



*Facultad
de
Ciencias*

Dinámica de Láseres de Semiconductor Sometidos a Retroalimentación Óptica

**(Dynamics of Semiconductor Lasers Subject to Optical
Feedback)**

Trabajo de Fin de Grado

para acceder al

GRADO EN FÍSICA

Autor: Saúl Estandía Rodríguez

Tutor: Ángel Valle Gutiérrez

Julio-2015

-Índice de Contenidos-

Resumen.....	4
Abstract	5
1. Introducción	7
1.1 Láseres de semiconductor.....	7
1.2 Características y aplicaciones de los VCSEL.....	9
1.3 Dinámica no lineal.....	11
1.4 Retroalimentación óptica en láseres de semiconductor.....	12
1.5 Objetivos.....	13
2. Montaje y Dispositivo Experimental	15
2.1 Elementos del Bucle de Fibra.....	15
2.1.1 Fibra Óptica	15
2.1.2 Circulador Óptico	16
2.1.3 Conexiones	16
2.1.4 Controlador de Polarización	17
2.1.5 Divisor de Haz 50/50	17
2.1.6 Amplificador y Atenuador	17
2.1.7 VCSEL	18
2.2 Aparatos de Medida.....	18
2.2.1 Fotodetector	19
2.2.2 Analizador de Espectros Ópticos	19
2.2.3 Analizador de Espectros de Radiofrecuencia	19
2.2.4 Osciloscopio	19
2.2.5 Medidor de potencia óptica	20
2.3 Montaje Experimental.....	20
3. Dinámica de VCSELs en Emisión Libre	23
3.1 VCSEL Monomodo en Emisión Libre.....	23
3.1.1 Switching de polarización	24
3.1.2 Oscilaciones de relajación	27
3.2 VCSEL Multimodo en Emisión Libre.....	29
4. Dinámica de VCSELs Sometidos a Retroalimentación Óptica	31
4.1 VCSEL Monomodo Sometido a Retroalimentación Óptica.....	31

4.1.1 Control de la polarización	31
4.1.2 Caracterización bajo retroalimentación óptica	33
4.1.4 Influencia de la intensidad de la retroalimentación	39
4.2 VCSEL Multimodo Sometido a Retroalimentación Óptica.....	40
5. Conclusiones	45
-Apéndice I	46
-Referencias	49

-Resumen-

Los láseres de semiconductor son muy apreciados comercialmente por sus excelentes prestaciones, bajo consumo, facilidad de miniaturización, altas frecuencias de modulación, etc. Además, los láseres de semiconductor pueden presentar un comportamiento que les confiere especial interés: la emisión caótica. Este tipo de emisión aparece frecuentemente al reinyectar pequeñas cantidades de luz (retroalimentación óptica) en láseres de semiconductor. La emisión caótica presenta una gran riqueza en cuanto a comportamientos y está relacionada con un sinnúmero de sistemas complejos que aparecen en la naturaleza por lo que su comprensión es de gran interés científico.

En este trabajo experimental nos centramos en el estudio de la dinámica de emisión caótica de luz por dos láseres de semiconductor de emisión vertical (VCSEL), uno de ellos de tipo monomodo y el otro de tipo multimodo al ser sometidos a retroalimentación óptica. Otro de los puntos de interés de este trabajo se centra en comprender y aprender a tratar con el efecto de la utilización de fibra óptica como guía de luz en los experimentos de láseres de semiconductor sometidos a retroalimentación óptica. La utilización de fibra óptica en este tipo de caracterizaciones es poco común, a diferencia del estudio de la emisión caótica por láseres de semiconductor sometidos a retroalimentación óptica mediante luz transmitida por el aire. Esta última variante está mucho más extendida y por tanto es más común en la bibliografía.

La memoria se divide en cuatro partes, en la primera se presenta una introducción con los conceptos clave para comprender los resultados y dinámicas que se presentan a lo largo del trabajo. En la segunda parte se presenta el dispositivo experimental usado así como el montaje experimental utilizado para estudiar la emisión caótica. En la tercera parte se realiza una caracterización de la dinámica de ambos láseres en emisión libre, es decir, sin retroalimentación óptica para más tarde poder observar las variaciones que esta produce. Finalmente, se presenta la caracterización de la emisión de ambos láseres sometidos a retroalimentación óptica analizando los principales cambios que se producen respecto a la emisión libre.

Algunos de los resultados obtenidos más destacados son los siguientes:

- En el VCSEL monomodo se encuentra emisión caótica en ambos modos de polarización lineal. A valores de corriente ligeramente por encima de la corriente umbral y bajo retroalimentación óptica se observan fluctuaciones de baja frecuencia, de 0 a 300 MHz.
- En el VCSEL multimodo se encuentra emisión caótica en los dos modos transversales en los que emite en regiones de corriente más amplias que en el VCSEL monomodo.

Palabras clave: VCSEL, láser de semiconductor, retroalimentación, caos.

-Abstract-

The semiconductor lasers are very appreciated because of their excellent performances, low consumption, ease to be miniaturized, high frequency modulation, etc. Furthermore, semiconductor lasers can show a behaviour that provides them a special interest: the chaotic emission. This kind of emission usually appears when reintroducing small quantities of light in semiconductor lasers. The chaotic emission has a broad spectrum of behaviours and it is related with a lot of complex systems appearing in the nature, so its understanding is very interesting for the science.

In this experimental work, we focus in the study of the chaotic emission of light by two semiconductor lasers, which are of the type VCSEL (“Vertical Cavity Surface Emitting Lasers”), one of them monomode and the other multimode, when they are working under optical feedback. Another point of interest of this work is related with the understanding of the use of optical fibers as light guide in the experiments of the emission of semiconductor lasers under optical feedback. The use of optical fibers in these kind of characterizations is not usual, instead of the study of the chaotic emission of semiconductor lasers under optical feedback of light transmitted by the air. This last option is much more extended and consequently more common in the bibliography.

The memory is divided in four parts, in the first one an introduction with the key concepts required to understand the results and dynamics that appears along the memory is showed. In the second part, the experimental devices as well as the experimental setup used for the study of the chaotic emission is showed. In the third part a characterization of the dynamics of both lasers in free emission appears, it means, without optical feedback. Finally, the characterization of the emission of both semiconductor lasers under optical feedback is performed, analyzing the main observed changes related to the free emission.

Some of the most important obtained results are the following:

- In the monomode VCSEL we found chaotic emission in both linear polarization modes. In a value of current slightly above the threshold and under optical feedback we observed low frequency fluctuations, from 0 to 300 MHz values.
- In the multimode VCSEL we found chaotic emission in both transverse modes which the laser emits, in a larger region than the monomode.

Key words: VCSEL, semiconductor laser, feedback, chaos.

Capítulo 1- Introducción

1.1 Láseres de semiconductor

Un láser (por sus siglas en inglés “Light Amplified by Stimulated Emission”) está formado por una cavidad resonadora y un material llamado medio activo que es capaz de amplificar una señal óptica bajo ciertas condiciones. En el caso de los láseres de semiconductor este material es un cristal semiconductor al que se le ha dopado con huecos por una zona (zona p) y con electrones por otra (zona n) , obteniendo así la conocida unión p-n, o lo que es lo mismo, un diodo de semiconductor. Frecuentemente, la cavidad resonadora o espejos se obtiene mediante el pulido del cristal semiconductor del que está hecho el medio activo, lo que aumenta significativamente su reflectividad. Las recombinaciones en un material semiconductor pueden ocurrir en un rango continuo de energías debido a la estructura de bandas presente en materiales de este tipo, así el material puede producir fotones en un rango continuo de energías, a diferencia de los fotones con energías discretas producidos en transiciones de átomos solitarios. El medio activo puede ser excitado de tal manera que cuando un fotón de una determinada longitud de onda viaja por el medio activo tenga más probabilidad de inducir una emisión estimulada que de ser absorbido. Cuando se está en estas condiciones la estadística dispone que una señal óptica de la misma frecuencia que la del fotón considerado atravesando el medio activo verá amplificada su intensidad. Para alcanzar tales condiciones se ha de aportar energía externamente, normalmente esto se consigue inyectando una corriente eléctrica en el material (inyección de portadores de carga), aunque también es posible usar una señal óptica para excitar el material. Estas condiciones que propician o no la emisión estimulada se resumen en la llamada curva de ganancia, la cual depende de la longitud de onda, de la intensidad del bombeo, de la temperatura, etc. La curva de ganancia establece un valor de intensidad umbral para que el láser emita debido a que a valores muy bajos de corriente la curva de ganancia está por debajo del valor mínimo requerido. De las frecuencias permitidas por la curva de ganancia sólo aquellas resonantes con la cavidad láser aparecerán en el espectro óptico del láser, teniendo estas una cierta anchura espectral debido a que uno de los espejos del resonador tiene una reflectividad ligeramente menor que 1 para dejar salir una cierta cantidad de luz. Estas frecuencias discretas permitidas son los llamados modos del resonador, existiendo modos longitudinales a la cavidad y modos transversales a esta. Finalmente obtenemos la situación que se representa en la figura 1.1.

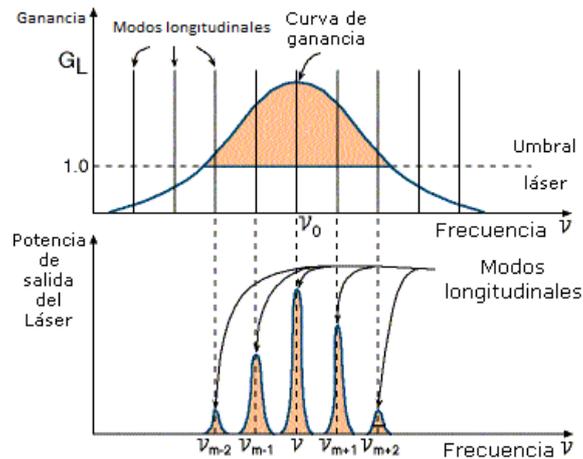


Figura 1.1. Esquema del espectro de ganancia de un medio láser junto a los modos permitidos por el resonador.

Atendiendo a la geometría de los láseres de semiconductor es posible clasificarlos en dos grandes grupos: láseres de emisión lateral y láseres de emisión vertical (VCSEL). Los láseres de emisión vertical emiten luz en dirección perpendicular al plano que forma el medio activo, mientras que los láseres de emisión lateral emiten en dirección paralela [1]. Como se muestra en la figura 1.1, el resonador permite ciertos modos que dependen básicamente del tiempo de viaje del fotón en la cavidad, estando en ello involucrado la velocidad de la luz en el medio $\frac{c}{n}$, donde n es el índice de refracción del medio y c la velocidad de la luz en el vacío, así como la longitud de la cavidad y la frecuencia de la luz, de lo que es posible obtener la ecuación 1.1, en la que aparecen las frecuencias ν permitidas por el resonador:

$$\nu = \frac{qc}{2nL} \quad (1.1)$$

, donde q es un número entero positivo. A partir de esta ecuación es fácil comprobar que el rango espectral libre, es decir, el espaciamiento entre dos frecuencias permitidas consecutivas es: $\Delta\nu = \frac{c}{2nL}$.

La dinámica de la emisión de luz en láseres de semiconductor viene descrita por las ecuaciones de balance (ecuaciones 1.2), en ellas se describe matemáticamente el equilibrio entre el número de fotones P y el número de portadores N .

$$\begin{cases} \frac{dP}{dt} = a(N - N_t)P - \frac{P}{\tau_p} + \beta \cdot N \\ \frac{dN}{dt} = \frac{I}{e} - \frac{N}{\tau_n} - a \cdot (N - N_t) \cdot P \end{cases} \quad (1.2)$$

, donde τ_p es el tiempo de vida media de los fotones en el medio láser y τ_n el de los portadores. El parámetro a representa la ganancia diferencial y β la probabilidad por unidad de tiempo de que un portador produzca una emisión espontánea. I es la intensidad de corriente inyectada en el láser y e es la carga del electrón. Por otra parte,

el término $N-N_t$ representa el número de portadores por encima de la transparencia. La transparencia hace referencia a las condiciones en las que el número de absorciones iguala al de emisiones estimuladas. El valor es algo menor que el umbral. Muchos de estos parámetros que marcan la dinámica del láser son sensibles a distintas variables, entre ellas la temperatura, la polarización de la luz o la intensidad. Además, como en cualquier sistema físico, existe ruido, al que son especialmente sensibles los láseres de semiconductor.

1.2 Características y aplicaciones de los VCSEL

Un VCSEL, por sus siglas en inglés “Vertical Cavity Surface Emitting Laser” (láser de emisión superficial de cavidad vertical), o como se le conoce en castellano: láser de emisión vertical, es un diodo semiconductor de geometría cilíndrica que emite luz en dirección perpendicular al plano del medio activo, como se puede apreciar en la figura 1.2.

- Características Generales y Aplicaciones

Con un ancho espectral del orden del MHz los VCSEL pueden emitir en longitudes de onda desde los 400 nm a los 2000 nm [2]. Debido a las altas frecuencias de modulación que se pueden alcanzar en VCSELS éstos resultan útiles para comunicaciones ópticas, en las que se precisa una alta frecuencia de emisión de pulsos de luz. Además presentan ventajas como un bajo consumo energético y una baja corriente umbral (del orden de miliamperios). La eficiencia es alta comparada con otros tipos de láseres. Una desventaja sería el hecho de que su potencia es limitada (del orden del miliwatio), sin embargo se pueden colocar varios centenares de VCSELS en arrays bidimensionales generando potencias mucho mayores. Los costes de producción son reducidos, además existe la posibilidad de probar el funcionamiento del láser en la oblea de la que se obtienen, evitando así la producción de VCSELS inservibles. Este control no es posible en los láseres de emisión lateral. Por otra parte presentan un buen acoplamiento a fibra óptica debido a la simetría cilíndrica de la cavidad láser, lo que reduce las pérdidas. El haz circular junto con la baja divergencia de éste, eliminan la necesidad de óptica correctiva. Las aplicaciones de los VCSELS cubren un amplio dominio, siendo algunas de las principales las siguientes:

- Almacenamiento de datos
- Relojes ópticos para GPSs
- Ratones ópticos
- Comunicaciones ópticas, principalmente en sistemas de comunicaciones de alta velocidad en redes de área local y de media distancia. Actualmente, el rango de velocidad en transmisión de datos va de los 100 Mbs a los 50 Gbs.
- Interconectores ópticos.

Se prevé que en el futuro aumente el número de aplicaciones de los VCSELs, de las cuales algunas de las posibles son:

- Comunicaciones en el espacio libre.
- Computación óptica.
- Impresoras.

Además, los láseres de semiconductor en general, y los VCSELs en particular poseen características que los presentan como candidatos para la producción ultra-rápida de números aleatorios (ver sección 1.4), además de otras aplicaciones.

-Características geométricas y de composición

El funcionamiento de un VCSEL viene determinado por su composición química y su geometría. El medio activo posee una doble heteroestructura que permite confinar a los portadores de carga (electrones) y a la luz en pequeñas dimensiones. De esta forma, al aumentar la densidad de corriente se consigue la suficiente inversión de población para emitir luz láser utilizando corrientes pequeñas. Si las dimensiones de la doble heteroestructura son lo suficientemente pequeñas (del orden de nm) estamos ante un pozo cuántico. El material del que están formados los VCSELs varía, siendo GaAs (arseniuro de galio) y InGaAs (arseniuro de indio y galio) de los más usados. También se usa InGaAsP (arseniuro fosforo de indio y galio) y fosforo de indio (InP). Los espejos en los VCSEL se llaman reflectores de Bragg distribuidos (DBR), ya que son capas alternas con distinto índice de refracción que dotan al VCSEL de una reflectividad del 99,5% aproximadamente. Las dimensiones de estas capas guardan una estrecha relación para que se produzcan interferencias constructivas. Su espesor debe de ser $\lambda/4n$, donde n es el índice de refracción de cada capa. Una de las principales diferencias con los láseres de emisión lateral es la diferencia en el tamaño del resonador, mucho menor en los VCSEL. Esto permite obtener VCSELs de emisión en un sólo modo, debido al mayor espaciamiento entre modos longitudinales, de acuerdo a la ecuación 1.1. Además el menor tiempo de viaje del fotón implica, entre otras cosas, que el VCSEL pueda ser modulado a frecuencias mucho mayores que los láseres de emisión lateral.

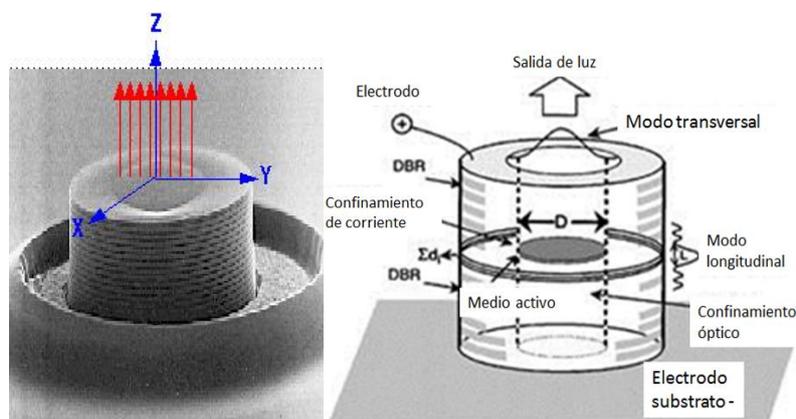


Figura 1.2. A la izquierda, fotografía de un VCSEL, a la derecha, esquema de un VCSEL con sus distintas partes indicadas.

1.3 Dinámica no lineal

La dinámica no lineal estudia el comportamiento de sistemas que presentan un comportamiento aparentemente desordenado o aleatorio, pero que sin embargo esconden una dinámica determinista. Es lo que se llama caos determinista o simplemente caos [3]. Dentro de los sistemas no lineales aparecen los sistemas con comportamientos caóticos. Antes de la aparición de las teorías del caos este tipo de comportamientos se trataban de explicar argumentando que el sistema tenía ruido o que dependía de un gran número de parámetros, sin embargo se ha demostrado que es posible conseguir caos con sistemas sencillos y que dependen de pocas variables (ejemplo: péndulo doble). A diferencia del cambio gradual de las soluciones que se observa en un sistema lineal al variar el valor de un parámetro, en un sistema caótico estas pueden cambiar bruscamente; este valor al que la solución del sistema varía bruscamente se le conoce como bifurcación. Los sistemas caóticos tienen una gran sensibilidad a las condiciones iniciales, lo que produce una de las características más notables de los sistemas no lineales, la divergencia de trayectorias cercanas. Esto significa que un sistema caótico con unas determinadas condiciones iniciales evolucionará de manera muy distinta que el mismo sistema con unas condiciones ligeramente distintas. Por tanto, y dado que nunca se puede conocer perfectamente el estado inicial de un sistema, la evolución temporal de un sistema caótico no se puede predecir a tiempos largos. Por esto, el estudio de la influencia de pequeñas variaciones de las condiciones iniciales de un sistema es de vital importancia.

Un ejemplo bastante conocido, y que marcó el inicio de las teorías del caos es el modelo de Lorenz aplicado a la atmósfera. En 1963 Lorenz había desarrollado un modelo simple para describir la dinámica de fluidos. Con ayuda de un ordenador resolvió numéricamente las ecuaciones de dicho modelo encontrando que estas dependían fuertemente de las condiciones iniciales. A valores bajos del tiempo dos sistemas con condiciones muy similares evolucionaban de manera muy similar hasta que de repente a valores más altos del tiempo el comportamiento tomaba valores completamente distintos. Se dice que el comportamiento de ambos sistemas diverge exponencialmente. Así, con el modelo de Lorenz se introdujeron los primeros conceptos en que se basa la descripción de la dinámica caótica.

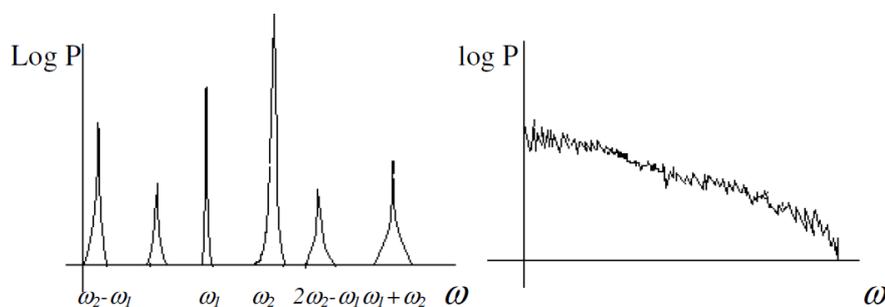


Figura 1.3. A la izquierda se muestra el espectro de potencias de un sistema cuasi-periódico, a la derecha se muestra el espectro de potencias de un sistema con muy baja periodicidad.

Un primer indicador de dinámica caótica determinista en un sistema es la evolución temporal aperiódica e irregular. Esto tendrá un claro efecto en el espectro de frecuencias (ver figura 1.3). Si el sistema evoluciona con cierta periodicidad se observarán picos en el espectro de potencias a las frecuencias correspondientes con dicha periodicidad. Por lo tanto un segundo indicador del tipo de dinámica de un sistema puede encontrarse en el espectro de frecuencias, siendo los espectros anchos un posible indicador de dinámica caótica. Una especial sensibilidad del sistema a las condiciones iniciales confirmaría este tipo de dinámica.

1.4 Retroalimentación óptica en láseres de semiconductor

Los láseres de semiconductor presentan una dinámica estable cuando operan como dispositivos aislados sometidos a una corriente constante. Sin embargo, una de las propiedades más importantes de los láseres de semiconductor viene dada por la facilidad con la que estos alcanzan una dinámica de emisión caótica (ver referencia [4]). La reinyección de luz en la cavidad láser, llamada retroalimentación óptica o feedback óptico, o la modulación de la intensidad de corriente pueden provocar una desestabilización en la emisión, dando lugar a una dinámica de caos determinista. En este trabajo nos centramos en el estudio de la dinámica caótica inducida por retroalimentación óptica. Esta dinámica puede ser alcanzada con pequeñas cantidades de luz. Dependiendo de los valores de los parámetros que definen al sistema como la intensidad de corriente, la temperatura, la corriente umbral, se encontrará o no dinámica caótica, además la dinámica vendrá fuertemente condicionada por el montaje experimental utilizado. Históricamente, la dinámica caótica producida por reflexiones representó un problema en la tecnología que necesitaba una emisión de luz láser estable. Una de las primeras soluciones para este problema pasaba por el uso de aislantes ópticos que eliminaran la luz reflejada. El funcionamiento de estos aislantes se basa en el efecto de rotación de la polarización de Faraday junto al uso de polarizadores lineales. Sin embargo el uso de aislantes ópticos plantea problemas como el diseño de elementos miniaturizados, además de elevar los costes de producción. La dinámica caótica producida por retroalimentación óptica fue estudiada por primera vez a raíz de dichos problemas. Actualmente se plantea una visión positiva acerca de la dinámica caótica en láseres de semiconductor, ya que estos se presentan como candidatos para el desarrollo de nuevas aplicaciones, como la producción de alta velocidad de números aleatorios, o comunicaciones con encriptación caótica. La emisión caótica presenta una gran riqueza en cuanto a comportamientos y se relaciona con un sinfín de sistemas complejos que aparecen en la naturaleza por lo que su comprensión es de gran interés científico. Los cambios más destacables producidos por el feedback óptico en la emisión de láseres de semiconductor son los siguientes:

- Reducción del umbral de emisión: se ha observado que los láseres de semiconductor bajo retroalimentación óptica empiezan a emitir luz láser a corrientes menores.
- Desestabilización de la potencia emitida: la potencia emitida por el láser se puede volver inestable presentando una dinámica caótica.
- Ensanchamiento de los espectros: la intensidad de la luz emitida se aleja aún más de la periodicidad, es decir se vuelve menos periódica obteniéndose espectros más planos. Este efecto afecta tanto a los espectros ópticos como a los espectros de potencia.

El ensanchamiento de los espectros junto a la desestabilización de la potencia emitida se conoce como colapso de coherencia.

1.5 Objetivos

En este trabajo experimental se pretende caracterizar la emisión de dos láseres de semiconductor de tipo VCSEL, uno monomodo y otro multimodo. Para ello se obtendrán las magnitudes y parámetros que caracterizan la emisión de estos y se estudiarán las distintas dinámicas que puedan presentar. En particular, y siendo el principal objetivo de este trabajo se pretende estudiar la emisión caótica determinista en láseres de semiconductor de tipo VCSEL al ser sometidos a retroalimentación óptica. Otro de los puntos de interés de gran importancia se centra en comprender y aprender a tratar con el efecto de la utilización de fibra óptica como guía de la luz en lugar de someter al láser a retroalimentación óptica de luz transmitida por el aire. Esta peculiaridad plantea una cierta problemática que está ligada al control de la polarización de la luz y que puede tener efectos en los resultados obtenidos. Como objetivo general del trabajo está la toma de contacto con el trabajo experimental en el ámbito de la fotónica, lo que incluye la familiarización con los distintos instrumentos y montaje experimental, así como con los procedimientos seguidos para obtener y realizar el análisis de los datos.

Capítulo 2- Montaje y Dispositivo Experimental

En este capítulo se presentan los elementos utilizados en el montaje experimental explicando su función, así como ciertas características de éstos que pueden resultar relevantes para comprender algunos resultados del experimento. Finalmente, se presenta el montaje experimental en su conjunto.

2.1 Elementos del Bucle de Fibra

En esta sección se presentan los elementos que intervienen en la emisión del láser, bien por actuar directamente sobre éste o por formar parte del bucle de fibra destinado a la retroalimentación óptica.

2.1.1 Fibra Óptica

La fibra óptica es una guía de ondas electromagnéticas que se utiliza para dirigir luz a cualquier punto deseado, su funcionamiento se basa en el principio de reflexión total interna existente cuando la luz va de un medio a otro medio de menor índice de refracción.

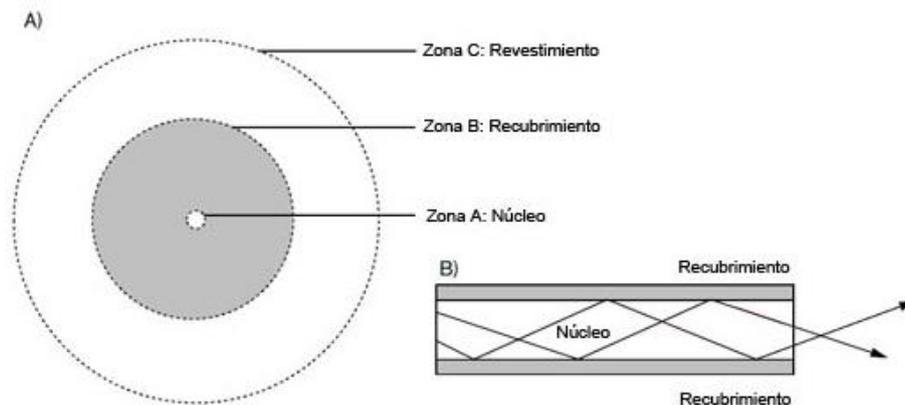


Figura 2.1. Esquema de la sección transversal de una fibra óptica (A) y de la sección lateral (B).

Dependiendo principalmente del diámetro se distingue entre fibras multimodo y monomodo, siendo las multimodo de mayor diámetro y permitiendo así que varios modos además del modo fundamental se propaguen a través de ella. Un modo es una solución monocromática a las ecuaciones de Maxwell en el interior de la fibra. En las fibras monomodo sólo se propagará el modo fundamental ya que es el único modo que es solución a las ecuaciones de Maxwell en el medio, este hecho se relaciona con la

distribución espacial de energía que presenta el modo fundamental. El núcleo de las fibras monomodo tienen un diámetro típico de unas 8 micras. En este trabajo el montaje experimental se ha utilizado fibra monomodo en todo momento excepto a la salida del VCSEL multimodo, debido a que este viene integrado en dicha fibra de fábrica. La fibra utilizada está hecha para dirigir luz de longitudes de onda próximas a 1550 nm existiendo pérdidas de intensidad muy pequeñas en longitudes de onda en torno a este valor. Uno de los inconvenientes al trabajar con luz guiada por fibra óptica es la distorsión que esta produce en la polarización, de modo que al inyectar luz polarizada linealmente a la salida se obtendrá polarización elíptica, que es el caso más general de polarización. Esta distorsión de la polarización se debe a birrefringencias, producidas por anisotropías en el material de la fibra. Las anisotropías aparecen simplemente por tensiones existentes en la fibra, las cuales pueden cambiar al mover la fibra, también aparecen por defectos de fabricación, etc. Otros efectos de la fibra son la atenuación y la dispersión. La dispersión se divide en dos tipos: la dispersión intermodal, que aparece en fibras multimodo y se debe al distinto tiempo empleado en el viaje entre los distintos modos. El otro tipo de dispersión es la dispersión material, la cual aparece en fibras monomodo y multimodo, este tipo de dispersión se debe a la dependencia del índice de refracción con la longitud de onda, lo que provoca velocidades distintas para fotones de distinta longitud de onda.

2.1.2 Circulador Óptico

Se trata de un dispositivo de tres puertos que sirve para controlar el sentido de viaje de la luz, permite el viaje de 1 a 2 y de 2 a 3 , en sentido inverso permite el paso de una cantidad muy pequeña de luz (ver figura 2.8).

2.1.3 Conexiones

Para conectar dos fibras ópticas se han usado dos tipos de conexiones, conexiones de tipo PC (polished connector) y de tipo APC (angled polished connector), como se puede observar en la figura 2.2. En estas conexiones siempre se refleja una pequeña parte de la luz incidente, siendo éstas reflexiones menores en las conexiones de tipo APC debido al ángulo no recto en que acaba la fibra.

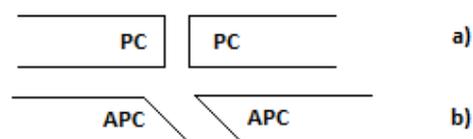


Figura2.2. Esquema de los dos tipos conexiones utilizadas, PC en a) y APC en b).

2.1.4 Controlador de Polarización

Permite convertir cualquier tipo de polarización de entrada en cualquier otro tipo de polarización a la salida siendo por tanto muy útil para controlar la polarización de la luz que sale de un bucle de fibra óptica. Se compone de tres láminas que se pueden rotar formando la combinación que produce la polarización deseada, las láminas exteriores son láminas retardadoras $\lambda/4$, mientras que la central es $\lambda/2$.



Figura 2.3. Fotografía de un controlador de polarización igual que el utilizado, se pueden apreciar las tres ruedas correspondientes a los $\lambda/4$ y al $\lambda/2$.

2.1.5 Divisor de Haz 50/50

Este dispositivo viene integrado en las fibras ópticas y su función consiste en dividir el haz incidente en dos haces de igual intensidad entre ellos y de la mitad que el incidente.

2.1.6 Amplificador y Atenuador

Estos dispositivos amplifican o atenúan una señal luminosa que viaje por su interior. El amplificador utilizado permite controlar la intensidad a la que se somete la fibra dopada con erbio en la que se basa el mecanismo de amplificación. Por lo tanto con el amplificador se controla el nivel de amplificación a partir de la corriente de amplificación aplicada a la fibra de erbio con una precisión de 1 mA. Con el atenuador utilizado es posible controlar la atenuación directamente sobre el valor de potencia óptica con una precisión de 0,01 dB.

2.1.7 Controladores de Intensidad y Temperatura

Los controladores de temperatura e intensidad de corriente nos permiten fijar y medir dichas magnitudes físicas en el VCSEL. El controlador de temperatura hace circular corriente eléctrica en un sentido o en el inverso para aumentar o disminuir la temperatura, la regulación de temperatura se basa en el efecto Peltier con una precisión de hasta 0,01°C. El controlador de corriente posee una precisión de hasta 0,01 mA.



Figura 2.4. Fotografía del controlador de temperatura (parte inferior) junto al controlador de corriente (parte superior).

2.1.8 VCSEL

En este trabajo se ha usado un VCSEL de tipo monomodo y otro de tipo multimodo, ambos son VCSELS de tipo comercial fabricados por la compañía RayCan. El láser monomodo emite en un solo modo de longitud de onda alrededor de 1540 nm. El VCSEL multimodo emite en dos modos transversales de longitud de onda en torno a 1560 nm con una separación típica intermodal de ~ 2 nm. En la figura 2.5 se muestra un esquema en el que se detalla la estructura de los VCSELS utilizados. La principal diferencia entre ambos láseres es la dimensión del plano del medio activo, siendo mayor en el láser multimodo que en el monomodo.

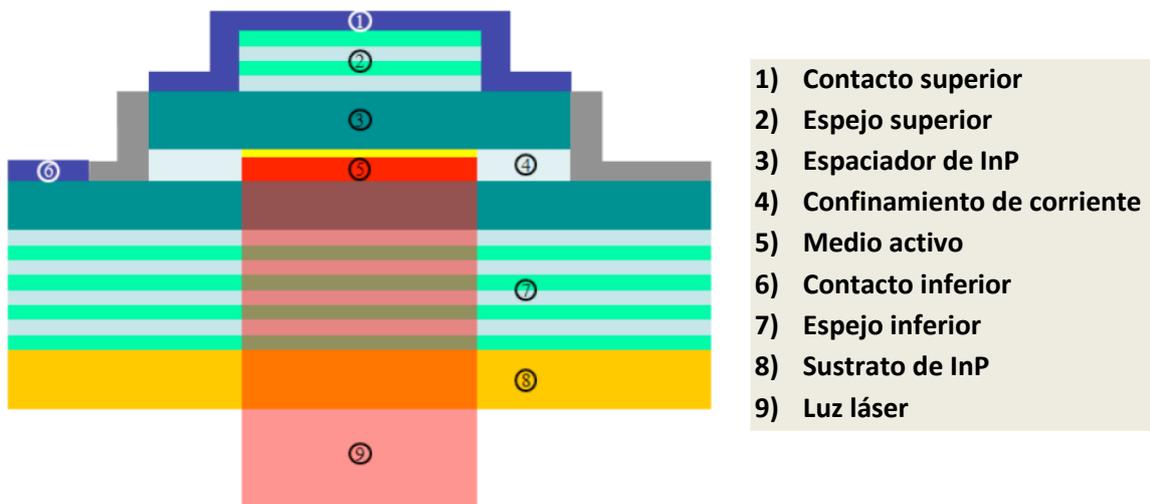


Figura 2.5. Esquema de la estructura de los VCSELS utilizados.

2.2 Aparatos de Medida

En este apartado se muestran los aparatos de medida que se han usado en este trabajo experimental así como sus características más importantes.

2.2.1 Fotodetector

El fotodetector es un dispositivo que responde ante una señal óptica de cierta intensidad creando una corriente eléctrica de salida proporcional a dicha intensidad. Se usa para poder medir señales ópticas con aparatos que trabajan con corrientes eléctricas, convirtiendo por medio del fotodetector una en otra. El fotodetector utilizado posee un ancho de banda de 9 GHz.

2.2.2 Analizador de Espectros Ópticos

El analizador de espectros ópticos BOSA nos muestra el espectro óptico de una señal óptica, es decir, la intensidad en función de la longitud de onda o frecuencia óptica. Para medir utiliza un láser sintonizable con el que se alcanza una resolución de 10 MHz, la cual viene dada por el efecto de dispersión Brillouin en el que se basa la medición.



Figura 2.6. Fotografía de un analizador de espectros ópticos del mismo modelo que el utilizado.

2.2.3 Analizador de Espectros de Radiofrecuencia

Este aparato realiza la transformada de Fourier de una señal eléctrica mostrando en pantalla el promedio de la intensidad óptica en función de la frecuencia: $\langle |I(\nu)|^2 \rangle$ [5]. Ya que está diseñado para medir señales eléctricas se ha de de colocar un fotodetector previamente al analizador de espectros de radiofrecuencias (RF) para obtener el espectro de RF de una señal óptica. El espectro de radiofrecuencias es un espectro de potencia similar a los que aparecen en la figura 1.3. Se ha utilizado un analizador de espectros de RF modelo OSA con un ancho de banda de 20 GHz.

2.2.4 Osciloscopio

Se ha utilizado un osciloscopio de tiempo real de Agilent Infiniium DSO91204A, el cual permite visualizar la dinámica temporal de la intensidad de una fuente. Este osciloscopio nos ofrece un ancho de banda de 12 GHz y un tiempo típico de muestreo de 25 ps. A diferencia de los osciloscopios de tiempo equivalente los osciloscopios de tiempo real permiten visualizar una señal con cualquier distribución temporal. Dado que el osciloscopio trabaja con señales eléctricas es necesario convertir la señal óptica que

se desea medir en una señal eléctrica, en nuestro caso se hizo utilizando un fotodetector al igual que en el analizador de espectros de radiofrecuencia.

2.2.5 Medidor de potencia óptica

El medidor de potencia óptica PM20 de Thorlabs mide la potencia óptica entorno a una longitud de onda que debe de ser introducida por el usuario. El medidor de potencia óptica utilizado es del mismo modelo que el de la fotografía de la figura 2.7.



Figura 2.7. Fotografía del medidor de potencia utilizado.

2.3 Montaje Experimental

A partir de los elementos del montaje (sección 2.1) y de los aparatos de medida (sección 2.2) se realizó el montaje experimental que se muestra en la figura 2.8 con el objetivo de estudiar la dinámica de los VCSELs sometidos a retroalimentación óptica. Este montaje tiene grandes similitudes con el montaje que aparece en el artículo de la referencia [6].

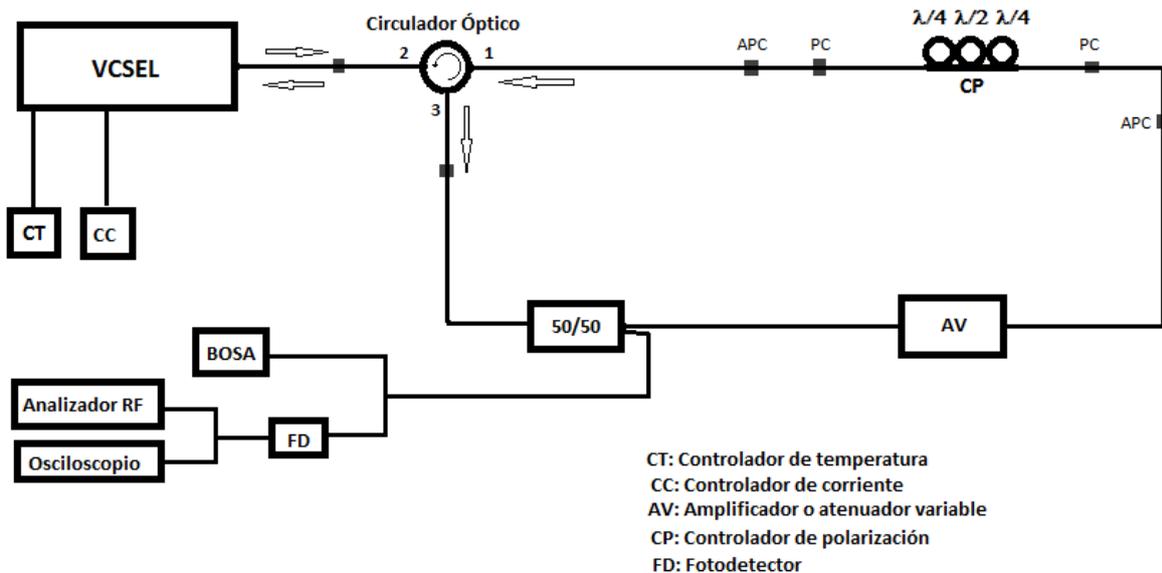


Figura 2.8. Esquema del montaje experimental utilizado durante el experimento. En el circulator óptico la luz circula, exclusivamente en los siguiente sentidos: $1 \rightarrow 2$ y $2 \rightarrow 3$. Nótese que en la región denotada con el número 2 la luz puede circular en ambos sentidos.

La luz emitida por el VCSEL es dirigida en el sentido indicado por el circulador óptico (ver figura 2.8), tras esto en su encuentro con el 50/50 la luz es dividida en dos haces de igual intensidad (idealmente), uno de ellos se destina a la medida, por lo que llega a los correspondientes aparatos de medida, y el otro se destina a la retroalimentación óptica, por lo que continúa el bucle de fibra de vuelta al VCSEL. Durante la caracterización del VCSEL en emisión libre (Capítulo 3) se evita la llegada de luz de feedback al desconectar uno de los conectores del bucle, quedando el circuito correspondiente al VCSEL y a los aparatos de medida. A partir de los controladores de temperatura y corriente se controlaba dichos parámetros, registrando siempre datos cuando el sistema ha alcanzado unos valores estables de temperatura y corriente. En la figura 2.9 puede observarse una fotografía del montaje experimental correspondiente a su vez con el esquema de la figura 2.8.

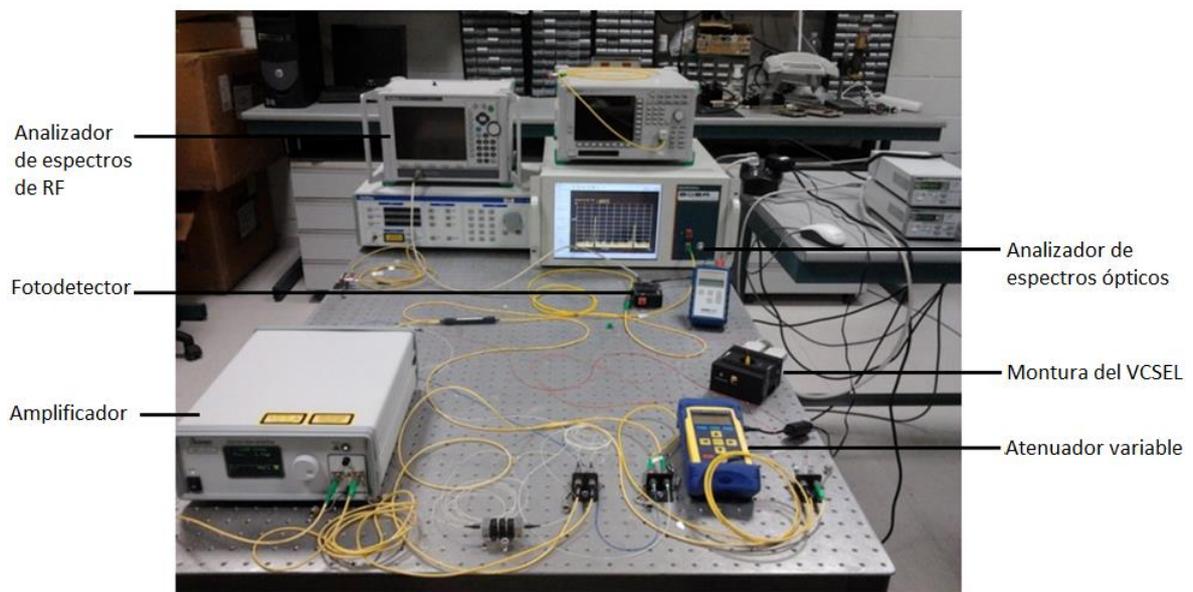


Figura 2.9. Fotografía del montaje experimental utilizado.

Capítulo 3- Caracterización de VCSELs en Emisión Libre

En este capítulo se caracterizan los dos VCSELs considerados en emisión libre, es decir, cuando trabajan en ausencia de retroalimentación óptica y conectados a una corriente constante. Todas las mediciones se realizaron a una temperatura $T=25,00^{\circ}\text{C}$ que podía fluctuar típicamente unos $0,03^{\circ}\text{C}$.

3.1 VCSEL Monomodo en Emisión Libre

Curva Luz-Intensidad y Eficiencia del VCSEL

La curva de luz-intensidad o potencia-intensidad es una de las más importantes en la caracterización de la emisión de un láser. Esta curva se suele dividir en dos regiones principales: la zona por debajo de la corriente umbral, en la que la pequeña potencia medida se debe principalmente a la emisión espontánea, y la zona por encima de la corriente umbral, en la cual domina la emisión estimulada produciéndose así emisión láser. A su vez la zona por encima de la corriente umbral se puede dividir en una zona lineal y una zona de saturación que aparece a corrientes más altas. En nuestro VCSEL se observa cómo por debajo de la corriente umbral $I_{th}=(1,64 \pm 0,05)$ mA la emisión es muy pequeña siendo la emisión espontánea la principal causa de la potencia observada (ver figura 3.1).

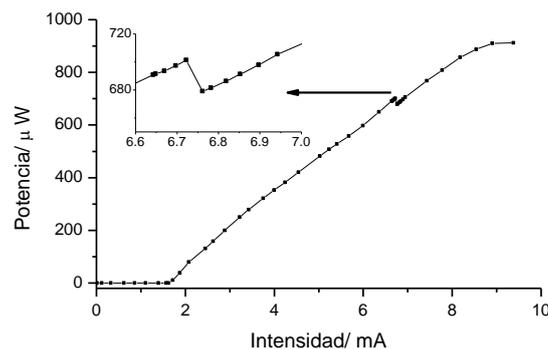


Figura 3.1. Potencia de salida del láser monomodo frente a la intensidad de corriente que atraviesa el láser.

A corrientes mayores que la umbral se observa una zona en la que la potencia de salida es proporcional a la intensidad de corriente. Este comportamiento cambia a corrientes mayores que 8 mA, al llegar a la zona de saturación en la que la potencia comienza a crecer más lentamente con la corriente. Se observó que ésta incluso llegaba a decrecer a corrientes por encima de 10 mA.

Uno de los fenómenos interesantes que encontramos es una caída de la potencia al valor $I = 6,73$ mA apreciable en figura 3.1. correspondiente con uno de los switchings de polarización (ver tabla 3.1), fenómeno que se explicará posteriormente.

A su vez, a partir de la curva luz-intensidad es posible calcular la eficiencia cuántica diferencial η del proceso de transformación de energía eléctrica en energía óptica a partir de la siguiente ecuación válida para la zona lineal:

$$P = \eta \frac{h\nu}{e} (I - I_{th}) \quad (3.1)$$

, donde P es la potencia emitida por el VCSEL, h es la constante de Planck, ν es la frecuencia de la luz emitida y e la carga del electrón. Esta eficiencia puede ser vista como el número de fotones en el haz de salida sobre el número de portadores por encima del umbral, es decir:

$$\eta = \frac{\frac{P}{h\nu}}{\frac{I - I_{th}}{e}} = \frac{\frac{n^\circ \text{ fotones en el haz}}{\text{tiempo}}}{\frac{n^\circ \text{ de portadores sobre umbral}}{\text{tiempo}}} = \frac{n^\circ \text{ fotones en el haz}}{n^\circ \text{ de portadores sobre umbral}}$$

A partir de la pendiente de la zona lineal de la figura 3.1 se obtiene el valor de la eficiencia del VCSEL, obteniéndose:

$$\eta = 141,6 \cdot \frac{10^{-6} \text{ W}}{10^{-3} \text{ A}} \cdot \frac{1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}}{6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} \cdot \frac{3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{1540 \cdot 10^{-9} \text{ m}}} = (17,6 \pm 0,7)\%$$

Según [7] la eficiencia del láser depende de la temperatura, aumentando al disminuir ésta, por lo que no estaríamos en las mejores condiciones de eficiencia. Este efecto se puede ver como una de las causas de la dependencia de la curva de ganancia con la temperatura. Otro de los aspectos que se han de tener en cuenta es el acoplamiento de la salida del láser con la fibra que lleva al medidor de potencia, ya que aquí se pueden producir pérdidas que no se están teniendo en cuenta. Por lo que en realidad la eficiencia obtenida es la del sistema VCSEL + fibra.

3.1.1 Switching de polarización

Dependiendo principalmente de la intensidad de corriente el VCSEL monomodo emitirá en uno de los dos modos de polarización, los cuales a pesar de la simetría cilíndrica del VCSEL vienen determinados por los ejes del cristal semiconductor. Así, la dirección de polarización puede cambiar 90° al variar la corriente, lo que se conoce como switching de polarización. El fenómeno del switching de polarización tiene una justificación compleja y son diversas las causas propuestas en la bibliografía [7]. En la figura 3.2 se pueden observar tres de los cuatro regímenes de emisión en polarización que presenta el

VCSEL monomodo. Por tanto nuestro VCSEL monomodo presenta tres switchings de polarización (ver tabla 3.1).

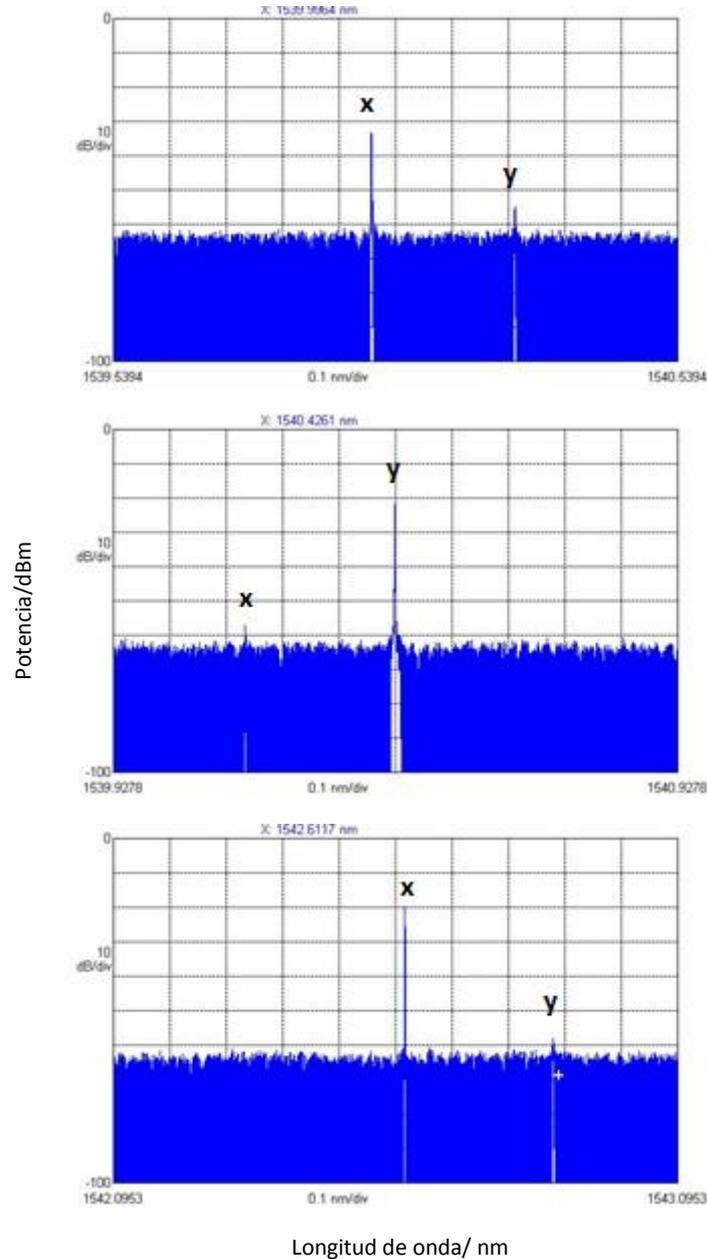


Figura 3.2. Espectros ópticos del VCSEL monomodo en emisión libre a las intensidades de corriente: $I=2$ mA, $I=2,4$ mA , $I=6,87$ mA de arriba hacia abajo.

De estos tres switchings dos magnifican la emisión del modo fundamental de polarización lineal que aparece a mayor longitud de onda y que llamaremos polarización Y. El otro switching magnifica la intensidad del modo de polarización lineal ortogonal al anterior, que llamaremos polarización X. En la tabla 3.1 aparecen las corrientes a las que se observó switching de polarización, es decir, el valor de corriente al que la máxima potencia de ambos picos de polarización se igualaba en el espectro óptico.

	Intensidad Switching/ mA
$P_X > P_Y \rightarrow P_X < P_Y$	2,25
$P_X < P_Y \rightarrow P_X > P_Y$	6,70
$P_X > P_Y \rightarrow P_X < P_Y$	9,15

Tabla 3.1. Registro de los valores de corriente a los que se observa switching de polarización. El subíndice X hace referencia a la polarización X mientras que el subíndice Y hace referencia a la polarización Y . P_X y P_Y son por tanto las potencias correspondientes.

Correlacionando con lo observado en figura 3.1 vemos que es el switching que magnifica la intensidad del modo de polarización lineal Y es el que produce la caída de potencia observada en figura 3.1, efecto que no se observa para el otro tipo de switching. Otro de los efectos que observamos es el corrimiento de los picos de emisión hacia longitudes de onda mayores al aumentar la intensidad de corriente. Este corrimiento de longitud de onda con la intensidad de corriente sigue una ley lineal.

Mientras que la potencia total crece de un modo constante en la zona lineal (ver figura 3.1), el switching de polarización produce que dicha potencia provenga en distinta proporción de los dos modos de polarización dependiendo del valor de corriente en el que se trabaje. A la mayoría de valores de corriente el láser emitirá sólo en un modo de polarización. Esta emisión en potencia resuelta en polarización se muestra en la figura 3.3.

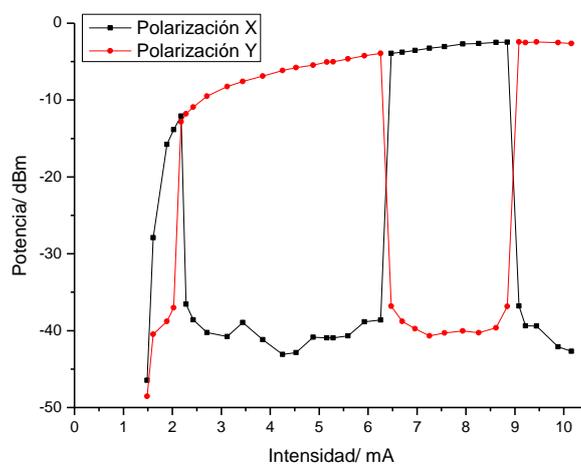


Figura 3.3. Máxima potencia frente a la intensidad de corriente para cada una de las polarizaciones. Nótese la escala logarítmica a diferencia de la figura 3.1.

3.1.2 Oscilaciones de relajación

La gran sensibilidad de los láseres de semiconductor a las condiciones presentes en la cavidad láser unido al ruido intrínseco (debido a emisión espontánea, picos o caídas de intensidad, etc) existente en el medio produce que la potencia emitida flutúe. Cuando las condiciones cambian el número de fotones y portadores pasa por una respuesta transitoria en la que se producen oscilaciones en la potencia emitida y en el número de portadores hasta estabilizarse de acuerdo a las nuevas condiciones. En este sentido el sistema se comporta como un oscilador amortiguado. A estas oscilaciones se les llama oscilaciones de relajación y tienen una frecuencia típica ν_R que depende de la intensidad de corriente y viene dada por la siguiente expresión [4]:

$$\nu_R = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{a}{e} (I - I_{TH})} \quad (3.2)$$

, donde a es la ganancia diferencial que aparece en secciones anteriores. Esta expresión es válida para láseres en emisión libre. Las oscilaciones de relajación se verán como un pico en el espectro de radiofrecuencias, siendo ésta la contribución más importante como se puede ver en la figura 3.4. La frecuencia de las oscilaciones de relajación establece un límite a la frecuencia de modulación de un láser ya que éstas determinan el intervalo de tiempo que el láser emplea para adaptarse a las nuevas condiciones. Así, cuanto mayor sea la frecuencia de estas oscilaciones, mayor será la frecuencia máxima de modulación de un láser, característica muy apreciada en telecomunicaciones.

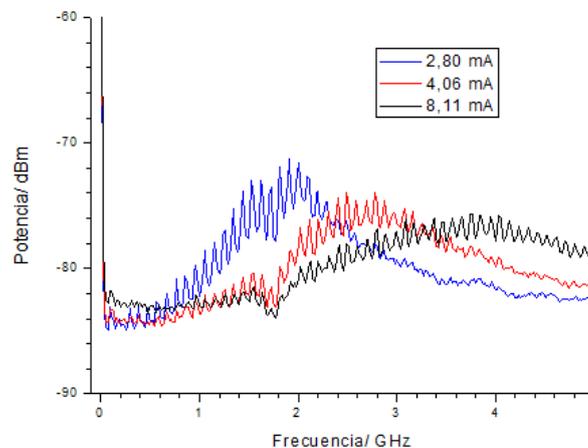


Figura 3.4. Espectro de radiofrecuencias del láser monomodo a las intensidades de corriente: $I=2,80$ mA, $I=4,06$ mA y $I=8,11$ mA.

Se observa cómo un incremento en la corriente produce un desplazamiento del máximo hacia frecuencias mayores. Estas frecuencias se muestran en la tabla 3.2 junto a las respectivas intensidades de corriente. Además de la gran contribución debida a las oscilaciones de relajación aparece una modulación de la potencia al variar la frecuencia (picos pequeños). Estos picos más pequeños que aparecen equiespaciados corresponden a los modos externos de la cavidad, ya que cualquier zona en la que se produzcan reflexiones actuará como un resonador permitiendo sólo ciertas frecuencias. El espaciamiento entre estos picos tiene una frecuencia de 87 MHz aproximadamente. Este

espaciamiento en frecuencia corresponde a una zona de reflexión a una distancia pequeña de la salida del VCSEL, probablemente proveniente de una conexión entre fibras ópticas del montaje. Más adelante se verá como el bucle de fibra destinado a retroalimentar los láseres se puede tratar también como un resonador y se observará que el espaciamiento en frecuencia es menor que en este caso, correspondiendo de acuerdo con la ec. 1.1 a una longitud mayor.

Frecuencia/ GHz	Intensidad/ mA
1,527	2,521
1,80	2,80
2,496	3,701
2,60	4,06
3,16	5,07
3,76	8,11

Tabla 3.2. Registro de las frecuencias a las que se encuentra un máximo de potencia correspondiente a las curvas que aparecen en figura 3.4. Se ha realizado un “suavizado” de las curvas de la figura 3.4 para obtener los máximos. El “suavizado” consiste en asociar a cada punto el promedio de los valores de los puntos cercanos a éste. Este proceso se puede repetir varias veces.

Ajustando los datos de la tabla 3.2 a la ecuación 3.2 es posible obtener el valor de la ganancia diferencial. Mediante el ajuste a una recta en la representación " ν_R^2 " frente a " $I - I_{TH}$ " se obtiene un pendiente m con lo que el valor de la ganancia diferencial será:

$$\begin{aligned}
 a &= (2\pi\nu_R)^2 \cdot \frac{e}{I - I_{TH}} = (2\pi)^2 \cdot e \cdot m = \\
 &= (2\pi)^2 \cdot 1,602 \cdot 10^{-19}C \cdot \frac{2,1002 \cdot (10^9)^2 \text{Hz}^2}{10^{-3}A} \approx (13300 \pm 1400)\text{Hz}
 \end{aligned}$$

3.2 VCSEL Multimodo en Emisión Libre

A diferencia de los múltiples switchings de polarización observados en el VCSEL monomodo, el VCSEL multimodo no presenta ningún switching de polarización en emisión libre. La corriente umbral es algo mayor que en el monomodo (ver figura 3.5) con un valor: $I_{TH}=(2,96 \pm 0,03)$ mA. La zona de saturación no se encuentra en el intervalo de corrientes considerado, llegando la zona lineal hasta 10 mA al menos.

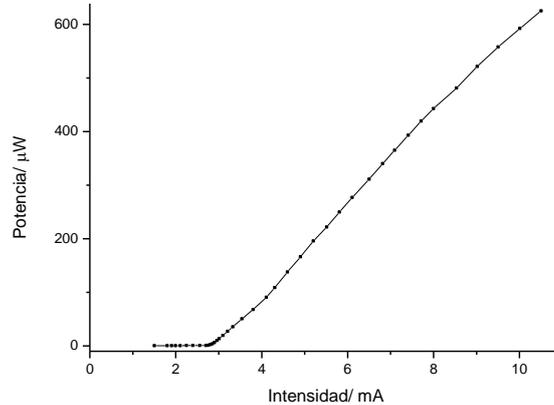


Figura 3.5. Potencia de salida del láser multimodo frente a la intensidad de corriente. Al igual que en el VCSEL monomodo se observa una corriente umbral a partir de la cual se llega a una relación lineal entre la potencia emitida y la intensidad de corriente.

Su eficiencia, al igual que en el VCSEL multimodo se puede calcular a partir de la pendiente de la zona lineal de la figura 3.5 y mediante la ec. 3.1. En este caso se obtiene el siguiente valor:

$$\eta = 87,827 \cdot \frac{10^{-6} \text{W}}{10^{-3} \text{A}} \cdot \frac{1,602 \cdot 10^{-19} \text{C}}{6,626 \cdot 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s} \cdot \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{1559 \cdot 10^{-9} \text{ m}}} = (11 \pm 1)\%$$

Por tanto, en el VCSEL multimodo se obtiene una eficiencia menor que en el monomodo.

A corrientes ligeramente mayores que la corriente umbral ($I_{TH}=2,96$ mA) el VCSEL multimodo emite sólo en el modo fundamental, es decir, aquel de mayor longitud de onda. El carácter multimodo comienza a ser apreciable a partir de 4 mA aproximadamente, valor a partir del cual empieza a emitir en ambos modos. Estos modos, a diferencia del VCSEL monomodo en que los dos modos eran modos de polarización lineal, son distintos modos transversales con distintos perfiles de intensidad en el plano de la región activa. La separación entre ellos es de 2,1 nm aproximadamente frente a los 0,25 nm de separación entre ambas polarizaciones lineales del VCSEL monomodo (ver figura 3.6 y figura 3.3).

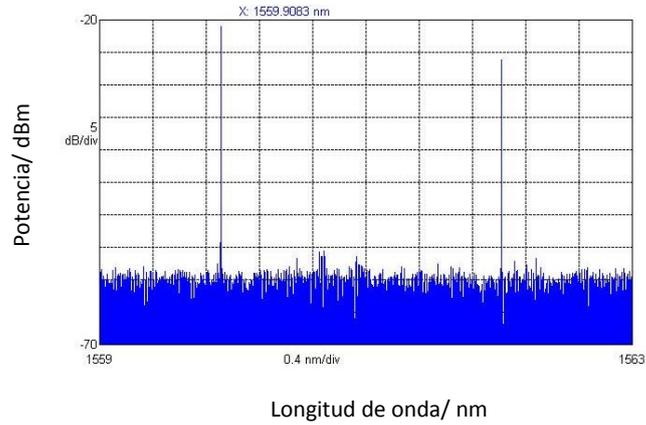


Figura 3.6. Espectro óptico del VCSEL multimodo en emisión libre a una corriente de $I=8$ mA.

Respecto al espectro de radiofrecuencias se observa que al igual que en el láser monomodo éste se desplaza hacia frecuencias mayores al aumentar la intensidad de corriente, como se muestra en la figura 3.7. Estos máximos de emisión aparecen a las frecuencias de las oscilaciones de relajación.

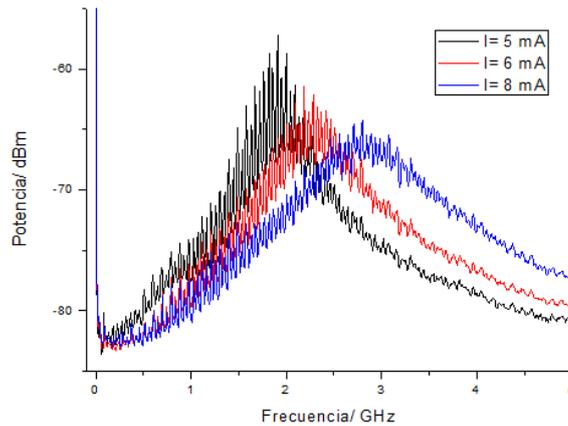


Figura 3.7. Espectros de radiofrecuencias del láser multimodo en emisión libre a las intensidades de corriente: $I=5$ mA, $I=6$ mA y $I=8$ mA. En esta figura el VCSEL multimodo se conectó directamente al analizador de espectros de RF por lo que la potencia es mayor que en el resto de espectros de RF que aparecen a lo largo del trabajo.

En la tabla 3.3 se muestran los máximos de frecuencia correspondientes a las oscilaciones de relajación.

Frecuencia/ GHz	Intensidad/ mA
1,916	5
2,259	6
2,788	8

Tabla 3.3. Registro de las frecuencias a las que se encuentra un máximo de potencia correspondiente a las curvas que aparecen figura 3.7. Para obtener los máximos se ha realizado un suavizado de las curvas.

En este caso, el número de valores frecuencia-intensidad es muy reducido por lo que no se ha determinado el valor de la ganancia diferencial.

Capítulo 4- Dinámica de VCSELs Sometidos a Retroalimentación Óptica

En este capítulo se abordan las dinámicas y características en la emisión de los VCSELs al ser sometidos a retroalimentación óptica, resaltando los cambios que se producen respecto de la emisión libre. Para ello se muestran los espectros ópticos de radiofrecuencias, así como las curvas de luz-intensidad. Además, se añaden trazas temporales, esto es la potencia emitida en función del tiempo y se introduce la función de autocorrelación para su caracterización. Al igual que en el capítulo dedicado al estudio de la emisión libre la temperatura se fijó a un valor $T=25^\circ$ a lo largo de toda la caracterización bajo retroalimentación óptica.

4.1 VCSEL Monomodo Sometido a Retroalimentación Óptica

4.1.1 Control de la polarización

Controlar la polarización de la luz cuando ésta viaja por el aire es una tarea sencilla ya que una vez conseguida la polarización deseada ésta no variará a lo largo del recorrido que realice. Sin embargo, controlarla cuando se trabaja con fibras ópticas es una tarea compleja, debido a la birrefringencia existente en el interior de las fibras, que puede ser causada por defectos de fabricación, curvatura, tensiones, etc. En este caso la polarización se verá distorsionada en su viaje por una fibra óptica. Una forma de controlar la polarización de la luz de retroalimentación a la entrada del VCSEL es usar el controlador de polarización (ver sección 2.1.4) junto con el medidor de potencia en el montaje experimental utilizado para conseguir retroalimentación óptica. La forma de conocer la polarización se basa en el hecho de que emitiendo el VCSEL en uno de los dos modos posibles de polarización, el efecto de la reinyección de luz polarizada ortogonalmente al modo de emisión será mínima, mientras que la reinyección de luz con polarización paralela al modo de emisión tendrá una influencia máxima, y por tanto la potencia medida se verá maximizada. La retroalimentación óptica por luz de la misma polarización que el modo en el que está emitiendo el láser se llama feedback isótropo. En este caso si el VCSEL emite en una polarización x la polarización de la luz de retroalimentación tendrá polarización x ($x \rightarrow x$). En el caso contrario está el feedback anisótropo en el que $x \rightarrow y$, donde y es la polarización ortogonal a x . Experimentalmente,

a una corriente $I=1,63$ mA se obtuvo una potencia de $5,3\mu\text{W}$ con feedback isótropo y una potencia mínima de aproximadamente 125 nW con feedback anisótropo.

Así, para una configuración fija de las fibras ópticas hemos sido capaces de maximizar o minimizar la influencia del feedback controlando la polarización de la luz reinyectada con el controlador de polarización, buscando en todo momento a lo largo de la caracterización bajo retroalimentación óptica trabajar con feedback óptico isótropo. Nótese que si se produce un cambio en la colocación de las fibras (cambio en la birrefringencia) se necesitaría reajustar la disposición del controlador de polarización para obtener la misma polarización de la luz reinyectada. En la figura 4.1 se muestran los espectros ópticos con feedback isótropo y anisótropo, es posible apreciar el efecto en la potencia emitida. Nótese que el efecto que produce el feedback anisótropo es pequeño pero existente, ya que la potencia mínima obtenida es ligeramente mayor que la potencia del VCSEL en emisión libre.

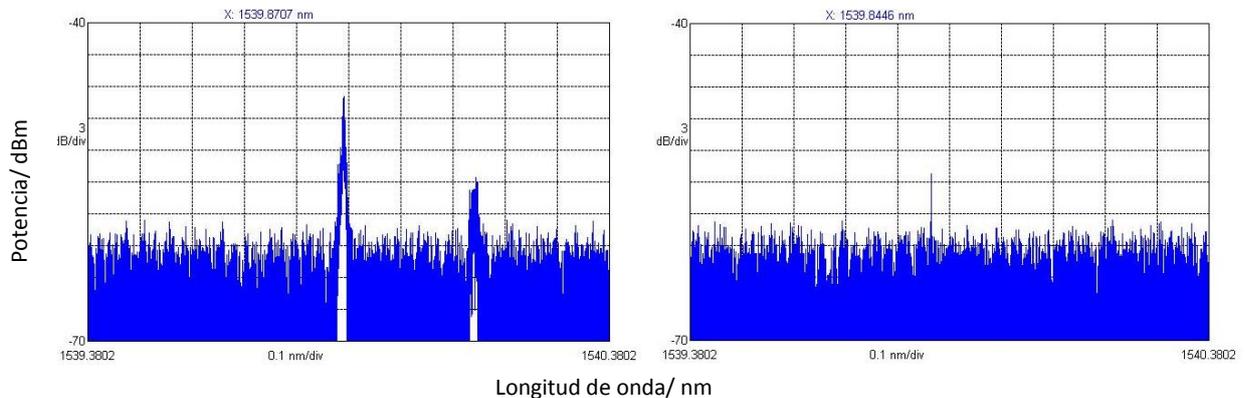


Figura 4.1. A la izquierda, espectro óptico del láser monomodo para una corriente de: $I=1,62$ mA al reinyectar luz paralela al modo de emisión. A la derecha se muestra el espectro óptico cuando la reinyección es ortogonal al modo de emisión. Cuando el VCSEL emite en solitario a esta corriente no se observa ningún pico en el espectro óptico

En la figura 4.1 el feedback isótropo produce una excitación de los dos modos mientras que el anisótropo no produce efecto en ninguno de los modos, es decir, sólo se encuentra efecto en la luz de feedback con polarización paralela al modo principal de emisión. En este caso el feedback excitará el modo principal (de misma polarización que el feedback) y el modo secundario (polarización ortogonal), sin embargo si reintroducimos luz con polarización paralela al modo secundario de emisión el efecto es prácticamente nulo ya que no afecta ni al modo de polarización paralelo (secundario) ni al ortogonal (principal).

4.1.2 Caracterización bajo retroalimentación óptica

Disminución del Umbral de Emisión

En la figura 4.2 se muestra la curva luz-intensidad al someter al VCSEL monomodo a retroalimentación mediante el montaje expuesto en la sección 2.3, se constata que la corriente umbral ha pasado de $I_{th}=1,7$ mA a $I_{th}=1,45$ mA, con lo que la reducción ha sido de $\sim 0,25$ mA. No obstante esta reducción puede depender de la intensidad del feedback reinyectado en el VCSEL, la cual depende del montaje utilizado.

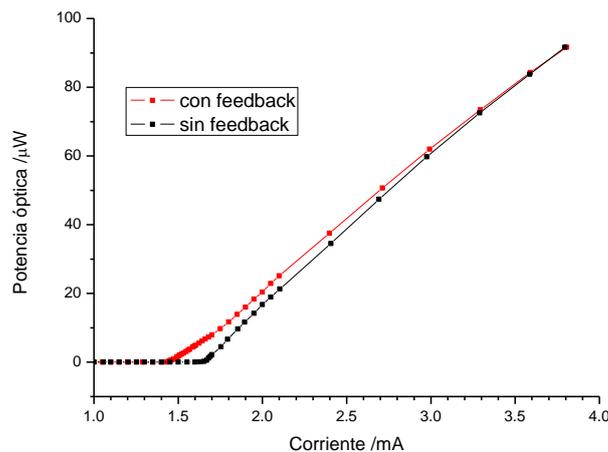


Figura 4.2 Curvas de potencia óptica de salida en función de la corriente, con feedback (en rojo) y sin feedback (en negro).

Además de la reducción del umbral de emisión debido al feedback isótropo se ve cómo la potencia emitida por el láser en emisión libre converge a la potencia emitida con feedback a corrientes de entre 3 a 4 mA.

La misma curva que aparece en la figura 4.2 ha sido estudiada en la referencia [4] obteniéndose resultados equivalentes y muy similares. Ambos resultados ayudan a dar vigencia a los resultados obtenidos así como a la reproducibilidad de estos. Otra propiedad que se ve afectada es la eficiencia del VCSEL, ésta se reduce algo a corrientes bajas (menor pendiente) igualándose progresivamente a la eficiencia del VCSEL sin feedback al aumentar la intensidad de corriente. A partir de 3 o 4 mA de intensidad en adelante se puede considerar que las eficiencias son iguales.

Colapso de coherencia

En la figura 4.3 se observan distintos fenómenos que caracterizan el llamado colapso de coherencia. Por una parte se tiene una emisión caótica caracterizada por un ensanchamiento del espectro óptico, y por otra parte se observa una desestabilización de la potencia emitida en función del tiempo. El modo fundamental pasa de una anchura a

10 dBm por debajo del máximo menor que 0,001nm (esta anchura viene dada por los 10MHz de resolución del BOSA) a una anchura de unos 0,04 nm.

Otra de las características que se encuentra es el aumento de la potencia emitida, que además trae consigo una excitación del modo de polarización de menor longitud de onda, el cual no se excita sin retroalimentación. Este efecto se hace patente en el espectro óptico de la figura 4.3. Además se observa una asimetría de los picos que presenta ciertas similitudes con lo observado en la figura 4.3 de la referencia [4]. La mayor similitud es la mayor pendiente de la zona de mayor longitud de onda de los picos. Ambos modos de polarización tienen una forma similar.

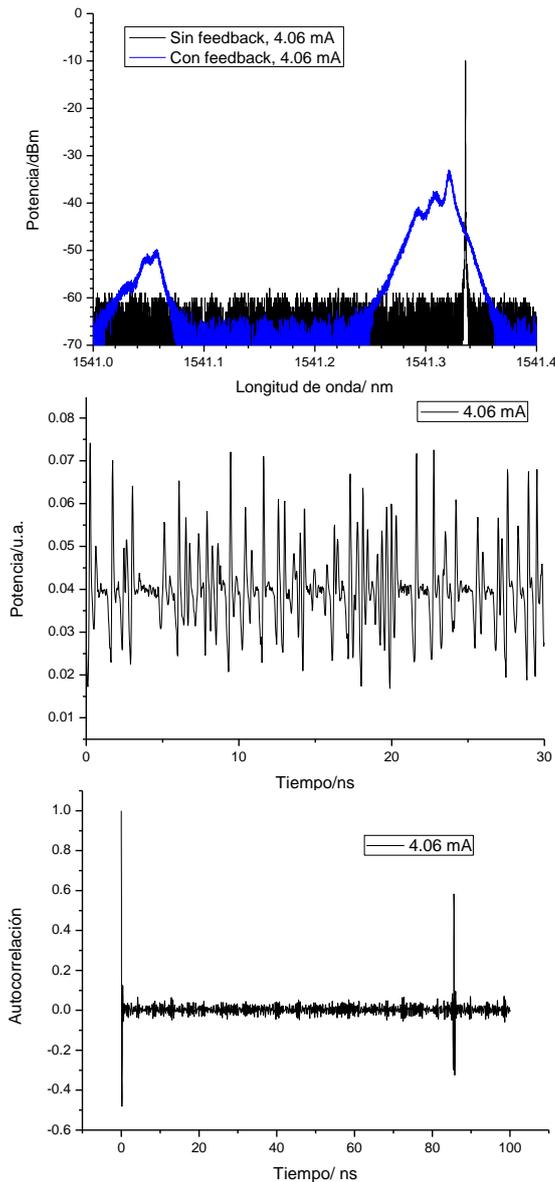


Figura 4.3. En orden descendente se muestra el espectro óptico (en azul, espectro óptico del VCSEL con feedback, en negro, el mismo espectro sin feedback) la traza temporal y la función de autocorrelación de la traza temporal a una corriente $I=4,06$ mA. En la traza temporal el muestreo se realizaba cada 25 ps, durante un intervalo temporal de 1 μ s.

Una forma de estudiar la semejanza entre dos funciones es mediante la función de correlación (ver ecuación 4.1). Si lo que se quiere es comparar una función en un tiempo con ella misma en otro tiempo para observar si presenta algún tipo de periodicidad esta función pasará a llamarse función de autocorrelación. La función de autocorrelación, en la que aparecen la potencia de salida del láser P en los tiempos t y $t+\Delta t$ para ver como se relacionan estos y su desviación estándar σ_P en los respectivos tiempos, nos dice que grado de parecido tiene una función con otra. Toma valores comprendidos entre 1 y -1, siendo 1 la correlación perfecta y -1 la anticorrelación perfecta. La función de autocorrelación se define matemáticamente cómo sigue:

$$R(\Delta t) = \frac{\langle [P(t + \Delta t) - \langle P(t + \Delta t) \rangle] \cdot [P(t) - \langle P(t) \rangle] \rangle}{\sigma_{P(t+\Delta t)} \cdot \sigma_{P(t)}} \quad (4.1)$$

, donde $\langle \rangle$ representa el promedio temporal. Aplicando la función de autocorrelación sobre la traza temporal de emisión del láser se obtiene la función de autocorrelación en función del tiempo (ver figura 4.3). Se encuentra que la autocorrelación es 1, es decir plena, cuando $\Delta t=0$, como era de esperar. A tiempos mayores la función toma básicamente valores muy próximos a cero hasta que al llegar al tiempo de 85,6 ns se encuentra una repentina subida del valor de la autocorrelación, con un valor de casi 0,6. En un tiempo posterior pero muy próximo (85,775 ns) se obtiene anticorrelación de valor -0,32. Si se representa la traza temporal frente a la misma traza desplazada los tiempos característicos a los que se encuentra correlación y anticorrelación se obtendrá una nube de puntos con correlación positiva y una nube de puntos con correlación negativa, respectivamente (ver figura 4.4). Si la correlación fuera 1 se obtendría una serie de puntos sobre una recta de pendiente 1 con dispersión nula.

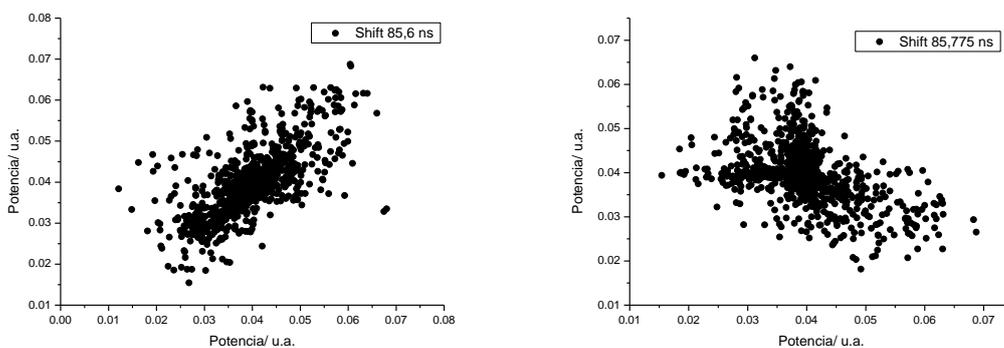


Figura 4.4. A la izquierda representación de la potencia que aparece en la traza temporal en función de la misma potencia con un desplazamiento temporal $\Delta t=(85,6\pm 0,02)$ ns y una correlación de casi 0,6. A la derecha se realiza el mismo gráfico con un desplazamiento temporal distinto y de valor: $\Delta t=85,775$ ns y una correlación de -0,32.

Este intervalo de tiempo entre máximos en el cual la correlación es prácticamente nula, o lo que es lo mismo, el período de la periodicidad observada, está íntimamente relacionado con el tiempo de viaje del fotón en la cavidad externa o bucle de fibra. Esto

nos permite hallar la longitud del bucle de fibra (ver apartado A.1 del Apéndice) obteniéndose una longitud L de valor: $L=(17,491\pm 0,004)$ m.

Influencia de la intensidad de corriente

En capítulos y apartados anteriores se ha mostrado como la intensidad de corriente es uno de los parámetros más importantes en la respuesta de emisión de un láser. En la figura 4.5 se muestran las dinámicas del VCSEL monodo sometido a retroalimentación óptica a distintas intensidades de corriente, en las que además se observa que la emisión caótica se mantiene a cualquier valor de intensidad por encima del umbral. Aunque se observa emisión caótica a cualquier valor de corriente por encima del umbral a corrientes suficientemente altas sólo se excita el modo de polarización fundamental, éste además presenta una cierta periodicidad que aparece a medida que se aumenta la corriente. Se puede observar como el fenómeno de switching de polarización sigue apareciendo al igual que en el caso de emisión sin feedback. Sin embargo, el switching en el que se pasa de emitir en X a emitir en Y no aparece, por lo que tampoco se observa el segundo switching que va de Y a X. El switching que se observa se produce a una corriente menor que en el caso sin feedback, por lo que se concluye que el feedback adelanta la corriente en que ocurre el switching de polarización. Este efecto se ha observado en otros trabajos experimentales (ver Fig. 2 en [8]) y teóricos [9]. A la intensidad de 8,11 mA se tiene una periodicidad de 1,5 ns en la traza temporal que corresponde al espaciamiento observado en el espectro óptico que es de unos $4,4 \cdot 10^{-3}$ nm. Se puede comprobar que esto es cierto ya que a la longitud de onda de nuestros VCSELs 1nm de espaciamiento corresponde a 126,5 GHz, como se ve a continuación:

$$dv = \frac{c}{\lambda^2} \cdot d\lambda = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{(1540 \cdot 10^{-9})^2 \text{ m}^2} \cdot 10^{-9} \text{ m} = 126,5 \text{ GHz}$$

Por tanto $4,4 \cdot 10^{-3}$ nm corresponderá a una frecuencia similar a la correspondiente a 1,5 ns, como se muestra a continuación:

$$v = 4,4 \cdot 10^{-3} \text{ nm} \cdot 126,5 \frac{\text{GHz}}{\text{nm}} = 0,5566 \text{ GHz} \sim \frac{1}{1,5 \text{ ns}}$$

A la intensidad 5,07 mA el espaciamiento no es constante por lo que es posible obtener la separación entre picos, sin embargo se observa que el comportamiento ha variado respecto de las intensidades más pequeñas y tiende al comportamiento periódico observado a 8,11 mA. Otro de los efectos que se observan en la figura 4.5 es la desamortiguación de las oscilaciones de relajación, visible en las trazas temporales. Esto significa que el valor de potencia emitida no consigue estabilizarse al cabo de un cierto número de oscilaciones, sino que estas oscilaciones mantienen una amplitud apreciable a lo largo del tiempo como consecuencia del feedback. Este efecto se observa a cualquier valor de corriente por encima del umbral de emisión.

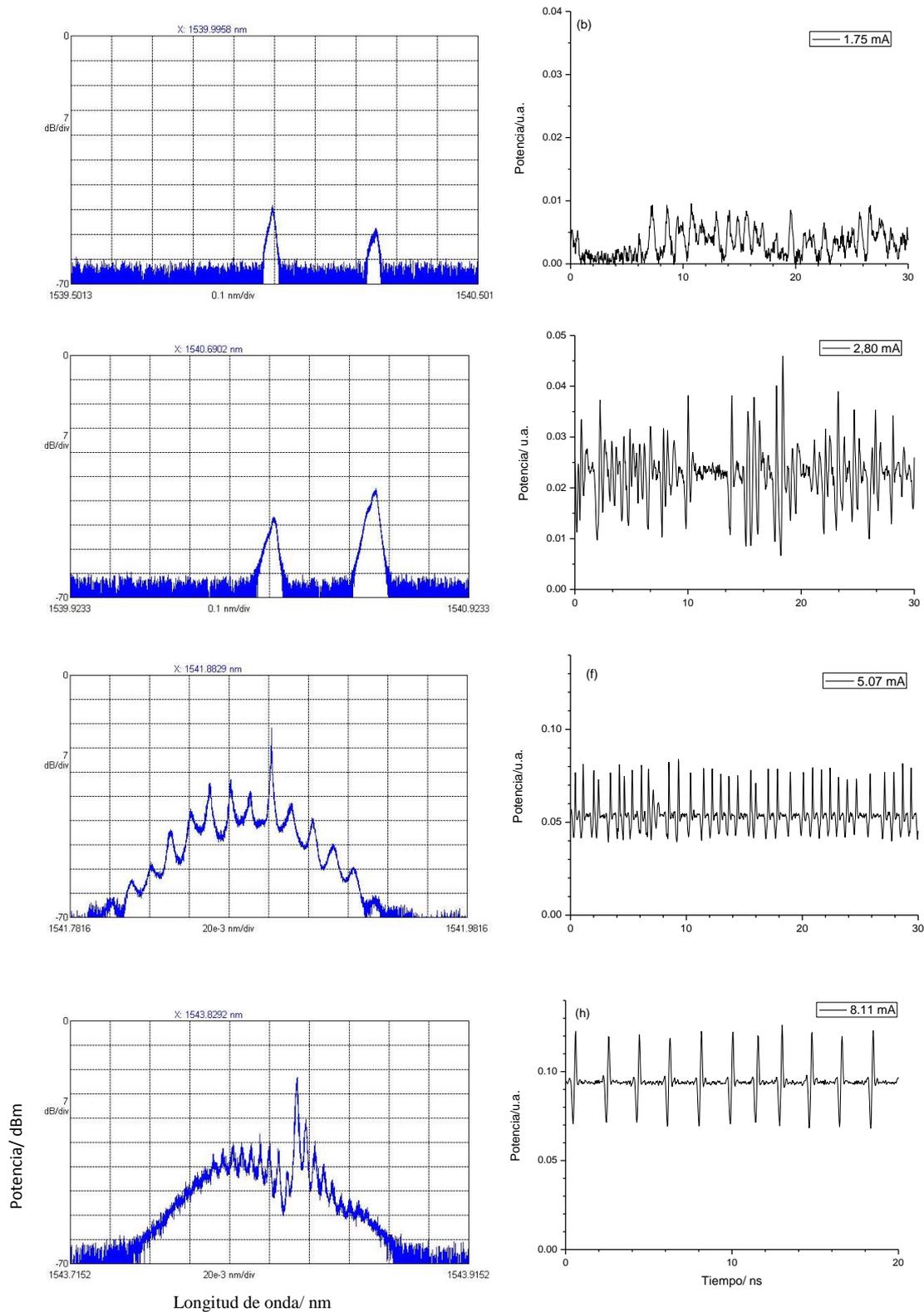


Figura 4.5. Espectros ópticos del láser monomodo junto a sus correspondientes trazas temporales a las intensidades de corriente: $I=1,75 \text{ mA}$, $I=2,80 \text{ mA}$, $I=5,07 \text{ mA}$ y $I=8,11 \text{ mA}$. A las dos últimas intensidades se muestra un zoom del pico de mayor longitud de onda ya que el otro posee una potencia muy pequeña. La velocidad de muestreo en las trazas temporales es de 40 GSamples/seg, lo que nos da 25 ps de separación entre cada punto.

Ensanchamiento de los espectros de radiofrecuencias

Al someter al VCSEL a retroalimentación óptica los espectros de radiofrecuencias sufren un cambio en su morfología. Por una parte se produce un ensanchamiento de los mismos, y por otra parte éstos se vuelven menos picudos, como se observa en la figura 4.6.

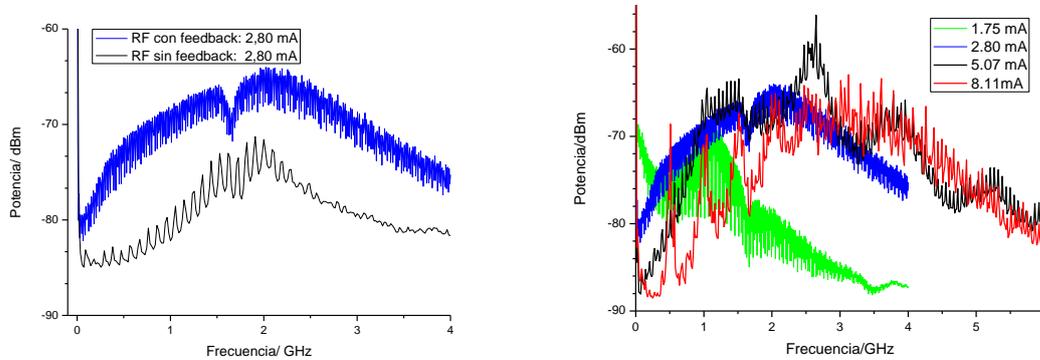


Figura 4.6. A la izquierda, espectros de radiofrecuencias a la intensidad $I=2,80$ mA (en azul con feedback, en negro sin feedback). A la derecha espectros de radiofrecuencias a las intensidades: $I=1,75$ mA, $I=2,80$ mA, $I=5,07$ mA y $I=8,11$ mA, correspondientes con las que se muestran en la figura 4.5.

El ensanchamiento se puede cuantificar comparando la anchura a un cierto valor de potencia por debajo del máximo, en este caso se ha considerado la anchura 5 dB por debajo del máximo por motivos prácticos, a pesar de no ser el estándar utilizado. Se obtiene:

- Anchura del espectro con feedback: $(2,26 \pm 0,1)$ GHz
- Anchura del espectro sin feedback: $(1,48 \pm 0,1)$ GHz

En todos los espectros de la figura 4.6 se encuentra una subida de intensidad a frecuencia muy cercana a cero, lo que indica la presencia de una importante contribución aperiódica. Una de las características destacables es la subida de potencia en el espectro de radiofrecuencias entre 0 y 300 MHz a la intensidad de 1,75 mA, es decir, a corrientes ligeramente por encima de la corriente umbral. Esta subida indica la presencia de fluctuaciones de baja frecuencia (LFF). Por lo tanto se tienen dos casos de emisión caótica diferenciados, emisión caótica con fluctuaciones de baja frecuencia y emisión caótica sin fluctuaciones de baja frecuencia. La contribución debida a las oscilaciones de relajación está presente en ambos casos. Otra de las características que se vienen observando en los espectros de radiofrecuencia a lo largo del trabajo es una caída de intensidad a la frecuencia de 1,7 GHz, esta caída se ha observado utilizando distintos fotodetectores y en ambos VCSELs por lo que se concluyó que era un problema del analizador de espectros de radiofrecuencias y por lo tanto no se debe tomar en cuenta como un proceso físico correspondiente a la emisión de los láseres.

4.1.4 Influencia de la intensidad de la retroalimentación

Además de la intensidad de corriente inyectada en el láser, que tiene una influencia directa en la intensidad de la retroalimentación, ésta última puede ser variada por medio de un amplificador, en el caso en el que se busque magnificar la señal, o de un atenuador, en el caso contrario. Debido a que la luz de retroalimentación causa la emisión caótica, se espera que su intensidad tenga gran influencia en la dinámica del láser. Con nuestro VCSEL monomodo es posible observar, a partir de los espectros ópticos de la figura 4.7 como al disminuir la intensidad del feedback el sistema tiende hacia la dinámica de emisión libre. En la zona de transición, en la que la intensidad del feedback comienza a ser muy pequeña, se observan picos con una estructura periódica.

No se observa corrimiento de longitud de onda al variar la intensidad de la retroalimentación, aunque puede desplazarse ligeramente el máximo de emisión de cada modo debido al pasar de picos bastante simétricos (sin feedback) a picos asimétricos (con feedback).

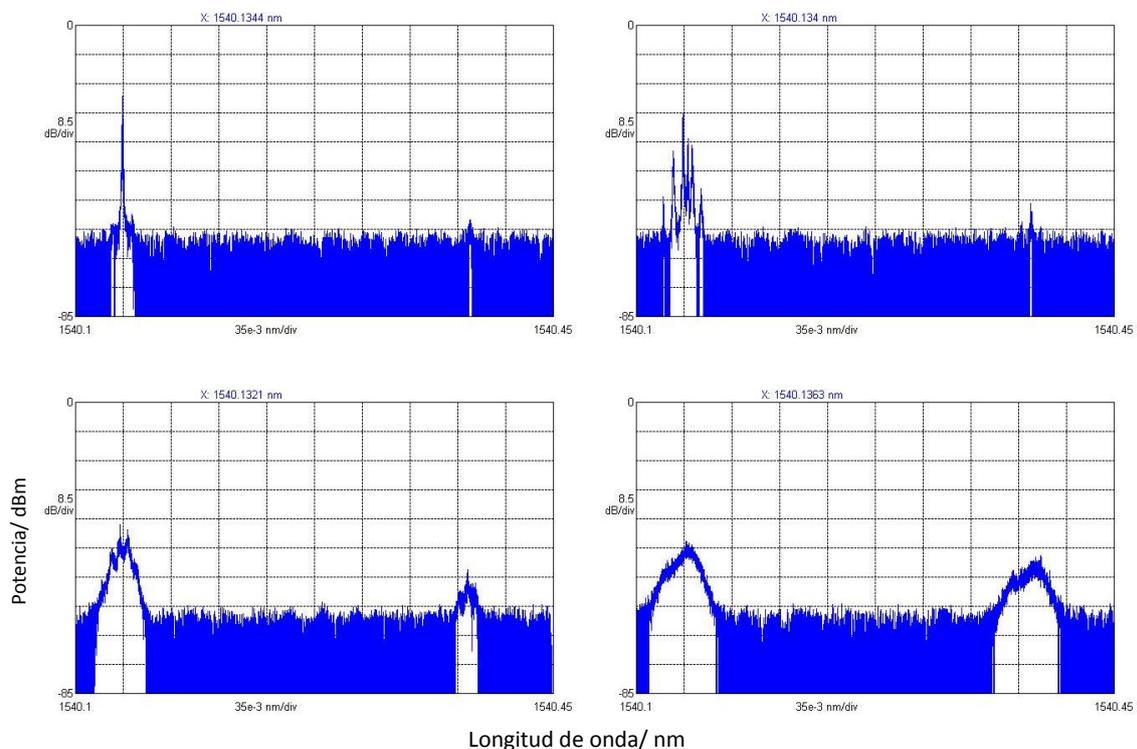


Figura 4.7. Espectros ópticos del láser monomodo para distintos niveles de feedback atenuado y una intensidad de corriente de $I=2,00$ mA. El valor de la atenuación es, de izquierda a derecha: 25dB, 19dB, 13dB, 1dB.

Otro aspecto interesante, ligado a la inestabilidad del sistema, es la presencia de ciertas ventanas con una dinámica característica que perdura un cierto intervalo de tiempo, pero que sin embargo es inestable y se alterna con otros tipos de dinámica. Tal es el caso del VCSEL monomodo cuando la atenuación es de 19 dB. En la figura 4.8 aparece este comportamiento, donde se ve que la amplitud máxima toma distintos valores con un periodo de aproximadamente 10 MHz.

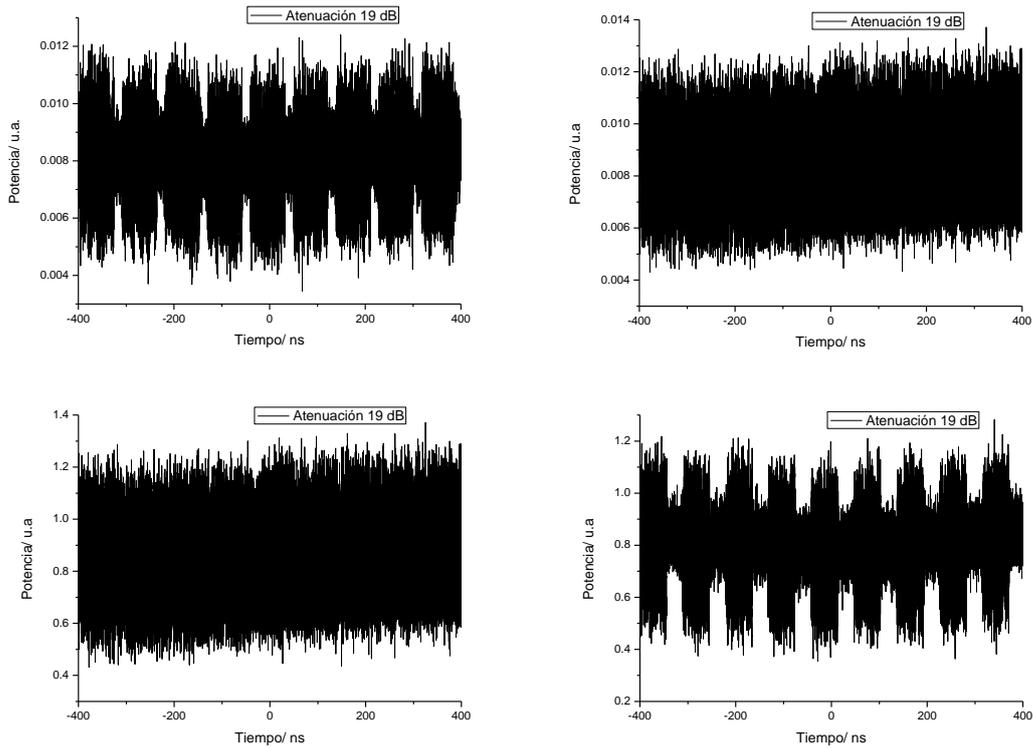


Figura 4.8. Trazas temporales para una intensidad de corriente $I=2,00$ mA y una atenuación de 19 dBs. Se aprecia como la dinámica de emisión pasa por distintas fases que se alternan en el tiempo.

4.2 VCSEL Multimodo Sometido a Retroalimentación Óptica

En la caracterización del VCSEL multimodo emitiendo bajo retroalimentación ha sido necesario utilizar un amplificador para conseguir mayor potencia óptica de retroalimentación. Esta necesidad aparece debido a que el VCSEL multimodo utilizado viene acoplado a un fibra óptica multimodo, pero sin embargo, todo el montaje experimental utiliza fibra monomodo. El acoplamiento de los modos superiores que aparecen en la fibra multimodo a la fibra monomodo es muy pequeño por lo que si no se palía por medio de un amplificador la intensidad del feedback se reduce muy significativamente dejándose de observar los efectos buscados.

Espectros Ópticos

En la figura 4.10 se observa el espectro óptico correspondiente a una corriente de amplificación de 30 mA, los picos ya presentan una cierta anchura, bastante mayor que la anchura de los mismos en emisión libre. Este efecto está ligado a la intensidad de feedback que llega al VCSEL. Sin embargo, la cantidad de feedback es aún pequeña a este valor de la corriente de amplificación.

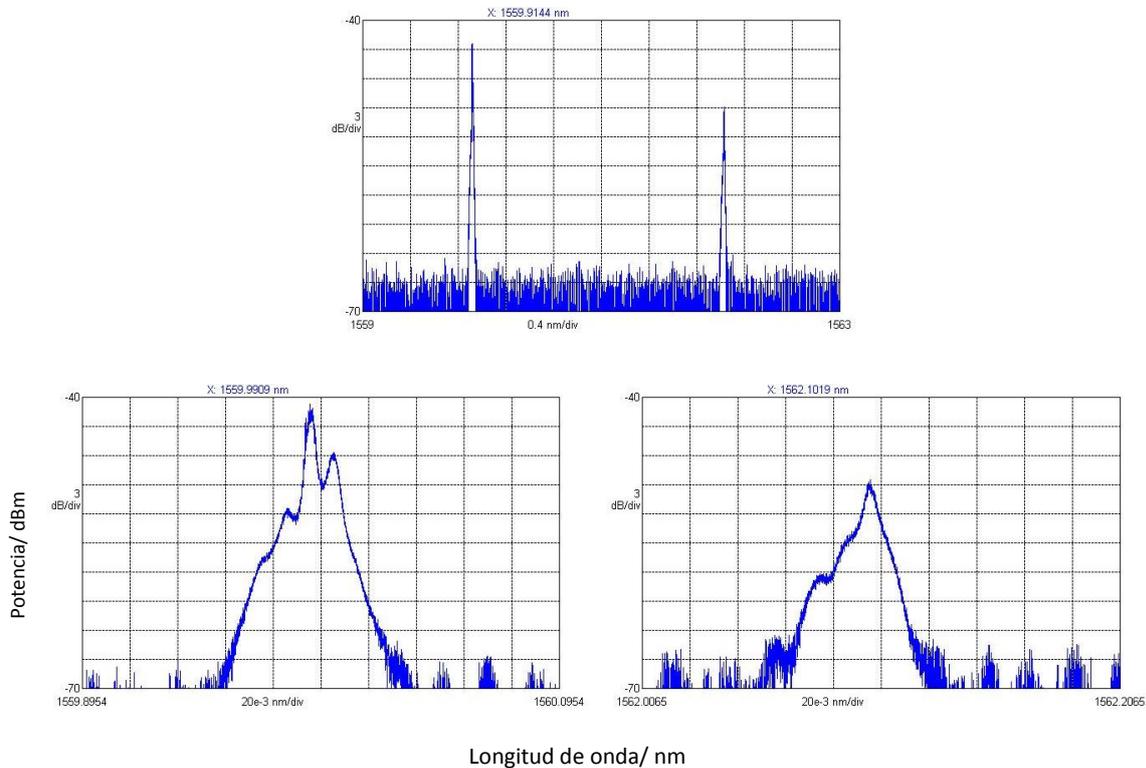


Figura 4.10. Espectro óptico del láser multimodo con una intensidad de amplificación: $I_{AMP}=30$ mA y una intensidad de corriente: $I=8$ mA. Los gráficos de la parte inferior son zooms de los picos de emisión que presenta el espectro. El pico de la izquierda es el de orden superior mientras que el modo fundamental aparece a la derecha.

Un aumento de la amplificación, es decir, un aumento de la intensidad de la retroalimentación, ensancha los picos de emisión y aumenta la potencia total emitida por el láser, aunque disminuye la máxima potencia emitida como consecuencia del ensanchamiento de los picos. Este fenómeno se puede ver al comparar el espectro obtenido en la figura 4.10 con el espectro de la figura 4.11. A diferencia de lo que ocurre en el VCSEL monomodo con los dos modos de polarización, en el multimodo se observa emisión caótica en ambos modos transversales a intensidades de corrientes altas.

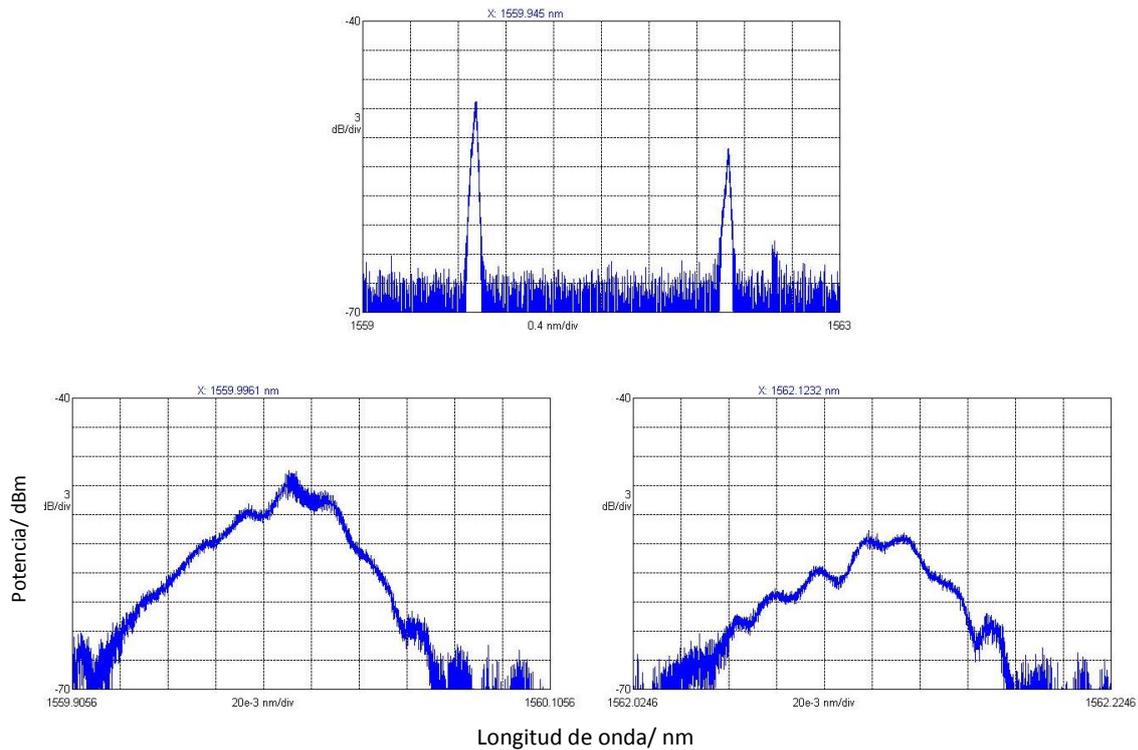


Figura 4.11. Espectro óptico del láser multimodo con una intensidad de amplificación: $I_{AMP}=80$ mA y una intensidad de corriente: $I=8$ mA. Los gráficos de la parte inferior son zooms de los picos de emisión que presenta el espectro. El pico de la izquierda es el de orden superior mientras que el modo fundamental aparece a la derecha.

Traza temporal y autocorrelación

Con una intensidad de amplificación de 80 mA se consigue una emisión caótica, como se ha podido comprobar mediante los espectros ópticos. En la figura 4.12 se observa cómo, además, la potencia emitida es inestable y las oscilaciones de relajación están desamortiguadas, lo que indica emisión caótica. Al igual que en el caso del VCSEL monomodo, en la figura 4.12 se muestra la función de autocorrelación de la traza temporal, obteniéndose valores altos de correlación cada un cierto tiempo constante. En este caso se obtiene una longitud de la cavidad externa mayor que en el caso del VCSEL monomodo debido a que el amplificador usa un bucle de fibra adicional donde se amplifica la señal. El valor de la longitud en este caso es: $L=(37,281\pm 0,004)$ m, unos 20 metros mayor que en el caso del VCSEL monomodo (ver sección A.2 del apéndice). La correlación obtenida desplazando la traza un tiempo igual al tiempo típico de viaje de un fotón es menor que en el caso del VCSEL monomodo, en el que se obtenía una autocorrelación de 0,6, frente a los 0,36 obtenidos para el VCSEL multimodo. Esta diferencia puede tener diversas causas, ya que estamos ante un láser distinto con condiciones de intensidad de feedback distintas y a distintos valores de intensidad de corriente en el láser.

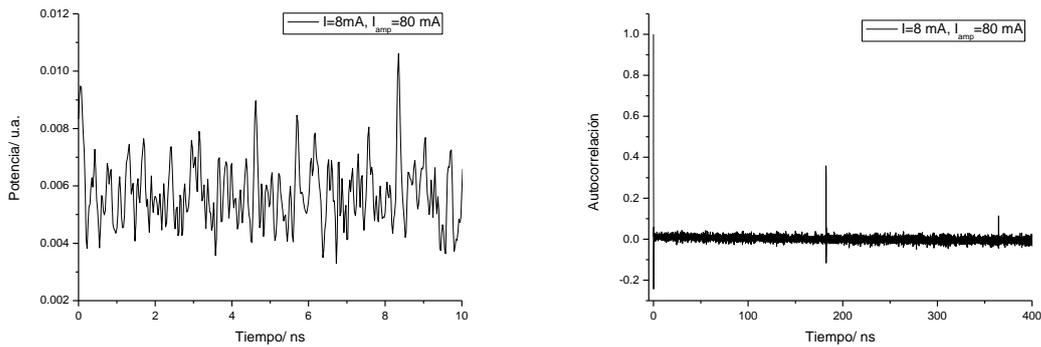


Figura 4.12. A la izquierda, traza temporal del láser multimodo, a la derecha función de autocorrelación de la misma traza temporal. La corriente del láser era: $I=8\text{ mA}$ y la corriente de amplificación: $I_{AMP}=80\text{ mA}$. La autocorrelación se ha calculado a partir de una traza de $1\mu\text{s}$ longitud. Se obtiene una correlación de $0,36$ a un tiempo $\Delta t = (182,33\pm 0,02)\text{ ns}$.

Espectros de radiofrecuencias

Al igual que en los espectros de radiofrecuencias del VCSEL monomodo, en los espectros de RF del VCSEL multimodo se produce un ensanchamiento de los mismos (ver figura 4.13 y figura 3.7). Los efectos de la corriente inyectada en el VCSEL, así como la corriente aplicada al amplificador no tienen efectos especialmente destacables.

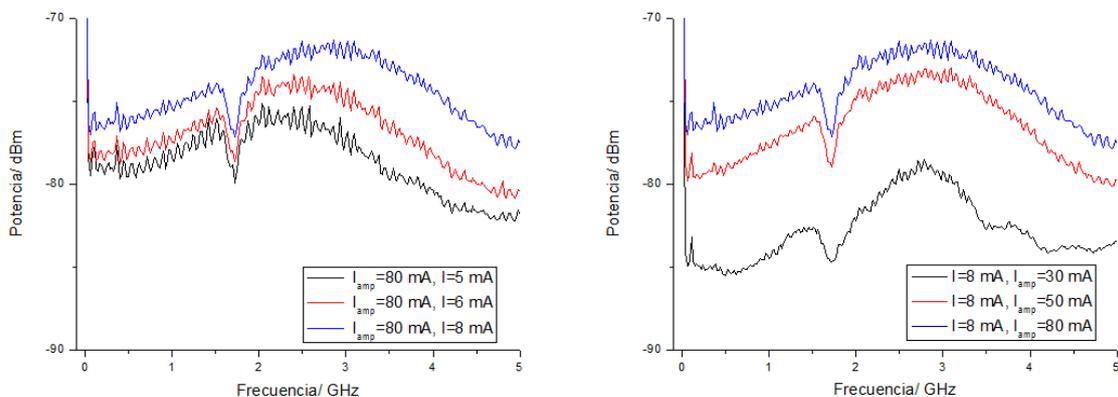


Figura 4.13. Espectros de radiofrecuencias del láser multimodo, en el gráfico de la izquierda se ha variado la intensidad a la que se sometía el láser mientras que en la de la derecha se ha variado la intensidad de la amplificación. La caída de intensidad a $1,7\text{ GHz}$ corresponde a un problema del analizador de espectros como ya se explicó anteriormente.

Al aumentar la intensidad que circula por el VCSEL se produce un desplazamiento de la frecuencia de máxima potencia hacia frecuencias mayores, al igual que lo observado a lo largo del trabajo. Estos máximos, correspondientes a las oscilaciones de relajación para distintas corrientes con una amplificación de 80 mA se muestran en tabla 4.1. Al

aumentar la corriente de amplificación, es decir al aumentar la intensidad de la retroalimentación se encuentra un aumento de la potencia total, sin embargo, la forma de las curvas apenas varía. La mayor variación se encuentra entre el espectro correspondiente a un amplificación de 30 mA, en el que la emisión caótica no ha alcanzado un máximo, y los espectros correspondientes a corrientes de 50 y 80 mA, que apenas se distinguen uno del otro.

Frecuencia/ GHz	Intensidad/ mA
2,044	5
2,474	6
2,785	8

Tabla 4.1. Registro de las frecuencias a las que se encuentra un máximo de potencia correspondiente al gráfico de la parte izquierda de figura 4.13.

Los valores obtenidos en la tabla 4.1 son muy similares a los que aparecen en la tabla 3.3, correspondientes al VCSEL multimodo en emisión libre, es decir, la gran contribución de potencia emitida con feedback sigue apareciendo a las frecuencias de las oscilaciones de relajación. Este hecho confirma la idea de que en este caso la emisión caótica se manifiesta en una desamortiguación de las oscilaciones de relajación.

5.-Conclusiones

Tras preparar y familiarizarse con el montaje experimental descrito en el capítulo 2 se han caracterizado dos láseres de semiconductor tipo VCSEL en emisión solitaria obteniéndose los parámetros que caracterizan su emisión, tales como la corriente umbral de emisión, la eficiencia cuántica diferencial, los espectros de radiofrecuencias y los espectros ópticos. Se ha modelizado la frecuencia de las oscilaciones de relajación en función de la corriente. Además, se ha encontrado una caída de potencia correspondiente a uno de los switchings de polarización, efecto ya presente en la bibliografía.

Tras esto, se han caracterizado ambos láseres emitiendo bajo retroalimentación óptica, consiguiendo el control sobre la polarización de la luz de feedback a la entrada del láser. Se han observado distintos efectos descritos en otros trabajos de la bibliografía, tales como la desestabilización de la emisión, o el ensanchamiento de los espectros ópticos y de radiofrecuencias, efectos que se producen como causa de la emisión caótica. También se ha encontrado una reducción del umbral de emisión al someter el VCSEL monomodo a retroalimentación, lo que está plenamente de acuerdo con lo obtenido en la referencia [4]. La emisión caótica se ha encontrado en ambos VCSELs. En el multimodo se ha encontrado emisión caótica en ambos modos transversales en un rango amplio de corrientes. En el VCSEL monomodo se ha encontrado emisión caótica en ambos modos de polarización a corrientes pequeñas por debajo del umbral de emisión, y emisión caótica en un solo modo a corrientes mayores (emisión en un solo modo). Además, se han encontrado otros efectos interesantes ligados a la emisión caótica, como las oscilaciones de baja frecuencia, que se han encontrado para el VCSEL monomodo a intensidades ligeramente por encima del umbral, y la desamortiguación de las oscilaciones de relajación.

Con esto, las dinámicas y los efectos más característicos de la emisión de nuestros dos láseres de semiconductor de tipo VCSEL bajo retroalimentación óptica de luz guiada por fibra óptica quedan descritos.

-APÉNDICE-

A.1.-Longitud del bucle de fibra del VCSEL monomodo sometido a retroalimentación

La longitud del bucle de fibra del montaje experimental se puede calcular utilizando la periodicidad correspondiente a los modos externos a la cavidad. Esta periodicidad se hace patente tanto en la señal de la traza proveniente del osciloscopio como en la curva del espectro de RF.

-Longitud a través del espectro de radiofrecuencias

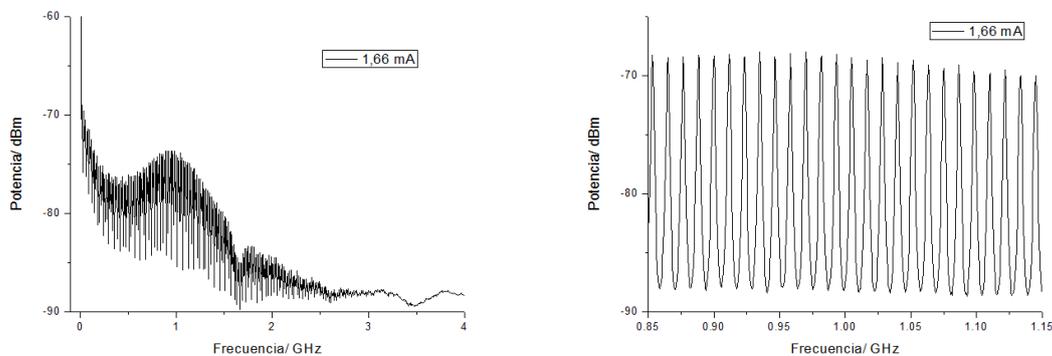


Figura A.1. Espectro de RF a la intensidad 1,66 mA junto con una ampliación de una zona del mismo. La frecuencia de la modulación del espectro de RF se debe al bucle de feedback y se relaciona con la longitud de este bucle.

A partir de la figura A.1 observamos picos igualmente espaciados. Tomamos un número N de picos ($N=20$ en nuestro caso) seguidos para disminuir el error al calcular la frecuencia. La distancia en frecuencia entre el primer y el último pico se denota como f mientras que N será el número de picos tomados y ν la frecuencia de la señal, por lo que tenemos:

$$f = N \cdot \nu$$

Utilizamos los siguientes valores para calcular f :

- $\nu_0=853,279$ MHz
- $\nu_{20}=1086,725$ MHz

Obteniendo:

$$\nu = \frac{\nu_{20} - \nu_0}{N} = \frac{233,446 \text{ MHz}}{20} = 11,67 \text{ MHz}$$

El tiempo que emplea un fotón en recorrer el bucle será proporcional a la longitud del bucle e inversamente proporcional a la velocidad de grupo v_g , así tenemos:

$$\tau = \frac{L}{v_g} = \frac{2L_1 + L_2}{v_g}$$

, donde L_1 es la longitud del bucle que se recorre en sentido de ida y de vuelta, es decir aquella que va desde la cavidad del VCSEL hasta el circulador óptico (ver figura 2.8) y L_2 es la longitud del resto del bucle. La velocidad de grupo v_g se puede definir a partir del índice de grupo n_g y la velocidad de la luz en el vacío c_0 como sigue:

$$v_g = \frac{c_0}{n_g} = \frac{3 \cdot 10^8}{1,468} = 2,043 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

La periodicidad observada se relaciona directamente con el tiempo empleado en recorrer el bucle de la siguiente forma:

$$\tau = \frac{1}{\nu}$$

$$\tau = 8,57 \cdot 10^{-8} \text{ s} = (85,7 \pm 0,5) \text{ ns}$$

Así, finalmente obtenemos una relación entre la longitud del bucle, la velocidad de la onda en el medio y el tiempo empleado en dicho recorrido:

$$L = \frac{v_g}{\nu} \quad [\text{A. 1}]$$

Obtenemos el siguiente valor para la longitud del bucle:

$$L = \frac{2,043 \cdot 10^8}{11,672 \cdot 10^6} = (17,51 \pm 0,11) \text{ m}$$

-Longitud a través de la función de autocorrelación

A partir de la traza que aparece en la figura 4.3. calculamos la longitud del bucle de fibra usando el tiempo $\tau = (85,6 \pm 0,02) \text{ ns}$ al que se encuentra un máximo característico, este tiempo concuerda con el tiempo de viaje del fotón $\tau = (85,7 \pm 0,7) \text{ ns}$ calculado por el método anterior.

Esta periodicidad corresponde a una frecuencia ν similar a la del apartado 1 que será:

$$\nu = \frac{1}{\tau} = \frac{1}{85,6 \text{ ns}} = (11,682 \pm 0,003) \text{ MHz}$$

$$L = \frac{v_g}{\nu} = \frac{2,043 \cdot 10^8}{11,68 \cdot 10^6} = (17,491 \pm 0,004) \text{ m}$$

Nótese que este método es más preciso que el anterior, esta diferencia se debe a que la frecuencia de muestreo del espectro de RF de la figura A.1 producía menor precisión que la frecuencia de muestreo de la figura 4.3.

A.2.-Longitud del bucle de fibra del VCSEL multimodo sometido a retroalimentación

En esta parte del experimento se añade la longitud de fibra del amplificador además de aproximadamente 2 m extra de fibra debidos a conexiones. La frecuencia obtenida a partir de la figura 4.12 es:

$$\nu = \frac{1}{\tau} = \frac{1}{182,33 \text{ ns}} = (5,4846 \pm 0,0006) \text{ MHz}$$

A partir de la ecuación A.1 se obtiene la siguiente longitud del bucle de fibra:

$$L = \frac{v_g}{\nu} = \frac{2,043 \cdot 10^8}{5,48 \cdot 10^6} = (37,281 \pm 0,004) \text{ m}$$

-Referencias

- [1] Fundamentals of Photonics, B.E.A Saleh, Wiley, 2007.
- [2] www.rp-photonics.com/vertical_cavity_surface_emitting_lasers.html
- [3] Apuntes de Mecánica Teórica, Ángel Valle, Universidad de Cantabria, 2009.
- [4] Experimental Study of the Synchronization of Two Delay-Coupled Semiconductor Lasers. Xavier Porte Parera, Tesis de Máster. Universidad de las Islas Baleares, 2011.
- [5] Electrical Spectrum and Network Analyzers. Albert D. Helfrick
- [6] N. Li, W. Pan, A. Locquet, V. N. Chizhevsky, D. S. Citrin. “Statistical properties of an External-Cavity Semiconductor Laser: Experiment and Theory”, IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, vol. 21, no. 6, DOI: [10.1109/JSTQE.2015.2427523](https://doi.org/10.1109/JSTQE.2015.2427523), 2015.
- [7] A.Quirce, A.Valle, L.Pesquera, H.Thienpont, K.Panajotov. “Measurement of temperature-dependent polarization parameters in long-wavelength VCSELs”, IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, vol. 21, no. 6, art. 1800207, 2015.
- [8] H. Lin, Z. J. Lapin, B. Malla, A. Valle, “Polarization dynamics in a multi-transverse-mode vertical-cavity surface-emitting laser subject to optical feedback”, Physical Review A 77, art. 033813, 2008.
- [9] A. Valle, H. Lin, Z. J. Lapin, B. Malla, “Analysis of the polarization dynamics in a multitransverse mode vertical-cavity surface-emitting laser with isotropic optical feedback”, Physical Review A 78, art. 033828, 2008.