



*Facultad
de
Ciencias*

**Láser de Semiconductor Sometido a
Retroalimentación Óptica:
Aplicación a la Medida de Distancias.
(Semiconductor Laser Subject to Optical
Feedback: Application to the Measurement of
Distances)**

Trabajo de Fin de Grado
para acceder al

GRADO EN FÍSICA

Autor: Alberto Gómez Iñigo

Director: Ángel Valle Gutiérrez

Septiembre - 2016

Resumen

Los láseres de semiconductor son sistemas optoelectrónicos en constante desarrollo desde su descubrimiento en la década de los 60. En concreto, el láser de cavidad vertical (VCSEL) presenta unas características que lo distinguen de otros láseres de semiconductor. Su capacidad para emitir luz en un haz circular estrecho, lo hace propicio para acoplamiento a fibra óptica. Su pequeño tamaño, lo convierte en un dispositivo barato y muy versátil. Además, opera en un único modo longitudinal, característica que lo distingue de los demás láseres de semiconductor y gracias a la cual lo convierte en un láser ideal para la medida de distancias.

El método de medida de distancias conocido como interferometría de automezcla consiste en reintroducir parte de la emisión del láser en el propio dispositivo después de reflejarse en un blanco. Los cambios en las características de emisión del láser dependen de la distancia al blanco permitiendo entonces la medida de la distancia que la luz ha recorrido.

En este trabajo empleamos un VCSEL que emite en el infrarrojo con longitud de onda de 1550nm. Nuestro objetivo será caracterizar el láser, construir un circuito de fibra óptica capaz de reintroducir el haz y finalmente medir la distancia que ha recorrido la luz desde que se emite hasta que regresa al láser. Este trabajo pretende estudiar como el VCSEL puede usarse para la medida de distancias y la precisión de esta medida.

Palabras clave: Láser de cavidad vertical(VCSEL), semiconductor, interferometría, retroalimentación, medida de distancias.

Abstract

Semiconductor lasers are optoelectronic devices which market have been growing up since they were discovered in 60's decade. In particular, vertical cavity surface emitting lasers (VCSEL) have some characteristics that distinguish them from other semiconductor lasers. Their ability for emitting in a narrow rounded beam makes them perfect devices for coupling with optical fibers. Their small size makes them cheap and very versatile devices. More over, they work in a single longitudinal mode. This characteristic distinguish them from any other semiconductor laser, and it is this fact what turns them in ideal lasers for the measurement of distances.

Self mixing interferometry measurement method consists on reintroducing part of the laser emission in the laser device after reflection at a target. Changes in the laser emission characteristics depend on the distance to the target. In this way the distance that the light has travelled can be measured.

In this project we are going to use an infra-red VCSEL with a wavelength of 1550nm. Our objective will be to characterise the laser, to build an optical fiber circuit able to feedback the light and finally to measure the distance that the light has travelled in its way back to the laser. This project pretends to study how the VCSEL can be used for measuring distances and the precision of this measurement.

Keywords: Vertical cavity surface emitting laser (VCSEL), feedback interferometry, self-mixing interferometry, distance measurement.

- ÍNDICE -

	<i>Resumen</i>	2
	<i>Abstract</i>	3
1	<i>Introducción al láser</i>	
1.1	<i>Láser de semiconductor</i>	5
1.2	<i>Tipos de láseres de semiconductor</i>	6
1.3	<i>Ventajas y aplicaciones del VCSEL</i>	8
1.4	<i>Reflectores de Bragg: DBRs</i>	9
1.5	<i>Láseres de semiconductor sometidos a feedback óptico</i>	9
1.6	<i>Objetivos</i>	10
2	<i>Instrumentación utilizada</i>	11
3	<i>VCSEL en solitario. Caracterización.</i>	
3.1	<i>Potencia total en función de la corriente a $T=25^{\circ}\text{C}$</i>	15
3.2	<i>Variación de la potencia total con la temperatura</i>	16
3.3	<i>Comportamiento de la longitud de onda frente a la temperatura</i>	19
3.4	<i>Potencia en los diferentes modos de polarización</i>	20
3.5	<i>Potencia de las dos polarizaciones del VCSEL en función de la corriente $T=10^{\circ}\text{C}$ y $T=40^{\circ}\text{C}$</i>	21
3.6	<i>Espectros ópticos</i>	22
3.7	<i>Espectro de Radiofrecuencia</i>	25
4	<i>VCSEL sometido a feedback</i>	26
4.1	<i>Aplicación a la medida de distancias. Medida de la longitud de una guía de onda</i>	27
5	<i>Conclusiones</i>	39
6	<i>Bibliografía</i>	40

1. INTRODUCCIÓN AL LÁSER

Un láser es un dispositivo opto-electrónico capaz de emitir luz monocromática, coherente y confinada en un haz no divergente [1]. Entre las aplicaciones más destacadas del láser se encuentra el tratamiento de señales para comunicaciones ópticas. Los láseres de semiconductor son los más utilizados. Entre otros muchos campos, la medida de distancias es una de sus aplicaciones. Nuestro trabajo consiste en realizar un estudio de un láser semiconductor de cavidad vertical (VCSEL) e implementar un dispositivo que nos permita la medida de distancias con él.

1.1 Láser de Semiconductor.

Los láseres de semiconductor, también llamados diodos láser, consisten en una unión de semiconductores dopados de tipo p y tipo n [2]. Los semiconductores presentan una banda prohibida o gap que comprenden un espacio de energías cuyos portadores de carga, electrones y huecos, no pueden adquirir. Dentro de las bandas permitidas, de valencia y de conducción hay un cuasi-continuo de energías. Estas bandas están ocupadas por portadores de carga. La anchura del gap típico oscila entre $E_g \sim 1 - 3 eV$ y viene determinada por la distancia entre el tope de la banda de valencia y el fondo de la banda de conducción. Los saltos interbanda de los portadores de carga son responsables de la interacción radiación materia en semiconductores, principalmente mediante procesos de absorción de fotones, emisión espontánea y emisión estimulada. Esta última es la responsable de que un semiconductor entre en régimen láser.

Para observar la emisión estimulada es necesario que haya dos condiciones. Necesitamos una región activa en la que, a partir de una fuente de energía externa (lo que se conoce como bombeo), consiga implementar en la región activa del láser una inversión de población favoreciendo la creación de fotones.

Necesitamos también una cavidad resonante para que el láser pueda emitir un haz no divergente monodireccional. Esto se puede conseguir con una cavidad resonante de Fabry-Perot situando espejos reflectores a ambos lados de la región activa. Los espejos con altas reflectividades, uno de ellos casi total y el otro muy alta, según el lado de la región activa en el que se encuentren, hacen que los fotones generados recorran varias veces la región activa del láser antes de salir. Se consigue un aumento en la emisión de fotones además de fijar la dirección de emisión [3].

El láser presenta algunas cantidades características. La longitud de onda de emisión λ . La intensidad umbral I_{th} , que se define como la intensidad mínima necesaria para que se produzca emisión en régimen láser. La eficiencia cuántica diferencial η , nos da el porcentaje de fotones que se crean en la cavidad con respecto al número de portadores de carga por encima del umbral.

Un láser está formado por espejos y material activo. Debido a esta distribución, las soluciones de las ecuaciones de Maxwell para el campo eléctrico solo admiten ciertas soluciones monocromáticas que llamamos modos del resonador o modos

del láser. Un láser solo será capaz de emitir luz en las frecuencias asociadas a esos modos. Así se distinguen modos longitudinales y transversales en función de la dependencia del campo eléctrico con la coordenada espacial. Longitudinal, si la dependencia es con la dirección del eje del resonador y transversal si lo es perpendicular a él. Estos modos son los que aparecerán en el espectro óptico del láser [1,2,3].

La estructura de las bandas de energía de un semiconductor es un factor determinante del tipo de transición, ya que según como sean estas bandas podemos encontrarnos con emisión directa o indirecta. La emisión láser se ha observado principalmente en semiconductores de gap directo, pues es en éstos donde las transiciones radiativas son más probables.

La anchura del gap es una característica muy importante del semiconductor [4]. Nos permite conocer aproximadamente la frecuencia o longitud de onda de emisión del láser según $E_g \sim \hbar\nu = \frac{hc}{\lambda}$.

Los láseres de semiconductor están dentro de los más pequeños y eficientes que existen en la actualidad. Tienen tamaños, a lo sumo, del orden de los milímetros pudiendo llegar a las micras. Su espectro de emisión cubre desde el infrarrojo hasta el visible. El desarrollo de estas fuentes láser es un área de investigación de gran importancia, particularmente en cuanto al diseño de nuevos materiales de fabricación que permitan aumentar el rango de emisión de longitudes de onda [3].

Las aplicaciones cotidianas de los láseres de semiconductor son muy amplias pues son los láseres que se utilizan en telecomunicaciones para comunicaciones por fibra y procesamiento de señales luminosas mediante óptica integrada. También se usan en reproductores de discos compactos, punteros láser, lectores de códigos de barras, etc [1].

1.2 Tipos de Láseres de semiconductor.

Atendiendo a la geometría podemos clasificar a los láseres de semiconductor en dos grupos:

1.2.1 Láser de emisión lateral:

El láser de emisión lateral recibe ese nombre porque el haz de luz láser que sale de él lo hace en la dirección paralela a la región activa del semiconductor y transversalmente a la unión de planos de espejos y medio activo. El medio activo está formado por heteroestructuras con una anchura de unos pocos nanómetros generando pozos cuánticos.

El haz producido por un láser de emisión lateral es altamente divergente por lo que presenta dificultades en el acoplamiento a fibra [1,3].

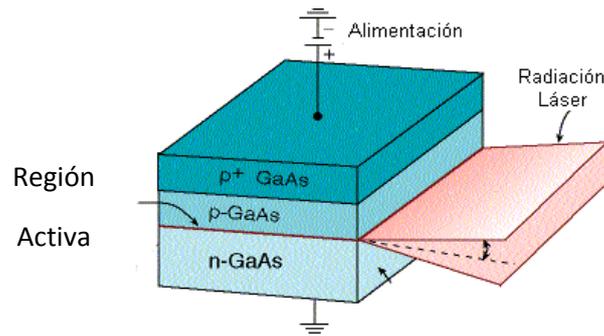


Figura 1.2.1: Esquema de un láser de emisión lateral.

1.2.2 - Láser de emisión Vertical (VCSEL):

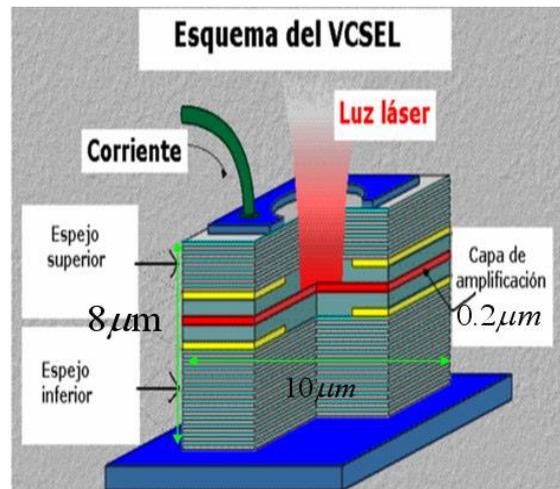


Figura 1.2.2: Esquema de un VCSEL. Se aprecian las dimensiones y partes que lo forman y la dirección de propagación del haz de luz láser.

El VCSEL, por sus siglas en inglés “Vertical Cavity Surface Emitting Laser” es un dispositivo láser de geometría cilíndrica que emite en dirección perpendicular a la región activa [5]. Esto supone un problema debido a que, en esta dirección, la anchura de la región activa es más pequeña, insuficiente para que se produzca amplificación (aumento de número de fotones) necesaria para emitir en régimen láser. Los espejos de Bragg, situados a ambos lados de la región activa del semiconductor, se ocupan de reflejar los fotones para que estos recorran más veces la región activa del semiconductor, así conseguimos una amplificación mayor (más fotones creados por emisión estimulada). A uno de los lados de la región activa se coloca el espejo con menor reflectividad en potencia. Será por este por el que los fotones saldrán del láser cumpliendo a su vez el papel de direccionar la luz.

Debido al tránsito de corriente a través de los espejos se produce un calentamiento del semiconductor por efecto Joule. Se coloca al láser en contacto térmico con un disipador y un enfriador controlado para mantener invariante la temperatura del exterior del láser y no se produzcan variaciones en la longitud de onda de emisión.

Por otro lado, los VCSEL, debido al pequeño tamaño de su región activa presentan algunas ventajas apreciables [5]. Pueden tener un tamaño de unos pocos μm . Se consigue un aumento en la separación de los modos longitudinales cuando disminuye la distancia entre espejos($\Delta\nu = c/2L$) hasta el punto de que un solo modo longitudinal (uno para cada polarización) aparece en el intervalo de frecuencias en el que opera el láser.

El VCSEL emite luz linealmente polarizada, la dirección de polarización de la luz puede variar, girando 90° con determinados cambios en la intensidad de corriente. A este fenómeno se le conoce como “switching” de polarización.

Las características del VCSEL superan en muchos aspectos a las del láser de emisión lateral. Este motivo, y nuevas técnicas de fabricación que abaratan y solucionan algunos problemas técnicos que tenía en sus inicios, han hecho de él un importante dispositivo en gran número de aplicaciones [5]

1.3 Ventajas y aplicaciones del VCSEL.

Mostramos a continuación algunas de las principales ventajas y aplicaciones del láser VCSEL.

Ventajas:

- ▶ Bajo consumo de potencia.
- ▶ Modulación de alta velocidad con baja corriente.
- ▶ Alta densidad de láser en “array” bidimensional.
- ▶ Haz circular estrecho ideal para acoplamiento directo a fibra.
- ▶ Barato de fabricar y versátil por su tamaño reducido.
- ▶ Opera en un único modo longitudinal.
- ▶ Cambio de longitud de onda de emisión mediante sistemas electromecánicos [5].

Aplicaciones:

- ▶ Comunicaciones ópticas, principalmente como emisores en sistemas de comunicaciones de alta velocidad en redes de área local y redes de media distancia [6].
- ▶ Almacenamiento de datos.
- ▶ Ratones Ópticos.
- ▶ Interconectores ópticos.
- ▶ Sensores [5].

1.4 Reflectores de Bragg o DBRs

Los Reflectores de Bragg o también llamados DBRs por sus siglas en inglés (Distributed Bragg Reflectors) son una parte importante de los VCSEL. Se trata de una estructura en la que un gran número de semiconductores con índices de refracción muy próximos entre sí están dispuestos alternadamente. La distancia entre espejos a ambos lados de un semiconductor debe ser la cuarta parte de la longitud de onda dentro del láser para que la luz interfiera constructivamente [1].

1.5 Láseres de Semiconductor Sometidos a Feedback Óptico.

Los láseres de semiconductor presentan una dinámica estable cuando operan como dispositivos aislados sometidos a una corriente constante. La retroalimentación de la luz o “feedback” consiste en la reinyección de luz en la cavidad láser. Es un proceso muy interesante en el que el láser presenta propiedades muy diferentes respecto a las que presenta cuando opera en solitario. Cuando es sometido a “feedback” la luz emitida puede tener una dinámica caótica y se desestabiliza produciendo una dinámica de caos determinista.

Lo que antes era un problema, debido a que se buscaba una emisión de luz estable, en la actualidad se presenta como una de las opciones más interesantes para el desarrollo de nuevas tecnologías como pueden ser la producción de alta velocidad de números aleatorios, o la comunicación que utiliza encriptación caótica. Además, la emisión caótica se relaciona con sistemas complejos que aparecen en la naturaleza, es por ello que tiene gran interés científico su estudio y comprensión.

Se pueden resumir los cambios más importantes en la dinámica de un láser cuando este está sometido a “feedback” de la siguiente manera:

- ▶ Se reduce el umbral de emisión: Los láseres retroalimentados requieren menor intensidad de corriente para entrar en régimen láser.
- ▶ Desestabilización de la potencia emitida: La potencia puede volverse inestable presentando dinámica caótica.
- ▶ Ensanchamiento de los espectros: Tanto el espectro óptico como el de potencia se vuelven más planos y menos periódicos.

Se conoce como colapso de coherencia cuando el láser presenta simultáneamente una evolución caótica de la potencia emitida con el consiguiente ensanchamiento de los espectros.

El láser de semiconductor sometido a feedback óptico se usa para medir distancias, desplazamientos, vibraciones de pequeña amplitud y velocidades [7]. Una de las técnicas usadas es la llamada interferometría de automezcla en la que el campo eléctrico en el interior del láser interactúa con el campo reflejado por un blanco, produciéndose cambios en la dinámica de la luz emitida que están relacionados con

la distancia al blanco o con su estado de movimiento [7]. Esta es de hecho la aproximación que seguiremos en la última parte de este trabajo para medir distancias.

1.6 Objetivos

En este trabajo experimental se pretende conocer el VCSEL para emplearlo posteriormente en la medida de distancias. Para conocer nuestro dispositivo vamos a realizar un proceso de caracterización del mismo. En este proceso se observarán y medirán los cambios en las magnitudes y parámetros que caracterizan un láser de tipo VCSEL.

Prepararemos un experimento con un circuito de fibra óptica en el que el VCSEL se vea sometido a feedback óptico.

Posteriormente utilizaremos el experimento anterior para medir la distancia que recorre la luz desde que se emite por el VCSEL hasta que regresa a él. Para ello se utilizarán los cambios en el espectro de radiofrecuencia de la luz emitida por el VCSEL debidos al feedback.

Además, aprovecharemos el proceso seguido para familiarizarnos con el instrumental de un laboratorio de fotónica y con los métodos de obtención y análisis de los datos.

2 INSTRUMENTACIÓN UTILIZADA

VCSEL

Un VCSEL típico, con una longitud de onda de 850nm, tiene usualmente la región activa formada por láminas semiconductoras de InGaAs y los reflectores de Bragg con pares de GaAs-AlGaAs o bien GaAs-AlAs. El sustrato suele ser GaAs.

Nosotros hemos empleado el VCSEL fabricado por la compañía RayCan [6]. Se trata de un láser que emite en el infrarrojo a una longitud próxima a los 1550nm. Tiene una intensidad umbral $I_{th} \sim 1.6mA$ a $T=25^{\circ}C$ y requiere corrientes inferiores a 11mA para evitar que se estropee. En nuestro láser la región activa está construida con InAlGaAs y los reflectores de Bragg con pares de InAlAs-InAlGaAs [6].

Controlador de Corriente:



Figura 2.1: Controlador de Corriente LDC200C

El controlador de corriente para VCSELs LDC200C de la marca Thorlabs permite fijar la intensidad de corriente que fluye por el VCSEL permitiendo valores de la intensidad comprendidos entre 0 y 20 mA con una precisión de 0.001 mA.

Montura para VCSEL:

La montura para VCSEL modelo TCLDM9 de la marca Thorlabs permite fijar el VCSEL a una estructura en la que se puede controlar la corriente que pasa por él y su temperatura externa. Tiene un dispositivo formado, por láminas termoeléctricas, capaz de regular la temperatura externa del láser. La intensidad de corriente que puede circular por estas láminas varía entre -2 y 2A. La montura permite la salida a fibra.

Controlador de temperatura:

El controlador de temperatura Thorlabs TED200 permite medir la temperatura a la que se encuentra la carcasa del láser variando la corriente que circula por las láminas metálicas de la montura del láser para fijar la temperatura externa del VCSEL por efecto termoeléctrico. Se consigue un rango de temperaturas de entre 5 y 55°C con una precisión de 0.01°C.

Circulador Óptico:

Un circulador es un tipo de aislador óptico con varios puertos cuya funcionalidad es permitir el paso de toda la luz que entra por uno de sus puertos hacia el siguiente puerto. Hemos empleado un circulador óptico de tres puertos, la luz que entra por el puerto 1 se dirige al puerto 2, la que entra por el puerto 2 se dirige al puerto 3. El puerto 2 es bidireccional.

Controlador de Polarización (PC):

El controlador de polarización *Thorlabs FBR05* es un dispositivo que permite cambiar cualquier tipo de polarización de entrada en cualquier otro tipo de polarización a la salida. Se compone de tres láminas retardadoras $\lambda/4$, $\lambda/2$ y $\lambda/4$ que pueden rotarse manualmente para conseguir la polarización deseada a la salida.



Figura 2.2: Controlador de polarización formado por láminas $\lambda/4$, $\lambda/2$ y $\lambda/4$

Divisor de haz 50/50 (BS):

Este dispositivo, acoplado a fibra, divide la intensidad del haz incidente en dos de igual intensidad entre ellos y, por tanto, de la mitad que el haz incidente.

Analizador de Espectros Ópticos (OSA)



Figura 2.3: Analizador de espectros ópticos.

El analizador de espectros ópticos *Anritsu MS9710B* permite visualizar y realizar medidas sobre la variación de la potencia óptica de un dispositivo con respecto a la longitud de onda. Permite medir en un rango comprendido entre los 600 y los 1750 nm con una resolución de 0.07 nm.

Analizador de Espectros Ópticos de Alta Resolución (BOSA)

El analizador de espectros ópticos Aragon Photonics BOSA 210 emplea espectroscopía por “scattering” de Brillouin permitiéndonos una resolución máxima de 10MHz para un rango dinámico de 80dB. El problema del BOSA es que opera con un láser interno sintonizable que se calienta, al trabajar un tiempo con él, mostrando en los resultados un corrimiento del espectro. Esto se debe tener en cuenta a la hora de medir para hacerlo en tiempos cortos y realizando pausas periódicas.

Medidor de Potencia Óptica (PM):

El fotodetector PM20 de Thorlabs es un dispositivo de medida de la potencia de la luz. La luz es inyectada a este dispositivo directamente mediante fibra óptica. Se puede emplear para medir la potencia de luz con longitud de onda entre 400 y 1700nm y obtener resultados comprendidos entre -60 y 20 dBm o equivalentemente entre 1nW y 100mW.

Fibra Óptica:

La fibra óptica es un filamento de material dieléctrico capaz de transmitir impulsos luminosos utilizando el principio físico de la reflexión total interna. Sus principales ventajas, frente a otras formas de comunicar la luz son; la inmunidad frente a corrientes electromagnéticas, la velocidad y la capacidad de transmitir a largas distancias. Presenta el inconveniente de cambiar la polarización de la luz debido a birrefringencias producidas por anisotropías en el material de la fibra.

Se distinguen dos tipos principales las SM (single mode) o monomodo y las MM (multi-mode) o multimodo. Se diferencian principalmente en el diámetro, teniendo las SM un diámetro menor por lo que solo pueden transmitir el modo fundamental. Las MM, con mayor diámetro pueden también transmitir otros modos. Se utiliza en el lenguaje, “modo” para referirnos a la solución monocromática a las ecuaciones de Maxwell en el interior de la fibra.

La fibra óptica que hemos utilizado SMF28 tiene un índice de refracción $n=1.4681$ y un diámetro típico de 8 micras. Permite transmitir típicamente longitudes de onda de entre 400-1550nm [8].

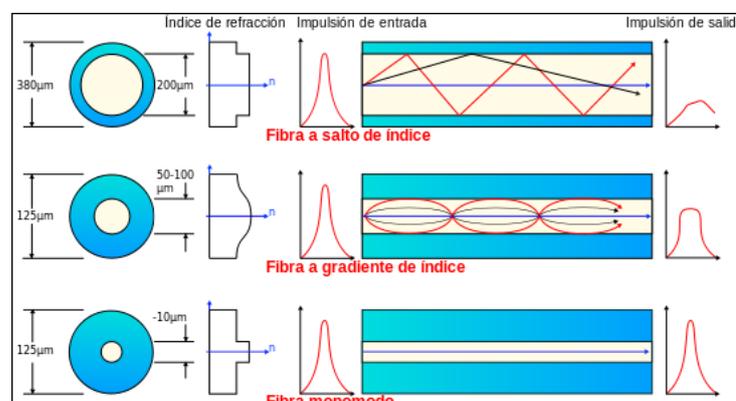


Figura 2.4: Tipos de fibra óptica y relación entre diámetro e índices de refracción con la curva de onda emitida [10].

Analizador Eléctrico de Espectros de Radiofrecuencia (RF):

Mide la potencia en dBm en función de la frecuencia proveniente del fotodetector. Puede medir frecuencias comprendidas entre 9KHz y 20GHz.

La conversión dBm a mW viene dada por la siguiente expresión:

$$P(mW) = 10^{\frac{P(dBm)}{10}}$$

Conectores Ópticos:

Un enlace óptico suele comenzar y terminar con conectores (Fig 2.5) los cuales permiten conectar y desconectar distintos dispositivos a fibra. Un conector consta de un medio sólido cerámico que se llama ferrula. Dispone de un orificio circular en el cual se va a conectar la fibra óptica. Las pérdidas en conectores son más elevadas que en los empalmes por fusión, típicamente de 0.1-0.25 dB en uniones conector-conector.



Figura 2.5: Fibra óptica con conectores ST.

Existen diferentes tipos de conectores según su aplicación y pulido. En este trabajo hemos utilizado los conectores FC/PC (Conector de Ferrula/ Conector Pulido) y FC/APC (Conector de Ferrula/ Conector Pulido en Ángulo). Permiten transmitir longitudes de onda comprendidas entre 400 y 1550nm.

Los dos tipos de conectores tienen pérdidas por reflexión. De entre los dos, la APC tiene menos pérdidas debido al corte en ángulo en que acaba la fibra.



Figura 2.6: Diferentes tipos de pulido en fibra óptica.

3 VCSEL EN SOLITARIO. CARACTERIZACIÓN

Vamos a realizar un estudio para caracterizar nuestro láser VCSEL. Teniendo en cuenta que tenemos un dispositivo emisor de luz variaremos las condiciones en las que se forma la luz, intensidad de corriente que circula por él, y la temperatura a la que se encuentra externamente el láser. También estudiaremos el comportamiento de la luz en cuanto a polarización se refiere. Por último, en este capítulo veremos y explicaremos los espectros ópticos y de radiofrecuencia producidos por el VCSEL.

3.1 Potencia total en función de la corriente a $T=25^{\circ}\text{C}$.

En primer lugar, conectaremos la fibra óptica de salida del VCSEL directamente a un medidor de potencia. Gracias al controlador de temperatura podemos establecer una temperatura constante en la carcasa del láser de $T=25^{\circ}\text{C}$ y con el controlador de corriente podemos variar la intensidad de corriente que circula a través del láser. Variamos la corriente entre 0 y 10mA. A mayor intensidad de corriente comunicada al láser, mayor será la potencia de emisión del láser. Por esta razón nos vale servirnos de un medidor de potencia para encontrar la relación entre intensidad de corriente I , y potencia P del láser.

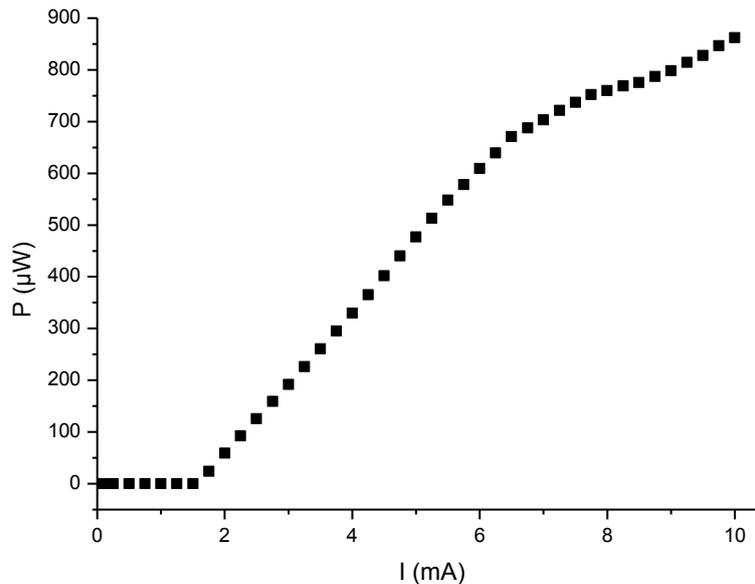


Figura 3.1.1: Potencia total del VCSEL para distintos valores de la intensidad de corriente a una temperatura de $T=25^{\circ}\text{C}$.

Representamos la potencia en función de la intensidad mediante un programa de representación de datos (*Figura 3.1.1*). Se observa que la potencia aumenta con la intensidad, como se esperaba según el modelo teórico. Se pueden diferenciar tres zonas principales con diferente comportamiento. La primera ($0-1.5\text{ mA}$) contempla valores muy pequeños de la potencia por lo que no se aprecia aumento. Vamos a hacer una representación en escala logarítmica para apreciar la variación de potencia para este rango de intensidades de corriente.

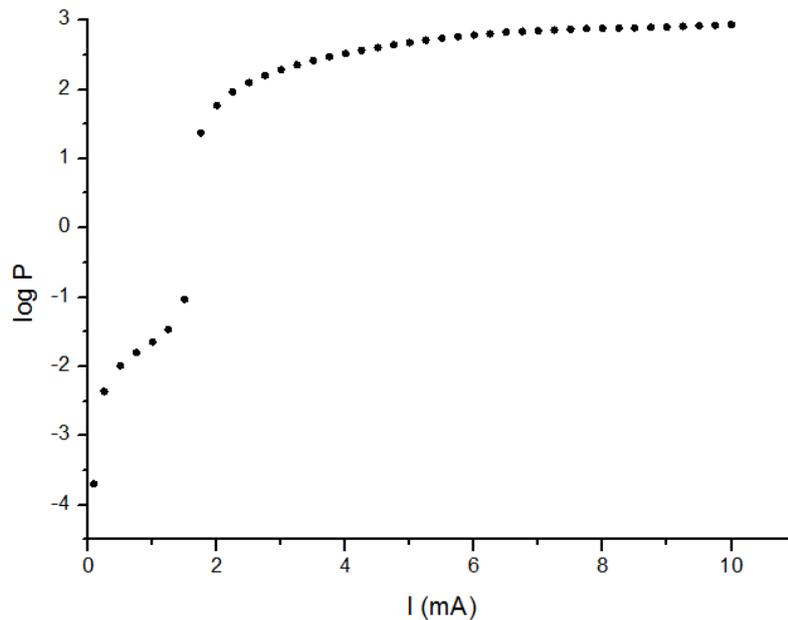


Figura 3.1.2: Logaritmo de la potencia total del VCSEL medidos para distintos valores de la intensidad de corriente a una temperatura de $T=25^{\circ}\text{C}$.

Los láseres producen y emiten fotones generados en el interior de la región activa del láser por emisión espontánea y emisión estimulada. En la región de corrientes menores que la umbral dominan las emisiones espontáneas de tal forma que un aumento en la corriente favorece la producción de estas emisiones. Es a partir de la intensidad umbral, segunda zona de la figura 3.1.1 (comprende $I=1.5 - 6.5\text{mA}$), cuando hay un predominio de emisión estimulada frente a espontánea. Para esta zona se observa un crecimiento lineal de la potencia con la intensidad.

En la tercera y última región ($I > 6.5\text{mA}$) es la llamada región de saturación del láser. Se caracteriza por un crecimiento de P con I menor al observado en la región lineal. En esta región hay un valor de la intensidad a partir del cual la potencia no aumenta, que se observará en nuestro caso a corrientes mayores de 10 mA.

3.2 Variación de la potencia total con la temperatura.

Estudiamos el comportamiento del láser a diferentes temperaturas. Como en el caso anterior, conectamos la fibra directamente al medidor de potencia. Medimos la potencia en función de la intensidad. Luego variamos la temperatura de la carcasa del láser con el controlador de temperatura y repetimos las medidas.

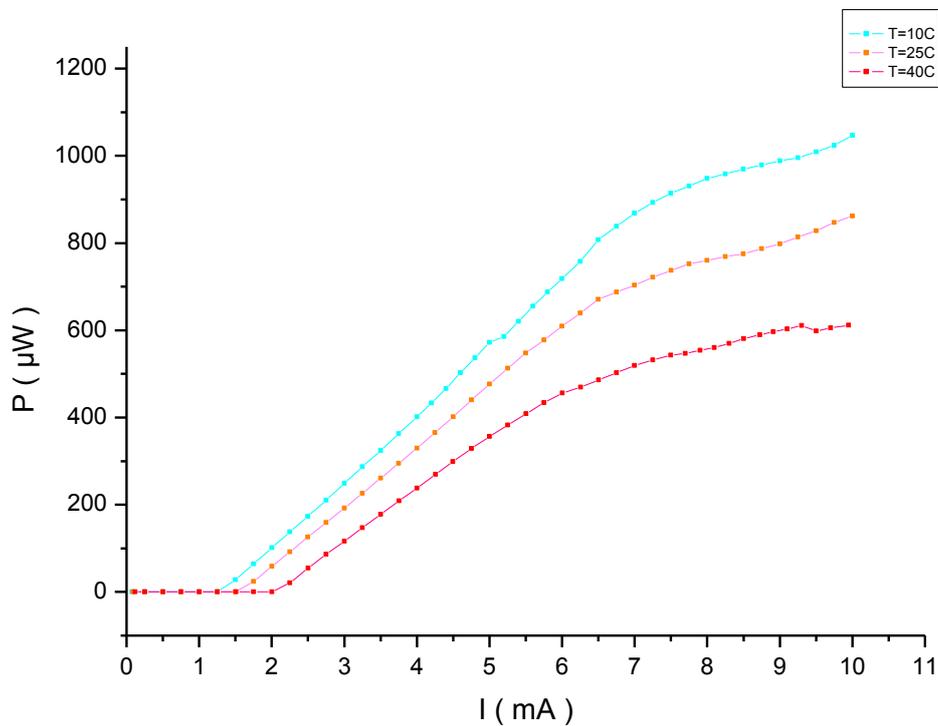


Figura 3.2.1: Valores experimentales de la potencia del VCSEL en función de la intensidad de corriente para temperaturas de $T=10^{\circ}\text{C}$, en azul, $T=20^{\circ}\text{C}$ en naranja y $T=40^{\circ}\text{C}$ en rojo.

Se observa que el aumento de la potencia con la corriente es mayor cuando el láser se encuentra a bajas temperaturas, es lo que cabe esperar debido a que un semiconductor trabaja con mayor eficiencia a menores temperaturas. A su vez se observa un desplazamiento, hacia intensidades más altas, de la intensidad de corriente umbral cuando se aumenta la temperatura.

Vamos a medir dos de las constantes características de un láser. La intensidad umbral y la eficiencia cuántica diferencial. Para ello seleccionamos los datos de la medida correspondientes al régimen láser, el tramo lineal en la Figura 3.2.1. Ajustamos linealmente los datos experimentales con un programa de representación de datos para los tres valores de la temperatura. Así obtenemos las rectas de ajuste con la forma $P = mI + n$ donde P es la potencia total, m la pendiente de la recta, I la intensidad de corriente y n la ordenada en el origen.

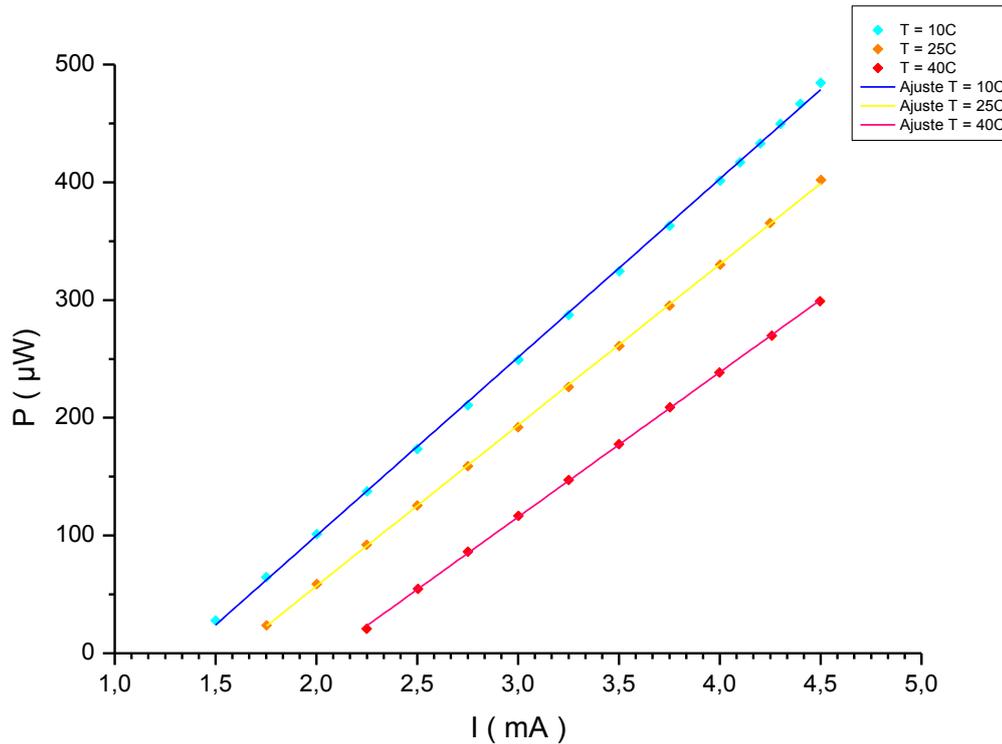


Tabla 3.2.2: Rectas de ajuste a datos de la potencia en función de la intensidad de corriente del láser VCSEL. Los diferentes ajustes quedan;

$$P = (151.5 \pm 0.7) \left(\frac{\mu W}{mA} \right) I - (203 \pm 2) \mu W \text{ en azul para } T=10^{\circ}C,$$

$$P = (136.7 \pm 0.5) \left(\frac{\mu W}{mA} \right) I - (216 \pm 2) \mu W \text{ en amarillo para } T=25^{\circ}C \text{ y}$$

$$P = (123 \pm 2) \left(\frac{\mu W}{mA} \right) I - (253.0 \pm 0.5) \mu W \text{ en rojo para } T=40^{\circ}C \text{ todas ellas con un coeficiente de regresión de } R=0,999.$$

Según la teoría, la potencia óptica de un láser viene dada por:

$$P_0 = \frac{\eta h \nu (I - I_{th})}{e} \quad Ec(1)$$

Donde η es la eficiencia cuántica diferencial, h la constante de Planck, ν la frecuencia de emisión del láser, I e I_{th} son la intensidad de corriente e intensidad umbral respectivamente y e es la carga del electrón.

Relacionamos la $Ec(1)$ con las rectas de ajuste y obtenemos los valores de la corriente umbral, I_{th} , y la eficiencia cuántica diferencial, η , en cada caso para cada temperatura. Mostramos los resultados en la Tabla 3.2.

$T (^{\circ}C)$	$I_{th} (mA)$	$\Delta I_{th} (mA)$	$\lambda (nm)$	η	$\Delta\eta$
10	1,37	0,03	1536,1935	0,192	0,001
25	1,59	0,02	1537,949	0,1714	0,0007
40	2,00	0,06	1539,601	0,145	0,001

Tabla 3.2: Valores obtenidos de la intensidad umbral I_{th} y eficiencia cuántica diferencial del láser para los diferentes valores de temperaturas. $T=10^{\circ}C$ en azul, $T=25^{\circ}C$ en amarillo y $T=40^{\circ}C$ en rojo. Para el cálculo de la eficiencia cuántica diferencial η se han empleado los valores de las longitudes de onda λ medidas previamente en función de la temperatura para una corriente de $I = 4mA$.

Como se ha explicado anteriormente, los valores de I_{th} aumentan con T mientras que η disminuyen con T . El resultado que se ha obtenido de la intensidad umbral del láser a $T=25^{\circ}C$ coincide con el aportado por el fabricante, $I_{th} \approx 1,6mA$.

3.3 Comportamiento de la longitud de onda frente a la temperatura.

Realizamos una serie de medidas de la longitud de onda de emisión del láser variando la temperatura de la carcasa del láser cuando tenemos una corriente fijada en 4mA. La longitud de onda la medimos con gran precisión con el analizador de espectros ópticos (BOSA). Nos permitirá observar dos valores de la longitud de onda, uno por cada polarización lineal. Tomaremos el que tiene mayor potencia que se corresponde con la polarización que aparece a longitudes de onda menores. Realizamos un ajuste lineal de estos valores con un programa de representación de datos (Figura 3.3).

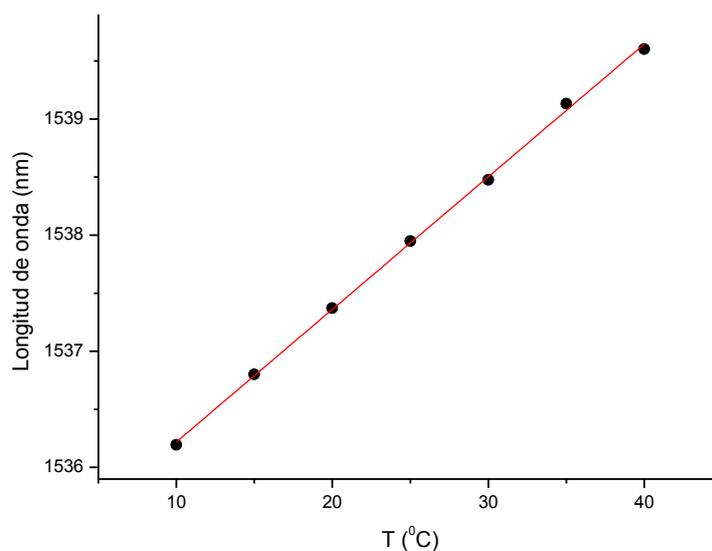


Figura 3.3: Representación de la longitud de onda de emisión del láser en función de la temperatura. Han sido medidas experimentalmente y se han ajustado a la recta. $\lambda = (0.114 \pm 0.001)(nm)T + (1535.08 \pm 0.04)nm$.

Se observa un aumento lineal $\frac{\Delta\lambda}{\Delta T} = (0.114 \pm 0.001) \frac{nm}{^\circ C}$ de la longitud de onda de emisión con la temperatura.

3.4 Potencia en los diferentes modos de polarización. (P_0 y P_{90})

Los VCSEL de semiconductor emiten luz linealmente polarizada en una de las direcciones cristalinas del semiconductor en el plano del medio activo. Esta dirección de polarización puede rotar 90° cuando se cambia la intensidad de corriente que alimenta el láser.

Como la luz láser la estamos transportando a través de fibra óptica, hay que considerar como es el comportamiento de la polarización dentro de ella. En un caso ideal de fibra óptica, con simetría cilíndrica, no habría cambios en la polarización. Sin embargo, el caso real es que la fibra presenta anisotropías provocando birrefringencias al paso de la luz y por tanto se produce un cambio en la polarización de la luz transformándola de linealmente polarizada a elípticamente polarizada.

Vamos a medir la polarización de la luz en las dos direcciones transversales, P_0 y P_{90} , potencias de polarización paralelas a la sección de la fibra y perpendiculares entre sí.

Montaremos el siguiente dispositivo experimental para medir P_0 y P_{90} .

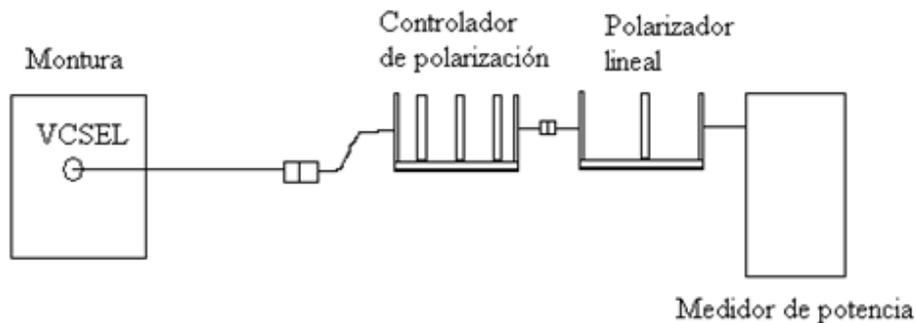


Figura 3.4.1: Esquema de dispositivo experimental para medida de las direcciones de polarización.

La luz emerge del láser VCSEL que está insertado en una montura para láser VCSEL. Esta montura dispone de controladores de corriente y temperatura. También tiene salida a fibra óptica, dirigiremos la luz hasta el medidor de potencia pasando antes por el controlador de polarización y después por el polarizador lineal (Figura 3.4.1). Con este dispositivo podemos, primeramente, cambiar la forma y la orientación de la elipse de polarización que caracteriza la luz láser y posteriormente quedarnos con una componente para medir las potencias correspondientes a la polarización P_0 y P_{90} .

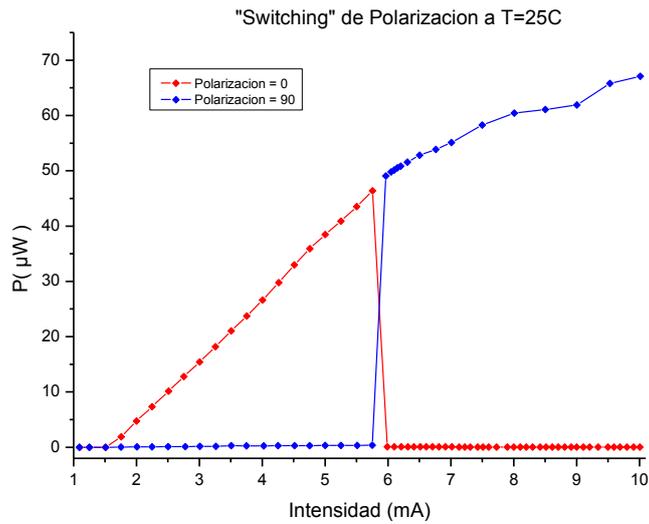


Figura 3.4.2: Potencia de emisión del láser VCSEL a T=25°C. Diferenciamos la polarización a 0° (en rojo) y a 90° (en azul).

Se representan los valores experimentales obtenidos de la potencia en función de la intensidad de corriente a una temperatura constante de T=25°C (Figura 3.4.2). Para valores inferiores a 6mA la luz tiene polarización fundamentalmente a lo largo de la dirección 0°, mientras que de 6mA en adelante la tiene a lo largo de la dirección 90°. Este cambio se conoce como “switching” de polarización.

El “switching” de polarización, en inglés, o rotación de polarización, en castellano, se trata de un giro de 90° en la dirección de la polarización lineal de la luz. Es una característica intrínseca del láser VCSEL.

3.5 Potencia de las dos polarizaciones del VCSEL en función de corriente a T=10°C y T=40°C

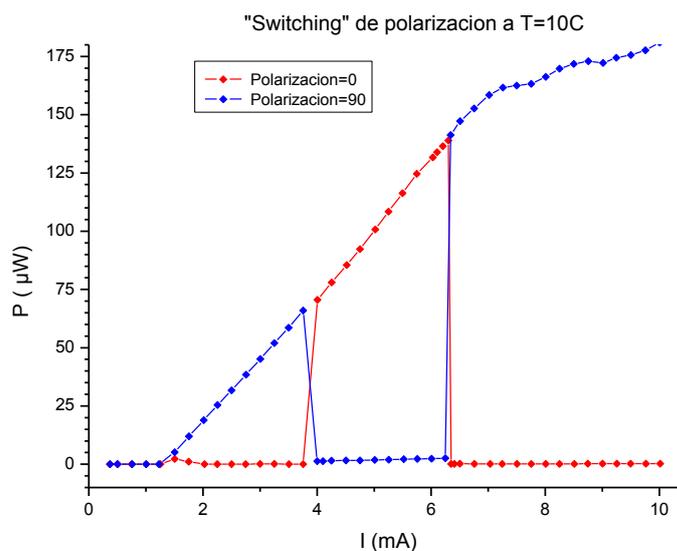


Figura 3.5.1: Potencia frente a intensidad de corriente del VCSEL a T=10°C para sus dos direcciones de polarización 0° (en rojo) y 90° (en azul).

En este caso (Figura 3.5.1), en el que la temperatura externa del VCSEL es de $T=10^{\circ}\text{C}$ se ha repetido el procedimiento anterior. También aparece “switching” de polarización. El giro de la polarización aparece dos veces. El primero gira la polarización 90° y aparece $I \approx 4\text{mA}$ y el segundo restaura la polarización en la dirección inicial, 0° , y aparece a $I \approx 6\text{mA}$.

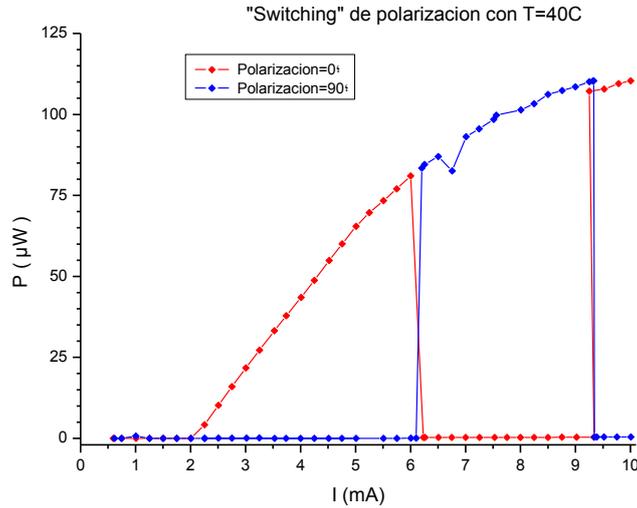


Figura 3.5.2: Potencia frente a intensidad de corriente del VCSEL a $T=40^{\circ}\text{C}$ para sus dos direcciones de polarización 0° (en rojo) y 90° (en azul).

Cuando el VCSEL está externamente a $T=40^{\circ}\text{C}$ se observa el fenómeno del “switching” de polarización, también doblemente (Figura 3.5.2), como en el caso anterior. Esta vez el “switching” ocurre cuando las intensidades son cercanas a 6, y 9,5 mA. Estas medidas reproducen resultados recientemente obtenidos [9]. En esta referencia se estudia el comportamiento de la polarización de la luz emitida por un VCSEL a temperaturas $T=10,25$ y 40°C . Nuestros resultados se asemejan mucho a los obtenidos en esa referencia. Aparecen el mismo número de “switchings” para cada temperatura. La única diferencia es que los switching aparecen para intensidades de corriente un poco más altas en comparación con las que hemos obtenido con nuestro dispositivo.

3.6 Espectros ópticos.

La luz producida en un láser de semiconductor de cavidad vertical, VCSEL es en principio monocromática. En realidad, emite fundamentalmente en dos longitudes de onda diferentes; las correspondientes a los dos modos de polarización lineal caracterizados en la sección anterior.

A corrientes bajas, a longitud de onda más corta, aparece una primera línea más intensa. Los modos longitudinales del láser están formados por las ondas monocromáticas que satisfacen [1]:

$$\kappa L = q\pi \quad E_c(2)$$

Donde $\kappa = \frac{2\pi}{\lambda}$ es el número de onda, L la distancia entre espejos y q es un número natural. Así el modo longitudinal del láser tiene una frecuencia asociada [1]:

$$\nu_q = \frac{qc}{2L} \quad \text{Ec (3)}$$

Donde q es un número natural, c la velocidad de la luz en el medio entre espejos y L la distancia entre espejos. Se puede visualizar el espectro óptico del láser como un pico estrecho centrado en la frecuencia óptica del láser.

Vamos a medir con el BOSA las longitudes de onda del láser cuando este se encuentra a $T=25^\circ\text{C}$. Lo haremos para tres valores de la intensidad de corriente $I=3\text{mA}$ (Figura 3.6.1), $I=5\text{mA}$ (Figura 3.6.2) e $I=6,5\text{mA}$ (Figura 3.6.3).

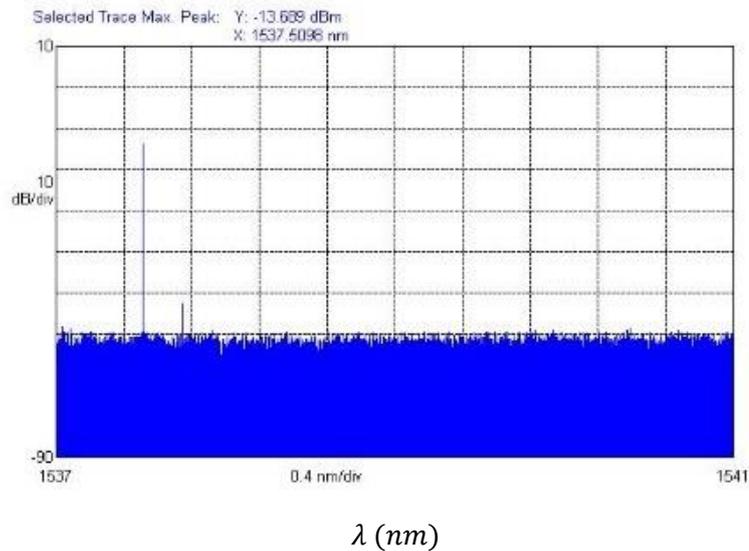


Figura 3.6.1: Espectro óptico del láser VCSEL a $T=25^\circ$ cuando $I= 3 \text{ mA}$.

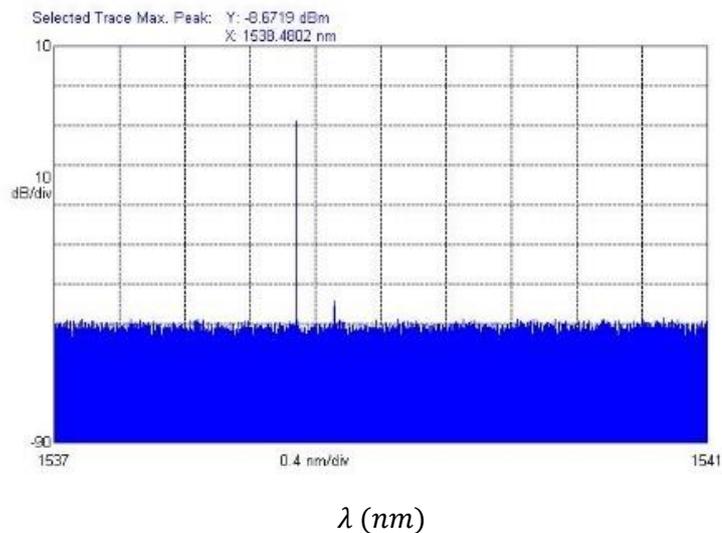


Figura 3.6.2: Espectro óptico del láser VCSEL a $T=25^\circ$ cuando $I= 5 \text{ mA}$.

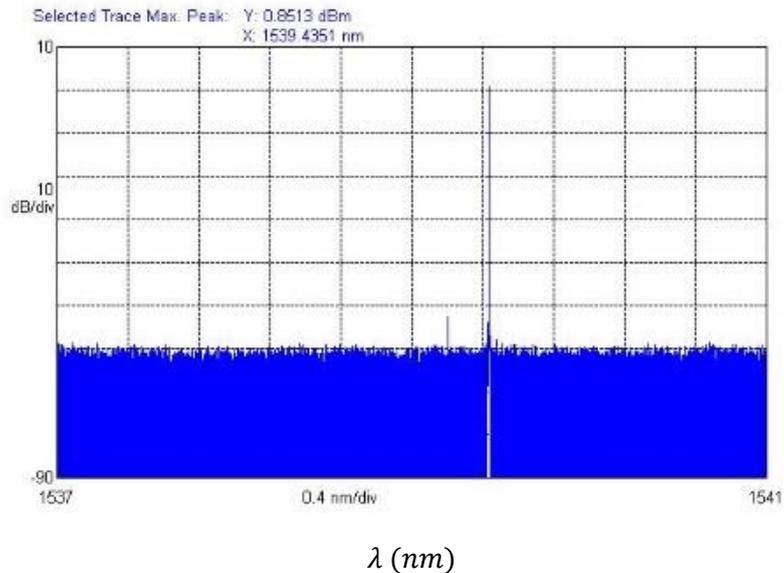


Figura 3.6.3: Espectro óptico del láser VCSEL a $T=25^\circ$ cuando $I=6,5$ mA.

En los espectros a $I=3$ mA y $I=5$ mA apreciamos dos picos, uno máximo correspondiente a la polarización en la dirección P_0 y la otra, de menor potencia, en la dirección P_{90} . Se ha medido el pico máximo para diferentes intensidades de corriente obteniéndose unas longitudes de onda de:

$I=3$ mA	$I=5$ mA	$I=6,5$ mA
$\lambda=1537.5098$ nm	$\lambda=1538.4802$ nm	$\lambda=1539.4351$ nm

Tabla 3.6.1: Longitudes de onda medidas con el espectrómetro óptico cuando se variaba la intensidad de corriente.

Con el aumento de la intensidad de corriente comunicada al láser se observa un corrimiento al rojo de la longitud de onda de emisión. También se observa en la Fig. 3.6.3 que los picos máximos pasan de estar a longitudes de onda más bajas, a más altas. Esto ocurre, de nuevo a intensidades próximas a 6 mA y es debido al “switching” de polarización que se ilustra en la Fig. 3.4.2.

Estas medidas reproducen resultados recientemente obtenidos [9]. Se puede entender el cambio de la longitud de onda con la corriente si tenemos en cuenta que la corriente eléctrica atraviesa los reflectores de Bragg en su camino a la región activa. Estos reflectores tienen una resistencia eléctrica que hace que debido al efecto Joule haya una disipación de energía en forma de calor de tal forma que la temperatura en el interior del láser aumenta. El índice de refracción de los semiconductores aumenta con la temperatura. Como la longitud de onda de resonancia de la luz en la cavidad láser es directamente proporcional a ese índice, de ahí la tendencia observada.

3.7 Espectro de Radiofrecuencia.

Tomamos un espectro de radiofrecuencia con el analizador de espectros de radiofrecuencia. Este dispositivo realiza un promedio de un conjunto de medidas que toma de la transformada de Fourier de la potencia óptica y nos la muestra para un barrido en frecuencias con un rango (span) deseado. Se obtiene una relación potencia-frecuencia como la que se observa a continuación (Figura 3.7).

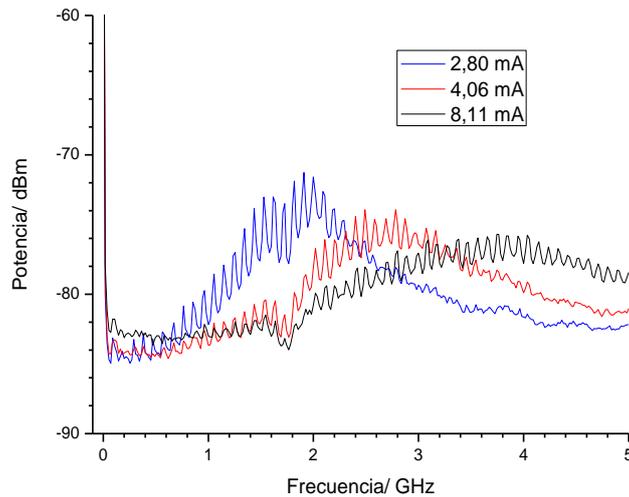


Figura 3.7: Espectro de radiofrecuencia de un VCSEL para diferentes intensidades de corriente.

Se observa un máximo que aparece a la frecuencia de oscilaciones de relajación, que es la frecuencia a la cual se intercambia energía entre el campo óptico y los portadores de carga. Se observa también el aumento de la frecuencia de las oscilaciones de relajación con la corriente, fenómeno que aparece usualmente en los láseres de semiconductor. La tendencia observada es similar a la que aparece en la Fig. 3 de [10].

4 VCSEL SOMETIDO A FEEDBACK.

Vamos a montar un dispositivo experimental para lograr la retroalimentación del láser. Implementaremos un circuito óptico cuyo objetivo fundamental sea la reintroducción de parte del haz de luz láser en la región activa del mismo. Se espera bajo determinadas condiciones un comportamiento caótico determinista que estudiaremos a continuación.

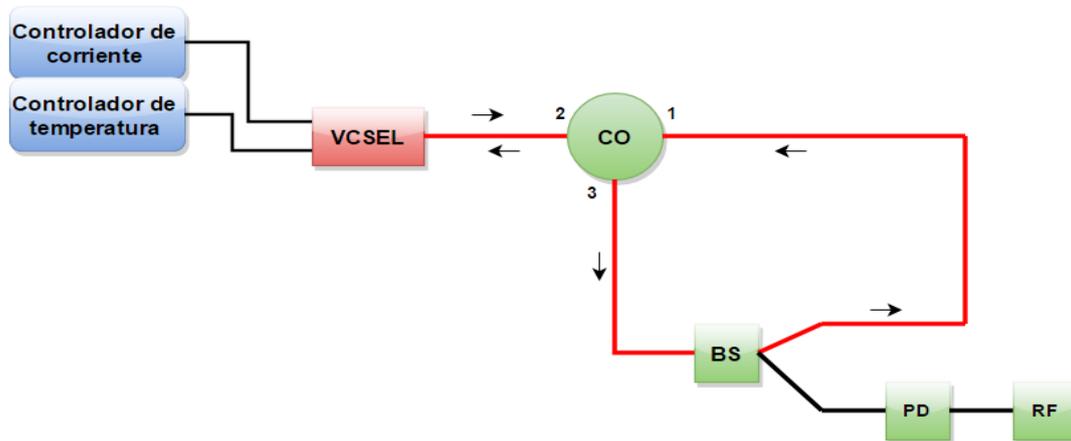


Figura 4.1: Esquema del dispositivo experimental para retroalimentar el VCSEL.

El haz láser sale del VCSEL previamente fijadas su temperatura externa y la corriente que circula a través de él con los controladores de corriente y temperatura (en azul en Fig - 4.1). La luz láser sale por fibra óptica y se dirige hacia un circulator de tres terminales (1, 2 y 3). En el terminal 3 conectamos otro tramo de fibra que lleva la luz hasta un divisor de haz 50/50(BS). El divisor de haz se encarga de dividir el haz que entra a él en dos haces de igual intensidad. Tiene dos salidas a fibra, una de ellas la conectamos al terminal 1 del circulator mientras que la otra la conectamos a diferentes aparatos de medida como pueden ser espectrómetro óptico (OSA o BOSA), analizador de espectros de radio-frecuencia(RF), medidor de potencia o fotodetector(PD).

Este circuito se comporta como un resonador óptico, por lo que, si medimos con el analizador de radiofrecuencia, una vez conseguida una dinámica caótica determinista, se espera obtener una serie de picos equidistantes separados $\nu = 1/\tau$, donde τ es el tiempo que tarda la luz en recorrer el circuito completo de fibra, es decir, el tiempo que tarda un fotón emitido por el VCSEL en volver a él. Las frecuencias a las que aparecen estos picos son las frecuencias de los llamados modos de la cavidad externa. A la diferencia entre picos consecutivos del espectro se la conoce como el rango espectral libre del resonador y nos permitirá hacer medidas de longitud.

Un fotón recorrerá una longitud L , a velocidad $v = c_0/n_g$ que depende directamente del índice de refracción de grupo de la fibra n_g , y tardará un tiempo τ . c_0 es la velocidad de la luz en el vacío.

Podemos expresar L de la siguiente forma:

$$L = \frac{c_0 \tau}{n_g} = \frac{c_0}{n_g \nu} \quad \text{Ec (4)}$$

Esta será nuestra ecuación para determinar la longitud del circuito de fibra conocido el rango espectral del resonador óptico, ν .

4.1 Aplicación a la medida de distancias. Medida de la longitud de una guía de onda.

Queremos medir la longitud del circuito de fibra, L , que se corresponde con la distancia que recorre la luz desde que se emite por el VCSEL hasta que vuelve a él. Para ello hemos medido con el analizador eléctrico de espectros de radiofrecuencia el patrón de picos de potencia frente a frecuencia cuando el láser está a $T=25^{\circ}\text{C}$ y emite con una corriente de $I=1.625\text{mA}$, valor ligeramente superior a la corriente umbral $I=1.02I_{th}$. El resultado se muestra en la Fig. 4.1.1.

En esta figura se ve el promedio que hace el analizador después de realizar 10 barridos de la frecuencia para un span de 2GHz y una radio band width (RBW) de 1MHz. El Radio Band Width es la anchura en frecuencias que tiene el filtro utilizado por el analizador. El rango de frecuencias que nos va a medir el analizador de espectros (span) es 2GHz. Una medida con menor RBW tiene mayor precisión, pero la potencia adquirida en un rango de frecuencias es menor

El espectro mostrado en la Fig. 4.1.1 corresponde a una dinámica del láser de semiconductor denominada fluctuaciones de baja frecuencia. Cada uno de los picos corresponde a la excitación de un modo de la cavidad externa. En esta dinámica la luz emitida por el láser se comporta de forma caótica excitando una gran cantidad de esos modos externos [11].

La distancia en frecuencias entre dos picos consecutivos es el rango espectral libre del resonador y se relaciona con la longitud del circuito de fibra (Ec 4). La longitud del circuito de fibra (en rojo en Fig 4.1) es la longitud de la fibra que sale del láser hacia el puerto 2 del circulador, a esto hay que añadir el tramo que va del puerto 3 al puerto 1 del circulador y el tramo que regresa la luz al láser desde el puerto 2 del circulador.

Dado que la distancia entre picos es constante tomaremos un espaciado en frecuencias correspondiente a 31 picos para minimizar el error. Podríamos haber elegido cualquier pico origen. En nuestro caso hemos elegido los picos de $\nu_0 = (422 \pm 4)\text{MHz}$ y $\nu_{30} = (971 \pm 4)\text{MHz}$.

El error se ha obtenido considerando que el espectro tiene 550 puntos para un span de 2GHz. Por lo tanto, el paso en frecuencias del espectro es de:

$$\frac{2\text{GHz}}{550} = 3.64\text{MHz}$$

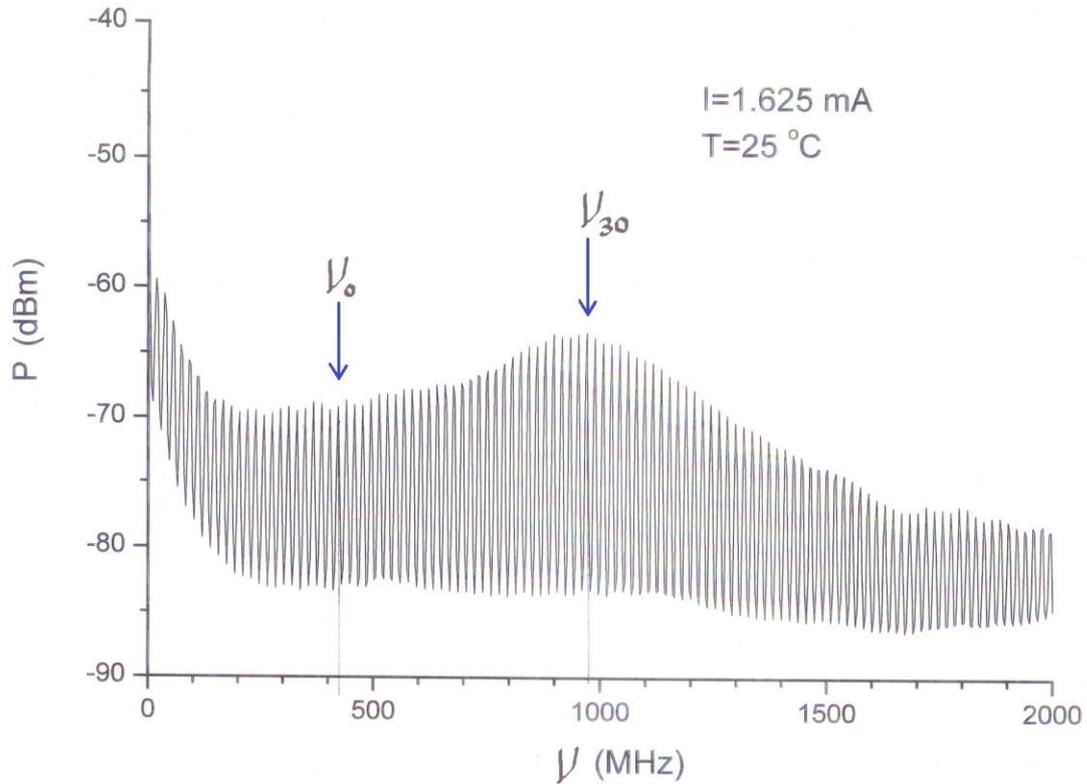


Figura 4.1.1: Espectro de radiofrecuencia obtenido del VCSEL montado en circuito con tramo de fibra óptica y emisión caótica debido a feedback.

Con estos valores podemos hacer una primera estimación de la longitud del circuito de fibra con el latiguillo:

$$\nu = \frac{\nu_n - \nu_0}{n} = 18,30 \text{ MHz}$$

$$\Delta\nu = \frac{1}{n} \sqrt{\Delta\nu_n^2 + \Delta\nu_0^2} = \frac{1}{30} \sqrt{(4 \cdot 10^6)^2 + (4 \cdot 10^6)^2} = 0,19 \text{ MHz}$$

$$L = \frac{c_0}{n_g \nu} = \frac{3 \cdot 10^8}{1,4681 \cdot 18,30 \cdot 10^6} = 11,1664 \text{ m}$$

$$\Delta L = \frac{c_0}{n_g \nu^2} \Delta\nu = \frac{3 \cdot 10^8}{1,4681 (1,83 \cdot 10^7)^2} \cdot 0,19 \cdot 10^6 = 0,12 \text{ m}$$

$$L = (11.17 \pm 0.12) \text{ m}$$

Estos cálculos se han realizado a partir de la medida de los picos de frecuencia, en un espectro de radiofrecuencia con 10 barridos y con un span de 2GHz. El error en la medida de la frecuencia a la que aparece un máximo en el espectro se puede disminuir si tomamos RBW más pequeño en “spans” más pequeños.

Haremos barridos en frecuencias con RBW=30kHz y 100kHz. Esta vez el analizador hará 2000 barridos con un span de 10MHz. Los resultados se muestran en la Fig. 4.1.2.

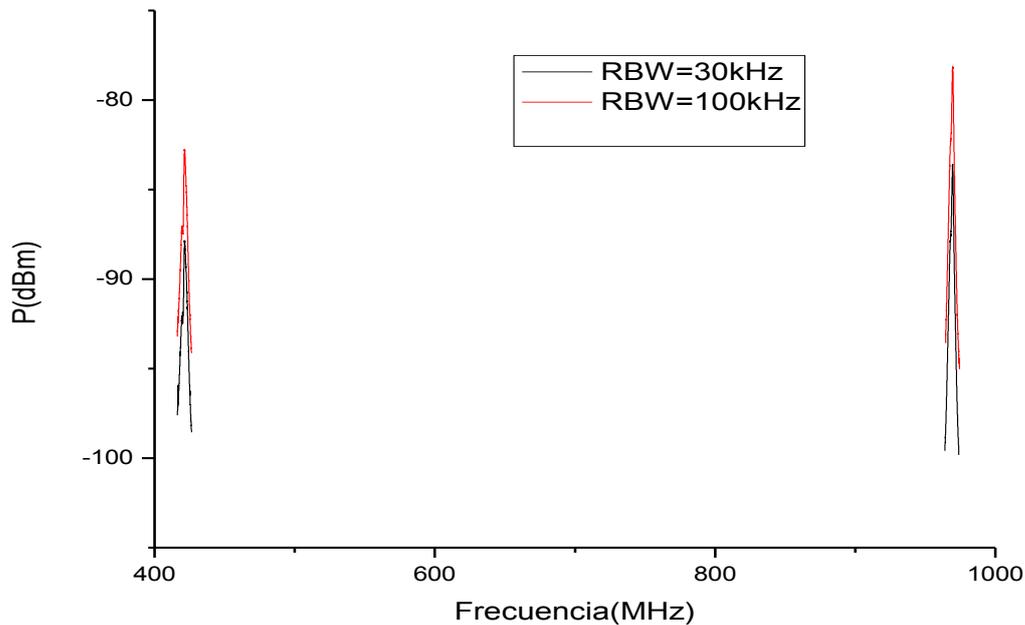


Figura 4.1.2: Espectros de radiofrecuencia en torno a los picos ν_0 y ν_{30} tomados con $RBW=30kHz$, en negro, y $100kHz$, en rojo.

Se observa que al aumentar el RBW el pico aumenta su altura, esto se debe a que la energía que entra en el analizador de espectros es mayor pues aumenta el ancho del filtro.

Para hacer nuestro análisis y encontrar el valor de la frecuencia para la cual se produce la máxima potencia de emisión vamos a tomar del espectro medido anteriormente los datos correspondientes al espectro con $RBW=100kHz$, seleccionamos un número de datos experimentales alrededor del pico máximo y ajustamos a una curva de Lorentz que tiene la siguiente ecuación:

$$P = P_0 + \frac{2A}{\pi} \frac{\omega}{4(f-f_0)^2 + \omega^2} \quad \text{Ec (4)}$$

Elegimos una ecuación lorentziana para el ajuste por tratarse de una función simétrica alrededor del máximo. Esta función tiene cuatro parámetros; la amplitud A , la anchura media altura $2w$, la frecuencia a la que aparece la potencia máxima f_0 y la potencia en el máximo P_0 . Haremos distintos ajustes con un programa de tratamiento de datos. A este programa le pediremos que haga el ajuste imponiendo distintos valores del centro de la lorentziana, f_0 , para encontrar el ajuste de A , w y P_0 que minimice el coeficiente de regresión R^2 .

El coeficiente de regresión nos dice mediante un valor numérico de 0 a 1 como de bien se ajustan nuestros resultados a una lorentziana, siendo 1 si la lorentziana pasa por todos los puntos.

Mostraremos con detalle el análisis del primer pico, el que está cercano a 422MHz cuando medimos con el analizador de espectros con RBW=100KHz. Luego procederemos de igual manera para el otro pico, el cercano a 969MHz. Repetiremos para RBW=30KHz. Antes de hacer el ajuste conviene pensar si es mejor cambiar las unidades de potencia en dBm, a W. Vamos a hacerlo de las dos maneras y nos quedaremos con la que consiga un menor error en la frecuencia ν_0 .

Tomamos los datos medidos cercanos al pico 422MHz cuando la potencia esta medida en dBm y los representamos gráficamente con diferentes ajustes a curvas lorentzianas en los que se ha variado el parámetro centro de la lorentziana, f_0 , en el ajuste.

Realizamos diversos ajustes a lorentzianas variando el parámetro f_0 de los datos experimentales alrededor de la frecuencia a la que aparece el pico máximo, ν_0 . Elegiremos $\nu_0 = f_0$ de la curva con mayor R^2 como el valor más probable de ν_0 . Para el error de ν_0 usaremos este procedimiento: tomaremos como posibles las frecuencias para las cuales se construyan curvas con R^2 tales que $R^2 > 0.95 R_{max}^2$. De esta manera buscaremos la línea que corte la recta horizontal $R^2 > 0.95 R_{max}^2$ y las rectas que unen los puntos en una representación de R^2 frente a f_0 (Figura 4.1.4). Y determinaremos los extremos de ese intervalo de frecuencias buenas que llamaremos ν_{min} y ν_{max} .

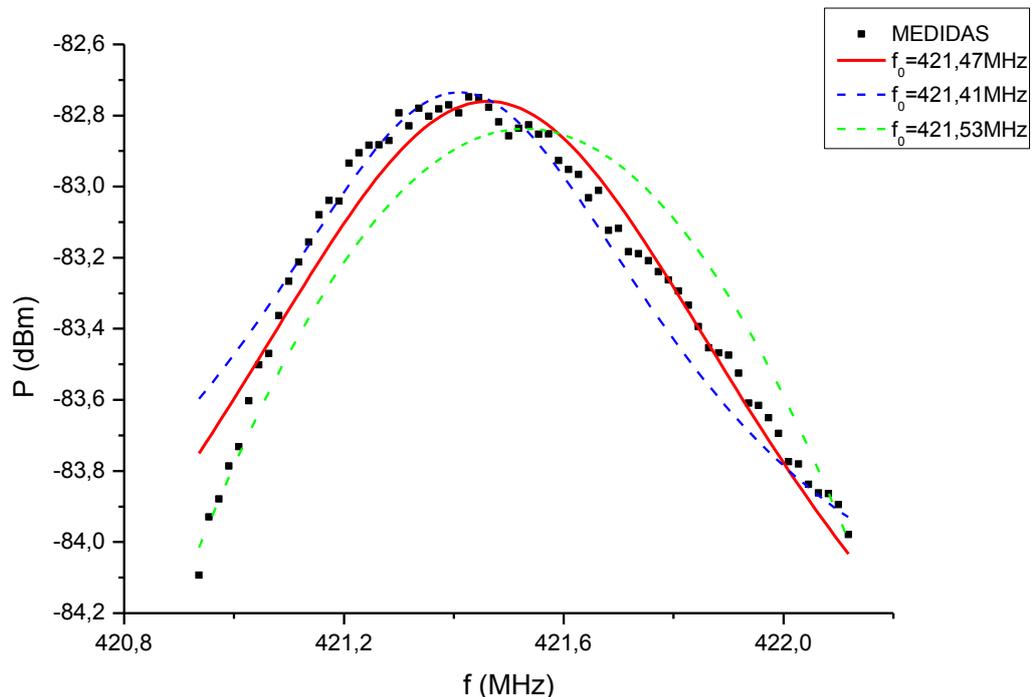


Figura 4.1.3: Datos experimentales, en negro, alrededor del pico de máxima potencia medidos con el analizador de espectros con RBW=100kHz. Se muestran tres ajustes, el mejor de ellos en rojo, en los que se ha variado f_0 . Obsérvese que la potencia esta en unidades de dBm.

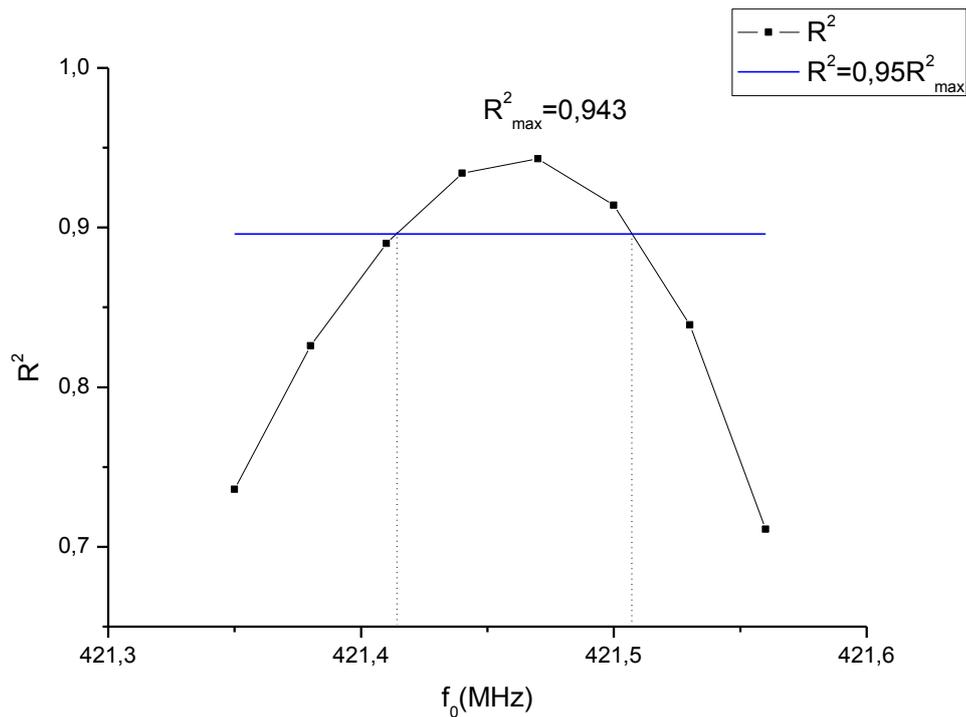


Figura 4.1.4: En negro, valores de R^2 cuando los ajustes a lorentzianas tienen de centro f_0 (Tabla 4.1.1). En azul recta $R^2 = 0,95 R_{max}^2$. Potencia medida en dBm.

Para este caso tenemos $\nu_0 = 421,47\text{MHz}$ Los valores de $\nu_{min} = 421,41\text{MHz}$ y $\nu_{max} = 421,51\text{MHz}$ dan un error $\Delta\nu_{R^2} = 0,06\text{MHz}$. El error del instrumento de medida (el analizador de espectros de radiofrecuencia) viene dado por $RBW/2$. Como $RBW=100\text{kHz}$, el error es $\Delta\nu_{RBW} = 0,05\text{MHz}$. El error en la frecuencia del pico se determina tomando el mayor de los errores anteriores, $\Delta\nu_0 = \max(\Delta\nu_{R^2}, \Delta\nu_{RBW})$ [12].

$$\nu_0 = (421,47 \pm 0,06)\text{MHz}$$

Hacemos el mismo procedimiento cuando la potencia esta expresada en unidades de Wattios, W.

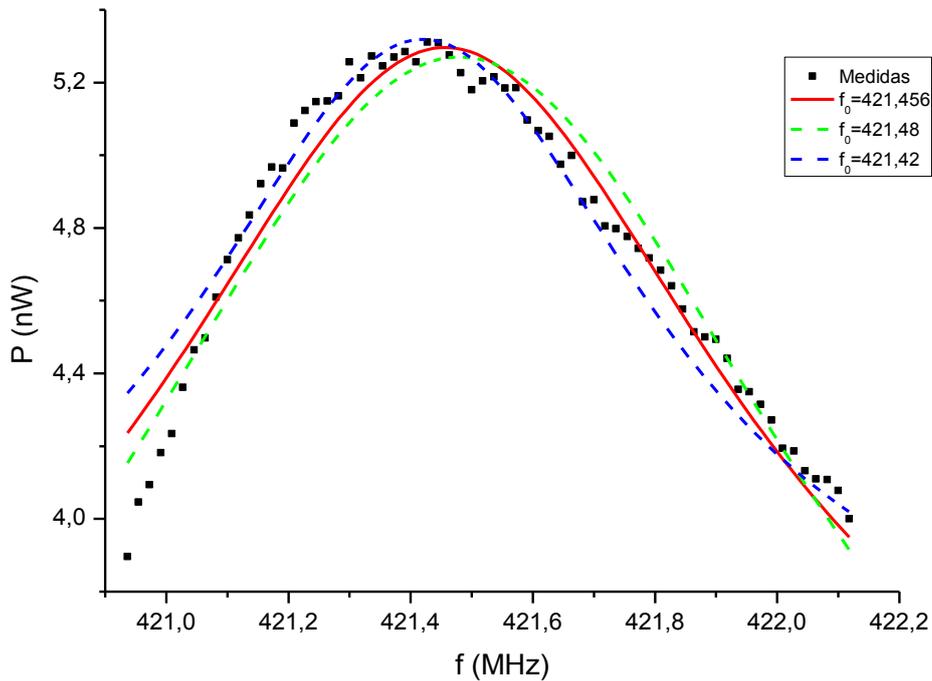


Figura 4.1.5: Datos experimentales, en negro, alrededor del pico de máxima potencia medidos con en el analizador de espectros de radiofrecuencia con $RBW=100\text{kHz}$. Se muestran tres ajustes, el mejor de todos en línea roja, en los que se ha variado el centro de la lorentziana, f_0 . Obsérvese que la potencia está en unidades de nW.

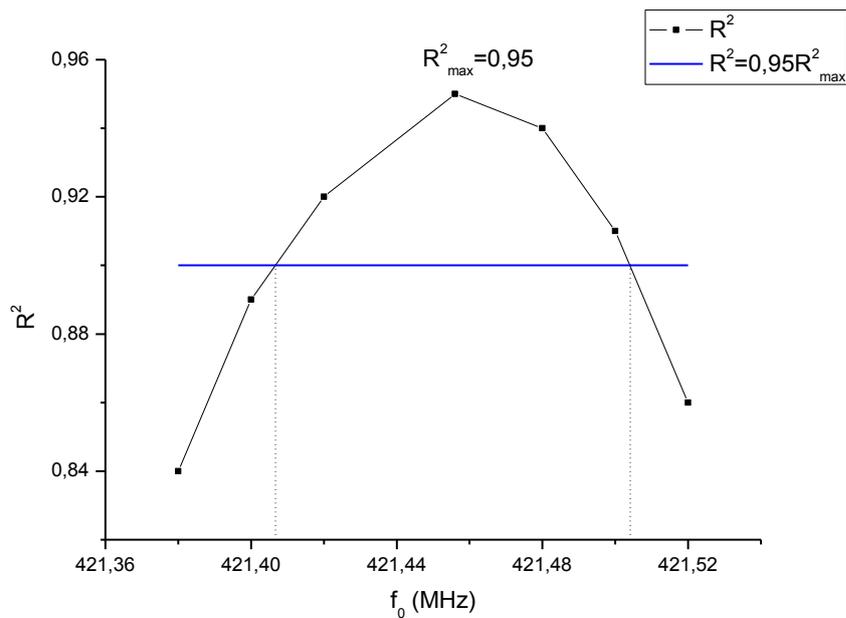


Figura 4.1.6: En negro, valores de R^2 cuando los ajustes a lorentzianas tienen de centro f_0 (Tabla 4.1.1). En azul recta $R^2 = 0.95 R^2_{max}$. Potencia medida en nW.

Con la potencia en unidades de nW el valor más preciso de $\nu_0 = 421.456\text{MHz}$ y valores de $\nu_{min} = 421.406\text{MHz}$ y $\nu_{max} = 421.504\text{MHz}$. Así se obtiene un error $\Delta\nu_{R^2} = 0.05\text{MHz}$. El error debido a la medida con el analizador con este RBW es de $\Delta\nu_{RBW} = 0.05\text{MHz}$. El error de ν_0 es el máximo, como ambos son iguales, entonces tomamos $\Delta\nu_0 = 0.05\text{MHz}$.

La medida del pico 1 con $\text{RBW}=100\text{kHz}$ nos ha permitido obtener una frecuencia de:

$$\nu_0 = (421,46 \pm 0.05)\text{MHz} \quad (\text{nW})$$

A partir de aquí, visto que las medidas de ν_0 con ambas medidas de potencia son compatibles y que se ha conseguido un menor error trabajando en nW vamos a repetir el procedimiento para el mismo pico con otro RBW y para el otro pico con ambos RBW.

Continuaremos con el análisis del pico 2 con $\text{RBW}=100\text{kHz}$ (Figura 4.1.7).

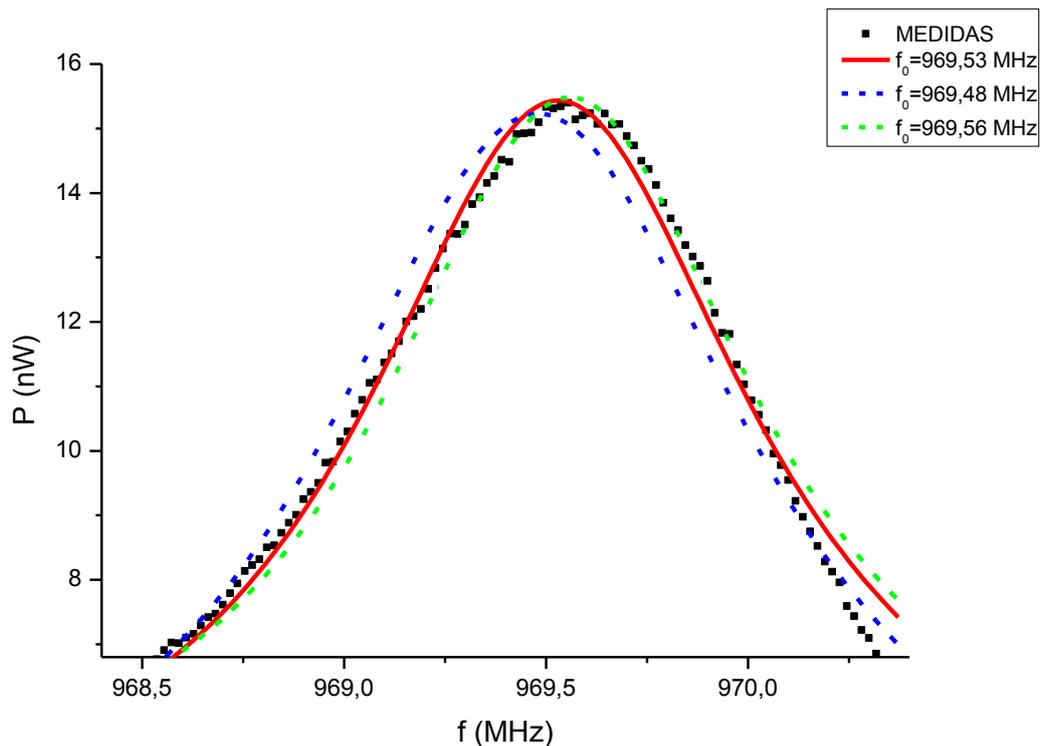


Figura 4.1.7: Datos experimentales, en negro, alrededor del pico de máxima potencia medidos con en el analizador de espectros con $\text{RBW}=100\text{kHz}$. Se muestran tres ajustes, el mejor de ellos en rojo, en los que se ha variado el centro de la lorentziana, f_0 .

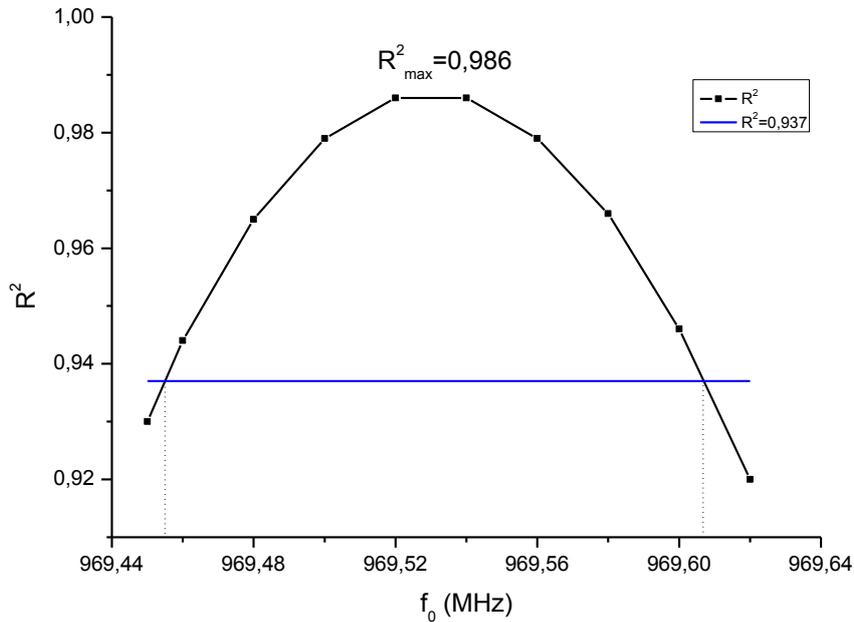


Figura 4.1.8: Valores de R^2 determinados mediante ajuste por mínimos cuadrados a lorentzianas de los datos experimentales obtenidos con el analizador de espectro de radiofrecuencia. En azul la recta $R^2=0.937$.

La mejor medida es $\nu_0 = 969,53\text{MHz}$ (Figura 4.1.7). Se obtiene $\nu_{min} = 969,455\text{MHz}$ y $\nu_{max} = 969,607\text{MHz}$ (Figura 4.1.8). Así se obtiene un error $\Delta\nu_{R^2} = 0.08\text{MHz}$. En este caso el error debido a la medida es debido al RBW; $\Delta\nu_{RBW} = 0.05\text{MHz}$. Por tanto

$$\Delta\nu_0 = \max(\Delta\nu_{R^2}, \Delta\nu_{RBW}) = 0.08\text{MHz}$$

Obtenemos una medida del pico 2 con RBW=100kHz de una frecuencia de:

$$\nu_{30} = (969,53 \pm 0.08)\text{MHz}$$

En este punto podemos hacer el cálculo de L para RBW=100KHz.

$$\nu = \frac{\nu_n - \nu_0}{n} = 18,269\text{MHz}$$

$$\Delta\nu = \frac{1}{n} \sqrt{\Delta\nu_n^2 + \Delta\nu_0^2} = \frac{1}{30} \sqrt{(0,05 \cdot 10^6)^2 + (0,08 \cdot 10^6)^2} = 3,1 \cdot 10^3\text{Hz}$$

$$\nu = (18,269 \pm 0,003)\text{MHz}$$

$$L = \frac{c_0}{n_g \nu} = \frac{3 \cdot 10^8}{1,4681 \cdot 18,269 \cdot 10^6} = 11,18538\text{m}$$

$$\Delta L = \frac{c_0}{n_g \nu^2} \Delta\nu = \frac{3 \cdot 10^8}{1,4681(18,269 \cdot 10^7)^2} \cdot 3 \cdot 10^3 = 0,0018\text{m}$$

$$L = (11.185 \pm 0.002)\text{m}$$

Repetimos el cálculo de ν_0 y ν_{30} y su error cuando RBW=30kHz.

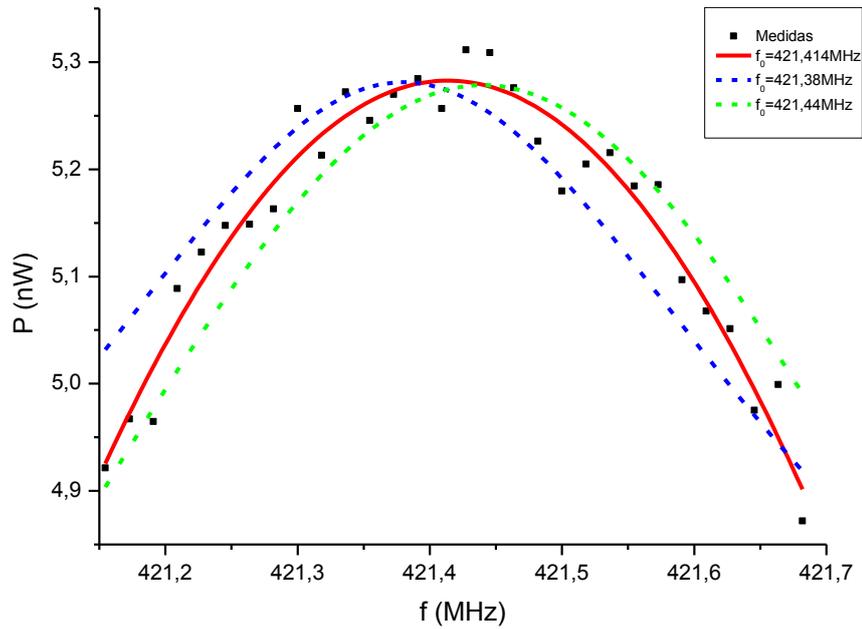


Figura 4.1.9: En negro, medidas experimentales tomadas con el analizador de espectro de radiofrecuencia en torno al pico 1 medido con un RBW=30kHz. Con líneas de colores ajustes a lorentzianas imponiendo a cada una de ellas el centro de estas f_0 .

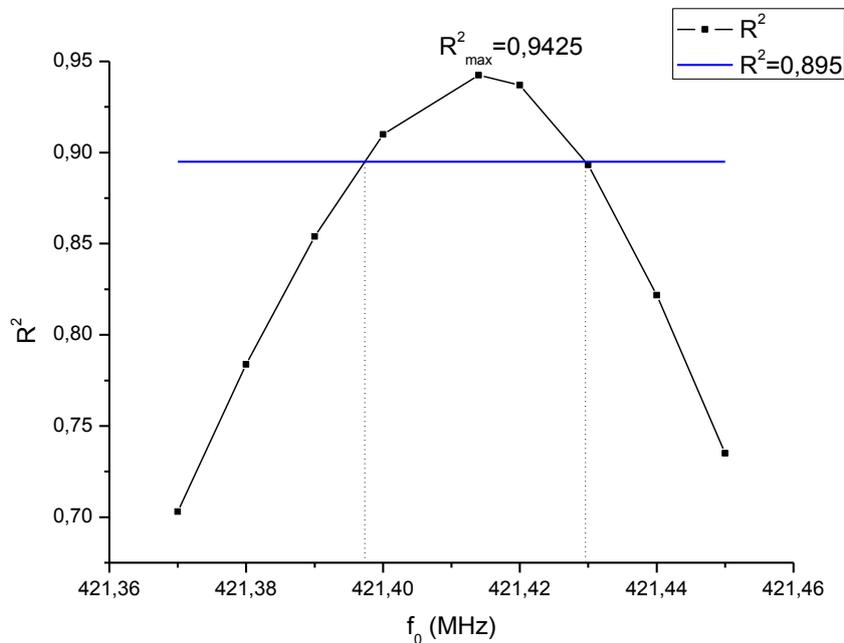


Figura 4.1.10: Valores de R^2 determinados mediante ajuste por mínimos cuadrados a lorentzianas de los datos experimentales obtenidos con el analizador de espectro de radiofrecuencia. En azul la recta $R^2=0.895$.

La mejor medida $\nu_0 = 421,414\text{MHz}$ (Figura 4.1.9). Se obtienen $\nu_{min} = 421.397\text{MHz}$ y $\nu_{max} = 421.429\text{MHz}$ (Figura 4.1.10). Así se obtiene un error $\Delta\nu_{R^2} = 0.017\text{MHz}$. En este caso el error debido al RBW es $\Delta\nu_{RBW} = 0.015\text{MHz}$. El error en la frecuencia del pico es $\Delta\nu_0 = 0.017\text{MHz}$.

Obtenemos una medida del pico 1 con $\text{RBW}=30\text{kHz}$ de una frecuencia de:

$$\nu_{30} = (421,414 \pm 0.017)\text{MHz}$$

Repetimos el procedimiento para el pico 2, en torno a $\nu_{30} = 969\text{MHz}$ y $\text{RBW}=30\text{kHz}$.

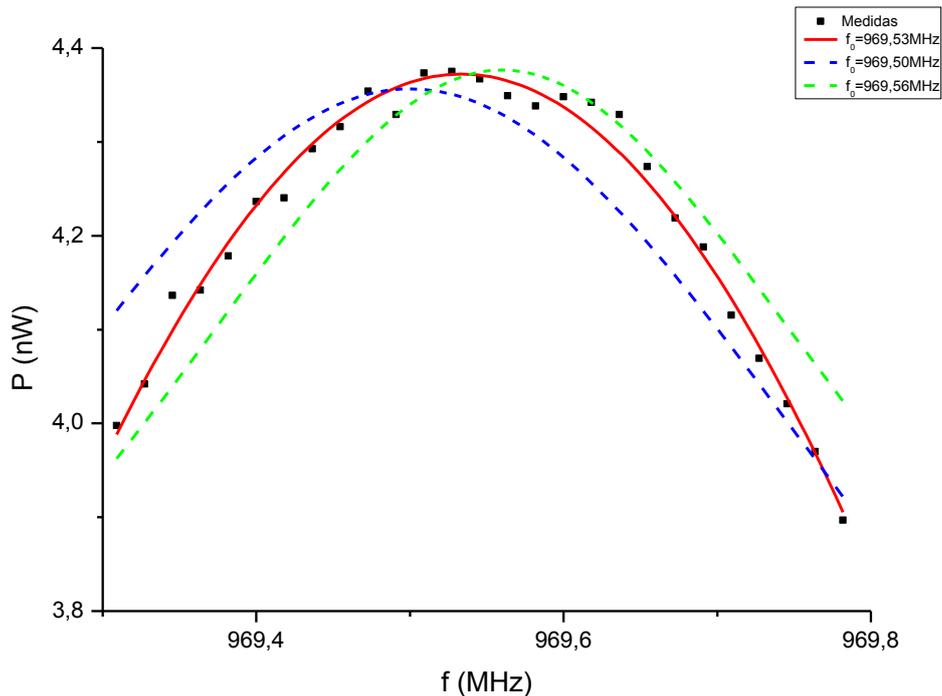


Figura 4.1.11: En negro, medidas experimentales tomadas con el analizador de espectro de radiofrecuencia en torno al pico 2 medido con un $\text{RBW}=30\text{kHz}$. Con líneas de colores ajustes a lorentzianas imponiendo a cada una de ellas el centro de estas f_0 .

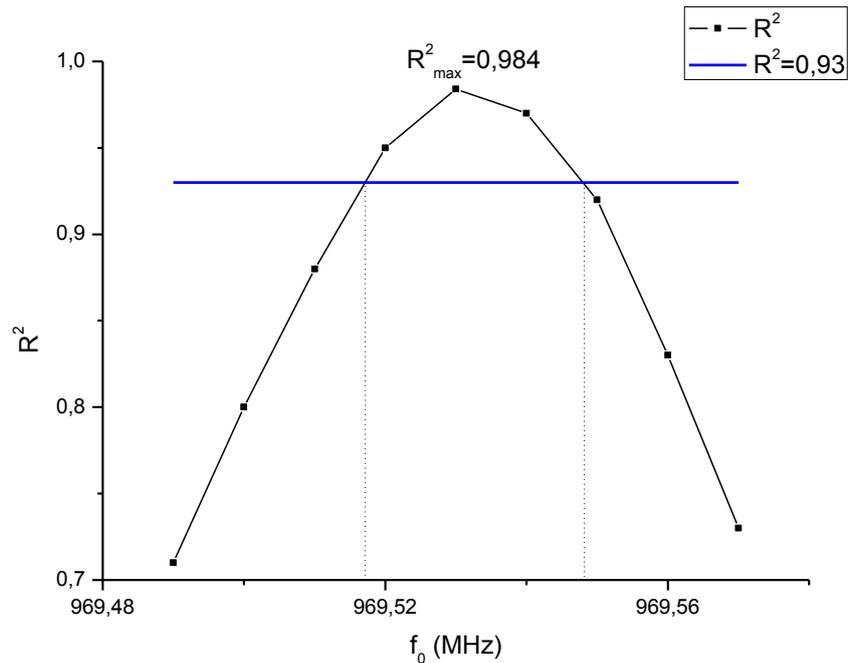


Figura 4.1.12: En negro, valores de R^2 cuando los ajustes a lorentzianas tienen centro f_0 . En azul recta $R^2=0,93$.

La mejor medida $\nu_{30} = 969,53\text{MHz}$ (Figura 4.1.11). Se obtienen $\nu_{\min} = 969,517\text{MHz}$ y $\nu_{\max} = 969,548\text{MHz}$ (Figura 4.1.12). Así se obtiene un error $\Delta\nu_{30} = 0.018\text{MHz}$. En este caso el error debido al RBW es 0.015MHz por lo que nos quedamos con el mayor de ambos.

$$\nu_{30} = (969,530 \pm 0.018)\text{MHz}$$

Se observa que este resultado de ν_0 , obtenido con $\text{RBW}=30\text{kHz}$, es compatible con el obtenido cuando hemos medido con $\text{RBW}=100\text{kHz}$.

Habiendo calculado ν_0 y ν_{30} con los errores correspondientes podemos calcular, utilizando la ecuación 3, la longitud del circuito L para el caso de $\text{RBW}=30\text{kHz}$.

$\nu_0 = (421,414 \pm 0.017)\text{MHz}$ y $\nu_{30} = (969,530 \pm 0.018)\text{MHz}$ podemos calcular la longitud de la fibra L , según la ecuación 3, de la forma más precisa:

$$\nu = \frac{\nu_n - \nu_0}{n} = 18,2705\text{MHz}$$

$$\Delta\nu = \frac{1}{n} \sqrt{\Delta\nu_n^2 + \Delta\nu_0^2} = \frac{1}{30} \sqrt{(0,018 \cdot 10^6)^2 + (0,017 \cdot 10^6)^2} = 0,825 \cdot 10^3\text{Hz}$$

$$\nu = (18,2705 \pm 0,0008)\text{MHz}$$

$$L = \frac{c_0}{n_g \nu} = \frac{3 \cdot 10^8}{1,4681 \cdot 18,2705 \cdot 10^6} = 11,18446\text{m}$$

$$\Delta L = \frac{c_0}{n_g \nu^2} \Delta\nu = \frac{3 \cdot 10^8}{1,4681(18,2705 \cdot 10^6)^2} \cdot 8 \cdot 10^2 = 0,00049\text{m}$$

$$L = (11.1845 \pm 0.0005)m$$

Se obtiene un resultado de la longitud del circuito de fibra con un error relativo:

$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{0.0005}{11.1845} = 4,47 \cdot 10^{-5}$$

Este error es menor que el obtenido con un RBW de 100 kHz, $1,79 \cdot 10^{-4}$. Se observa por tanto que el error relativo se reduce al disminuir el RBW. La disminución en el error relativo que se puede obtener reduciendo el RBW se va a ver limitada por dos factores. Por un lado, un menor RBW lleva a tener menor energía en cada pico y por tanto un pico más ruidoso con un peor ajuste a la lorentziana. Por otro lado, los métodos de medida de distancias basados en efectos interferométricos no pueden resolver longitudes menores que la mitad de la longitud de onda de la luz [7].

5 CONCLUSIONES

Este trabajo se constituye de dos partes fundamentales. Por un lado, hemos caracterizado un VCSEL. Después se ha medido la longitud de un circuito de fibra óptica que recorre un haz procedente del VCSEL mediante el cambio en el espectro inducido por el “feedback”.

La caracterización del VCSEL emitiendo a 1550nm ha seguido los siguientes pasos:

- Medida de la potencia óptica frente a corriente para diversas temperaturas. A partir de ahí se ha obtenido la corriente umbral y la eficiencia cuántica diferencial como función de la temperatura.
- Medida del espectro óptico del láser para diversas temperaturas.
- Medida de la potencia óptica emitida en cada una de las polarizaciones lineales del VCSEL, también para diferentes temperaturas.

Entre los resultados obtenidos destacamos que la eficiencia en la emisión de la luz por el láser es más alta cuando este se encuentra a bajas temperaturas emitiendo a más potencia además de disminuir la intensidad umbral. Se ha demostrado que la longitud de onda de emisión del láser crece linealmente con la temperatura. Se ha identificado el fenómeno de rotación de la polarización o “switching” de polarización a diferentes temperaturas, relacionándolo con los espectros ópticos medidos.

En la segunda parte de este trabajo se ha implementado un circuito óptico para conseguir el fenómeno de feedback y con ello observar un comportamiento caótico en el espectro de radiofrecuencia de la luz láser resultante. Gracias a la forma de este espectro hemos calculado la distancia que recorre la luz en ese circuito de fibra. A partir de este espectro se ha medido el rango espectral libre del resonador. Se ha empleado un programa de análisis de datos que nos ha permitido ajustar los datos obtenidos para la potencia en función de la frecuencia a diferentes lorentzianas, mostrándonos a su vez el coeficiente de regresión R^2 . Así mediante el procedimiento detallado en el capítulo 4 se ha determinado la longitud del circuito de fibra con una longitud $L = (11.1845 \pm 0.0005)m$ con un error relativo de $4,5 \cdot 10^{-5}$.

Por último, decir que a título personal este trabajo me ha servido para estudiar y comprender el comportamiento de los láseres, en particular del VCSEL. Además, me ha permitido desenvolverme en el campo de la fotónica/optoelectrónica, trabajando y midiendo con instrumentos típicos en este campo y poniendo en práctica conceptos que se han ido aprendiendo a lo largo del grado en física, todos estos aplicados a un dispositivo optoelectrónico, como es el VCSEL, de alto interés en la investigación en la actualidad por sus ventajas frente a otros dispositivos similares.

6 BIBLIOGRAFÍA

- 1- B.E.A. Saleh, M. C. Teich, *Fundamentals of Photonics*, John Wiley Sons, 1991.
- 2- W. Silfvast, *Laser Fundamentals.*, Cambridge University Press, 1996
- 3- J. Verdeyen, *Laser Electronics*. Prentice Hall , 1995
- 4- Jose María Albella y Jose Manuel Martínez-Duart, *Fundamentos de electrónica Física y Microelectrónica*,
- 5- F. Koyama, "Recent advances of VCSEL Photonics", *IEEE Journal of Lightwave Technology*, Vol. 24, no. 12, pp. 4502-4513, 2006
- 6- M.R. Park, O.K. Kwon, W.S. Han, K.H. Lee, S.J. Park y B.S. Yoo, "All-monolithic 1.55 μ m InAlGaAs/InP vertical cavity surface emitting lasers grown by metal organic chemical vapor deposition", *Japanese journal of applied physics*, vol. 45, no. 1L, p. L8, 2005.
- 7- S. Donati, "Developing self-mixing interferometry for instrumentation and measurements", *Laser Photonics Rev.* 1-25, 2011.
- 8- *Tecnología de dispositivos WDM*. Pablo Villarroel, Pedro Rojas.
<http://slideplayer.es/slide/2727344/#>
- 9- A. Quirce, A. Valle, L. Pesquera, H. Thienpont, K. Panajotov, "Measurement of temperatura-dependent polarization parameters in long-wavelength VCSELs", *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* Vol. 21, no. 6, art. 1800207, 2015.
- 10- P. Pérez, A. Valle, I. Noriega, L. Pesquera, "Measurement of the intrinsic parameters of single-mode VCSELs", vol. 32, no. 8, pp. 1601-1607, 2014.
- 11- H. Lin, Z. J. Lapin, B. Malla, A. Valle, "Polarization dynamics in multitransverse mode VCSEL subject to optical feedback", *Phys. Rev A* 77, art. 033813, 2008.
- 12- J.R. Taylor, "Error analysis" Univ. Science Books, Sansalito, California, 1997