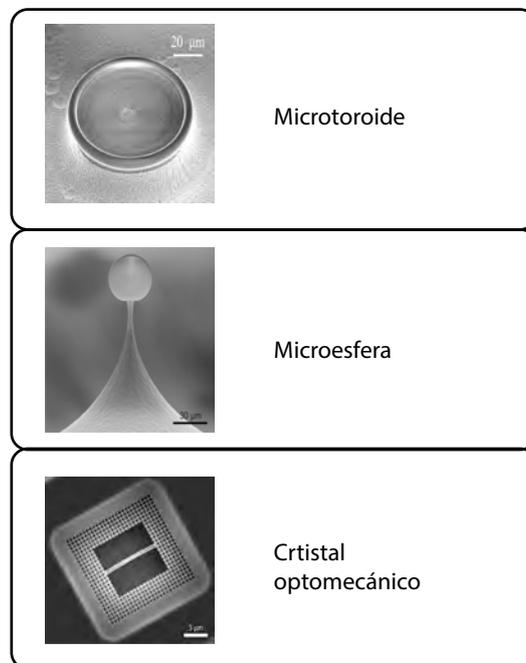


Figura 2.3: Distintos tipos de cavidades optomecánicas

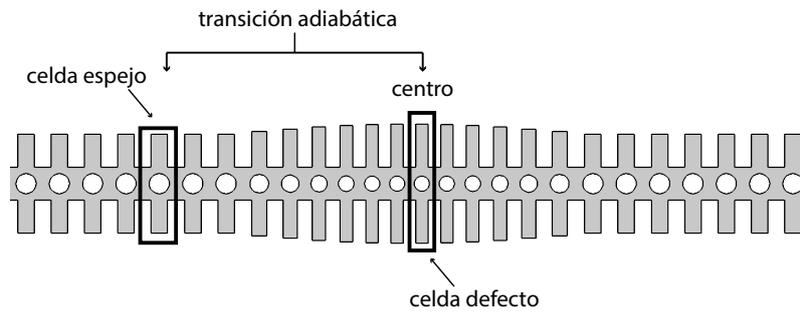


Figura 2.4: Imagen del tipo de cristal optomecánico que usamos

Cristal consistente en una corrugación 1D de una tira de silicio para localizar simultáneamente ondas de luz y mecánicas alrededor de la celda defecto. Las celdas espejo inhiben la fuga de las ondas del centro de la cavidad.

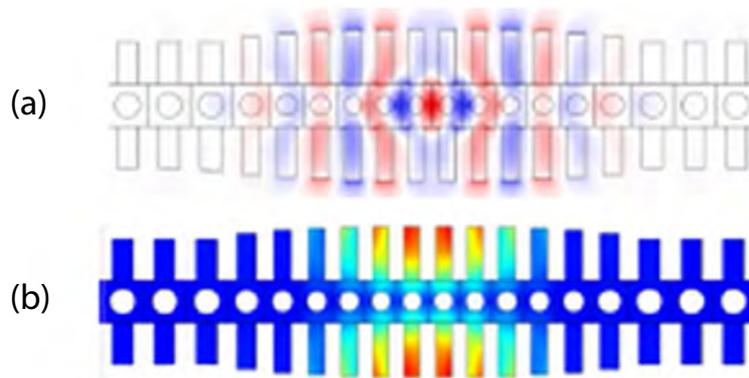


Figura 2.5: Perfiles del desplazamiento de ambos modos

(a) Perfil óptico del campo eléctrico confinado. En rojo y azul se representa respectivamente el máximo y el mínimo de intensidad de éste. (b) Perfil del desplazamiento del modo mecánico. En rojo se representa el máximo y en azul el mínimo de desplazamiento normalizado.

la misma, vemos esa transición adiabática en la que observamos un aumento de tamaño de las celdas unidad, con el objetivo de confinar los modos ópticos y mecánicos en el centro de ésta como observamos en la Fig. 2.5, dónde vemos por un lado el perfil del modo óptico confinado en el centro de la cavidad Fig. 2.5 (a) y por otro, el perfil del desplazamiento total del modo mecánico confinado también en el centro de esta Fig. 2.5 (b) [10]. Para el perfil del campo óptico en rojo y azul se representa respectivamente el máximo y el mínimo de intensidad de éste y para el perfil del campo mecánico rojo se representa el máximo y en azul el mínimo de desplazamiento normalizado.

2.2.1. Cristal fotónico

Un cristal fotónico puede ser definido como una nanoestructura óptica periódica que afecta al movimiento de los fotones mediante cambios periódicos en el índice de refracción del material. Estos cambios periódicos pueden ser generados en el espacio 1D, 2D o 3D [11, 12, 13, 14].

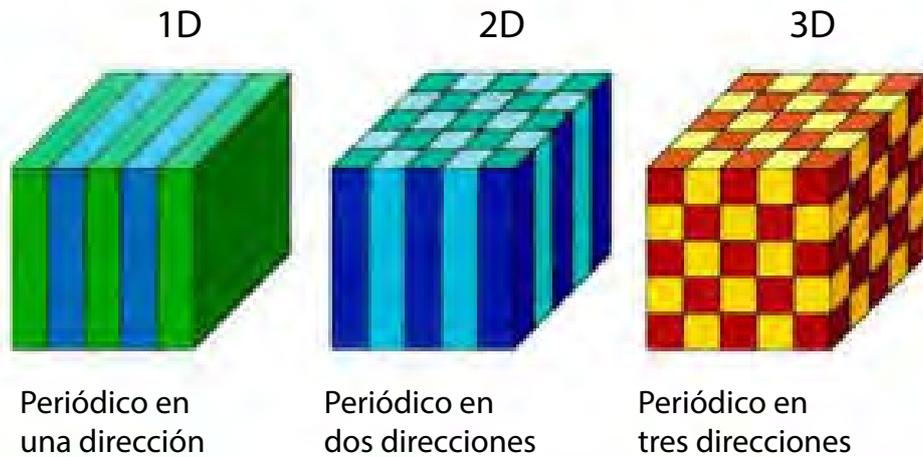


Figura 2.6: Representación gráfica de un cristal fotónico en 1D,2D,3D

El diseño de estos nos permite confinar, en este caso, el modo óptico en el centro de la cavidad. Para su diseño utilizamos el diagrama de bandas por un lado para las celdas de los espejos y por otro para la parte central de la cavidad (celda defecto). Un diagrama de bandas, en este caso, nos dice cómo se propaga el modo óptico en un rango de frecuencias, ya que nos aporta información sobre las frecuencias o estado permitidos conforme recorremos nuestro cristal.

En la parte (a) de la Figura 2.7 observamos por un lado el diagrama de bandas fotónico de la parte del espejo (azul) y, por otro lado, el diagrama de bandas fotónico de la parte central de la cavidad o defecto (rojo). Nuestro objetivo es que el modo óptico que se propaga en la parte central de la cavidad no se propague en la parte del espejo y así provocar el confinamiento que buscábamos de la luz. Para ello debemos provocar que en nuestro diagrama de bandas del espejo tengamos lo que llamamos bandgap. Un bandgap, en nuestro caso, sería un rango de frecuencias en el que no se propaga ningún modo (total bandgap), o por lo menos, no se propaga algún modo óptico de una simetría definida que nos interese, en este caso el de la parte central de la cavidad (quasi-bandgap). Así, como observamos en la parte (a) de la Fig. 2.7 alrededor de 200 THz tenemos un quasi-bandgap en la parte del espejo coincidiendo con el rango de frecuencias donde se propaga el modo óptico en la parte central, por lo que se encontrará confinado en la parte central y no se propagará hacia los espejos [9].

En la parte (b) de la Figura 2.7 observamos un diagrama de bandas óptico pero solamente de la parte del espejo con tanto modos transversal eléctrico (TE) y transversal magnético (TM). En nuestro estudio dado que los modos ópticos que nos interesan son TE hemos partido de estos diagramas para hacer el diseño teórico de los modos confinados.

2.2.2. Cristal fonónico

Los cristales fonónicos, siguiendo el ejemplo del cristal fotónico, son estructuras periódicas pero con la diferencia de que las variaciones se corresponden con las propiedades acústicas del material, como pueden ser la velocidad de propagación en el medio o el módulo de Young de éste, en vez de en su índice de refracción [2].

De la misma forma que en los cristales ópticos, en los fonónicos también utilizamos el diagrama

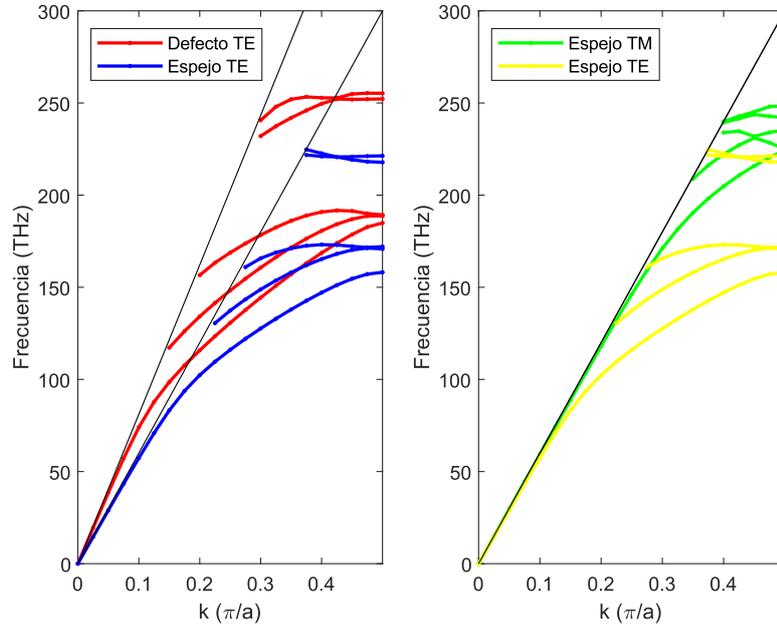


Figura 2.7: Diagramas de bandas óptico modos TE y TM

- (a) Diagrama de bandas óptico del modo transversal eléctrico (TE) de las partes del espejo y del defecto.
 (b) Diagrama de bandas óptico de la parte del espejo de los modos transversal eléctrico (TE) y magnético (TM).

de bandas para confinar el modo mecánico en el centro de la cavidad y evitar así que se transfiera por esta [9].

2.2.3. Acoplo de los modos ópticos y mecánicos

Una vez hemos diseñado nuestro cristal optomecánico a través de los conceptos introducidos anteriormente de cristales fotónicos y fonónicos, es necesario que los modos ópticos y mecánicos obtenidos se acoplen. El acoplo optomecánico es cuantificado calculando el cambio de la longitud de onda del fotón causado por el movimiento mecánico del material. Este cambio es estimado teniendo en cuenta ambos mecanismos que contribuyen al acoplo, los cuales son el efecto fotoelástico (PE) y el efecto de las interfaces móviles (MI). Por lo que, el acoplo optomecánico total lo calculamos mediante el coeficiente de acoplo g , descrito en la ecuación 2.2, en la que g_{pe} es el coeficiente del efecto fotoelástico y g_{mi} es el coeficiente del efecto de las interfaces móviles. Sólo aquellos modos mecánicos que tenga un acoplo optomecánico (g) con el modo óptico serán aquellos que se puedan transducir y medir experimentalmente [10]

$$g = g_{pe} + g_{mi} \quad (2.2)$$

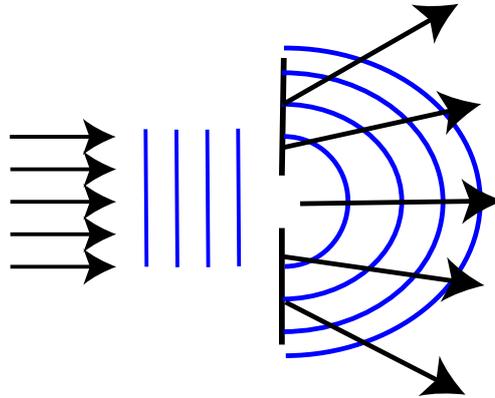


Figura 2.8: Representación gráfica del fenómeno de difracción

2.3. Gratings

Una vez hemos entendido qué es una cavidad optomecánica y cómo la diseñamos, es importante diseñar un sistema que nos permita su caracterización experimental, para lo que utilizaremos grating couplers. Un grating es un componente con una estructura periódica que divide y difracta la luz en haces viajando en diferentes direcciones. Las direcciones de estos haces dependen del espaciado del grating y de la longitud de onda de la luz, así que el grating actúa como un elemento dispersivo [15].

La difracción es un fenómeno característico de las ondas que se basa en la desviación de éstas al encontrar un obstáculo como se observa en la Fig. 2.8.

2.3.1. Grating coupler

Un grating coupler es una estructura utilizada en fotónica que nos permite acoplar la luz desde una fibra óptica a lo que llamamos una guía de onda y viceversa utilizando los ya mencionados gratings. Una guía de onda es una estructura utilizada en óptica que permite guiar ondas electromagnéticas en el espectro óptico. Son usadas como componentes de circuitos ópticos integrados [16].

Vamos a introducir como podemos acoplar la luz confinada en una guía de onda a una fibra óptica mediante el uso de grating couplers para entender bien el concepto de éste.

Al marcar periódicamente una guía de onda podemos hacer un grating para que la luz que se difracte fuera de ésta, interfiera constructivamente hacia una dirección en la fibra óptica como podemos observar en la Figura 2.9. Podemos elegir el periodo del grating (a) de tal manera que los rayos interfieran constructivamente en el ángulo deseado (θ) como observamos en la Figura 2.10.

De la misma manera, podemos utilizar el mismo grating para acoplar luz desde la fibra a la guía de onda como observamos en la Figura 2.11 [17]. Por lo que eligiendo un periodo de grating (a) adecuado podemos acoplar la luz proveniente de una fibra óptica hacia la guía de onda correspondiente.

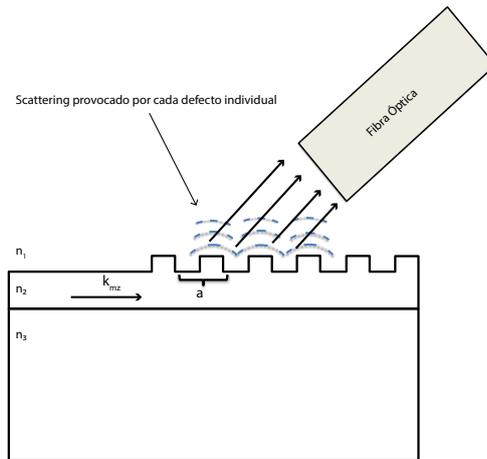


Figura 2.9: Representación de los rayos difractados constructivamente hacia la fibra óptica

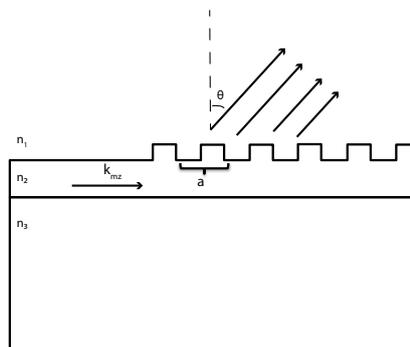


Figura 2.10: Relación entre la periodicidad del grating y el ángulo de difracción de los rayos

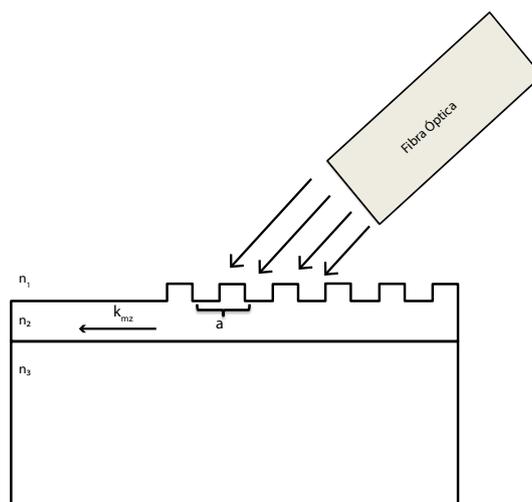


Figura 2.11: Acoplo desde fibra a guía de onda

Capítulo 3

Caracterización Experimental

En este capítulo vamos a introducir los montajes y procedimientos que hemos utilizado para la realización de las medidas de resonancias ópticas y mecánicas. Durante el desarrollo de esta trabajo de fin de grado hemos utilizado dos sistemas experimentales distintos: un montaje con un loop de fibra taper y un montaje mediante grating couplers. El primero es el sistema que hemos utilizado para acoplarnos a las cavidades mediante una onda evanescente y caracterizarlas de forma más rápida y eficiente. Además, este sistema nos permitió caracterizar y optimizar algunos de los elementos que se incluyeron en el dispositivo final. El segundo sistema es que el empleamos para la caracterización final del dispositivo integrado, para el cual utilizamos grating couplers.

3.1. Sistema experimental mediante loop de fibra óptica

Las medidas referentes a la caracterización experimental de las cavidades han sido realizadas mediante el dispositivo experimental que se presenta en la Fig. 3.1. Los elementos utilizados en el montaje son los siguientes:

- Láser: Utilizamos un modelo Keysight Agilent 8163B, con el cual hemos realizado barridos de 1520 a 1630 nm
- Aislador óptico: Dispositivo que permite que la luz se transmita en una sola dirección y así, en nuestro caso, evitar que la señal pueda volver por el canal de entrada, lo utilizamos para evitar dañar el láser, ya que el circulador puede tener pérdidas en reflexión.
- Polarizador: Aparato que filtra la oscilación de una radiación electromagnética en una sola dirección. En nuestro caso para que la luz que llegue a la cavidad tenga el mismo perfil que el modo óptico que queremos excitar (modo TE).
- Circulador óptico: Dispositivo de 3 puertos diseñado de tal manera que la luz que entra en cualquier puerto sale por el siguiente. En nuestro caso la luz entrante por el puerto 1 va hacia la cavidad por el puerto 2 y la luz que vuelve por el puerto 2 va hacia el fotodetector 2 (PD2) por el puerto 3.
- Fotodetector: Sensor de luz u otra radiación electromagnética que convierte la luz detectada en pulsos eléctricos. El modelo del fotodetector 1 (PD1) es DC-12 Ghz IR Photoreceiver Mo-

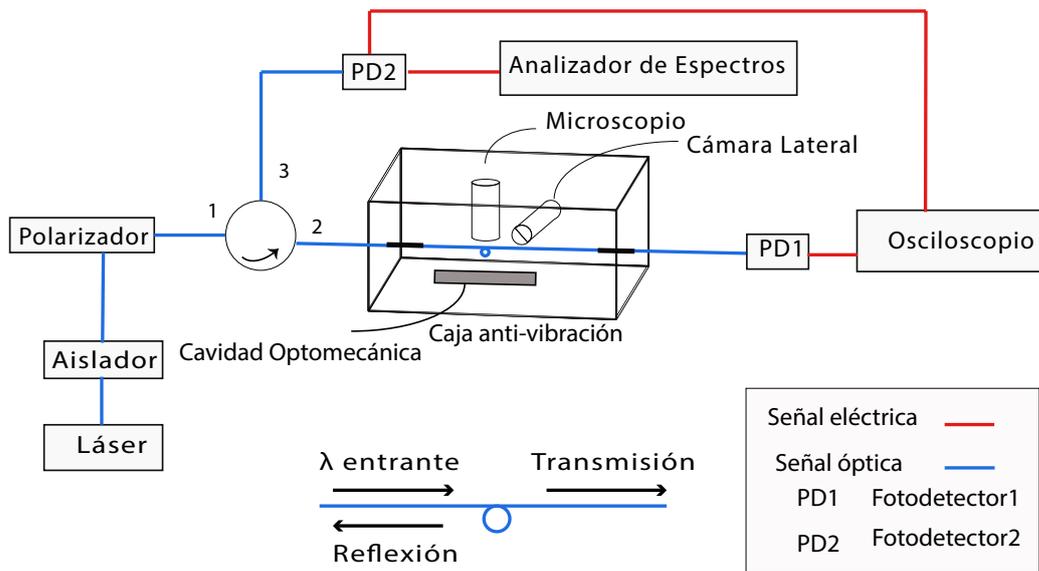


Figura 3.1: Esquema del set-up utilizado para medir con el loop de fibra óptica

del 1544-B, mientras que el modelo del fotodetector 2 (PD2) es InGaAs Amplified Detector PDA20CS-EC.

- **Osciloscopio:** Instrumento de visualización electrónico para la representación gráfica de señales eléctricas que pueden variar con el tiempo. Lo utilizamos para monitorizar la respuesta óptica de nuestro sistema. Utilizamos el modelo Infiniium DSA80000B.
- **Analizador de Espectros:** Equipo de medición electrónica que mide la amplitud de una señal entrante en función del rango de frecuencias elegido. En nuestro caso medimos la potencia de la señal óptica detectada por el fotodetector 2 (PD2). Utilizamos el modelo FSQ 40 Signal Analyzer.
- **Caja antivibración :** Pecera de metacrilato para evitar perturbaciones que influyan en el proceso de medida.

El fotodetector 1, lo utilizamos para medir resonancias ópticas, ya que permite amplificar la potencia de entrada y así ser capaces de detectar mejor estas resonancias.

El fotodetector 2, en nuestro caso, es usado para medir el modo mecánico, ya que no amplifica mucha potencia, por lo que no sería muy útil para la detección de resonancias ópticas y además puede detectar señales de hasta 12 GHz, por lo que esta gran sensibilidad es muy útil para detectar modos mecánicos a GHz como buscamos.

Por lo que gran parte de la luz que circula por el loop de fibra se acopla a la cavidad optomecánica y posteriormente parte de ésta vuelve en transmisión la cual detectamos con el fotodetector 1 y parte en reflexión, la cual detectamos con el fotodetector 2.

En la figura 3.2 observamos una imagen del montaje completo.

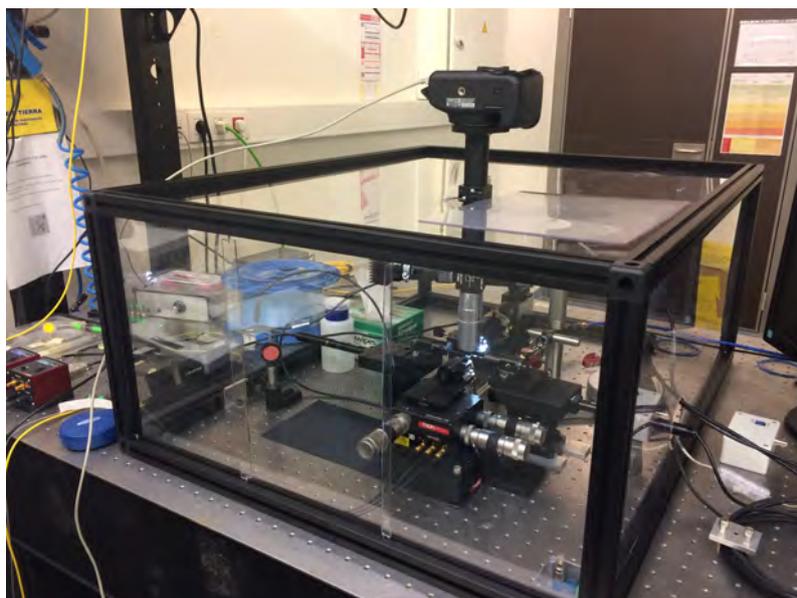


Figura 3.2: Montaje utilizado para medir con el loop de fibra óptica

3.1.1. Procedimiento

Antes de adquirir los espectros ópticos y mecánicos de las cavidades optomecánicas, es necesario fabricar el elemento que nos permitirá poder acoplarnos eficientemente: un loop de fibra taper. Éste se acoplará a ellas por onda evanescente lo que nos permitirá tanto inyectar luz a la cavidad cómo recibir de ella. Para ello partimos de una fibra monomodo, donde primero hemos quitado en la parte central el revestimiento de la fibra, y posteriormente calentamos ésta generando una llama a alta temperatura con un generador de hidrógeno. Durante este proceso de calentamiento se estira la fibra a velocidad constante hasta llegar a las dimensiones requeridas para poder llegar a tener un fibra taper.

La ventaja de este sistema es que nos permite acoplarnos de forma muy rápida y eficiente a las cavidades a caracterizar. En el primer paso de nuestro estudio fue necesario fabricar muchas cavidades con pequeñas variaciones para poder obtener aquella que se ajustaba más a nuestras necesidades. Como observamos en la Fig. 3.3 nuestra muestra contiene cientos de cavidades como las que se aprecia en la Fig. 3.4, las cuales hemos diseñado previamente mediante simulaciones con el programa RSoft y Comsol. Estas cavidades son de silicio y se encuentran suspendidas en aire, sólo sujetas por los extremos de la cavidad, tal y como puede apreciarse en la Fig. 3.4. La razón de que se encuentren suspendidas en aire es para que estas puedan vibrar libremente y el movimiento no se disipe debido al contacto con el sustrato.

Una vez fabricado el loop de fibra, mediante este sistema experimental hemos procedido a la adquisición por un lado del espectro óptico y por otro, del espectro mecánico. Para las medidas del espectro óptico hemos realizado un barrido de la longitud de onda del láser con una velocidad de 20 nm/s y en un rango de longitudes de onda de 1520 a 1630 nm. Esto se ha repetido para cada una de las cavidades de nuestra muestra, con el objetivo de localizar resonancias ópticas y cuantificar a que longitud de onda se encuentran. Debido a que la adquisición de las medidas ópticas se utilizó un osciloscopio, que nos proporcionaba las trazas ópticas de transmisión en función del tiempo,

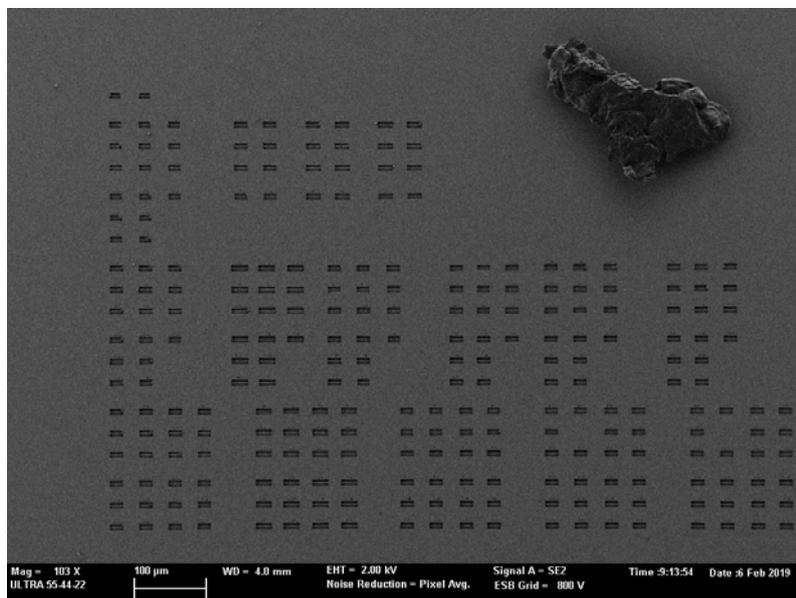


Figura 3.3: Muestra con cavidades optomecánicas

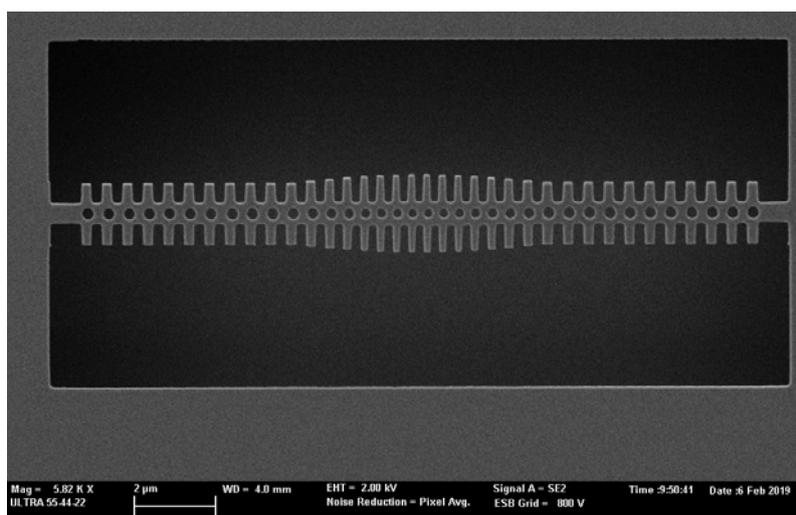


Figura 3.4: Cavidad optomecánica vista en el SEM



Figura 3.5: Imagen vista desde cámara lateral

para ser capaces de cuantificarlas en longitudes de onda, hemos utilizado la ecuación 3.1:

$$\lambda = t \cdot v_l + \lambda_l \quad (3.1)$$

donde λ es la longitud de onda dónde se encuentra nuestra resonancia, t es el punto central donde se encuentra nuestra resonancia en términos de tiempo (el valor proporcionado por el osciloscopio), v_l es la velocidad a la que opera nuestro láser y λ_l es la longitud de onda inicial a la que opera el láser utilizado.

Estas medidas las hemos llevado a cabo en transmisión como se puede apreciar en la Fig. 3.1. Además, estas mediciones las hemos realizado con el loop muy cerca o tocando la muestra como se aprecia en la Fig. 3.5. A pesar de que tenemos que situarnos muy cerca de la cavidad para caracterizarla es importante tener en cuenta que debíamos intentar evitar tocarla directamente. Esto podría hacer que rompiesen la cavidad o la perturbásemos, además, podríamos impedir si transduciésemos movimiento mecánico a la cavidad esta no pudiese vibrar adecuadamente porque el loop estaría impidiéndolo.

Una vez hemos caracterizado las resonancias ópticas nos centramos en aquellas de un factor de calidad alto, concepto que se introducirá en el apartado de resultados, para posteriormente comprobar si transducen al modo mecánico. Si las resonancias ópticas son las adecuadas, analizaremos la señal procedente de la cavidad, utilizando el analizador de espectros y el fotodetector 2. De esta forma, podremos comprobar si transducen modos mecánicos realizando barridos cerca de la longitud de onda a la que se encuentra las resonancias ópticas previamente caracterizadas, midiendo en esta ocasión en reflexión, utilizando el canal 3 del circulador, como apreciamos en la Fig. 3.1. En esta ocasión realizaremos barridos alrededor de la resonancia óptica a velocidades menores de 1 nm/s para asegurarnos de que seremos capaces de resolver los espectros mecánicos en el analizador de espectros.

3.2. Sistema experimental de Acoplo Vertical

Las medidas referentes a la caracterización de los componentes gratings se ha realizado mediante el montaje de la Fig. 3.6, en particular, este montaje fue desarrollado durante las prácticas extracurriculares que el alumno realizó en el Instituto Universitario de Tecnología Nanofotónica (NTC).

Como observamos el montaje se compone de casi los mismos elementos que el montaje del loop de fibra, un láser que opera en el rango 1520-1630 nm, un polarizador, circulador, microscopio vertical, dos fotodetectores y un medidor de potencia. La principal diferencia consistirá en cómo nos acoplamos a la muestra tal y como se verá en el apartado de procedimiento. En la Fig. 3.7 podemos observar el montaje de acoplo vertical.

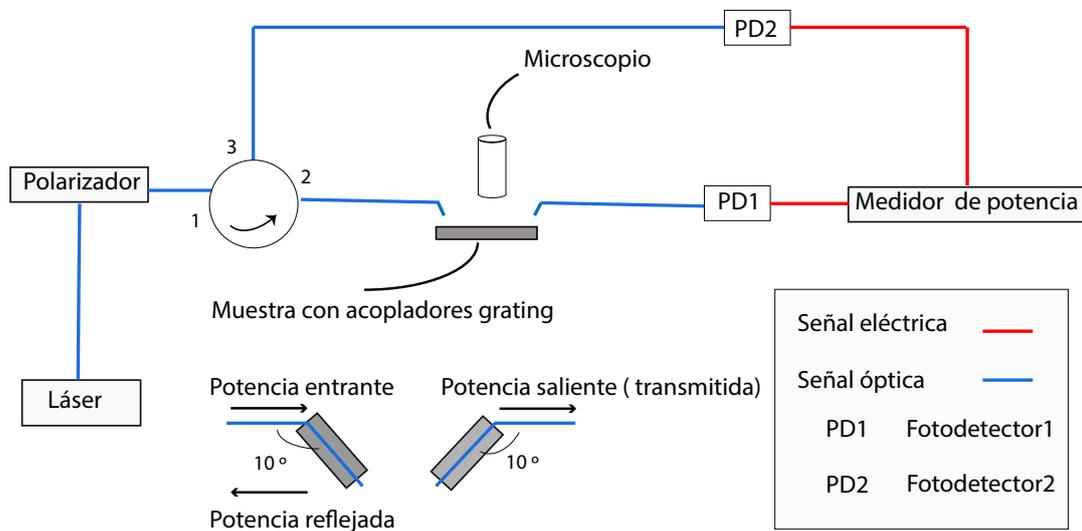


Figura 3.6: Esquema del set-up de acoplo vertical

3.2.1. Procedimiento

La principal diferencia con el anterior montaje se encuentra en la manera en qué nos acoplamos a la muestra, qué en este caso se compone de acopladores grating como se observa en la Fig. 3.8.

Para la caracterización de los gratings, utilizamos una fibra óptica cortada de forma recta situada muy cerca de éstos. Podemos caracterizar la muestra de dos formas, la primera, midiendo en transmisión, utilizando dos fibras, una de entrada localizada al principio y otra, de salida, localizada al final como vemos en el esquema de la Fig. 3.6. Aquí, el fotodetector 1 (PD1) recoge la respuesta óptica en transmisión que llega a la fibra de salida y mediante el medidor de potencia conectado al fotodetector medimos la potencia que le llega a ésta. Con este sistema se puede comprobar cual de los gratings tiene menos pérdidas para posteriores caracterizaciones u optimizaciones del diseño.

La segunda forma es medir en reflexión, en la que utilizamos solo una fibra que es utilizada tanto de entrada como de salida, como también observamos en la Fig. 3.6. Así, la respuesta óptica entra

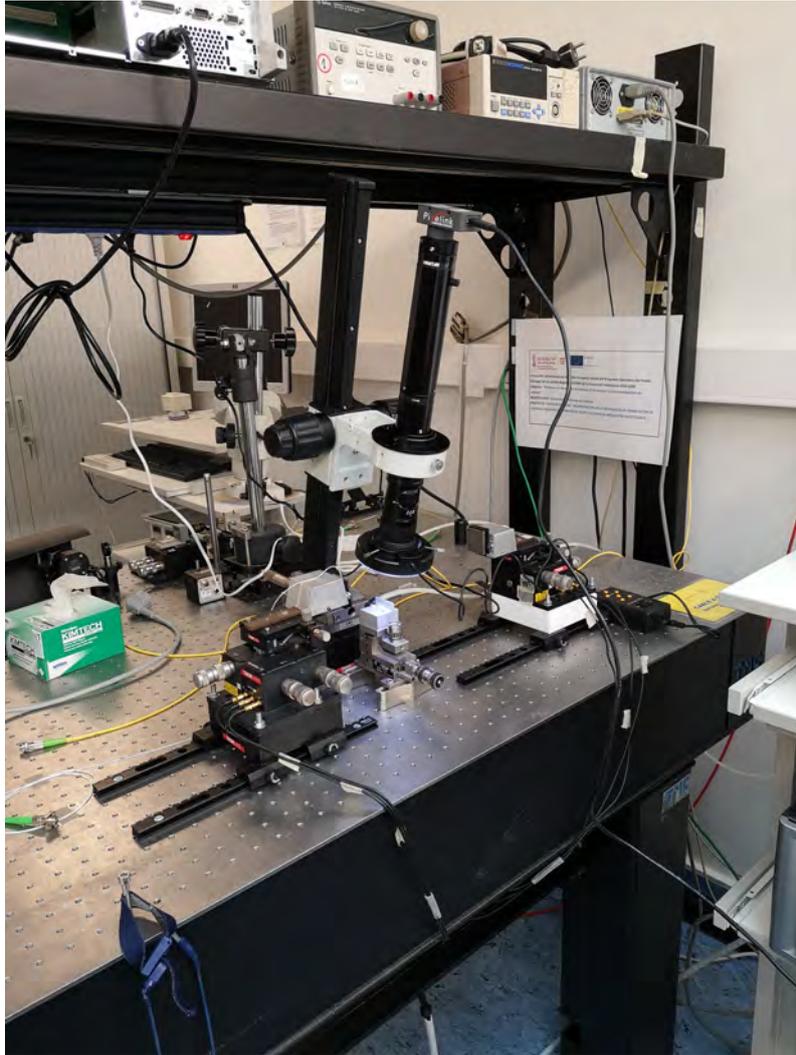


Figura 3.7: Set-up de acoplo vertical

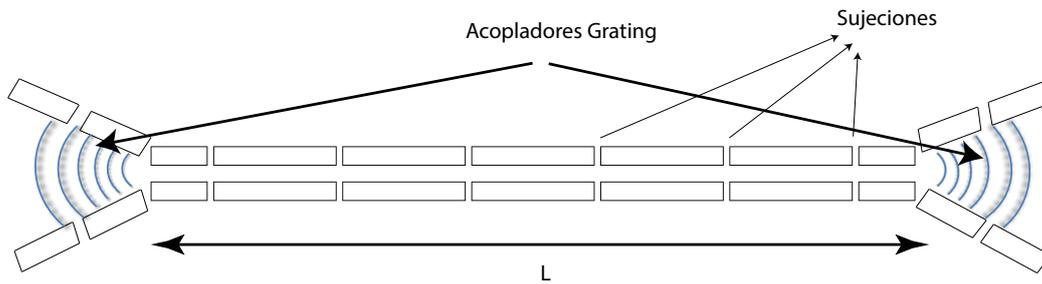


Figura 3.8: Caracterización de acopladores grating

por el canal 1, vuelve por el canal 2 yendo al canal 3 y siendo recogida por el fotodetector 2 (PD2), que conectado al medidor de potencia nos indica cuánta potencia recibe.

En ambos casos tanto la fibra de entrada como la de salida están acopladas de manera vertical con una inclinación de 10° como observamos en la Fig. 3.6. Éste acoplo vertical a 10° es el ángulo de incidencia óptimo con el cual han sido diseñados los gratings mediante simulaciones con el programa RSoft.

Capítulo 4

Experimentos y Resultados

4.1. Medidas Obtenidas

En este apartado hemos analizado las medidas obtenidas de los espectros ópticos y mecánicos. Hemos ajustado los resultados a un modelo de distribución teórico para cuantificar los parámetros de interés. Para ello, hemos utilizado el programa de cómputo numérico Matlab.

4.1.1. Resonancias Ópticas

Primeramente, una vez hemos analizado los datos obtenidos para estas resonancias, hemos convertido éstos de unidades de tiempos a unidades de longitudes de onda y posteriormente, les hemos aplicado un ajuste lorentziano para poder extraer los datos con los que cuantificaremos nuestras cavidades.

Una función de Lorentz se define con la ecuación 4.1. Donde A es el área de la función, x_c e y_c son los puntos centrales de la función y Δ es el FWHM (anchura a la mitad del valor máximo), que viene dada por la diferencia entre los dos valores extremos de la variable independiente (x) en los que la variable dependiente (y) es igual a la mitad de su valor máximo y en nuestro caso, nos informa acerca de la calidad de nuestra resonancia.

$$y = y_0 + \left(\frac{2 \cdot A}{\pi}\right) \cdot \frac{\Delta}{4 \cdot ((x - x_c)^2 + \Delta^2)} \quad (4.1)$$

Podemos ver en la Fig. 4.1 un ejemplo de una función de Lorentz con los parámetros principales señalados [18]. Este ajuste nos permite obtener parámetros como el ancho a mitad del máximo (FWHM), este parámetro guarda una relación con el factor de calidad (Q) mediante la ecuación 4.2:

$$Q = \frac{\lambda_0}{\Delta} \quad (4.2)$$

dónde λ_0 es la longitud de onda central donde se localiza nuestra resonancia y Δ como ya hemos mencionado anteriormente, es el FWHM. El factor de calidad mide la relación entre los fotones que permanecen oscilando en la cavidad y los que se disipan, es decir, mide la relación entre la

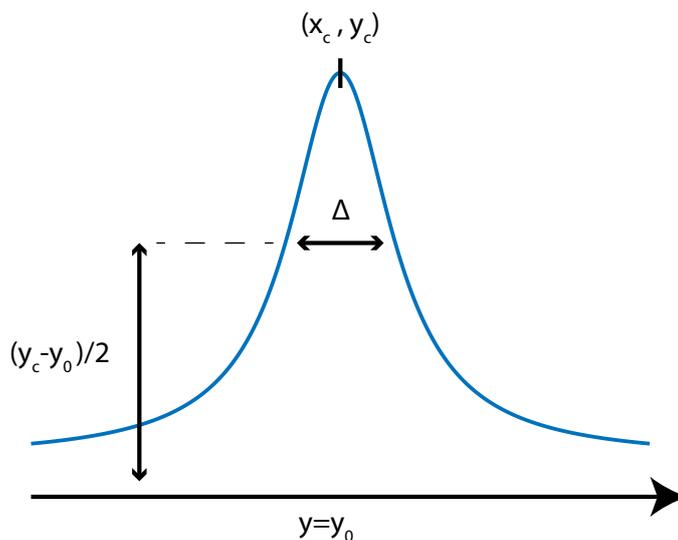


Figura 4.1: Función de Lorentz

energía almacenada y la energía disipada por ciclo óptico. De esta forma, cuánto más estrecha sea nuestra resonancia mayor será su factor de calidad, generando mayor sensibilidad en la detección que es de gran utilidad por ejemplo en el área de biosensado [16].

En la figura 4.2 observamos el espectro de completo de una de las resonancias ópticas medidas. Donde en la en la Fig. 4.3 vemos por un lado la resonancia en azul y por otro, el ajuste Lorentziano aplicado en rojo. Además hemos calculado el factor de calidad de ésta, siendo la longitud de onda central 1558 nm y el FWHM 1.5 nm, por lo que aplicando la ecuación 4.2 tenemos un factor de calidad de 1038.66, el cual es no es muy alto y nos induce a pensar que seguramente en esta resonancia no habrá transducción al modo mecánico.

En la figura 4.4 vemos algunos de los muchos espectros de resonancias ópticas que hemos medido. Observamos que en los apartados (b) y (c) no existen resonancias, en cambio, en los demás apartados sí que las podemos apreciar. Hay que tener en cuenta que no todas poseen un factor de calidad suficientemente alto como para ser transducidas al modo mecánico, normalmente sobre un factor de 10^4 se puede transducir al modo mecánico. Por ejemplo, en la Fig. 4.2 había otra resonancia óptica a mayor longitud de onda que era mucho más estrecha. Ésta tenía un factor de calidad mayor que sí permitió transducir modos mecánicos, que serán los que se presentarán en la sección siguiente. En general, podríamos mejorar los factores de calidad, mejorando el diseño de la muestra, añadiendo celdas en la zona de transición adiabática y en la zona de los espejos.

La razón de que veamos más de una resonancia es porque hay que tener en cuenta que podemos ver más resonancias debidas a otros perfiles ópticos con distinta polarización. En particular, si cambiamos esta, podemos observar distintas resonancias, confirmando de ésta forma que no sólo tenemos modos ópticos confinados de una polarización concreta. También debido a defectos de fabricación, las cavidades finalmente fabricadas pueden ser distintas a las de nuestros diseños originales, causando que estas resonancias se encuentren a distinta frecuencia de dónde correspondería en las simulaciones realizadas.

En la Figura 4.5 vemos por un lado, el histograma de las resonancias ópticas medidas en función

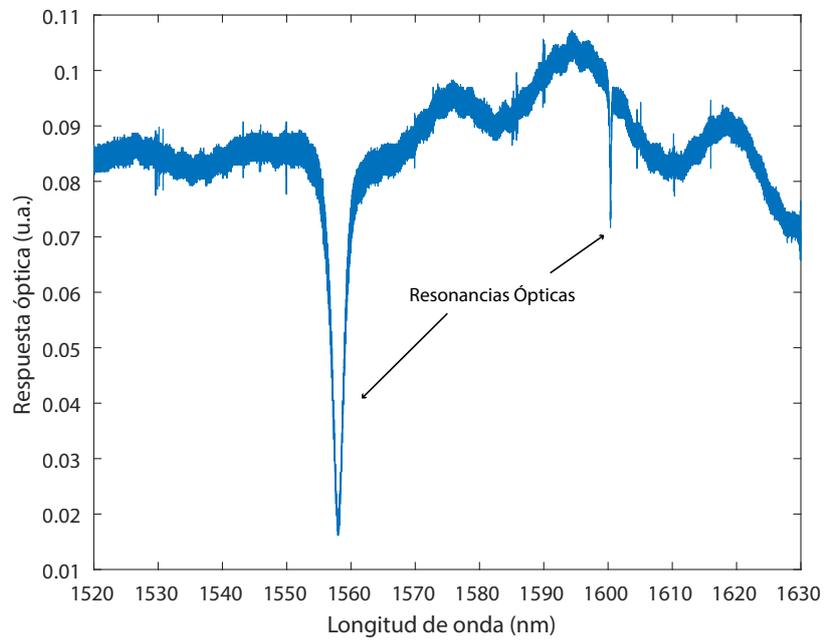


Figura 4.2: Espectro completo de una de las resonancias ópticas medidas

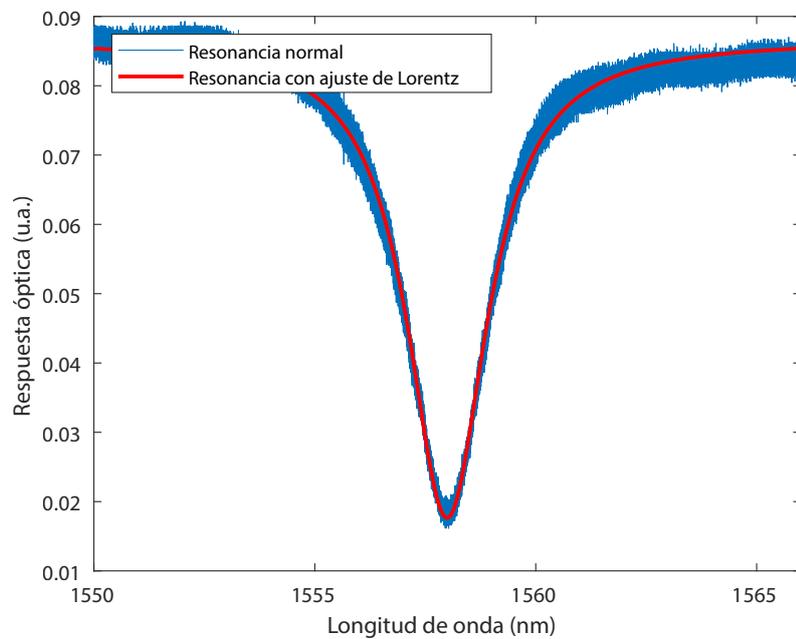


Figura 4.3: Ejemplo de una de las resonancias ópticas medidas con el ajuste lorentz aplicado

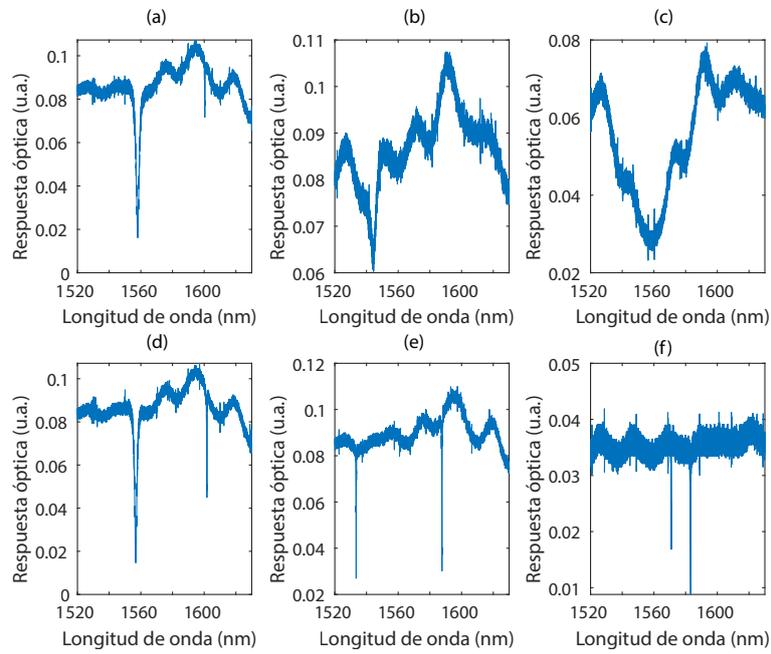


Figura 4.4: Espectros de distintas resonancias ópticas medidas

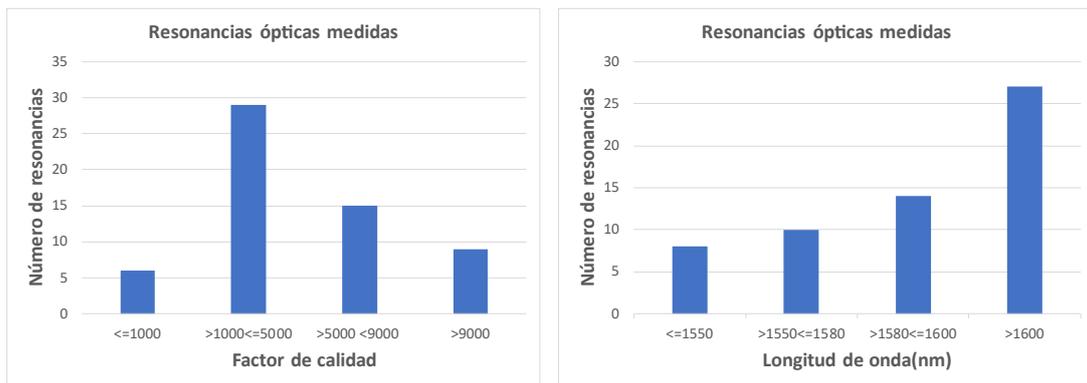


Figura 4.5: Histogramas de las resonancias ópticas medidas

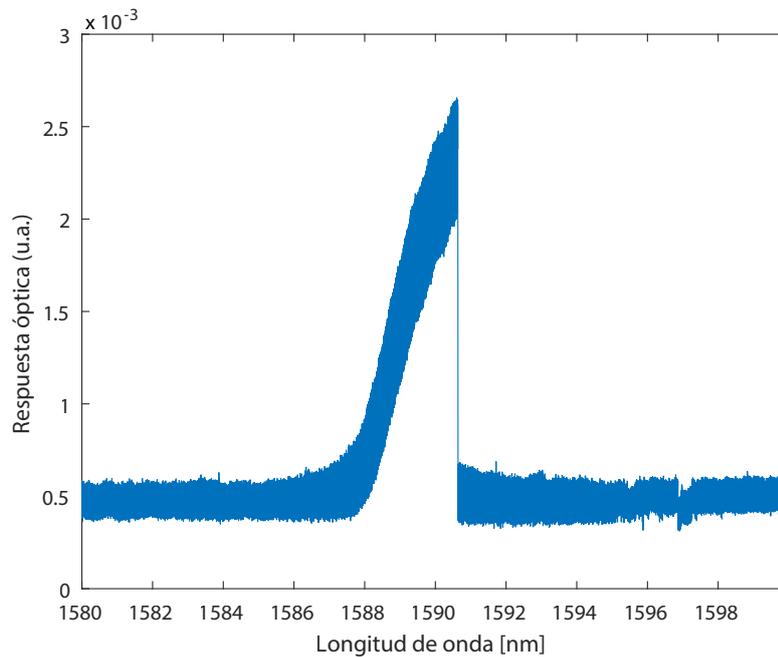


Figura 4.6: Ejemplo de efecto termoóptico medido en reflexión

de su factor de calidad. Observamos que la mayoría de ellas poseen un factor de calidad entre 1000 y 5000, hecho que podría mejorarse como hemos ya hemos mencionado, aumentando el número de celdas en la transición adiabática y en la zona de los espejos.

Por otro lado, también en la Figura 4.5 vemos el histograma de las resonancias ópticas en función de la longitud de onda dónde se encuentran localizadas. Apreciamos que la mayoría de ellas se encuentran localizadas alrededor de 1600 nm, seguramente debido a los defectos de fabricación ya nombrados, hecho que podría optimizarse con otro proceso iterativo de fabricación.

4.1.2. Resonancias Mecánicas

Para ser capaces de transducir modos mecánicos en las resonancias ópticas medidas hemos aumentado considerablemente la potencia, provocando un efecto termo óptico en las resonancias ópticas como se observa en la Fig. 4.6, el cual se aprecia en la bajada de potencia tan rápida entre 1590 y 1592 nm, este efecto termoóptico normalmente nos hace intuir la transducción al modo mecánico en ese rango. Además observamos que la resonancia óptica utilizada como señal de control se encuentra al revés de como se presentaba en las resonancias ópticas medidas como en la Fig. 4.3, esto es debido a que los modos mecánicos los medimos en reflexión, en vez de en transmisión, como sí medíamos las resonancias ópticas. La razón de ello es para asegurarnos que le llega una potencia no demasiado elevada al fotodetector PD2 debido a su alta sensibilidad. En caso de haberlo medido en transmisión se necesitaría utilizar un atenuador para no saturar la respuesta del detector.

Debido a que los datos obtenidos del analizador de espectros están en dBm/Hz, hemos procedido a realizar una conversión de unidades a escala lineal para poder hacer un ajuste lorentziano que nos permita de nuevo extraer los datos requeridos.

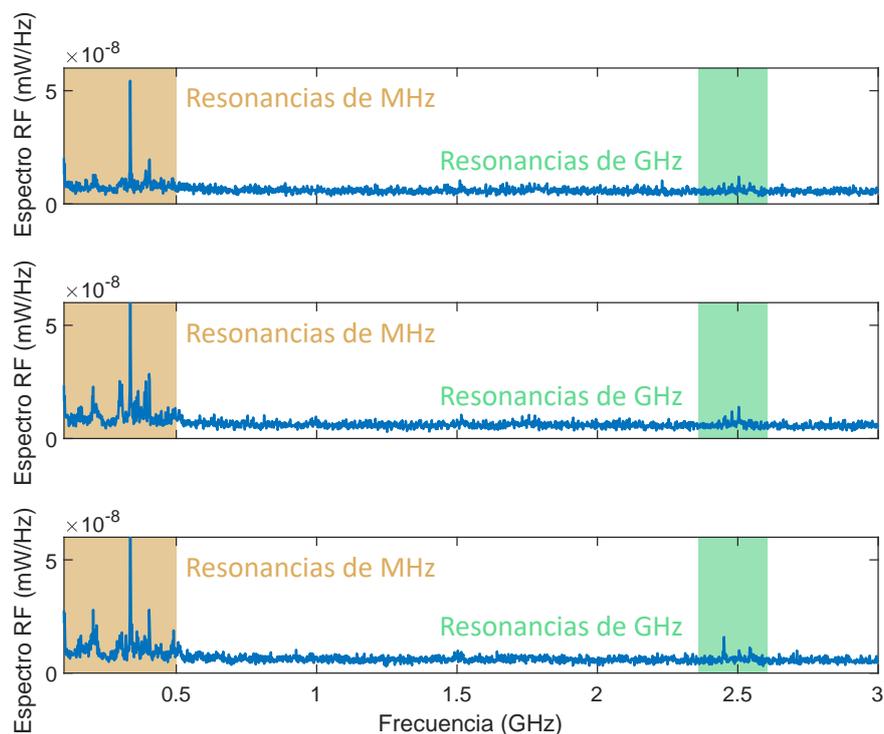


Figura 4.7: Espectro de resonancias mecánicas de MHz y GHz

El resultado de la transducción de modos mecánicos se puede ver en el espectro general de varias resonancias mecánicas que se puede ver en la Fig. 4.7. Aquí podemos ver que cuando somos capaces de transducir modos mecánicos en el espectro de RF obtenido con el analizador de espectros veremos picos a frecuencias correspondientes a los modos de vibración que hayamos podido excitar. Aquí, podemos ver distintos picos pequeños en la región de los 2.5 GHz que corresponden a nuestros modos mecánicos confinados que habíamos diseñado en la parte teórica (zona sombreada verde). Sin embargo, también se aprecian distintos picos en la región de los centenares de MHz (zona sombreada naranja). Estos modos mecánicos corresponden a modos de vibración que no están localizados en la región central de nuestra cavidad, como son los modos de GHz anteriores, sino que son modos donde vibra toda la cavidad como si de los modos de vibración de una cuerda se tratase, por lo que no están localizados. Como nos interesa tener modos mecánicos de GHz confinados en la región central nos centraremos sólo en los de más alta frecuencia. Cabe señalar que estas medidas fueron tomadas con una resolución de 1 MHz para poder hacer un barrido rápido y detectar todas las resonancias.

Si realizamos un barrido entorno a las frecuencias deseadas con mucha más resolución, del orden de 100 kHz, podemos observar los modos mecánicos de GHz mucho más definidos como en la Fig. 4.8. Por ejemplo analizando estas resonancias podemos observar que hay más de un pico correspondiente a varias resonancias mecánicas. Recordamos que según el perfil de los modos mecánicos en la Fig. 2.5 el modo mecánico se podía entender como vibraciones de las corrugaciones de la celda unidad defecto. Aquí, en azul está representado los datos experimentales y en rojo un ajuste a la distribución lorentziana esperada. Como estamos fabricando estructuras con corrugaciones de anchos de cientos de nm, cualquier pequeña perturbación puede hacer que estas corrugaciones os-

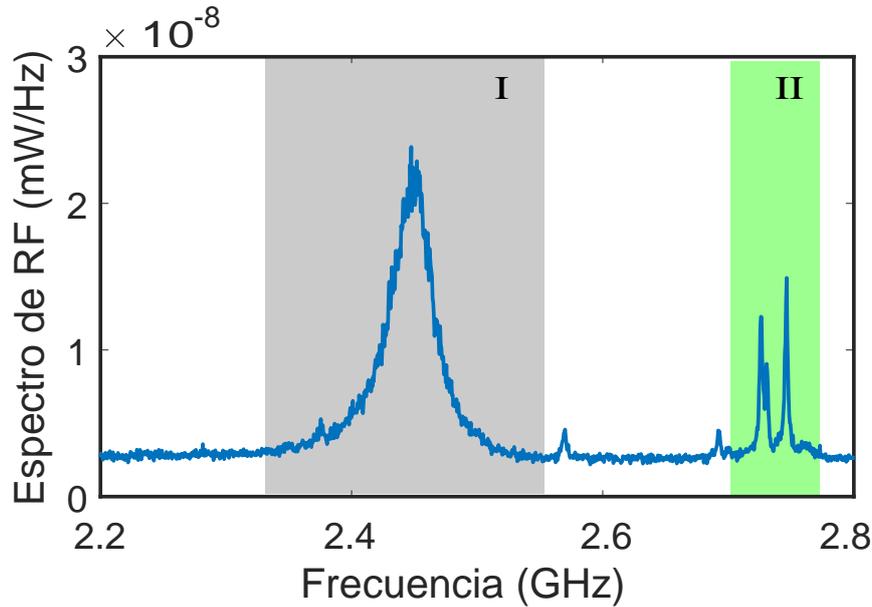


Figura 4.8: Espectro de una de las resonancias mecánicas medidas

cilen a frecuencia ligeramente distinta, como parece que está ocurriendo aquí. Independientemente de esto, si analizamos con un ajuste lorentziano estas resonancias podemos ver como la distribución se ajusta a lo esperado, como se puede ver en la Fig. 4.9. Con esto podemos concluir que hemos sido capaces de transducir modos mecánicos alrededor de la frecuencia de diseño a través del acoplo por onda evanescente con un loop de fibra taper a la cavidad.

A pesar de que el diseño teórico estaba orientado a que las resonancias mecánicas estuviesen entorno a 2 GHz, vemos que en el experimento estas están ligeramente desplazadas unos 450 MHz aproximadamente. La razón de esto puede ser debido a las imperfecciones de fabricación. Dado que estamos tratando con sistemas tan pequeños, pequeñas variaciones nanométricas en el proceso de fabricación pueden hacer variar sustancialmente la respuesta óptica o mecánica del sistema.

También en la Fig. 4.10 vemos el espectro de algunas resonancias mecánicas, podemos observar como en los apartados (b) y (d), no existen resonancias mecánicas, solo ruido, mientras que en los apartados (a) y (c) sí que podemos apreciar algunas de estas resonancias mecánicas.

Teniendo en cuenta todo esto, hemos sido capaces de diseñar cavidades optomecánicas que tienen modo óptico alrededor de 1550 nm y modos mecánicos en un rango cercano a 2 GHz, por lo que para ajustarnos todavía más a los diseños teóricos bastaría con realizar otro proceso iterativo de fabricación y medición.

4.1.3. Diseño de Gratings mediante simulación en Rsoft

Con el objetivo de diseñar los parámetros que caracterizan a los acopladores grating, hemos realizado simulaciones de éstos con el programa RSoft. Los parámetros que hemos considerado en nuestras simulaciones son los siguientes:

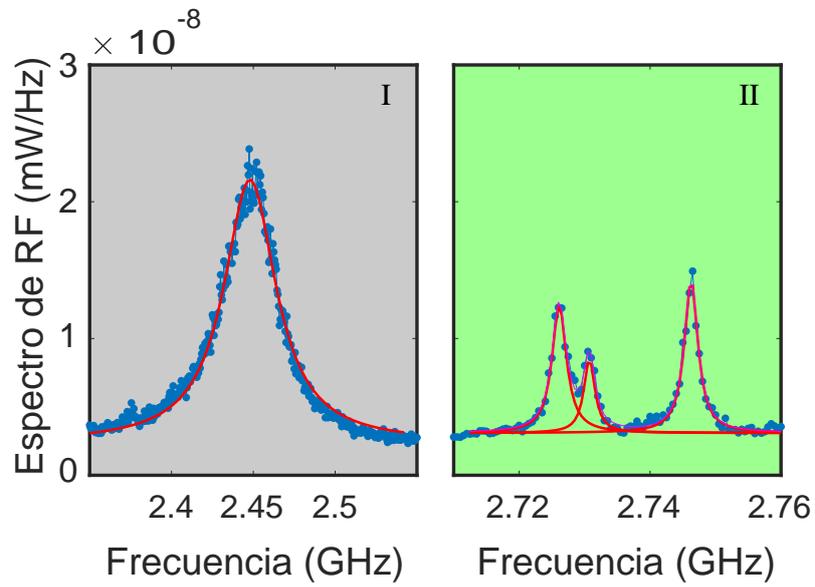


Figura 4.9: Espectro de RF de una cavidad optomecánica.

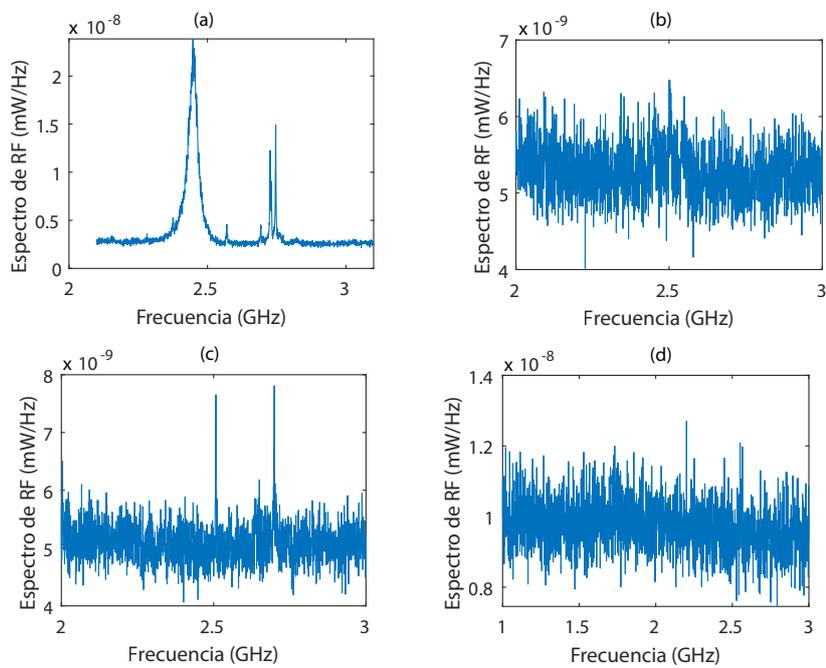


Figura 4.10: Espectro de distintas resonancias mecánicas medidas

- Periodo: Se corresponde con la longitud a la que es marcado cada grating de forma continuada.
- Factor de relleno (FF): Es el ratio entre las franjas que no están atacadas y las que lo están.
- Ed: Nos indica como de profundo es el ataque de cada franja

Para la realización de las simulaciones con los anteriores parámetros, hemos dejado otros fijos como la longitud de onda de 1550 nm y el ángulo de acoplo de las fibras de 10° . Primeramente hemos simulado el factor de relleno entre 0.1 y 0.9 para un valor fijo de periodo de $0.66 \mu\text{m}$ y un valor de Ed de $0.02 \mu\text{m}$. Para este parámetro hemos obtenido un valor óptimo de 0.25 como apreciamos en la sección (a) de la Fig.4.11.

Seguidamente hemos simulado el periodo entre un rango de 0.3 y $1 \mu\text{m}$ obteniendo un valor óptimo de $0.627 \mu\text{m}$ como observamos en la sección (b) de la Fig. 4.11.

A continuación hemos simulado el parámetro Ed con los valores óptimos tanto del periodo como del factor de relleno, entre el rango de valores de 0.015 y $0.035 \mu\text{m}$ obteniendo un valor óptimo para $0.035 \mu\text{m}$, como vemos en la parte (c) de la Fig.4.11.

Por último hemos simulado la eficiencia de acoplo en función de la longitud de onda, en el rango de valores de 1.3 a $1.7 \mu\text{m}$ obteniendo un valor óptimo alrededor de $1.55 \mu\text{m}$ como vemos en la Fig. 4.12. Esta última gráfica nos permite obtener la respuesta general de caracterización del grating y comprobar efectivamente que está optimizado para la longitud de onda de diseño de nuestras cavidades alrededor de 1550 nm.

4.1.4. Caracterización de gratings

En este apartado hemos realizado medidas de muestras de acopladores gratings similares a los de la Fig. 3.8 en reflexión mediante el montaje experimental de la Fig. 3.6. Estas medidas fueron un paso inicial y crucial para el objetivo final de toda esta caracterización y desarrollo que consiste en desarrollar los distintos elementos necesarios para introducir en un chip final con cavidades y gratings integrados.

Para la caracterización hemos obtenido los resultados que se aprecian en la Fig. 4.13, donde vemos que el pico de potencia se produce sobre 1560 nm. Vemos que está ligeramente desplazado del diseño teórico seguramente debido a algún defecto de fabricación. Sin embargo, sigue siendo compatible con la integración de nuestras cavidades optomecánicas puesto que tal y como vimos en el histograma donde cuantificábamos la longitud de onda donde estaban nuestras resonancias, en la Fig. 4.5, la mayor parte de las resonancias ópticas las encontramos alrededor de 1600 nm. Eso significa que, a pesar de estar 50 nm desplazadas de las longitudes de onda de diseño, ambos elementos, las cavidades y los gratings, son totalmente compatibles entre sí, lo que permitiría una integración entre ambos elementos satisfactoria.

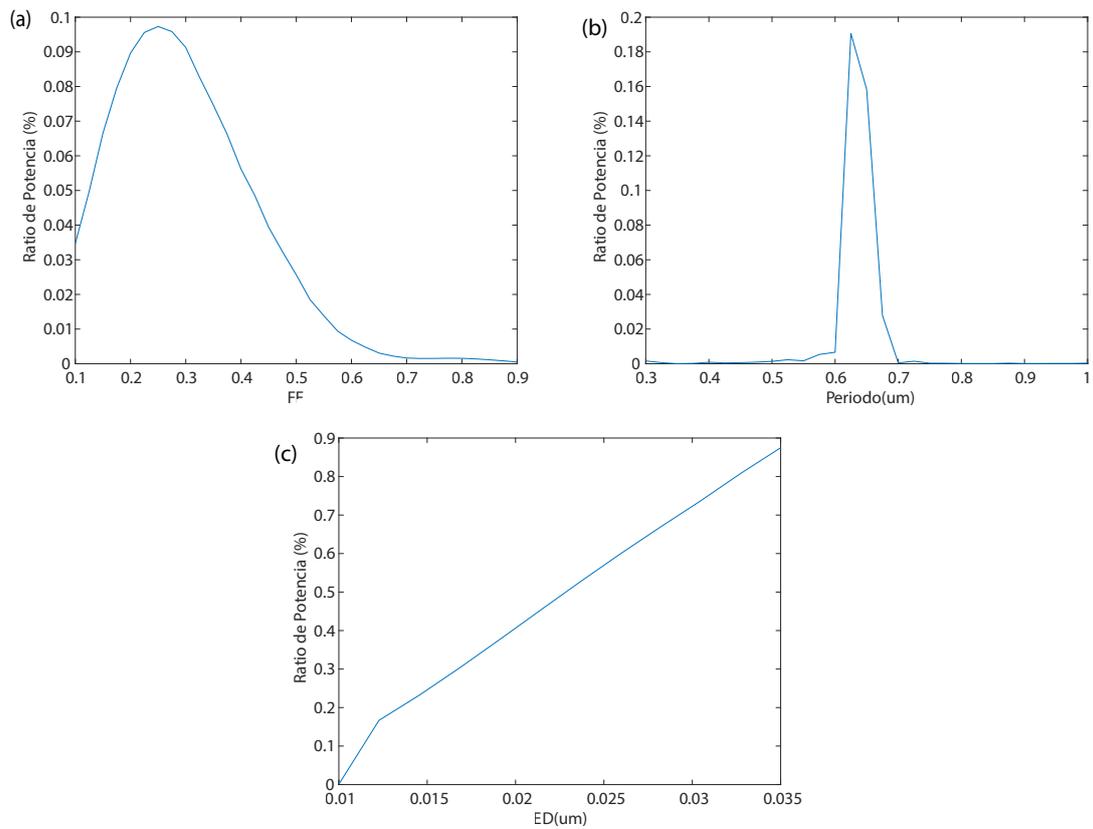


Figura 4.11: Eficiencia de acoplo en función de diferentes parámetros

(a) Eficiencia de acoplo en función del factor de relleno(FF). (b) Eficiencia de acoplo en función del periodo. (c) Eficiencia de acoplo en función de la profundidad del ataque(ED)

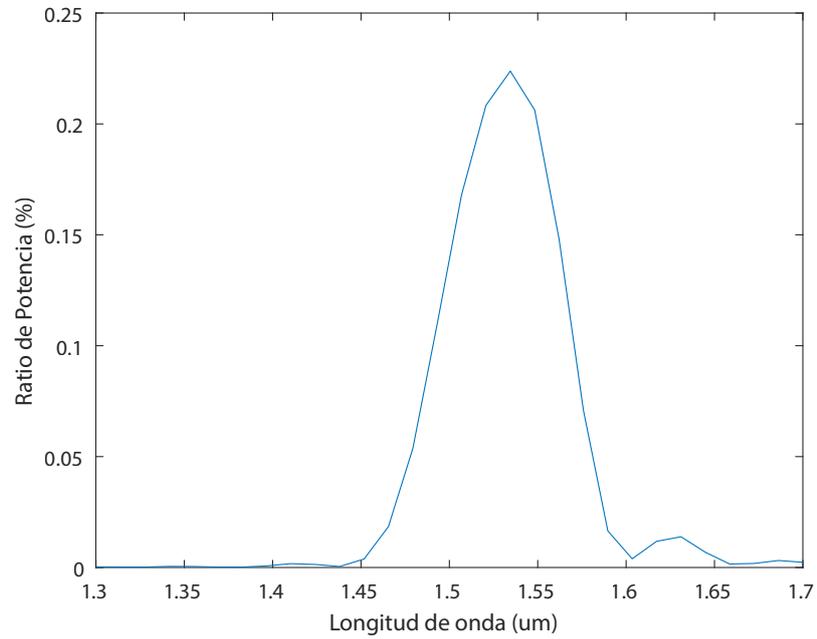


Figura 4.12: Eficiencia de acoplo en función de la longitud de onda

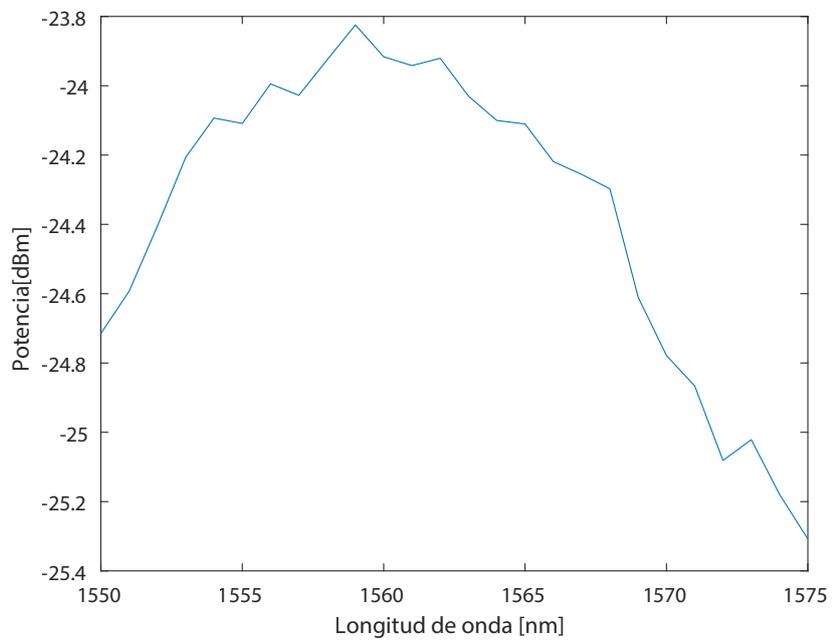


Figura 4.13: Caracterización de acopladores grating en reflexión

Capítulo 5

Trabajo Futuro

Una vez hemos caracterizado todos los elementos, tanto cavidades optomecánicas (incluyendo tanto caracterización de resonancias ópticas como medidas de las oscilaciones mecánicas) como acopladores grating, el objetivo final sería introducirlos en un dispositivo final como se muestra en la Fig. 1.1, el cual mediríamos en reflexión mediante el montaje de la Fig. 3.6.

Nuestros objetivos con esta muestra son:

- Acoplarnos desde las guías de onda hacia las cavidades optomecánicas por acoplo de onda evanescente
- Usar un montaje de acoplo vertical con acopladores grating para acoplar luz al chip que así nos permita aumentar la facilidad de caracterización

Para ello necesitamos primero comprobar qué muestras de acopladores gratings nos resultan más eficientes. Por ello ayudándonos de la simulación realizada en el apartado 4.1.3 hemos realizado una muestra como la de la Fig. 3.8 la cual mediríamos con el montaje de la Fig. 3.6 para caracterizar los acopladores grating, siguiendo un procedimiento similar al del apartado 4.1.4 . La muestra se compone de varios acopladores grating cambiando su periodo en ± 10 nm alrededor del valor óptimo de 660 nm y donde L es la mínima longitud entre acopladores grating.

En las figuras 5.1 y 5.2 vemos respectivamente la muestra de acopladores grating fabricada a falta de su caracterización y la misma muestra pero en detalle, ambas vistas desde un microscopio electrónico de barrido (SEM) (Nótese que el sustrato de SiO_2 se ha eliminado mediante un vaho con alta frecuencia, y el circuito que se observa en la imagen 5.1 es una capa de silicio suspendido de 220 nm de grosor; de esta forma, es posible confinar tanto luz como vibraciones mecánicas en el silicio).

Concluyendo, hemos de destacar el hecho de haber sido capaces de generar resonancias ópticas con suficiente factor de calidad y transducir al modo mecánico confinado alrededor de 2 GHz como era uno de nuestros objetivos. Además, hemos comprobado la compatibilidad de las cavidades optomecánicas con los acopladores grating, a pesar de ser elementos diferentes, y así poder ser capaces de integrarlos en un chip fotónico, facilitando la caracterización de éstas cavidades para estar más cerca de poder llevar su aplicación fuera del laboratorio.

También volver a subrayar, que podemos acercar más aún las simulaciones teóricas realizadas de

los elementos con su caracterización experimental, mediante un proceso iterativo en la fabricación y medición de estos elementos.

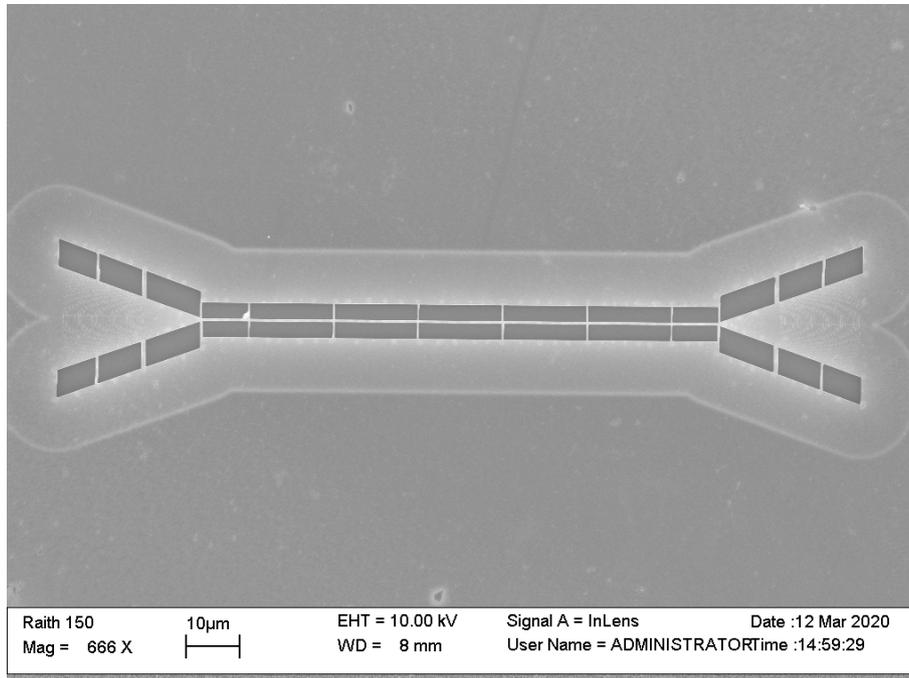


Figura 5.1: Muestra de los acopladores grating

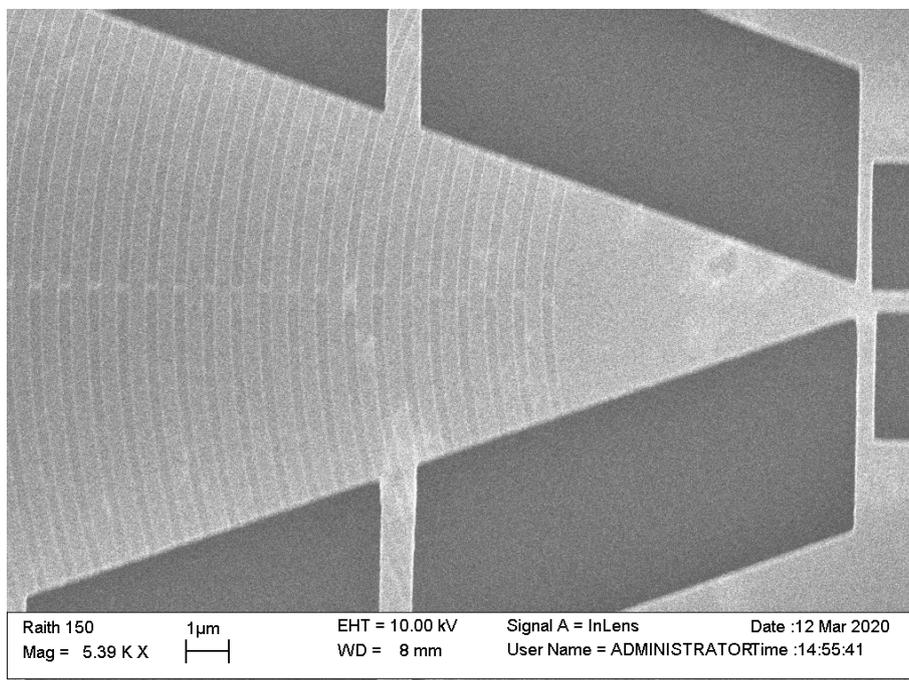


Figura 5.2: Acopladores Grating vistos en detalle

Bibliografía

- [1] *Phenomen project: All-Phononic circuits Enabled by Opto-mechanics PHENOMEN (H2020-EU713450)*. URL: <http://phenomen-project.eu/> (visitado 05-04-2020).
- [2] Yan Pennec y col. “Modeling light-sound interaction in nanoscale cavities and waveguides”. En: *Nanophotonics* 3.6 (2014), págs. 413-440. ISSN: 21928606. DOI: 10.1515/nanoph-2014-0004. URL: <https://www.degruyter.com/view/journals/nanoph/3/6/article-p413.xml>.
- [3] Markus Aspelmeyer, Tobias J. Kippenberg y Florian Marquardt. “Cavity optomechanics”. En: *Reviews of Modern Physics* 86.4 (2014), págs. 1391-1452. ISSN: 15390756. DOI: 10.1103/RevModPhys.86.1391. URL: <https://journals.aps.org/rmp/abstract/10.1103/RevModPhys.86.1391>.
- [4] Matt Eichenfeld. “Cavity Optomechanics in Photonic and Phononic Crystals: Engineering the Interaction of Light and Sound at the Nanoscale”. Tesis doct. California Institute of Technology, 2010, págs. 1-182. DOI: 10.7907/8Q52-8C38. URL: <papers2://publication/uuid/5AFAF6A0-53BE-44B3-8A0B-D0764845E38B>.
- [5] T. J. Kippenberg y K. J. Vahala. “Cavity optomechanics: Back-action at the mesoscale”. En: *Science* 321.5893 (2008), págs. 1172-1176. ISSN: 00368075. DOI: 10.1126/science.1156032. URL: <https://science.sciencemag.org/content/321/5893/1172>.
- [6] Pui Chuen Hui. “Optomechanics and nonlinear mechanics of suspended photonic crystal membranes”. Tesis doct. Havard University, 2014, pág. 155. URL: https://pdfs.semanticscholar.org/1163/13432ef3ede899c829ac2a7219fa71cbfd0e.pdf?{_}ga=2.221488024.1485754046.1586114262-1217086882.1586114262.
- [7] A. Schliesser y col. “Radiation Pressure Cooling of a Micromechanical Oscillator Using Dynamical Backaction”. En: *Phys. Rev. Lett.* 97 (24 2006), pág. 243905. DOI: 10.1103/PhysRevLett.97.243905. URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.97.243905>.
- [8] R. Ma y col. “Radiation pressure driven vibrational modes in ultra-high-Q silica microspheres”. En: *Optics InfoBase Conference Papers* 32.15 (2007), págs. 2200-2202. ISSN: 21622701. DOI: 10.1364/ol.32.002200. URL: <https://www.osapublishing.org/ol/abstract.cfm?uri=ol-32-15-2200>.
- [9] Laura Mercadé y col. *Microwave generation and frequency comb in a silicon optomechanical cavity with a full phononic bandgap*. 2019. arXiv: 1912.06692 [physics.optics]. URL: <https://arxiv.org/abs/1912.06692>.

-
- [10] Mourad Oudich y col. “Optomechanic interaction in a corrugated phoxonic nanobeam cavity”. En: *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics* 89.24 (2014). ISSN: 1550235X. DOI: 10.1103/PhysRevB.89.245122. URL: <https://journals.aps.org/prb/abstract/10.1103/PhysRevB.89.245122>.
- [11] E. Yablonovitch y T. J. Gmitter. “Photonic band structure: The face-centered-cubic case”. En: *Phys. Rev. Lett.* 63 (18 1989), págs. 1950-1953. DOI: 10.1103/PhysRevLett.63.1950. URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.63.1950>.
- [12] Ze Zhang y Sashi Satpathy. “Electromagnetic wave propagation in periodic structures: Bloch wave solution of Maxwell’s equations”. En: *Phys. Rev. Lett.* 65 (21 1990), págs. 2650-2653. DOI: 10.1103/PhysRevLett.65.2650. URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.65.2650>.
- [13] K. M. Ho, C. T. Chan y C. M. Soukoulis. “Existence of a photonic gap in periodic dielectric structures”. En: *Phys. Rev. Lett.* 65 (25 1990), págs. 3152-3155. DOI: 10.1103/PhysRevLett.65.3152. URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.65.3152>.
- [14] Remo Proietti Zaccaria. “Butterfly wing color: A photonic crystal demonstration”. En: *Optics and Lasers in Engineering* 76 (2016), págs. 70-73. ISSN: 01438166. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2015.04.008. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0143816615000925>.
- [15] Rama Balachandran Riverwood High School Atlanta y Ga Karen Porter-Davis. *USING CDs AND DVDs AS DIFFRACTION GRATINGS*. Inf. téc. 2009.
- [16] John D. Joannopoulos y col. *Photonic Crystals: Molding the Flow of Light*. 2.^a ed. Princeton University Press, 2008. ISBN: 0691124566. URL: <http://ab-initio.mit.edu/book/>.
- [17] University of California Berkeley. *Discussion 5 - Grating coupler theory*. URL: <https://slideplayer.com/slide/14295288/>.
- [18] K.F. Riley, M.P. Hobson y S.J. Bence. *Mathematical Methods for Physics and Engineering: A Comprehensive Guide*. Cambridge University Press, 2006. ISBN: 9781139450997.