



LICENCIATURA EN FÍSICA
-TRABAJO FIN DE CARRERA-



Medida de parámetros estáticos y dinámicos de un láser de semiconductor de emisión de cavidad vertical

Autor: Ignacio Noriega González

Tutores: Dr. Ángel Valle Gutiérrez y Pablo Pérez García

Curso 2012/2013

- Índice -

Resumen	4
1- Introducción	
1.1 Propiedad fundamental: emisión perpendicular.....	5
1.2 Estructura y funcionamiento del VCSEL.....	5
1.3 Dinámica del VCSEL.....	8
1.4 Descripción del VCSEL utilizado (RayCan).....	11
1.5 Objetivos.....	12
2- Descripción experimental	
2.1 Instrumentación utilizada.....	13
2.2 Dispositivo experimental.....	16
3- Análisis y resultados	
3.1 Relaciones luz-corriente.....	17
3.1.1 Curvas luz corriente de la emisión total.....	17
3.1.2 Curvas luz-corriente de cada polarización lineal.....	22
3.2 Espectros de radiofrecuencia: medida de la ganancia diferencial.....	31
4- Conclusiones	34
5- Referencias	35

Resumen

Los láseres de semiconductor de cavidad vertical (VCSELs) son dispositivos que están suscitando un gran interés desde el punto de vista de sus aplicaciones. Se postulan como una de las fuentes láser del futuro debido a sus excelentes prestaciones, en comparación con los láseres de semiconductor habituales de emisión lateral. Por citar algunas de sus ventajas, presentan un tamaño muy reducido, consumen poca potencia, presentan buen acoplo a fibra, operan en un solo modo longitudinal y minimizan los costes de producción. Entre las aplicaciones más relevantes se encuentran los ratones ópticos, impresoras láser, y sobre todo sistemas de comunicaciones ópticas a corta y media distancia.

En este trabajo, el láser objeto de estudio es un VCSEL monomodo longitudinal emitiendo con una longitud de onda de 1550 nm. Esta longitud de onda pertenece a una región del espectro donde las características de transmisión de las fibras son favorables pues la atenuación que producen es mínima: 0.2 dB/km. En este trabajo se pretende realizar una serie de medidas que sirvan para conocer algunos de los parámetros que caracterizan estos láseres. Las medidas de espectros ópticos y espectros eléctricos de radiofrecuencia se usan para caracterizar el fenómeno de las oscilaciones de relajación que aparece en estos láseres y para conocer parámetros del láser como la ganancia diferencial.

La memoria se ha estructurado en 4 partes. En la primera parte se hace una descripción general de las diferencias entre VCSELs y láseres de emisión lateral, comentando las ventajas y aplicaciones de este tipo de láseres. Se incluye una explicación de la estructura y funcionamiento de los VCSEL, y una descripción específica del propio VCSEL empleado en el laboratorio. Además, se introducen las ecuaciones básicas que rigen el comportamiento de los láseres de semiconductor (ecuaciones de balance) y se describen fenómenos tales como las oscilaciones de relajación y el ruido de emisión espontánea. Todo ello permite obtener una visión global de este tipo de láseres de semiconductor.

A continuación, en una segunda parte, se describe e ilustra toda la instrumentación empleada, destacando sus características más relevantes y esquematizando su disposición en función de los estudios realizados a lo largo del trabajo.

La tercera parte comprende ya la caracterización del VCSEL y la medida de parámetros, donde se analizan y cuantifican aspectos relativos a la emisión del láser. A partir de curvas luz-corriente se obtienen parámetros estáticos del láser como la corriente umbral y la eficiencia cuántica diferencial. Mediante la medida de espectros ópticos se obtiene la potencia de cada una de las polarizaciones lineales perpendiculares en que puede emitir el VCSEL y el cambio de su longitud de onda con la corriente aplicada al dispositivo.

Con la medida de espectros de radiofrecuencia, se obtienen además los parámetros dinámicos que caracterizan el láser como la frecuencia de las oscilaciones de relajación. Su dependencia con la corriente permite hallar el parámetro de la ganancia diferencial.

Finalmente, se recogen las conclusiones extraídas a partir de todo el estudio realizado.

La realización de este trabajo ha supuesto una ampliación de los conocimientos en materia de Fotónica así como la adquisición de una mayor destreza en el manejo de la instrumentación que se utiliza para la investigación en este tipo de campos. Cabe señalar además que este trabajo también ha permitido obtener valores precisos para los parámetros de un VCSEL, cuya disposición ya está permitiendo llevar a cabo simulaciones que aporten resultados más próximos a la realidad, y en definitiva, avanzar en la comprensión y desarrollo de esta nueva tecnología.

1.Introducción

1.1- Propiedad fundamental: emisión perpendicular

El láser de semiconductor convencional, o de emisión lateral, es un dispositivo emisor de luz coherente en el que el haz láser viaja paralelo al plano de la región activa. Aunque éste se sigue empleando en multitud de aplicaciones [1] aún presenta algunos inconvenientes, como la dificultad en su fabricación y posterior integración con dispositivos electrónicos. Debido a razones como éstas, se han ido desarrollando propuestas de láseres de semiconductor alternativos, siendo la más común la de los láseres de emisión de cavidad vertical o VCSELs (“vertical-cavity surface-emitting lasers”). Estos dispositivos son láseres de semiconductor con la peculiaridad fundamental de que la luz se propaga perpendicularmente al plano de la región activa, a diferencia de los láseres de semiconductor de emisión lateral[2].

1.2- Estructura y funcionamiento

Los láseres de semiconductor, también denominados diodos láser, están constituidos fundamentalmente por una unión $p-n$ de materiales altamente dopados polarizada en directa [3]. La polarización directa significa que el voltaje en la zona p con respecto del de la zona n es positivo. Si la corriente aplicada es suficientemente alta se produce una inversión de población y el medio proporciona ganancia por emisión estimulada. A esta estructura básica se le añaden unos espejos con el objetivo de proporcionar la realimentación necesaria para aumentar la probabilidad de emisión estimulada hasta un régimen de emisión láser eficiente. La diferencia fundamental entre los láseres de semiconductor de emisión lateral más habituales hasta hace poco y los VCSELs que están desarrollándose en las últimas décadas es que estos últimos emiten en dirección perpendicular a la región activa, razón por la cuál tienen los espejos dispuestos en planos paralelos a la unión $p-n$, en vez de en planos perpendiculares (ver figura 1).

Debido a esta estructura, la región activa es recorrida por los fotones a lo largo del eje vertical, lo que implica un recorrido más corto por parte de los mismos en comparación con el caso de los láseres de emisión lateral, lo que en principio reduciría la probabilidad de que se diesen emisiones estimuladas. Para compensar este hecho y aumentar la probabilidad de emisión estimulada, es necesario aumentar el tiempo de vida media de los fotones dentro de la región activa, lo que se consigue con espejos de reflectividades mayores, en torno al 99.5%⁽¹⁾, que conlleven un mayor número de recorridos (“idas y venidas”) de los fotones dentro de la región activa. Estas reflectividades son imposibles de alcanzar

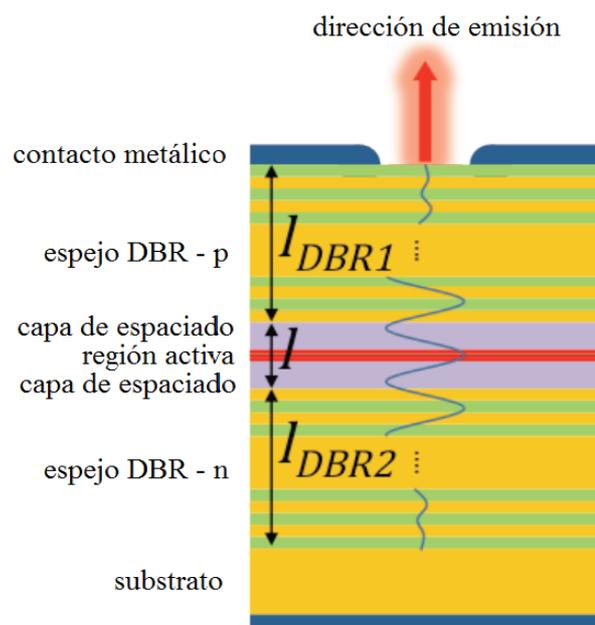


Figura 1: Estructura de un VCSEL

(1) En este trabajo se utilizará la notación anglosajona para los decimales

con espejos metálicos que como mucho pueden llegar a valores en torno al 98%. En su lugar, se usa un sistema de reflexión basado en “reflectores de Bragg distribuidos” (DBRs).

Espejos DBRs

Los espejos situados paralelamente a la región activa son la característica fundamental de los VCSELs que los diferencia de los láseres de emisión lateral; los espejos están basados en una estructura denominada Reflectores de Bragg, consistentes en la superposición de varias capas alternadas de dos medios con diferente índice de refracción, de espesores todas ellas de un cuarto de la longitud de onda de la luz en ese medio [2]. De esta forma, todas las reflexiones que se vayan produciendo en cualquiera de las múltiples interfaces se irán sumando en interferencia constructiva obteniendo como resultado neto la reflexión del haz incidente con una reflectividad en potencia en torno al 99.5%. Típicamente se requieren alrededor de 20 pares de reflectores Bragg para cada espejo (uno encima y otro debajo de la unión p-n, ver figura 1).

El número de capas superpuestas necesarias viene determinado por la diferencia entre los índices de refracción del medio, de tal forma que cuanto mayor sea la diferencia, menos capas serán necesarias para obtener la misma reflectividad. Una ventaja adicional de este tipo de espejos, es que al crearse por procesos de deposición de las diferentes capas de semiconductores no necesitan un pulido posterior.

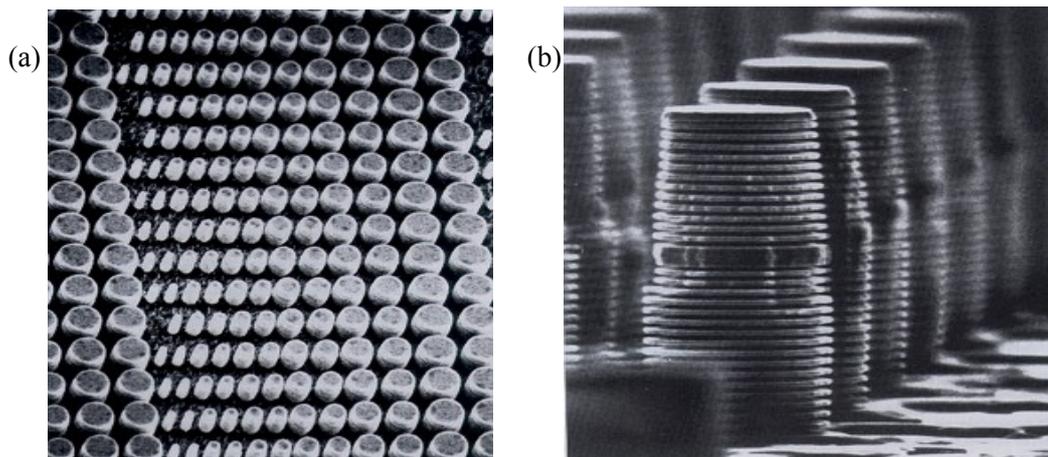


Figura 2: a) matriz de VCSELs. (izquierda). b) ampliación de la matriz en donde pueden apreciarse las capas alternas de los DBRs (derecha).

No obstante, las capas $\lambda/4$ (que es como se denomina a las capas superpuestas de los DBRs) no sólo tienen la función de actuar como espejos altamente reflectantes para los fotones. Las capas $\lambda/4$ tienen también la función de transportar la corriente de electrones y huecos, pues los contactos eléctricos están situados por encima y por debajo de los espejos del VCSEL (ver figura 1).

Región activa

También conocida como capa de amplificación, la región activa está comprendida entre los espejos DBRs (ver figura 1) e incluye varias capas ultrafinas (de unos pocos nm de espesor cada una) donde los electrones y huecos son inyectados a través de los contactos metálicos de

los substratos y quedan atrapados. Estas capas ultrafinas actúan como múltiples pozos cuánticos, donde los portadores se recombinan para dar lugar a los fotones.

El hecho de que la longitud de la cavidad sea menor que en el caso de los láseres de emisión lateral, del orden de varias micras, (unas pocas longitudes de onda de la luz emitida), tiene una implicación importante: la separación en frecuencia de los modos longitudinales es inversamente proporcional a la longitud de la cavidad, lo que conlleva una separación entre modos longitudinales de varios THz, tal y como se indica en la siguiente ecuación:

$$\Delta \nu = \frac{c}{2L} \quad (1)$$

donde $\Delta \nu$ es la separación entre modos longitudinales en frecuencia, L es la longitud de la cavidad (unos pocos μm) y c la velocidad de la luz en el material semiconductor. La separación entre modos longitudinales de varios THz es más ancha que el espectro de ganancia requerido para la amplificación de luz. En consecuencia, los VCSELs emiten en un único modo longitudinal (a diferencia de los láseres de emisión lateral), característica intrínseca que los hace idóneos para su uso como emisores de luz en sistemas ópticos de transmisión de información (véase figura 3) [3].

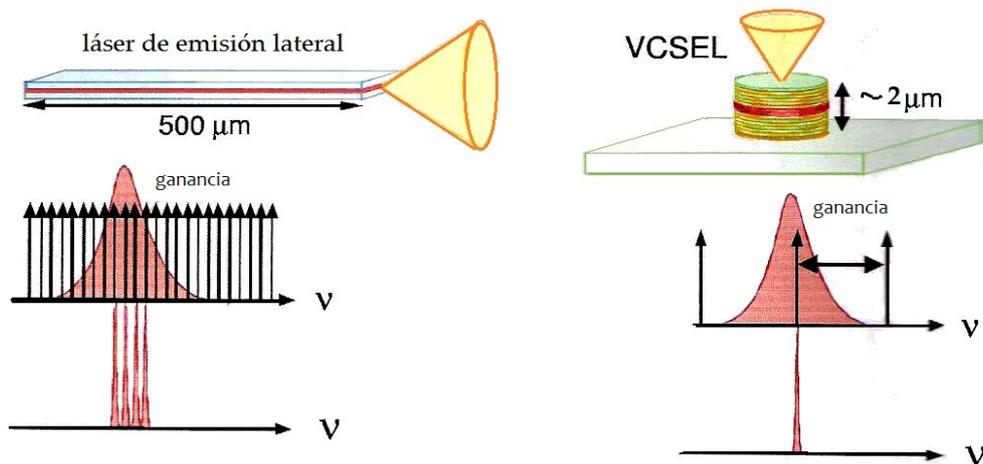


Figura 3: espectros de ganancia y emisión de un láser de semiconductor de emisión lateral (izquierda) y de un VCSEL (derecha).

La operación más eficiente de estos láseres se consigue cuando la frecuencia del modo longitudinal coincide con la frecuencia en la que el espectro de ganancia es máximo; no obstante, ese solapamiento puede verse afectado por cambios de temperatura (T), pues el índice de refracción del semiconductor aumenta con T y en consecuencia el pico de emisión se desplaza. El aumento de temperatura se debe a los procesos de autocalentamiento derivados fundamentalmente del efecto Joule producido por la resistencia al paso de la corriente a través de los espejos DBRs. Los VCSELs siempre pueden ser diseñados para conseguir una eficiencia óptima a una temperatura dada.

Un buen diseño del láser puede llegar a compensar la disminución de ganancia a altas temperaturas de manera que el comportamiento del VCSEL sea relativamente insensible a cambios de temperatura [4].

Ventajas del VCSEL

Los VCSELs presentan algunas importantes ventajas frente a otros láseres convencionales ([4]-[5]):

- El bajo consumo de potencia requerido para su funcionamiento
- El hecho de que operan en un único modo longitudinal
- La simetría cilíndrica de emisión - el haz emitido es circular- lo que facilita su acoplamiento a fibra óptica.
- La baja corriente umbral.
- Dada su estructura (figura 1) los láseres pueden ser empaquetados densamente en la superficie de una oblea, con lo que se logra que un conjunto muy numeroso de láseres se puedan manufacturar a un bajo costo (ver figuras 2.a y 2.b).

Aplicaciones

Estos láseres tienen un gran número de aplicaciones [1]:

- Almacenamiento de datos
- Ratones ópticos
- Comunicaciones ópticas, principalmente en sistemas de comunicaciones de alta velocidad en redes de área local, aunque su uso se está generalizando también en redes a media distancia.
 - Interconectores ópticos.

Otras aplicaciones posibles en vías de desarrollo:

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

1.3-Dinámica del láser

Ecuaciones de balance

Uno de los principales objetivos de este trabajo es la obtención de algunos de los parámetros intrínsecos del láser. Para ello es fundamental contar con una descripción teórica del funcionamiento del mismo. En el caso del VCSEL, se considera el modelo estándar de ecuaciones de balance para un láser de semiconductor que emite en un solo modo [6]:

$$\frac{dP}{dt} = G_N \cdot (N - N_t) \cdot P - \frac{P}{\tau_p} + \beta \cdot N \quad (2)$$

$$\frac{dN}{dt} = \frac{I}{e} - \frac{N}{\tau_n} - G_N \cdot (N - N_t) \cdot P \quad (3)$$

En estas ecuaciones se tienen dos variables: N y P , que son el número de portadores de carga y

fotones en el interior de la región activa, respectivamente. Además de I , la corriente aplicada al VCSEL (el bombeo) y e , la carga del electrón, se tienen los parámetros intrínsecos del mismo: G_N , N_t , τ_p , β y τ_n . G_N es la ganancia diferencial y proviene de derivar la ganancia neta, $G_N(N-N_t)$, con respecto al número de portadores. La ganancia neta tiene en cuenta tanto la absorción o pérdidas dentro de la cavidad como la emisión estimulada. N_t el número de portadores en el régimen de transparencia (régimen en el cual la luz no sufre absorción o pérdidas en la cavidad). Por otra parte, τ_p y τ_n son la vida media de fotones y portadores dentro de la región activa, respectivamente. Por último, βN , es la velocidad de la emisión espontánea en el modo láser dando β idea de la fracción de emisión espontánea que se acopla en modo láser.

La potencia óptica que emite un láser de semiconductor (P_0) es directamente proporcional al número de fotones P . Por encima del umbral, es función de la corriente que se aplica al mismo (I) y viene dada por [6]:

$$P_0 = \eta \frac{h\nu}{e} (I - I_{th}), \quad (4)$$

donde h es la constante de Planck, ν la frecuencia del haz emitido, I_{th} la corriente umbral a partir de la cuál comienza a haber emisión láser y por último η es la eficiencia cuántica diferencial. La eficiencia cuántica diferencial es la fracción de portadores de carga inyectados por encima del umbral que contribuyen a la emisión de fotones al exterior; ésto puede entenderse a partir de la ecuación 4, despejando η :

$$\eta = \frac{P_0/h\nu}{(I - I_{th})/e} \Rightarrow \frac{\left(\# \text{ fotones emitidos al exterior} / \text{tiempo} \right)}{\left(\# \text{ portadores inyectados sobre umbral} / \text{tiempo} \right)} = \frac{\# \text{ fotones emitidos}}{\# \text{ portadores inyectados}}$$

Estos parámetros definidos hasta aquí son parámetros estáticos del láser, diferentes de los dinámicos, que proporcionan información sobre la evolución temporal de las variables, los cuales se explicarán más adelante.

Se pueden analizar brevemente los términos que componen las ecuaciones 2, 3 y 4. El término $(-P/\tau_p)$ tiene en cuenta la pérdida de fotones a través de los espejos (los DBRs en este caso) y el interior del láser. El término βN , como ya se ha señalado, tiene que ver con la emisión espontánea que interviene en el modo láser. Su valor será pequeño, porque la emisión espontánea ocurre en todas las direcciones sobre un amplio rango espectral (30-40 nm) pero sólo una pequeña fracción contribuye al aumento de fotones en el modo láser. Por otra parte, I/e da cuenta del bombeo: gracias a la corriente aplicada aumenta el número de portadores en la cavidad. (N/τ_n) incluye la pérdida de portadores debido a la emisión espontánea y a la recombinación no radiativa (recombinación de electrones y huecos que no da lugar a emisión). Por último, el término $G_N(N-N_t)P$ da cuenta de la velocidad de recombinación de electrones y huecos debido a la emisión estimulada. Como por cada fotón que se crea se destruye un electrón, este término es positivo en la ecuación para los fotones pero negativo en la de los electrones.

Hay otros parámetros que se pueden calcular a partir de los anteriores, como por ejemplo la supresión del modo lateral que es el cociente de la potencia de pico más intensa obtenida en el espectro óptico entre la del segundo pico más intenso.

Oscilaciones de relajación

Anteriormente se ha hablado de los parámetros estáticos del láser. Ahora se hablará de dos parámetros dinámicos importantes: la frecuencia de las oscilaciones de relajación y su tasa de amortiguamiento. Se llaman parámetros dinámicos porque informan directamente de la evolución temporal del número de fotones y portadores.

De acuerdo con la observación experimental, es conocido que los láseres son capaces de alcanzar con el tiempo, un estado estacionario de emisión. Este estado estacionario también puede ser calculado a través de las ecuaciones de los modelos, en este caso las ecuaciones de balance. Sin embargo, antes de llegar al estado estacionario estable, en el que no se encuentra operando el láser bien porque comienza a funcionar (proceso de encendido) o bien porque una perturbación lo ha desplazado del mismo, tanto el número de portadores como el de fotones llevan a cabo unas oscilaciones periódicas amortiguadas, conocidas como oscilaciones de relajación [6]. Pueden observarse dichas oscilaciones en la figura 4 [7], después del crecimiento del número de portadores hasta su valor umbral, valor a partir del cual se produce la emisión láser. El punto de operación umbral se caracteriza por la igualdad entre pérdidas y ganancia en la cavidad.

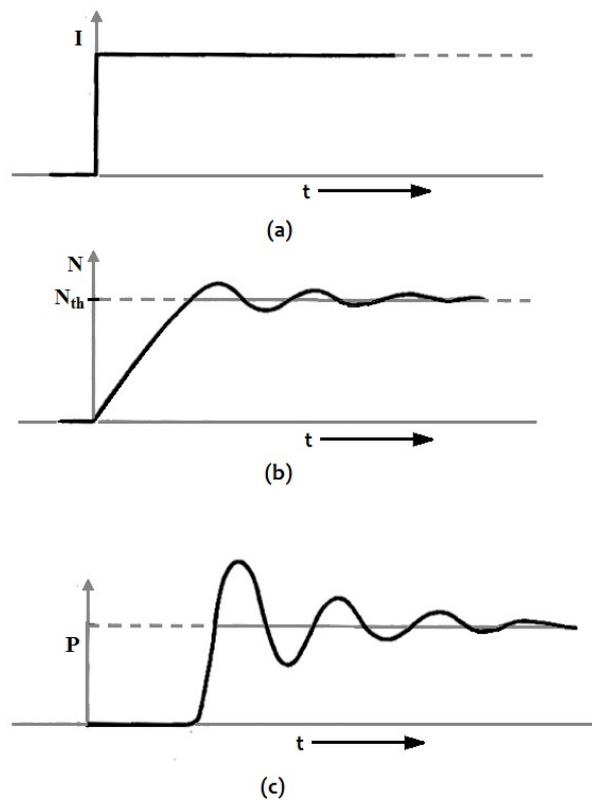


Figura 4: Oscilaciones de relajación en los portadores (b) y fotones (c) tras un aumento instantáneo de corriente (a) que provoca el encendido del láser.

La caracterización de las oscilaciones de relajación viene dada por la frecuencia angular de las mismas (Ω_R) y su tasa de amortiguamiento (Γ_R). El cálculo de ambos parámetros puede realizarse a través de las ecuaciones de balance, considerando pequeñas perturbaciones alrededor del punto estacionario [6]. Las expresiones que se obtienen se presentan a continuación, donde puede verse

la dependencia con los parámetros estáticos y con la corriente aplicada relativa a la corriente umbral I_{th} (corriente a partir de la cual existe emisión láser).

$$\Omega_R = \sqrt{\frac{G_N}{e} (I - I_{th})} \quad (5)$$

$$\Gamma_R = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\tau_n} + \frac{G_N \tau_p}{e} (I - I_{th}) \right) \quad (6)$$

Ruido en el láser

La presencia de ruido es algo común a la mayoría de dispositivos físicos, y el láser de semiconductor no es una excepción [6]. La salida del láser tiene fluctuaciones en su intensidad, fase y frecuencia, incluso cuando la corriente aplicada tiene unas fluctuaciones despreciables. El ruido, en este caso de los láseres de semiconductor, está dominado por la emisión espontánea. Un fotón emitido espontáneamente puede añadirse al campo coherente creado por la emisión estimulada, dando lugar a una componente del campo pequeña pero de fase aleatoria, perturbando la fase total y la amplitud de forma también aleatoria. Estos sucesos de emisión espontánea ocurren a gran velocidad.

En las ecuaciones de balance es posible tener en cuenta el ruido. Éste es simulado por una variable gaussiana dependiente del tiempo con una autocorrelación dada por una función delta de Dirac, lo que es conocido como ruido blanco Gaussiano. Puede pues añadirse un término proporcional a este ruido blanco en las ecuaciones de balance para tener en cuenta el ruido y los efectos que éste produce en la emisión láser, si bien aquí no se analizará con más detalle.

Como ya se ha señalado, el ruido provoca fluctuaciones de intensidad, fase y frecuencia. Particularmente interesantes en este trabajo son las fluctuaciones en intensidad. Éstas dan lugar a que el cociente señal-ruido (SNR) esté limitado, y se pueden caracterizar por el promedio del valor absoluto al cuadrado de las fluctuaciones en el número de fotones en el dominio de la frecuencia, es decir, por el espectro de las fluctuaciones en el número de fotones. Este espectro no se mide directamente, siendo medido en su lugar un espectro proporcional a él obtenido con un fotodetector conectado a un analizador de espectros de radiofrecuencia. Ambos espectros son proporcionales debido a que la corriente obtenida en el fotodetector es proporcional a la potencia de luz que recibe, siendo ésta a su vez proporcional al número de fotones en el láser. El cálculo de la expresión de estos espectros puede realizarse analíticamente linealizando las ecuaciones de balance alrededor de los valores estacionarios y realizando la transformada de Fourier [6]. Esta expresión presenta un máximo en la frecuencia de las oscilaciones de relajación, lo que permite obtener éstas a través de la medida del espectro de radiofrecuencia, como se realiza precisamente en este trabajo más adelante.

1.4-Descripción del VCSEL utilizado

Se han realizado medidas sobre un VCSEL comercial mono-modo (longitudinal) polarizado en inversa (RayCan co.) diseñado para su uso en sistemas de alta velocidad (hasta 4.5 Gbps). Este VCSEL emite a una longitud de onda de 1550 nm y ha sido fabricado sobre un sustrato de InP crecido monolíticamente mediante la técnica de depósito de capas delgadas MOCVD (deposición química de capas en fase por vapor mediante precursores organometálicos) [8]. Las capas alternas que componen los espejos DBRs situados en las partes superior e inferior, están constituidas por InAlAs/InAlGaAs.

La región activa, donde se encuentran los múltiples pozos cuánticos, cuenta con un espesor de 0.5 veces la longitud de onda de la luz en la cavidad (λ).

En el interior de la cavidad, se tiene un doble contacto con un espesor de 2.5λ revestido de capas de n-InP, a fin de difundir con alta eficiencia el calor y disminuir la resistencia del dispositivo. Por último, el confinamiento de la corriente lo proporciona una abertura de aire formada mediante la técnica de grabado húmedo selectivo. En la figura 5 se presenta un esquema del dispositivo empleado.

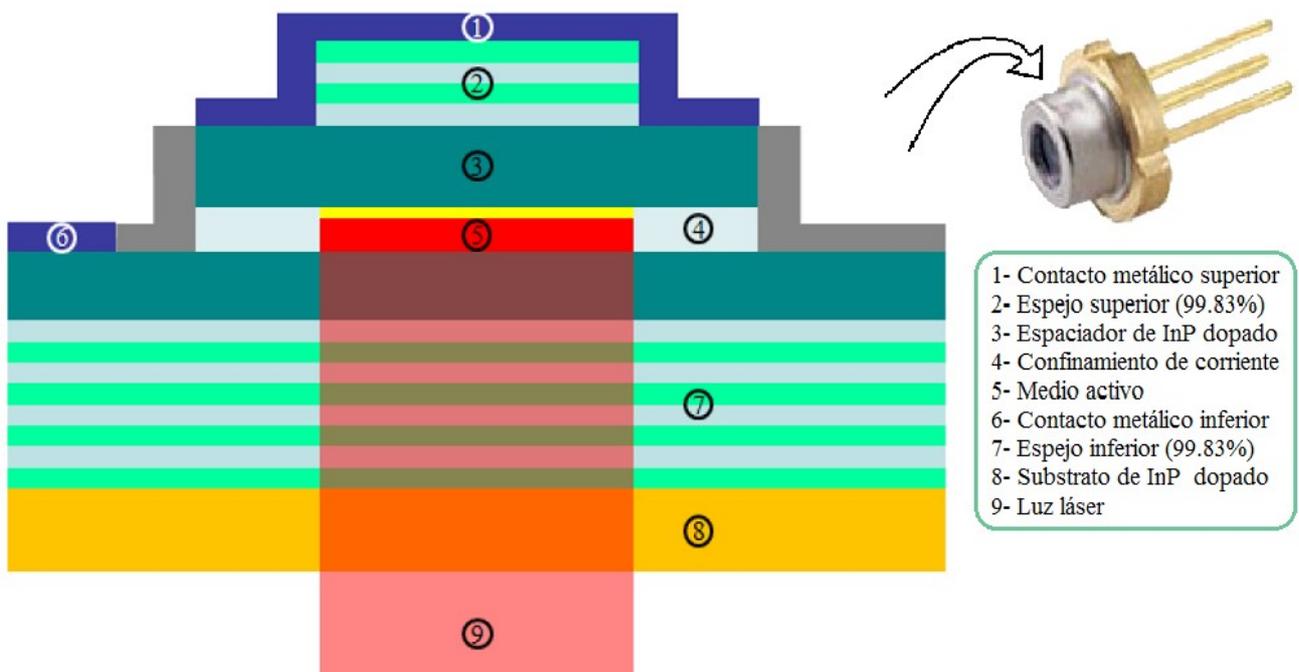


Figura 5: estructura del VCSEL monomodo con longitud de onda de emisión de 1550 nm comercializado por RayCan y empleado en este trabajo. Arriba a la derecha carcasa en la que es introducido para su manipulación.

Los VCSELs se colocan en el interior de unas carcasas (ver esquina superior derecha de la figura 5) que facilitan su manejo y acoplamiento en fibra. El VCSEL encapsulado tiene una salida de fibra óptica en cuyo extremo opuesto se encuentra un conector, que permite los acoplamientos necesarios según el uso que se le quiera dar al VCSEL.

1.5- Objetivos

En este trabajo se pretende esencialmente medir parámetros intrínsecos de un láser, adquiriendo con ello una mayor destreza en el manejo de la instrumentación de laboratorio y una ampliación de los conocimientos de fotónica. Aunque en las especificaciones de los láser vienen parámetros ya medidos como la corriente umbral, longitud de onda de emisión, potencia típica de emisión, la supresión del modo lateral. etc, hay otros parámetros intrínsecos del láser que no son detallados y cuyo conocimiento es indispensable para describir de forma teórica el comportamiento dinámico del láser. Estos parámetros son los detallados anteriormente al describir las ecuaciones de balance. Concretamente se propuso como objetivo la medida de los siguientes parámetros:

- estáticos: corriente umbral, eficiencia cuántica diferencial y ganancia diferencial
- dinámicos: frecuencia de las oscilaciones de relajación

2. Descripción experimental

2.1- Instrumentación utilizada

A continuación, se realiza una breve descripción de la instrumentación utilizada en este trabajo.

Montura para VCSEL



Esta montura, modelo TCLDM9 de Thorlabs, (foto a la izquierda) permite acoplar láseres de semiconductor (no solo VCSELs) de forma rápida, fijándose en la correcta colocación de los contactos. Pueden acoplarse láseres con carcasa de 5.6 ó 9 mm indistintamente, láseres acoplados a fibra como es el caso, o láseres que emiten al aire. Esta montura permite controlar la temperatura del VCSEL utilizando el efecto Peltier mediante el uso de dos laminas refrigeradoras

termoeléctricas (TEC) por las que pasa una corriente continua cuyo valor puede variar entre -2 y +2 A. La intensidad y sentido de esa corriente, y por tanto de la temperatura del exterior del VCSEL, están reguladas por el controlador de temperatura para láseres de semiconductor que se describe a continuación.

Controladores de corriente y temperatura



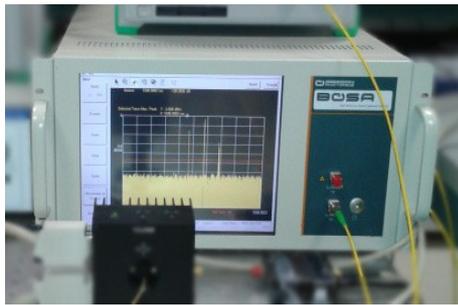
En la parte superior se muestra el controlador de corriente para VCSELs LDC205C. La intensidad de corriente que pasa por el VCSEL puede variarse entre 0 y 20 mA con una precisión de 0.001 mA. En la parte inferior de la figura de la izquierda se muestra el controlador de temperatura para láseres de semiconductor TED200, regulado a la temperatura que se mantuvo durante todo el trabajo de investigación (25°C). El controlador de temperatura tiene una precisión de 0.01°C.

Medidor de potencia óptica (PM)

El medidor de potencia óptica PM20 de Thorlabs cubre un amplio rango de longitudes de onda, entre 400 y 1700 nm. Es capaz de medir potencia óptica desde -60 hasta 20 dBm, y las medidas pueden realizarse tanto en dBm como en W. Para realizar medidas es necesario introducir la longitud de onda aproximada en la que se desea trabajar.



Analizador de espectros ópticos de alta resolución (BOSA)



Este analizador de espectros utiliza la estrecha ventana de amplificación característica de la dispersión de Brillouin en la fibra óptica para obtener el espectro óptico de una señal con una resolución de 0.08 pm (10 MHz). El proceso de medida consiste en un láser sintonizable (TL) que cambia continuamente su longitud de onda a lo largo del rango espectral de interés para luego detectar la luz dispersada por efecto Brillouin del haz sometido a estudio. Todo el proceso de filtrado se lleva a cabo en el dominio óptico y la información espectral de la señal llega directamente a la zona de detección. Un dispositivo sincronizado con el TL es el encargado de realizar los barridos y procesar los datos. La amplificación de potencia no lineal que se encuentra en la señal dispersada permite la detección de componentes espectrales a muy bajos niveles de potencia, hasta -70 dBm /0.08 pm.

Fotodetector



El fotodetector es un dispositivo que proporciona una intensidad o voltaje en respuesta a la potencia óptica incidente sobre la superficie sensora de radiación óptica. El utilizado en este trabajo es el PDA8GS de Thorlabs, con entrada de fibra óptica, ancho de banda de 8 GHz y responsividad 0.9 A/W a 1550 nm. El fotodetector, en este caso, esta conectado al analizador de espectros de radiofrecuencia, que describimos a continuación.

Analizador eléctrico de espectros de radiofrecuencia (RF)



El analizador de espectros de radiofrecuencia (RF) ANRITSU MS2719B mide básicamente la potencia en dBm en función de la frecuencia de la señal proveniente del fotodetector, el cual recoge la radiación óptica. Opera en el rango de frecuencias de 9 kHz a 20 GHz, con la posibilidad de ajustar el intervalo de medida.

Control de polarización (PC)



El controlador de polarización (Thorlabs FBROS) es un dispositivo capaz de cambiar la polarización de la luz entrante a cualquier otra que se desee. Consta de 3 laminas retardadoras: dos en los extremos de un cuarto de longitud de onda ($\lambda/4$) y una central de media longitud de onda ($\lambda/2$).

Estas tres laminas van montadas sobre un soporte y pueden ser giradas libremente. Combinando las posiciones de las mismas es posible transformar una polarización cualquiera en otra deseada.

Divisor de polarizaciones (PBS)



El PBS (del ingles *Polarization Beam Splitter*, divisor de polarizaciones) F-PBC- 15-SM-FA de Newport es un dispositivo que permite separar la luz entrante por uno de sus puertos en las dos polarizaciones paralela y ortogonal, las cuales salen por los otros dos puertos.

El funcionamiento interno se basa en la birrefringencia de los materiales que lo componen. El haz paralelo sufre una atenuación de 0.63 dB y el ortogonal de 0.88 dB, según indica el fabricante.

Fibra óptica



Las fibras ópticas son el medio de transmisión de la luz en los sistemas ópticos. Están fabricadas con materiales dieléctricos. Su importancia se debe a la baja atenuación que presentan, del orden de 0.2 dB/km para un láser emitiendo a una longitud de onda de

1550 nm, y a que sus tasas de transmisión son muy elevadas, además de confinar el campo eléctrico. Presentan un tamaño transversal y peso reducidos.

2.2- Dispositivo experimental

En la figura 6 se muestra esquemáticamente un modelo general para explicar el dispositivo experimental que contiene todas las posibilidades concretas empleadas en el laboratorio durante los diferentes estudios realizados:

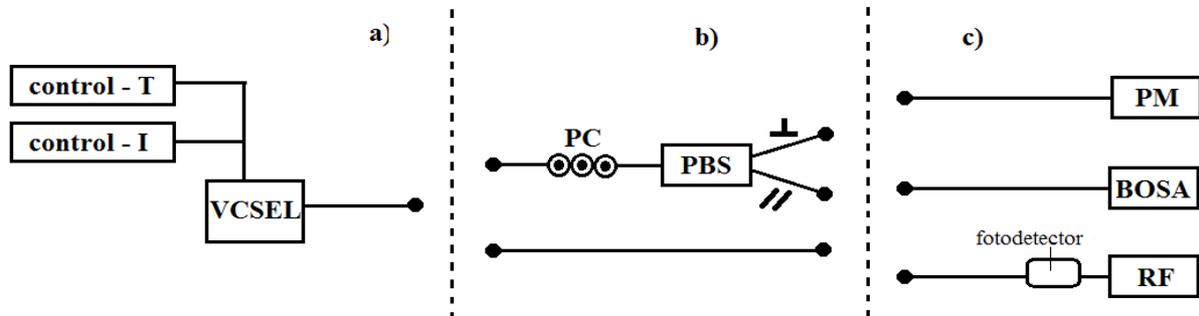


Figura 6: Esquema del dispositivo experimental utilizado durante el trabajo.

En el dispositivo experimental se tiene, de izquierda a derecha: los controladores de temperatura y corriente, el VCSEL, el controlador de polarización (PC) y el divisor de polarización (PBS) que podrá ser usado o no, y los aparatos de detección a los que se conectará la fibra (o fibras, si hay separación de polarizaciones por PBS) para hacer los registros y que podrán ser el medidor de potencia óptica (PM), el analizador de espectros ópticos (BOSA) o el analizador de espectros de radiofrecuencia (RF) que registra la señal eléctrica que formará el espectro óptico en pantalla, proveniente de un fotodetector conectando previamente a la fibra, a través del que pasa la luz. El esquema del dispositivo experimental se divide en 3 zonas (*a*, *b* y *c*).

- La zona *a* es común en todos los procesos de medida (parte fija del dispositivo).
- La zona *b* es variable: o se usó el conjunto PC-PBS para separar las polarizaciones, o se dejó sólo la fibra transportando el haz total del VCSEL.
- La zona *c* indica las tres opciones de aparato de medida a utilizar .

En el laboratorio se cuenta con un sólo BOSA y un sólo RF. Se tienen no obstante varios PM. Cuando se quieran estudiar las polarizaciones por separado y la zona *b* conste por tanto de PBS, se tendrán dos salidas de luz por fibra (las dos polarizaciones) en vez de una. Para estudiar la luz completa del VCSEL en ese caso, si se recurre al BOSA o al RF se necesitará hacer uso de éstos dos veces en vez de una (una vez para cada salida del PBS). En el caso de que se vaya a usar PM, se podrá disponer de un PM para cada salida y realizar las medidas simultáneamente para las dos polarizaciones.

3. Análisis y resultados

Se llevó a cabo la caracterización de un VCSEL monomodo que emite a una longitud de onda de 1550 nm, manteniendo una temperatura de 25° en todo momento, mediante el controlador de temperatura. Un primer estudio se enfocó en la relación luz-corriente, y en el reparto de la potencia óptica entre los dos tipos de polarización lineales presentes en la emisión (a los que se convendrá en llamar polarización paralela y polarización ortogonal); se caracterizó el desplazamiento de la frecuencia en la que la emisión era máxima, para ambas polarizaciones y en función de la corriente. Por último se estudió el espectro de potencia del ruido debido

principalmente a la emisión espontánea a través de los espectros registrados en el analizador de espectros de radiofrecuencia (RF), con objeto de determinar la frecuencia de las oscilaciones de relajación.

3.1- Relación luz-corriente

3.1.1 Curvas Luz-Corriente de la emisión total

Prescindiendo del PBS en un primer estudio y haciendo uso de un PM (ver figura 6 del dispositivo experimental) se midió la potencia óptica total del láser para distintos valores de la corriente de inyección (la potencia es proporcional a la cantidad de fotones que hay en la cavidad del VCSEL, por eso se hablará indistintamente de luz o potencia).

Los resultados se muestran gráficamente en la figura 7.

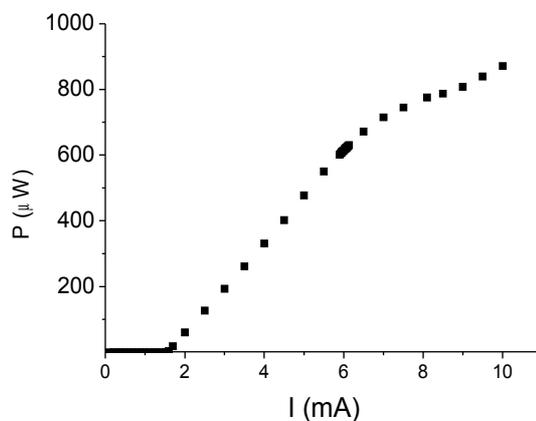


Figura 7: Potencia total del VCSEL para distintos valores de la corriente, a una temperatura de 25°C

Se aprecia claramente una primera región de bajas corrientes donde la emisión de luz es muy pequeña (aparentemente despreciable), seguida de una región donde la potencia crece linealmente con la corriente. La corriente a partir de la cual la potencia comienza a crecer, o corriente umbral, está claramente situada entre 1 y 2 mA. Para ver más finamente cuán despreciable o no es la emisión de luz en la primera región (corrientes por debajo de la corriente umbral) se representa la misma gráfica en escala logarítmica en la figura 8.

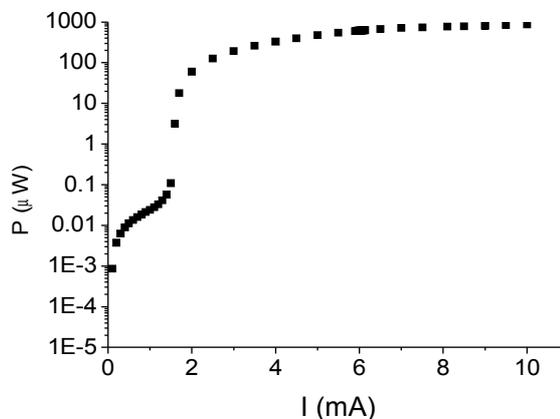


Figura 8: Potencia total del VCSEL para distintos valores de la corriente, a una temperatura de 25°C.

Se observa que la emisión de luz por debajo de la corriente umbral no es nula. La presencia de emisión lumínica en esta zona se debe al hecho de que aunque no se haya alcanzado la corriente umbral que da lugar a las emisiones estimuladas por inversión de población, siempre está presente la emisión espontánea, responsable de este registro de emisión por debajo de la corriente umbral.

Por encima de la corriente umbral también hay emisión espontánea, pero su contribución es muy pequeña frente a la emisión estimulada que es la que rige a partir de ahí el comportamiento del VCSEL y de ahí el cambio en la curva luz-corriente.

Volviendo a la figura 7, se observa que la potencia crece linealmente con la corriente a lo largo de una región extensa de valores de la corriente que parten de la umbral. Pero se llega una región de altas corrientes donde la potencia deja de crecer linealmente. En esta zona de altas corrientes, la potencia va aumentando más lentamente; se dice entonces que el láser se encuentra en régimen de saturación.

De hecho, si se sigue aumentando la corriente en régimen de saturación, se puede llegar a un punto en el que sucesivos incrementos de corriente comiencen a producir decrementos de potencia.

Para determinar un valor preciso de la corriente umbral, tiene sentido plantear un ajuste de la relación lineal $P-I$ de la gráfica 7. De esta forma, el punto de corte de la recta de regresión con el eje de coordenadas será una aproximación adecuada del valor de la corriente umbral.

Por otro lado, si se representa la relación $P-(I-I_{th})$ junto con su ajuste lineal, puede obtenerse la eficiencia cuántica diferencial directamente de la pendiente, según la ecuación 4.

La relación $P-I$ con su respectivo ajuste se presenta en la figura 9(a).

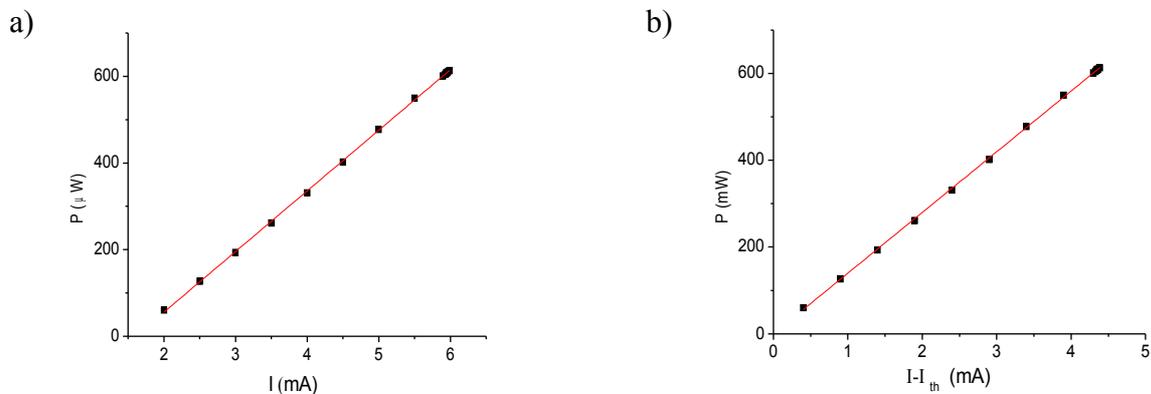


Figura 9: Valores de la potencia total del VCSEL en función de: a) la corriente aplicada, y b) la corriente aplicada menos la corriente umbral. Ambos datos pertenecen a la región de comportamiento lineal. Se presenta junto con los ajustes lineales $P(I)=140.0 \cdot I - 224$ y $P(I)=139.8 \cdot (I-I_{th})$ para (a) y (b) respectivamente, ambos con $R=0.999$.

A partir del ajuste mostrado en la figura 9(a), queda cuantitativamente manifiesto el comportamiento lineal de la curva luz-corriente superado el límite de la corriente umbral, y antes de llegar a la zona de saturación. Con estos ajustes pueden obtenerse el valor de la corriente umbral y de la eficiencia cuántica diferencial.

El ajuste lineal de la gráfica a) de la figura 9 viene dado por:

$$P(I) = a \cdot I + b \Rightarrow \begin{cases} a = (140.0 \pm 0.5) \frac{\mu W}{mA} \\ b = (-224 \pm 3) \mu W \end{cases}$$

La corriente umbral (I_{th}) será aquella para la cuál la potencia sea cero, por tanto:

$$I_{th} = \frac{-b}{a} = \frac{224}{140} \Rightarrow I_{th} = (1.60 \pm 0.02) mA$$

Con este valor de la corriente umbral se puede dibujar la relación $P-(I-I_{th})$ que se muestra en la figura 9(b). El ajuste lineal de la gráfica b) de la figura 9 viene dado por:

$$P(I - I_{th}) = m \cdot (I - I_{th}) \Rightarrow \begin{cases} m = (139.8 \pm 0.2) \frac{\mu W}{mA} \end{cases}$$

La eficiencia cuántica se halla a partir de la pendiente (véase ecuación 4):

$$\eta = \frac{m \cdot e}{h \nu} = \frac{m \cdot e \cdot \lambda}{h \cdot c} = \frac{139.8 \cdot 10^{-6} \cdot 1.602 \cdot 10^{-19} \cdot 1538 \cdot 10^{-9}}{6.626 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}$$

$$\eta = (0.1733 \pm 0.0003)$$

Para el cálculo de la eficiencia cuántica se requirió el valor de la longitud de onda de emisión del VCSEL (λ). Aunque la especificación de la casa dice que el VCSEL emite a 1550 nm, éste es meramente un valor orientativo: como se verá en el siguiente apartado, la longitud de onda de emisión varía con la corriente aplicada. Por esa razón se ha creído conveniente tomar como valor de λ el promedio de los dos valores extremales de la longitud de onda asociados al rango de corrientes aplicadas (estimación hecha a partir de la figura 11) tomando la mitad de la diferencia entre ambos extremales como error: $\lambda = (1538 \pm 1) \text{nm}$.

Desplazamiento de picos de emisión en longitud de onda

Con objeto de estudiar el espectro óptico del láser en función de la corriente, se preparó el dispositivo experimental (ver figura 4) de la siguiente forma: se prescindió del PBS y del PC en la parte b, y se conectó la fibra óptica de la salida del VCSEL directamente al BOSA (parte c) para registrar el espectro óptico de emisión del láser. Se pudieron observar así dos picos de emisión (correspondientes al único modo longitudinal) para cualquier valor de la corriente por encima de la umbral: el pico de emisión de la polarización paralela y el pico de emisión de la polarización ortogonal. El pico de emisión que corresponde a la potencia paralela (ortogonal) es el que aparece a longitudes de onda más bajas (altas). Se registraron un total de 27 espectros ópticos mediante el BOSA. Se presentan 6 de esos espectros, como representativos de toda la evolución observada del espectro con la corriente en la figura 8.

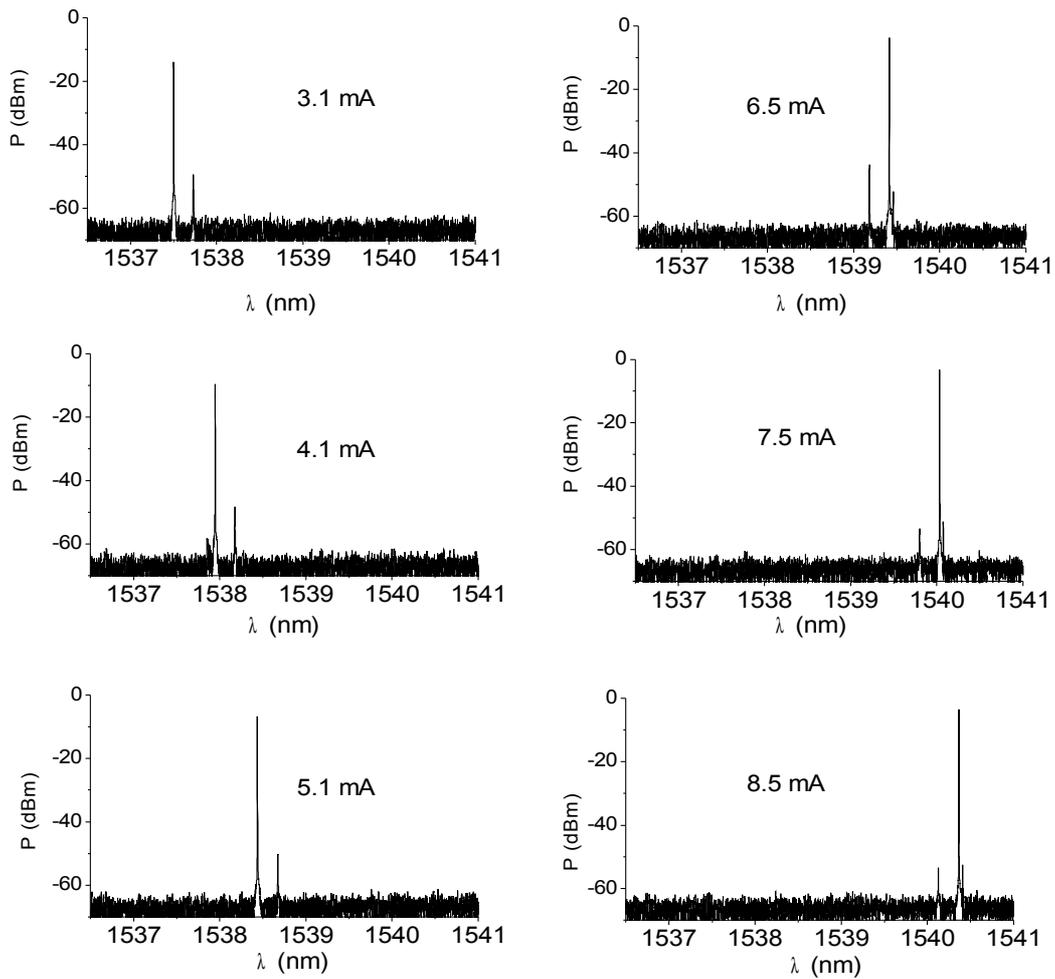


Figura 10: Espectros ópticos de la emisión del láser registrados mediante el BOSA. La temperatura se mantuvo fija en todo momento a 25°C. Cada espectro corresponde a una corriente diferente aplicada al VCSEL, que se indica en cada caso. El pico izquierdo es el pico de emisión de polarización paralela, y el derecho el de polarización ortogonal.

En los espectros correspondientes a las tres corrientes más bajas (columna izquierda de la figura 10), se observa que casi toda la emisión se produce a través de la componente de polarización paralela. Posteriormente se llega a una corriente a partir de la cuál, se intercambia la potencia entre las polarizaciones, de forma que la mayor parte de la luz se emite en polarización ortogonal, tal y como se aprecia en los tres espectros de mayor corriente de la figura 10 (columna derecha de la figura 8). Este cambio de polarización dominante se denomina “switching” de polarización, y en el VCSEL estudiado, a 25°C, tiene lugar a una corriente aplicada de 6.0 mA.

A partir de los datos de los 27 espectros registrados con el BOSA, se extrajo para cada corriente, el valor de la longitud de onda de la potencia máxima de emisión de los dos tipos de polarización, λ_{para} y λ_{orto} para la paralela y ortogonal, respectivamente. Los resultados se muestran gráficamente en la figura 11.

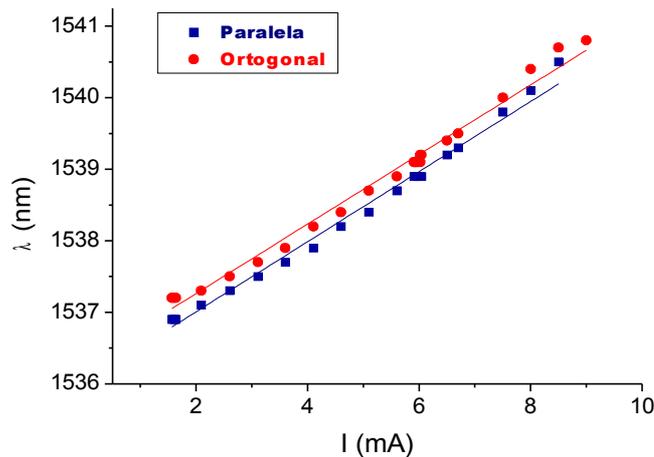


Figura 11: Longitud de onda de los picos de emisión de polarización paralela y ortogonal, en función de la corriente. Se presenta además el ajuste lineal para los datos de las dos polarizaciones: $\lambda_{\text{para}}(I) = 0.49 \cdot I + 1536.03$, con $R = 0.991$. Y $\lambda_{\text{orto}}(I) = 0.49 \cdot I + 1536.29$, con $R = 0.990$.

Se observa por un lado que la longitud de onda de ambos picos de emisión crece linealmente con la corriente. Este corrimiento también se observaba en la figura 10. Por otro lado, la distancia relativa de ambos picos de emisión permanece constante a lo largo de todos los valores de la corriente, como puede apreciarse en el hecho de que las pendientes toman el mismo valor para las dos polarizaciones:

$$\frac{\Delta \lambda_{\parallel}}{\Delta I} = (0.49 \pm 0.01) \frac{nm}{mA}$$

$$\frac{\Delta \lambda_{\perp}}{\Delta I} = (0.49 \pm 0.01) \frac{nm}{mA}$$

La razón del cambio de la longitud de onda de resonancia con la corriente aplicada se entiende a partir de la condición de resonancia:

$$2 \cdot k \cdot L = 2 \cdot q \cdot \pi,$$

donde L es la distancia recorrida por los fotones dentro de la región activa, q es un número natural y $k = 2\pi/\lambda = 2\pi n/\lambda_0$, siendo λ la longitud de onda de emisión en el material semiconductor, λ_0 la longitud de onda de emisión en el vacío y n el índice de refracción del material semiconductor. Si se expresa la longitud de onda de emisión en el exterior del VCSEL teniendo en cuenta la condición de resonancia, resulta:

$$\lambda_0 = \frac{2 \cdot L \cdot n}{q} \Rightarrow \lambda_0 \propto n$$

La longitud de onda de resonancia es proporcional al índice de refracción. En un material semiconductor el índice de refracción aumenta con la temperatura. Por tanto, cuando se aumenta la corriente inyectada al VCSEL, se produce también un aumento de la disipación de energía en forma de calor por efecto joule en los espejos, que implica en definitiva un aumento de la temperatura y éste, por las razones explicadas, conlleva un aumento de la longitud de onda de emisión.

3.1. 2 Curvas luz-corriente de cada polarización lineal

En la primera parte del análisis se registró la potencia total que llegaba desde el VCSEL a través de fibra óptica conectada directamente al medidor de potencia óptica PM (figuras 7 y 8). En aquel caso, no estaban presentes ni el controlador de polarización (PC) ni el divisor de polarizaciones (PBS).

Ahora se registrará la relación potencia-corriente de cada polarización por separado. Lo primero fue colocar el dispositivo experimental (ver figura 6) de forma que en la parte *a* se ajustasen las polarizaciones paralela y ortogonal mediante el PC con objeto de que quedasen alineadas con los ejes de polarización del PBS. Para realizar este ajuste, en la parte *b* se introdujo el PBS para separar el haz de luz en estas dos componentes de polarización y a continuación, haciendo uso de dos PM en la parte *c*, conectados uno a cada una de las dos fibras de salida del PBS (a cada polarización) se manipuló el PC hasta obtener simultáneamente un valor máximo de potencia en el PM conectado a la salida paralela del PBS y un valor mínimo en el PM conectada a la salida ortogonal. Una vez quedaron adecuadamente combinados el PC y el PBS, se registró por separado la potencia de cada componente para distintos valores de la corriente. El registro de potencias se hizo de nuevo llevando a cabo un barrido en valores de la corriente aplicada y los resultados se muestran gráficamente en la figura 12..

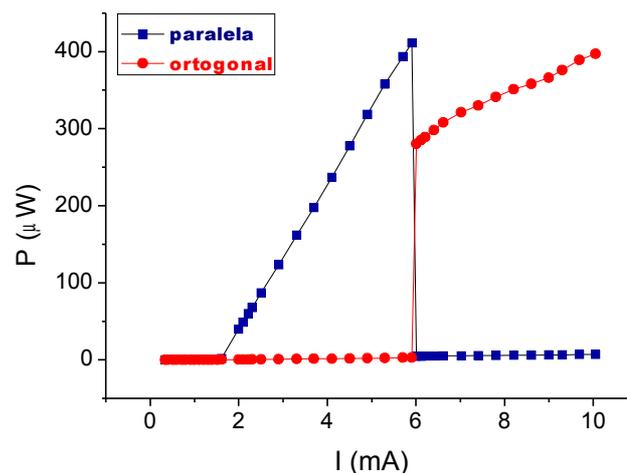


Figura 12: Potencia de cada componente de polarización para distintos valores de la corriente.

La primera diferencia que llama la atención al comparar la figura 12 con la figura 7 es la discontinuidad que se produce justo en el “switching” de polarización (el punto de corriente en que se “intercambia” la potencia entre las polarizaciones). La causa de esta discontinuidad es una cuestión instrumental: El PBS origina unas pérdidas diferentes para cada salida. Las pérdidas en las salidas del PBS son un porcentaje de la potencia que pasa por ellas. Cuando se produce el “switching” de polarización, se produce un cambio brusco en el valor de la potencia en las salidas y éste va inevitablemente acompañado de un cambio brusco en las pérdidas de potencia de las polarizaciones.

Corrección de pérdidas dependientes de la polarización

Con objeto de corregir la discontinuidad de los resultados directos obtenidos, se propone un

tratamiento basado en reproducir en el tramo de polarización dominante ortogonal (zona de corrientes mayores de 6 mA en la figura 12), las pérdidas de la salida de la componente paralela (podría haberse procedido al revés); de esta forma, al igualar las pérdidas cabe esperar que la discontinuidad se corrija. Para llevar a cabo esta corrección se plantea un ajuste en la zona de comportamiento lineal de la región de corrientes menores de 6 mA. En la figura 11 se presenta el ajuste lineal de los puntos de la figura 12 comprendidos entre las corrientes 2.098 y 5.907 mA, que delimitan una región lineal dentro del rango de corrientes en que la potencia paralela es la dominante.

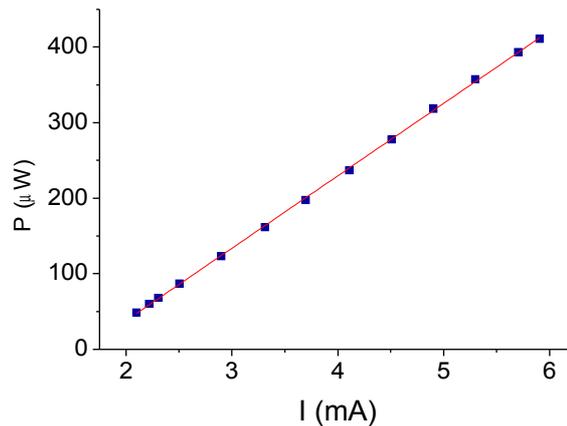


Figura 13: Potencia de la polarización paralela para valores de corriente comprendidos entre 2.098 y 5.907 mA (región de relación lineal entre potencia y corriente) . Se presenta junto con el ajuste lineal: $P_{\text{para}}(I) = 95.8 \cdot I - 153.3$, con $R=0.999$

Haciendo uso de la recta de ajuste lineal de la figura 13, puede hallarse la potencia que debería corresponder al primer punto del tramo de potencia dominante ortogonal, si hubiese sufrido las pérdidas de la salida paralela del PBS. Tiene sentido plantear este punto como perteneciente a la recta de ajuste de la figura 13, ya que como puede observarse en las figuras 7 y 12, el primer punto de la región donde la polarización ortogonal es dominante también se encuentra dentro de la zona de comportamiento lineal con respecto de la corriente. La corriente aplicada al láser en este punto es $I^* = 6.011 \text{ mA}$. Para que los tramos empalmen manteniendo la misma pendiente y el carácter lineal, se calcula a través de la recta anterior el valor de la potencia que debería tener este primer punto (el valor que hubiese tenido si hubiese sufrido las mismas pérdidas que la polarización paralela en el PBS):

$$P_{\perp \text{ corregida}}(I^*) = P_{\parallel}(I^*) = 95.8 \cdot I^* - 153.3 = 95.8 \cdot 6.011 - 153.3 = (423 \pm 3) \mu W$$

Una vez obtenido el valor de la potencia en este punto, se puede hallar un factor de conversión general para todo el tramo de corrientes mayores que 6 mA. La potencia en I^* antes de la corrección era de $P=(280 \pm 1) \mu W$. Tras la corrección es de $P=(423 \pm 3) \mu W$. El factor de conversión será por tanto:

$$c_r = \frac{423}{280} = (1.511 \pm 0.012)$$

Multiplicando por este factor todas las potencias de la polarización ortogonal en el PM (representadas en la figura 12 en rojo), se obtiene la corrección de la discontinuidad en la

figura 12 tal y como puede verse en la figura 14, cuyo significado físico es el de haber igualado las pérdidas en el PBS.

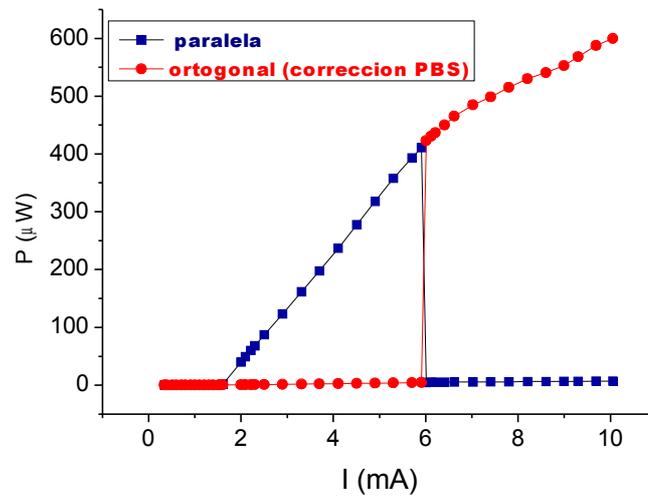


Figura 14: Potencia de cada polarización para distintos valores de la corriente, con la corrección de igualación de pérdidas en las salidas del PBS.

Corrección de pérdidas a través de PC y PBS

Si se compara la figura 14 con la figura 7, se aprecian aún discrepancias, como se puede observar en su representación conjunta en la figura 15.

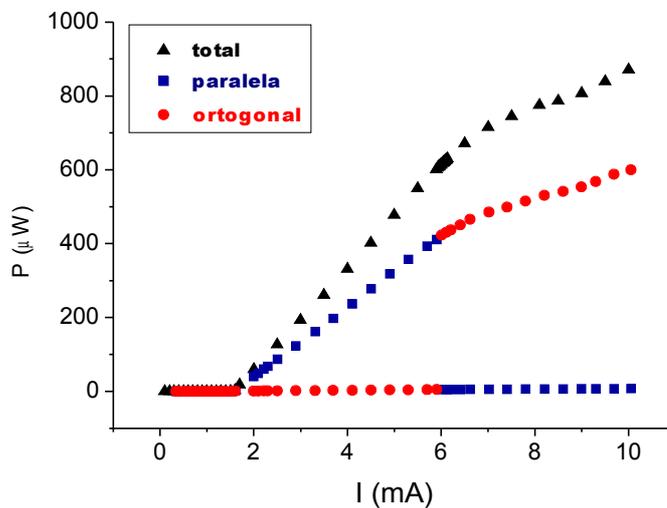


Figura 15: En negro: Potencia total para distintos valores de la corriente (reproducción de la figura 7). En azul y rojo: Potencia de cada polarización para distintos valores de la corriente, con la corrección de igualación de pérdidas en las salidas del PBS (reproducción de la figura 14).

El motivo de la diferencia es que en la gráfica 14 la potencia se ha visto mermada por las

pérdidas ocasionadas por el paso de la luz a través del PC y el PBS.
 Se calcula a continuación el factor de pérdidas originadas por el dispositivo experimental (despreciando las pérdidas a través de la fibra óptica).

Para analizar estas pérdidas se comparan los ajustes lineales de las figuras citadas (9 y 13).
 Obteniendo el factor de conversión que iguale la pendiente de la figura 13 a la de la figura 9, pendientes a las que se denominará p_2 y p_1 respectivamente, se tiene cuantificado el porcentaje de pérdidas debido al paso del haz láser a través del PC y del PBS:

$$\left. \begin{aligned} p_1 &= (140.0 \pm 0.5) \frac{\mu W}{mA} \\ p_2 &= (95.8 \pm 0.5) \frac{\mu W}{mA} \end{aligned} \right\} \Rightarrow 1 - A = \frac{p_2}{p_1} = \frac{95.8}{140} \Rightarrow A = (0.316 \pm 0.004)$$

Las pérdidas originadas por el PBS y el PC sobre la luz emitida por el VCSEL son de aproximadamente el 32%.

Haciendo uso del factor (1-A), que permite eliminar las pérdidas de PC y PBS, se puede representar de nuevo, corregida finalmente, la figura 14, junto con los datos de la figura 7; esta representación conjunta se muestra en la figura 16. La corrección de pérdidas PC-PBS sobre las potencias de la figura 14 consistió en multiplicar éstas por el factor $1/(1-A)$.

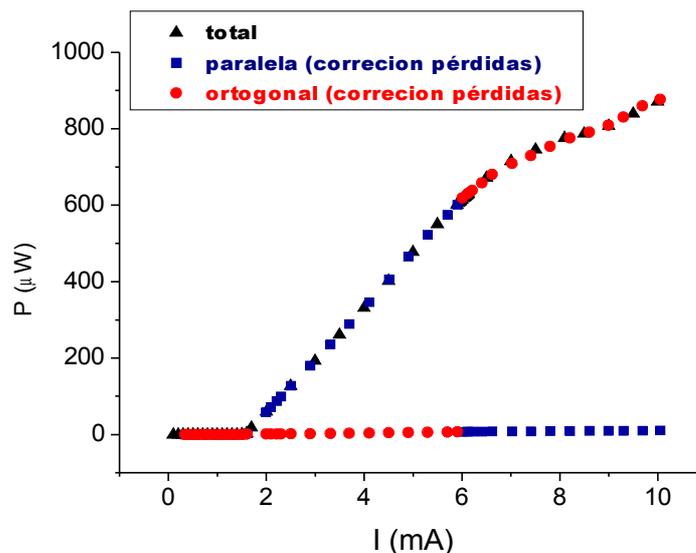


Figura 16: En negro: Potencia total para distintos valores de la corriente (reproducción de la figura 7). En rojo y azul: Potencia de cada polarización para distintos valores de la corriente, con la corrección de eliminación de pérdidas originadas en los dispositivos PC y PBS (reproducción de la figura 14 con corrección PC-PBS).

En la figura 16, se observa un buen acuerdo entre los datos del registro de la potencia total directamente a través de un PM (sin separar polarizaciones) y de los datos obtenidos por el otro camino seguido en el que se estudió las polarizaciones por separado (utilizando PC y PBS, y registro mediante dos PM) y aplicando las pertinentes correcciones de pérdidas del

dispositivo experimental. No obstante, en los datos del registro de polarizaciones por separado (potencias en rojo y azul de la figura 14) hay presencia de una pequeña cantidad de potencia en las polarizaciones que se suponen suprimidas en cada región, y que no está presente en las potencias totales sin separación de polarización, es decir: existe una pequeña emisión de luz polarizada ortogonalmente en la zona en que domina la polarización paralela y viceversa. El motivo de este hecho es que la separación de polarizaciones no es perfecta, con lo que pasa una pequeña cantidad de luz polarizada ortogonalmente en la salida del PBS destinada a luz polarizada paralelamente y viceversa. La explicación y tratamiento de este hecho se desarrolla con más detalle a continuación.

“Contaminación” entre polarizaciones

En la primera parte del análisis se registró la potencia total que llegaba desde el VCSEL a través de fibra óptica conectada directamente al medidor de potencia óptica PM (ver figura 6). En aquel caso, no estaban presentes ni el PC ni el PBS que se encargan de dividir las dos componentes de polarización y transmitir las por fibras independientes. En un segundo estudio de la relación luz-corriente, se optó por separar el haz láser en sus dos componentes de polarización mediante el PC y el PBS y llevar a cabo el registro de potencias por separado. Lo que ocurre al utilizar el PC y el PBS es que la separación de las polarizaciones paralela y ortogonal no es perfecta, sino que la polarización dominante siempre está aportando una fracción pequeña de su potencia a la polarización que en principio se supondría suprimida (con una potencia muy pequeña). Ésto es lo que se convendrá en llamar “contaminación” entre polarizaciones a partir de ahora.

Se pasa a hacer un estudio cuantitativo de esta contaminación entre polarizaciones, a partir de los valores de la potencia en las polarizaciones suprimidas.

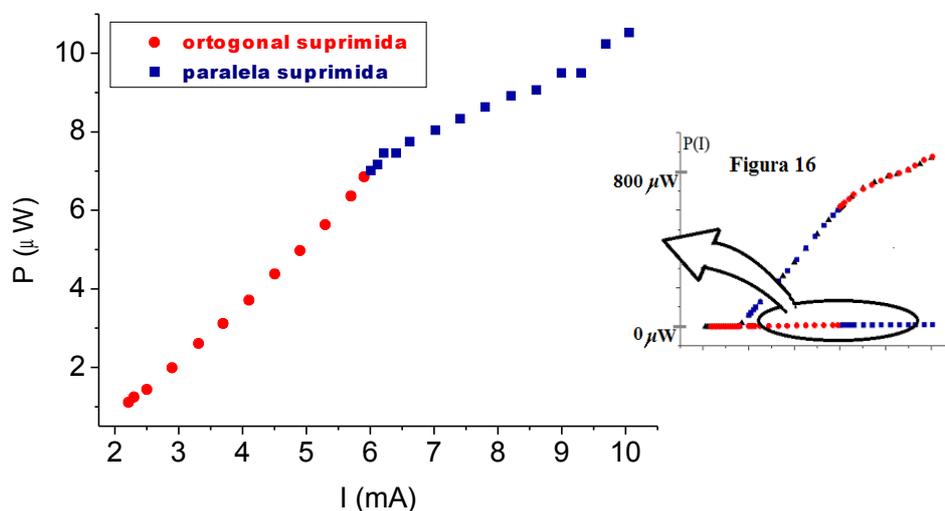


Figura 17: Gráfica izquierda en grande: potencias de las polarizaciones suprimidas ortogonal y paralela en las salidas del PBS en función de la corriente. Entiéndase como un “zoom” de las potencias inferiores de la figura 16, que se ha vuelto a dibujar esquemáticamente a la derecha.

La pequeña cantidad de luz ortogonal presente en la región de corrientes donde domina la polarización paralela, será la potencia suprimida ortogonal. Son los valores en torno a cero de la potencia ortogonal para corrientes menores de 6 mA (ver figura 16).

Por otro lado, la pequeña cantidad de luz paralela en la región de corrientes donde domina la polarización ortogonal, será la potencia suprimida paralela. Son los valores en torno a cero de la potencia paralela para corrientes mayores de 6mA (ver figura 16). Para hacer visualmente apreciable la potencia de estas polarizaciones suprimidas, partiendo de la figura 16 se toman sólo los valores de la potencia de la polarizaciones suprimidas, y se representan en la figura 17.

Estos valores de potencia son muy débiles (basta compararlas con los valores de las potencias dominantes) pero no son nulos. Presentan un comportamiento con una dinámica definida: aparentemente la potencia en la polarización suprimida crece linealmente con la potencia de la polarización dominante. A partir de lo observado en la figura 17, se puede proponer obtener un cociente que de cuenta de la contaminación, tomando los datos de la figura 16 y dividiendo en cada punto la potencia menos intensa entre la más intensa (la potencia de la polarización suprimida entre la potencia de la polarización dominante). Así se obtiene el factor de contaminación entre polarizaciones mostrado en la figura 18, que cómo cabe esperar, fluctúa ligeramente en torno a un valor constante, ya que tanto la potencia de la polarización suprimida como la potencia dominante crecen linealmente con la corriente (se están dividiendo los puntos de dos rectas).

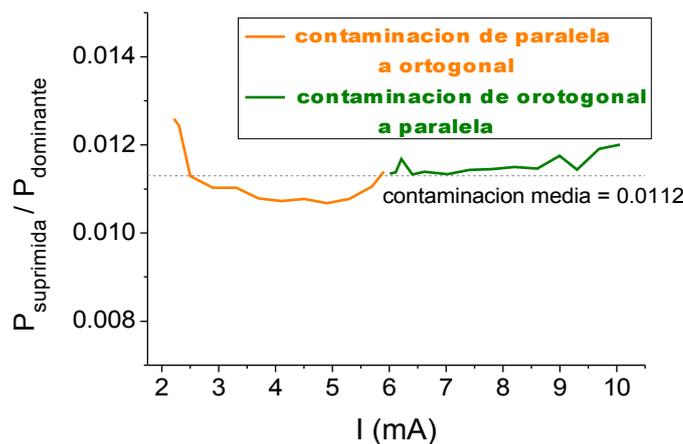


Figura 18: factor de contaminación de la polarización dominante sobre la polarización suprimida para cada valor de la corriente. Se obtiene dividiendo el valor de la potencia menos intensa entre la más intensa, en cada valor de la corriente.

El valor de la contaminación de la polarización dominante sobre la polarización suprimida, tiene como valor medio:

$$c = (0.0112 \pm 0.004)$$

Multiplicando por este valor las potencias de las polarizaciones dominantes de la figura 16, cabe esperar una aproximación a lo registrado en la figura 17. En la figura 19 se representa el resultado de dicha multiplicación sobre la figura 16, junto con los datos de la figura 17.

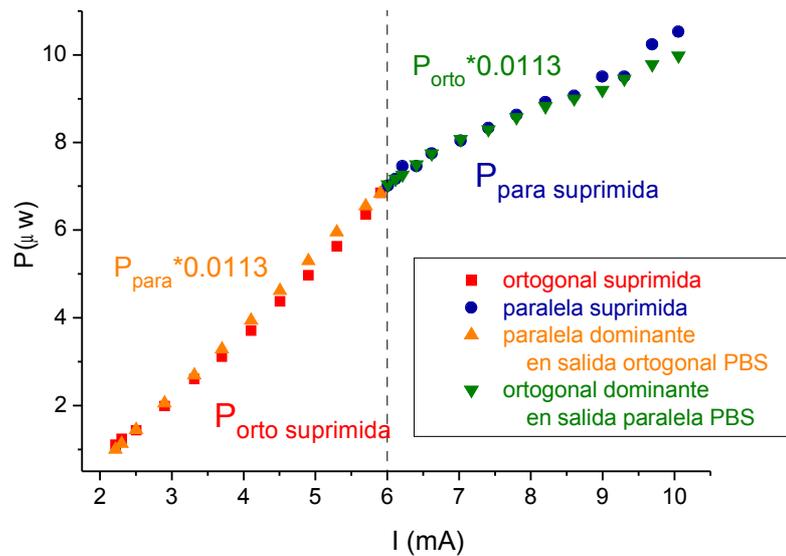


Figura 19: Potencias de las polarizaciones suprimidas (rojo y azul) de la figura 14. Fracción de potencia de la polarización dominante que contamina la salida del PBS de polarización contraria (naranja y verde). La línea discontinua delimita el punto de “switching” de polarización.

Efectivamente, los valores de la potencia que se obtienen como resultado de multiplicar las potencias de la polarización dominante (en cada una de las dos regiones divididas por el “switching”) por el factor de contaminación, solapan con las potencias de las polarizaciones suprimidas a lo largo de todo el rango de corriente.

Potencia de cada polarización a partir del espectro óptico

Tomando los datos de los 27 espectros ópticos registrados con el BOSA, se aplicó una transformación para pasar de la dependencia en longitud de onda a la dependencia en frecuencia.

A continuación se presentan 6 de esos espectros, como representativos de toda la evolución observada del espectro con la corriente (se escogieron las mismas corrientes empleadas en la figura 10). Además, puesto que el interés con este cambio reside en observar la cantidad de energía o potencia en cada pico de emisión, se estrechó el eje de ordenadas lo máximo posible, para captar el ancho y forma de estos picos con todo detalle.

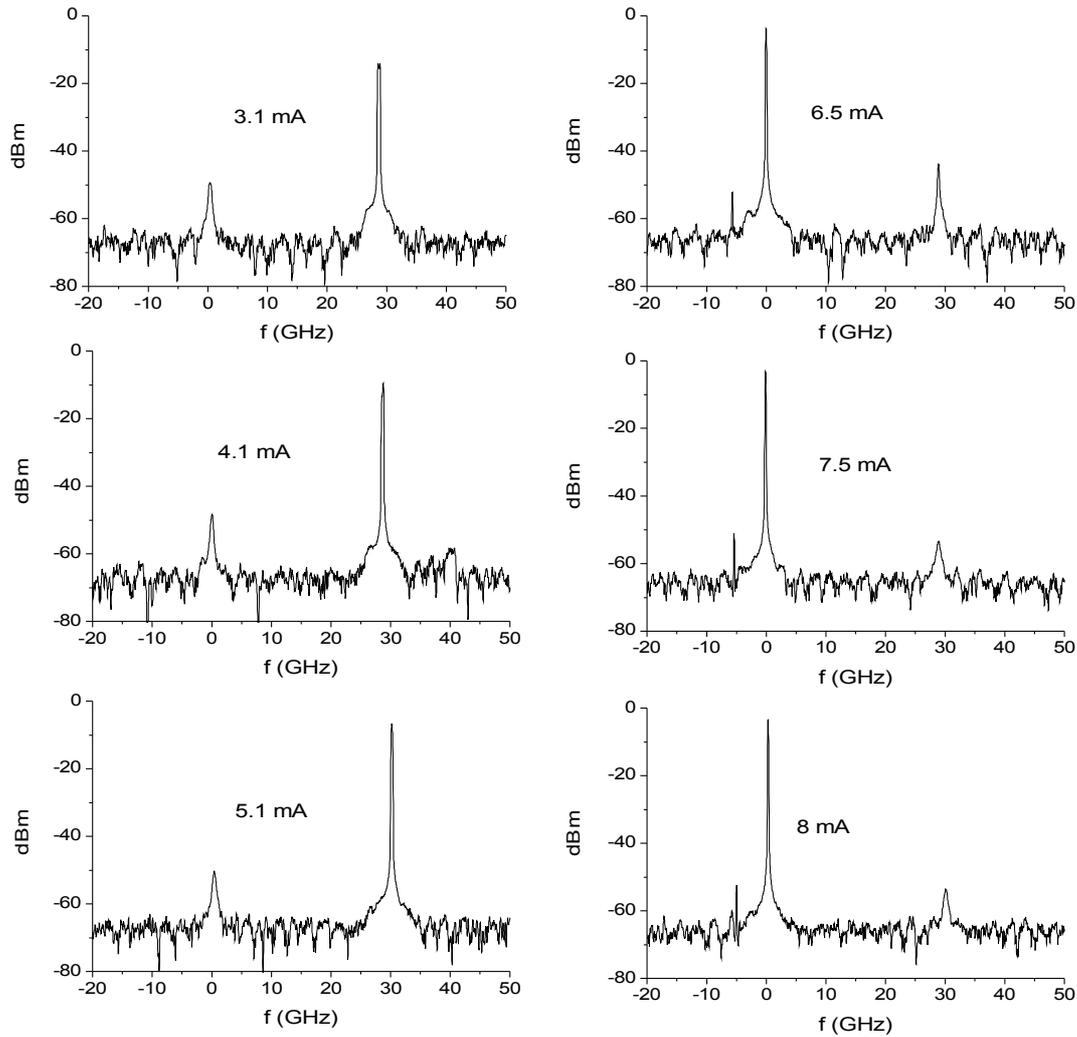


Figura 20: Espectros ópticos de emisión del VCSEL registrados mediante el BOSA y transformados al dominio de la frecuencia, centrados con la componente ortogonal en 0 Ghz. Cada espectro corresponde a una corriente diferente aplicada.

Si se comparan estos espectros con los contenidos en la figura 10, ha de tenerse presente que la transformación a frecuencia invierte la posición de los picos: ahora el pico de la izquierda es el ortogonal. Además ahora se ha centrado el espectro tomando la componente ortogonal como origen de coordenadas, razón por la cuál no se aprecia el desplazamiento de los mismos. En los espectros correspondientes a las tres corrientes más bajas (columna izquierda de la figura 20), se observa que no hay cambios aparentes en la cantidad de potencia emitida a través de la polarización ortogonal, que es la suprimida en esa región de corrientes. Al sobrepasar el “switching” de polarización (ubicado en 6 mA), se aprecia el intercambio de potencia entre las polarizaciones dominantes.

En vista de las conclusiones propuestas a partir de los espectros de la figura 20, se realizó posteriormente un estudio detallado de la potencia emitida a través de cada polarización: para ello se integró el área bajo los picos de emisión. En este caso, el dispositivo experimental consistió en conectar el VCSEL al BOSA directamente. Haciendo uso de las opciones de tratamiento del mismo BOSA, se realizó una integración alrededor de cada pico con un rango

de frecuencias de 10 Ghz. En la figura 21 se presenta gráficamente el valor de la potencia de cada polarización, para diferentes valores de la corriente.

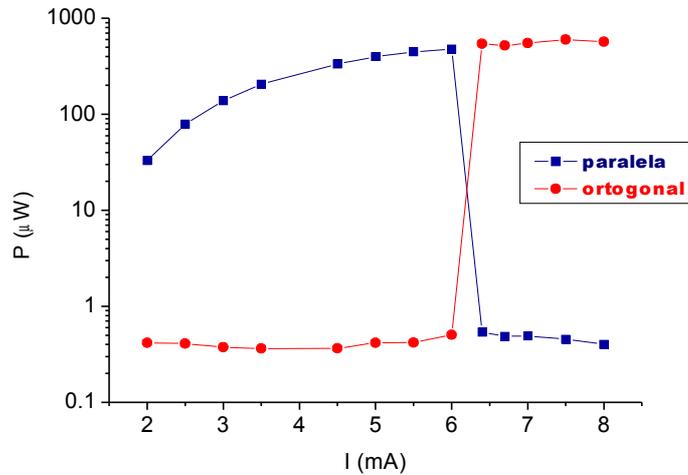


Figura 21: Potencia integrada de cada polarización para distintos valores de la corriente.

Los datos contenidos en la figura 21 guardan plena relación con los representados en la figura 16 (considerando la escala logarítmica), sólo que aquí se obtuvieron mediante el BOSA (en vez de mediante los PM) y en este caso no hay pérdidas en el PBS ni en el PC porque no están presentes. De hecho, en la figura 21 se observa que la potencia de la polarización suprimida no cambia con la corriente aplicada, es decir, no hay contaminación entre polarizaciones, a diferencia de lo observado en la figura 17. Este tipo de medida con el BOSA evita los efectos de contaminación entre polarizaciones inducidos por el PC y el PBS utilizados en el análisis anterior.

A partir de los datos presentados en la figura 21, se puede obtener el cociente de la potencia paralela entre la potencia ortogonal para cada valor de la corriente, tal y como se representa en la figura 22.

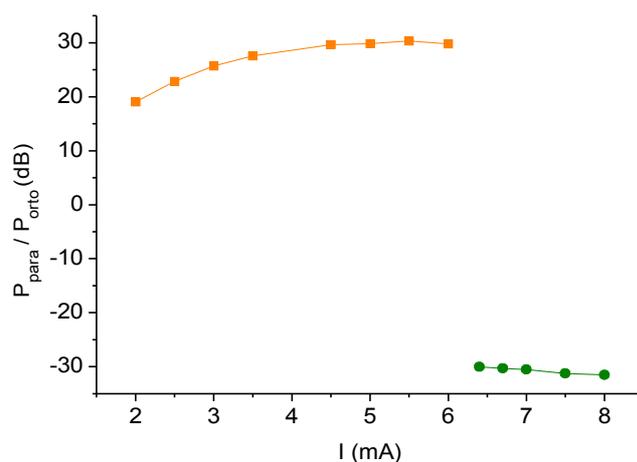


Figura 22: Cocientes de potencias de la polarización paralela entre la ortogonal, para distintos valores de la corriente aplicada al VCSEL. En naranja: cociente antes del “switching” de polarización. En verde: cociente después del “switching” de polarización

Si en vez del cociente de potencia entre polarizaciones paralela y ortogonal, se calcula el cociente de potencia entre polarizaciones dominante y suprimida, se obtiene la figura 23. A esta cantidad se la llama usualmente cociente de supresión del modo lateral (side mode suppression ratio, SMSR). Es la cantidad que se utiliza para describir si un láser es más o menos monomodo.

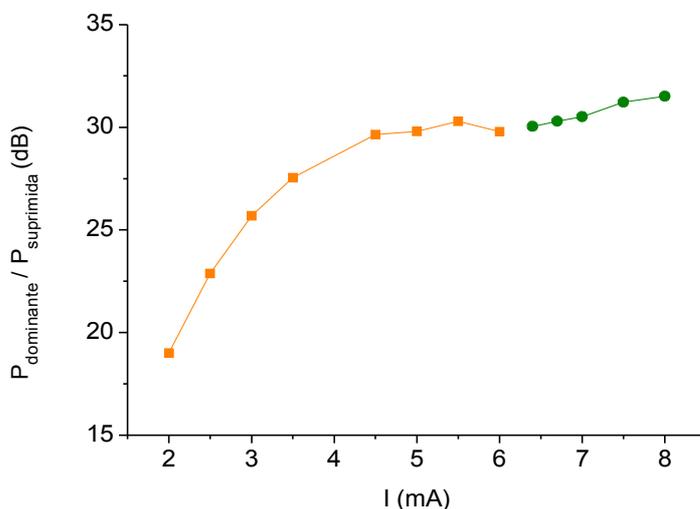


Figura 23 - Cocientes de potencias de la polarización dominante entre la suprimida, para distintos valores de la corriente aplicada al VCSEL. En naranja: cociente antes del “switching” de polarización. En verde: cociente después del “switching” de polarización

Como cabía esperar, el rango de corrientes inferiores a 6 mA (previas al “switching”) solapa en las gráficas 20 y 21, por coincidir la dominante con la paralela en ambas.

3.2- Espectros de radiofrecuencia: medida de la ganancia diferencial

Oscilaciones de relajación

En esta parte de la experiencia (ver figura 6 del dispositivo experimental) se conectó directamente el VCSEL, mediante fibra óptica, al fotodetector que a su vez estaba conectado al analizador de espectros de radiofrecuencia (RF). El objetivo fue poder estudiar los espectros de radiofrecuencia para distintas corrientes. Estos espectros son proporcionales a $\langle |\Delta P(f)|^2 \rangle$, donde $\Delta P(f)$ es la transformada de Fourier de la potencia óptica y $\langle |\Delta P(f)|^2 \rangle$ es un promedio sobre varios barridos. Se tomaron 29 de estos espectros. En la gráfica 24 se presentan 9 de esos espectros, debidamente espaciados, como representativos de toda la evolución observada del espectro de radiofrecuencia con la corriente. Los espectros extraídos directamente del BOSA son las curvas en negro. La curva roja que envuelve estos espectros es un suavizado realizado a posteriori sobre el registro en negro que tiene en cuenta un promedio de los 5 vecinos más cercanos.

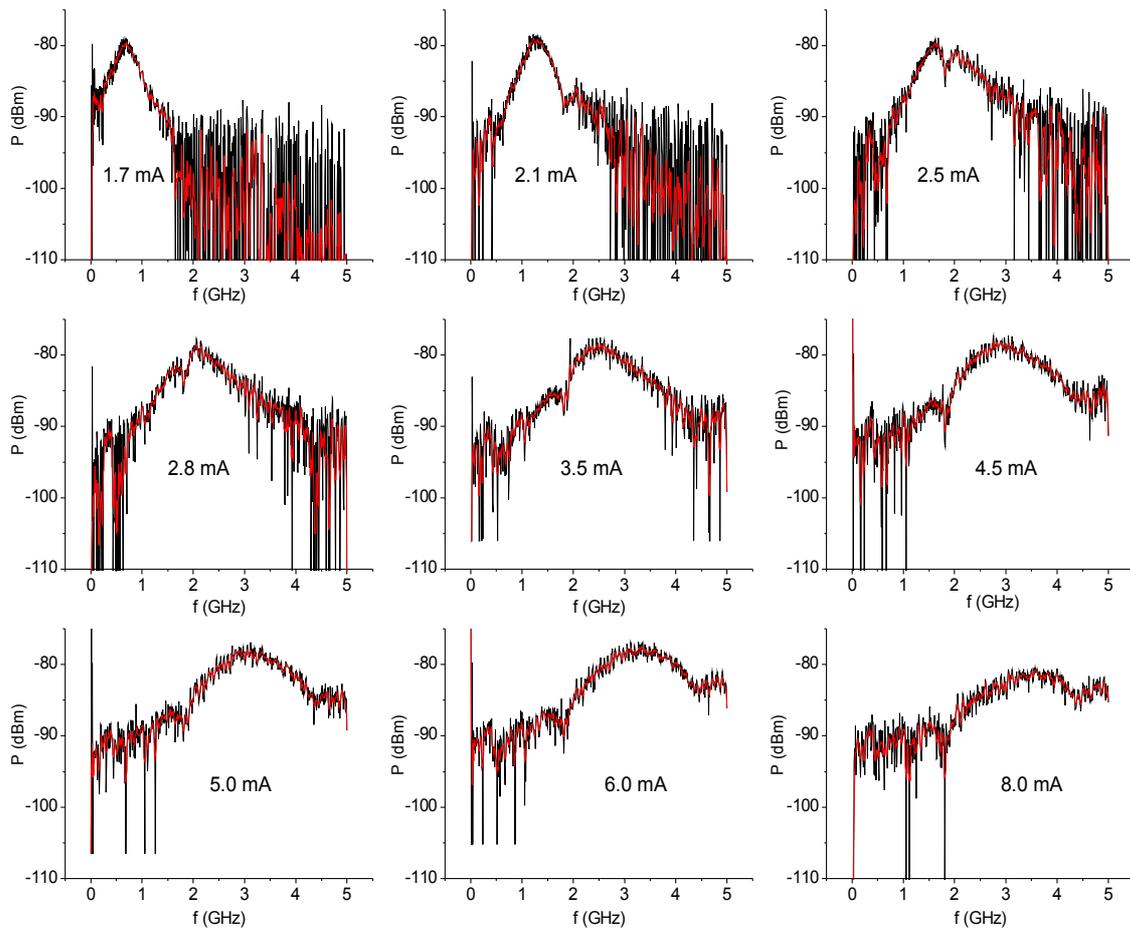


Figura 24: Espectros de radiofrecuencia del VCSEL para distintas corrientes aplicadas (en negro) obtenidos con el analizador de espectros de radiofrecuencia (RF). Se presentan junta con una curva de suavizado (en rojo) que tiene en cuenta un promedio de los 5 vecinos más cercanos..

Haciendo uso de la curva de suavizado se pueden calcular las frecuencias a las que aparecen los máximos de potencia. Como esas frecuencias coinciden con las frecuencias de las oscilaciones de relajación [6] tiene sentido tomar los cuadrados de estas frecuencias (f_r^2) y expresarlos gráficamente en función de $I-I_{th}$, en base a la ecuación 5, de tal forma que la relación esperada sea:

$$\Omega_R^2 = \frac{G_N}{e} \cdot (I - I_{th})$$

Si los resultados son coherentes con la teoría, se tendrá una relación lineal, y de la pendiente podrá obtenerse el valor de la ganancia diferencial G_N . Estos resultados se presentan en la figura 25.

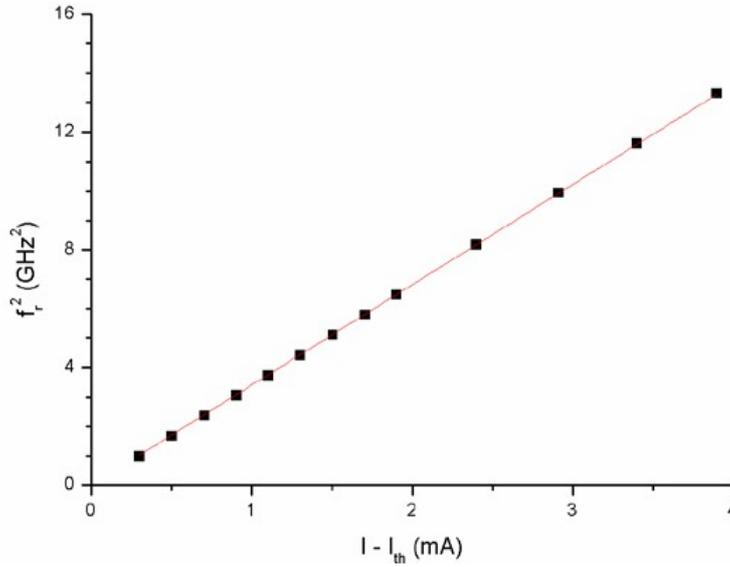


Figura 25 Cuadrados de las frecuencias dónde se centra el máximo de emisión de los espectros ópticos tomados con el BOSA, frente al valor de la corriente aplicada. Se presenta junto con un ajuste lineal : $f_r^2(I)=3.407 \cdot (I - I_{th})$, con $R=0.999$

A partir de la pendiente del ajuste mostrado en la figura 25, se obtiene la ganancia diferencial:

$$f_r^2 = \frac{G_N}{4\pi^2 e} \cdot (I - I_{th}) \Rightarrow \frac{G_N}{4\pi^2 e} = (3.407 \pm 0.004) \frac{GHz^2}{mA};$$

$$G_N = (2.152 \pm 0.003) 10^4 s^{-1}$$

El parámetro de ganancia diferencial medido es tan solo uno de los parámetros necesarios para describir la dinámica del VCSEL. Para saber el resto de parámetros se deben realizar una serie de medidas adicionales, por ejemplo, el ancho del espectro óptico en función de la corriente y la velocidad de amortiguamiento de los oscilaciones de relajación en función de la corriente. Este proceso se ha realizado recientemente para el dispositivo considerado en este trabajo [9].

4. Conclusiones

Los láseres de semiconductor de cavidad vertical (VCSELs) son motivo de gran interés en la investigación actual debido a sus propiedades y aplicaciones, tanto inmediatas como en desarrollo. Estos dispositivos, tal y como queda reflejado en el fenómeno del “switching” de polarización observado, se rigen por una dinámica no lineal.

En este trabajo, se ha caracterizado un VCSEL monomodo longitudinal emitiendo a 1550 nm, estudiando las curvas luz-corriente por diferentes vías instrumentales y considerando en unos casos el haz de emisión total, y en otros separado por polarizaciones. A través del estudio de la potencia total del haz emitido se han extraído parámetros como la corriente umbral $I_{th}=(1.60\pm 0.02)\text{mA}$ y la eficiencia cuántica diferencial $\eta=(0.1733\pm 0.0003)$. Esta última da idea del porcentaje de recombinaciones radiativas, es decir, la fracción de portadores de corriente (respecto del total) que al recombinarse dan lugar a un fotón.

Se ha medido la supresión de modo lateral que se encuentra en torno a 30 dB, lo cuál ratifica el carácter monomodo del VCSEL.

Se ha observado que la longitud de onda en la que se centra el pico de emisión crece linealmente con la corriente aplicada, y lo hace con la misma proporcionalidad para las dos polarizaciones lineales ortogonales entre sí, dentro de un amplio rango de corrientes, en coherencia con la proporcionalidad entre “longitud de onda - temperatura – corriente inyectada”.

Un fenómeno destacable observado desde el inicio del trabajo es el intercambio de potencias entre las polarizaciones denominado “switching” de polarización, que tiene lugar para una corriente de aproximadamente 6mA, a la temperatura fijada a lo largo de todo el trabajo de 25°C.

Haciendo un estudio de los espectros de radiofrecuencia a través del analizador eléctrico de espectros de radiofrecuencias (RF) se ha podido caracterizar la frecuencia de las oscilaciones de relajación en función de la corriente, y se ha obtenido la ganancia diferencial

$G_N=(2.152\pm 0.003)10^4\text{s}^{-1}$, que es uno de los parámetros para describir de forma teórica la dinámica del VCSEL. Para tener un conjunto completo de parámetros es necesario hacer medidas adicionales. El conocimiento de un conjunto completo de parámetros es de interés pues permite hacer simulaciones realistas de la dinámica de los VCSELs cuando están sometidos a perturbaciones externas, como por ejemplo, VCSELs sometidos a inyección óptica de luz emitida por otro láser o VCSEL, o sometidos a retroalimentación de luz emitida por ellos mismos.

Evidentemente, para realizar todo este estudio se han empleado varios aparatos de medida complementarios entre sí como el analizador de espectros ópticos de alta resolución (BOSA), el analizador eléctrico de espectros de radiofrecuencia (RF), el control de polarización (PC), el divisor de polarizaciones (PBS), etc, que se utilizan para la investigación dentro del campo de la fotónica. De esta forma se ha conseguido adquirir destreza en su utilización, uno de los objetivos de este trabajo.

5. Referencias

1. Fumio Koyama: *Recent Advances of VCSEL Photonics*, Journal of lightwave technology, vol. 24, no. 12, December 2006.
2. R. Michalzik, “*VCSELs: fundamentals, technology and applications of vertical-cavity surface-emitting lasers*”, ed Springer-Verlag, 2012.
3. B. E. A. Saleh, M. C. Teich, *Fundamentals of Photonics*, John Wiley Sons, 1991.
4. Paul L. Gourley, Kevin L. Lear, Richard P. Schneider Jr: *A different mirror*, IEEE Spectrum, pp 31-37, August 1994.
5. K. Iga: *Vertical–Cavity Surface–Emitting Laser: Its Conception and Evolution*. Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 47, N° 1, pp. 1–10, 2008.
6. G. P. Agrawal, N. K. Dutta *Long-wavelength semiconductor lasers*, ed. Van Nostrand Reinhold, 1986.
7. William B. Jones, Jr, *Introduction to Optical Fiber Communication Systems*, Ed. Holt, Rinehart and Wiston, 1988.
8. J. H. Shin, B. S. Yoo, W. S. Han, O. K. Kwon, Y. G. Ju, J. H. Lee, *CW operation and threshold characteristics of all-monolithic InAlGaAs 1.55 micron VCSELs grown by MOCVD*, IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 14, no. 8, pp. 1031-1033, 2002.
9. P. Pérez, A. Valle, I. Noriega, L. Pesquera, “Measurement of the intrinsic parameters of a long-wavelength VCSEL”, enviado a IEEE Journal of Lightwave Technology para su publicación