



FACULTAD DE CIENCIAS

Simulación de peines de frecuencia óptica generados por láseres de semiconductor

Simulation of optical frequency comb generate by
semiconductor lasers

Trabajo de Fin de Grado para acceder al
Grado en Física

Autor

Jaime DÍEZ GONZÁLEZ-PARDO

Director

Dr. Á.A. VALLE GUTIERREZ

12 de septiembre de 2019

Índice general

1. Introducción	2
1.1. Láseres de Semiconductor	2
1.2. Procesos Estocásticos	2
1.3. Dinámica No Lineal	2
1.4. Peines de Frecuencia Óptica	2
1.4.1. <i>Gain-Switching</i>	2
1.4.2. Inyección Óptica	2
1.4.3. Aplicaciones	2
1.5. Objetivo del Estudio	2
2. Modelo Computacional	3
2.1. RoF	3
2.2. Código de la Simulación	3
2.2.1. Término de la temperatura	3
2.2.2. Transitorio	3
3. Láser en solitario	4
3.1. Láser en corriente continua	4
3.1.1. Espectros de emisión	4
3.1.2. Oscilaciones de Relajación	6
3.2. OFC (Gain-Switching)	8
3.2.1. Efecto de la amplitud de modulación a altas frecuencias	8
3.2.2. Efecto de la amplitud de modulación a bajas frecuencias	12
4. Inyeccion de Luz	14
5. Inyeccion de luz en OFC	17
6. Conclusiones	19
A. Código de la simulación	21

Capítulo 1

Introducción

Hola a todos

1.1. Láseres de Semiconductor

1.2. Procesos Estocásticos

1.3. Dinámica No Lineal

1.4. Peines de Frecuencia Óptica

Que son, características principales y como se generan,...

1.4.1. *Gain-Switching*

hola que tal todos

1.4.2. Inyección Óptica

adios a todos

1.4.3. Aplicaciones

1.5. Objetivo del Estudio

Capítulo 2

Modelo Computacional

Hola a todos

NO SE DONDE PONER ESTA ECUACION

$$P(t) = \eta_f \frac{hf_0 V_{act}}{\Gamma \tau_p} S(t) \quad (2.1)$$

2.1. RoF

2.2. Código de la Simulación

Se explicará el código utilizado para el trabajo

2.2.1. Término de la temperatura

Explicar el término de la temperatura

2.2.2. Transitorio

Explicar el transitorio

Capítulo 3

Láser en solitario

Antes de abordar el estudio de la dinámica no lineal del láser de semiconductor de modo discreto se ha realizado la simulación del láser en solitario, sin inyección de luz del láser esclavo ($P_{Iny} = 0$). Se han realizado simulaciones para el láser tanto en corriente continua (CW de sus siglas en inglés), como en Gain-Switching, comparando los resultados con los obtenidos experimentalmente en condiciones similares [2].

3.1. Láser en corriente continua

Para poder realizar las simulaciones en corriente continua se ha trabajado con una corriente de inyección constante e igual a la corriente de polarización ($I(t) = I_{bias}$), tomando $V_{RF} = 0$.

HABLAR DE QUE EN CONTINUA SE TIENE QUE $\frac{dN}{dt} = \frac{dS}{dt} = \frac{d\Phi}{dt} = 0$

3.1.1. Espectros de emisión

Tal y como se vio en la sección 1.1, pequeñas variaciones en la corriente de inyección del láser producen desplazamientos de la línea de emisión del láser en el espectro de frecuencias. Por ello es importante conocer el valor de la longitud de onda del pico de emisión del láser en solitario en función de la corriente de polarización I_{bias} , de cara a realizar el estudio de la inyección de luz.

En la Figura 3.1 se muestran las densidades espectrales de potencia del láser a diferentes corrientes de polarización, comparando los datos obtenidos mediante la simulación del láser (Figura 3.1a), con los obtenidos experimentalmente (Figura 3.1b).

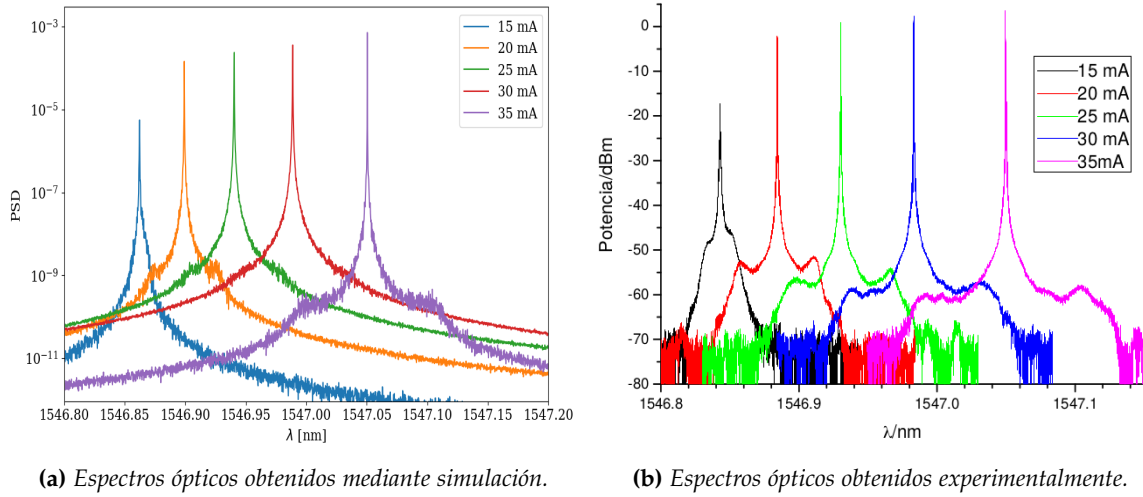


Figura 3.1: Espectros ópticos del DML para diferentes corrientes de polarización I_{bias} obtenidos mediante simulación (izquierda 3.1a) y mediante experimento (derecha, 3.1b).

Comparando los espectros obtenidos mediante simulación con los obtenidos experimentalmente se observa un gran parecido en la forma, observando una forma más puntiaguda y estrecha en los espectros con corriente $I_{bias} = 15$ mA para ambas gráficas. Además, la simulación permite observar los picos propios de las oscilaciones de relajación del láser que se observan en el experimento.

Además, a partir de los espectros de la Figura 3.1 se pueden obtener las longitudes de onda de los picos de emisión en función de la corriente I_{bias} . En la Tabla 3.1 se muestran los valores de las longitudes de onda λ obtenidas de los espectros de la Figura 3.1 tanto para la simulación como para el experimento.

I_{bias}	λ_{sim}	λ_{exp}
15	1546.86	1546.84
20	1546.90	1546.88
25	1546.94	1546.93
30	1546.99	1546.98
35	1547.05	1547.05

Tabla 3.1: Longitud de onda de las líneas de emisión del DML en función de la I_{bias} obtenidas de la figura 3.1. Se muestran los valores experimentales λ_{exp} obtenidos de la gráfica 3.1b con un error de $\delta\lambda_{exp} = 0.02$, y los valores obtenidos de la simulación de la gráfica 3.1a.

Los valores de las longitudes de onda que se muestran en la Tabla 3.1 muestran una gran similitud entre los valores experimentales y los obtenidos mediante simulación, obteniendo una discrepancia máxima de 0.02 nm. De esta forma, la gran concordancia entre los valores de λ experimentales y los obtenidos a partir de la simulación, junto con la gran similitud en la forma de los espectros, muestra la capacidad de la simulación de reproducir computacionalmente los resultados obtenidos experimentalmente en el laboratorio.

Para el estudio de la inyección de luz se trabajará con una corriente $I_{bias} = 35$ mA. Por tanto, la Tabla 3.1 permite obtener su longitud de onda de emisión de $\lambda = 1547.05$ nm, siendo además la misma que la obtenida en el experimento.

3.1.2. Oscilaciones de Relajación

Para que el láser comience a emitir se ha de cumplir que la emisión estimulada domine frente a la emisión espontánea. Esto se produce cuando la densidad de portadores de carga en la región activa supera un valor umbral, N_{th} , a partir del cuál el láser comienza a emitir fotones. Si la inyección de corriente que se le aplica al láser es constante (corriente continua), la densidad de portadores de carga tenderá a estabilizarse en N_{th} . De el mismo modo, la densidad de fotones y el chirp se estabilizarán para valores S_{th} y Φ_{th} .

No obstante, si se parte de unas condiciones iniciales del láser con valores $N(t=0) < N_{th}$, será necesario que transcurra un cierto tiempo hasta que el láser alcance el equilibrio y se estabilice. A este tiempo se le denomina transitorio.

Cabe destacar que, tal y como se comentó en el apartado 2.2.2, para la simulación se ha trabajado con un tiempo de transitorio $t_{trans} = 1.2$ ns, en el cuál se ha operado con la raíz cuadrada del módulo de S en los términos de ruido para evitar resultados complejos, despreciando dicho intervalo en el estudio de los espectros. Sin embargo, en este apartado se estudiarán las ecuaciones de balance en el transitorio para corriente continua. El trabajar con una corriente continua mayor que la corriente umbral permite disminuir el intervalo de tiempo en el que se operará con $\sqrt{|S|}$ hasta los 0.2 ns, pudiendo realizar un estudio más riguroso de las ecuaciones de balance en el transitorio.

Se considerará una intensidad de corriente $I(t)$ función escalón con $I(t > 0) = I_{bias}$. En la ecuación 3.1 se muestra la función escalón $I(t)$ utilizada así como las condiciones iniciales para la densidad de portadores de carga $N(0)$, la densidad de fotones $S(0)$ y de la fase óptica $\Phi(0)$.

$$I(t) = \begin{cases} 0 & t \leq 0 \\ I_{bias} = 30 \text{ mA} & t > 0 \end{cases} \quad \begin{aligned} N(0) &= N_{tr} \\ S(0) &= 10^{15} \text{ m}^{-3} \\ \Phi(0) &= 0 \end{aligned} \quad (3.1)$$

En la Figura 3.2 se muestra la evolución temporal de la corriente de inyección $I(t)$ junto con los valores obtenidos en la simulación para la densidad de portadores de carga $N(t)$ la densidad de fotones $S(t)$ y la fase óptica $\Phi(t)$ para el transitorio $t_{trans} = 1.2$ ns.

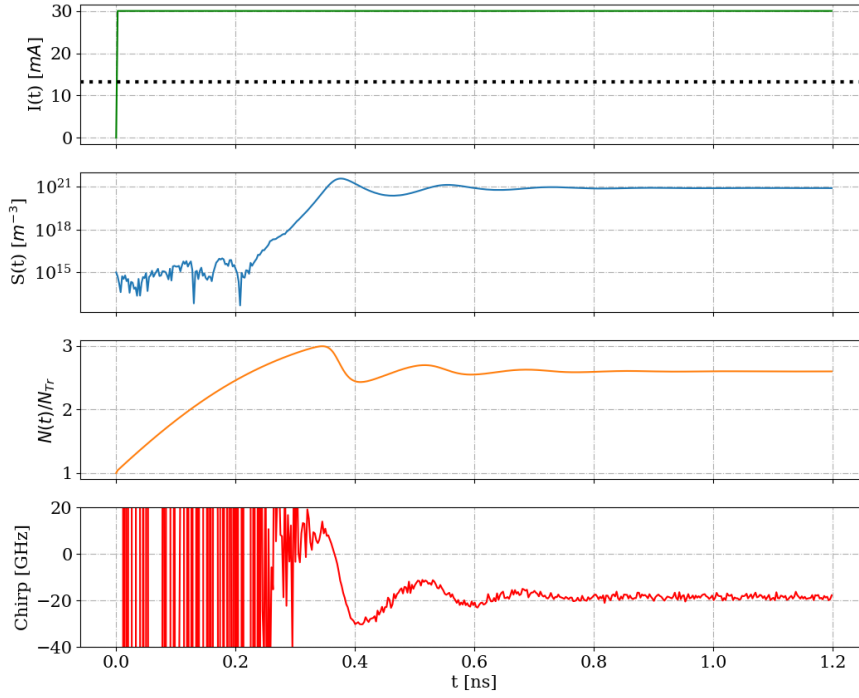


Figura 3.2: Evolución temporal de la corriente de inyección $I(t)$, la densidad de fotones $S(t)$, la densidad de portadores de carga $N(t)$ y del Chirp durante el transitorio. Para la corriente de inyección $I(t)$ se ha marcado la corriente umbral del láser $I_{th} = 14.8$ mA con una línea horizontal discontinua.

Se observan en las evoluciones temporales de densidad de portadores de carga $N(t)$, densidad de fotones $S(t)$ y fase óptica $\Phi(t)$ de la Figura 3.2 tres regiones diferentes en función del comportamiento de las tres magnitudes: *i)* Una vez que la corriente inyectada supera la corriente umbral I_{th} (en $t = 0$) la densidad de portadores de carga $N(t)$ comienza a aumentar. No obstante, el valor de $N(t)$ se mantiene inferior a N_{th} por lo que no se produce emisión estimulada, y así, la densidad de fotones no aumenta y toma valores aleatorios, debido a la emisión espontánea, alrededor de $S(0)$. Esto también se puede observar en el comportamiento también aleatorio del Chirp. *ii)* La densidad de portadores de carga $N(t)$ continua aumentando alcanzando el valor umbral N_{th} en $t = 0.23$ ns. En este punto la densidad de fotones comienza a aumentar debido a la emisión estimulada producida al superar N_{th} . Sin embargo, al encontrarse $S(t)$ por debajo de S_{th} , $N(t)$ continua creciendo tomando valores por encima N_{th} hasta que $S(t)$ alcanza el valor de S_{th} , en $t \approx 0.37$ ns. Al alcanzar $S(t)$ el valor de S_{th} , comienza a dominar la emisión estimulada frente a la emisión espontánea. Al alcanzar el valor S_{th} la emisión estimulada domina frente a la emisión espontánea, como se puede observar el Chirp, y la densidad de portadores de carga comienza a disminuir, alcanzando la densidad de portadores de carga $N(t)$ y Chirp un máximo. La densidad de fotones continúa aumentando y la densidad de portadores de carga disminuyendo, llegando nuevamente a tomar valores por debajo de N_{th} . Debido a esto $S(t)$ alcanza un máximo cuando $N(t) = N_{th}$ y comienza a disminuir, volviendo a tomar valores inferiores a S_{th} y así, volviendo a aumentar $N(t)$. Estas oscilaciones entorno a los valores umbrales continúan, disminuyendo su amplitud, realizando un comportamiento anarmónico y se las conoce como oscilaciones de relajación. En la figura 3.2 se observan claramente estas oscilaciones, siendo iguales en el tiempo para densidad de portadores de carga $N(t)$ y para el Chirp (máximos en el mismo tiempo t). También se observa la relación entre las oscilaciones de estas

magnitudes con las de $S(t)$, obteniendo un máximo en $S(t)$ cuando $N(t) = N_{th}$ de tal forma que ambas oscilaciones tengan el mismo periodo. *ii)* Las oscilaciones de relajación van disminuyendo a medida que el tiempo avanza alcanzando el equilibrio en el que las tres magnitudes se mantienen constante.

A partir de los datos de la figura 3.2 se pueden obtener las frecuencias de las oscilaciones de relajación en el transitorio, a partir del tiempo entre los máximos. Una primera estimación permite obtener una frecuencia de oscilación de $\nu_{RoF} \approx 5.9$ GHz, que pasado a longitud de onda equivale a $\lambda = 0.05$ nm. Comparando dicho valor con los picos debidos a las oscilaciones de relajación de los espectros para $I = 30$ mA de la figura 3.1 observamos que se encuentran en el mismo orden de magnitud, mostrando una gran concordancia entre la simulación y el experimento.

3.2. OFC (Gain-Switching)

Para el estudio del método de generación de OFC mediante Gain-Switching se ha trabajado con una corriente de inyección $I(t)$ modulada mediante una función sinusoidal superpuesta a una corriente de polarización I_{bias} tal y como se muestra en la ecuación 3.2.

$$I(t) = I_{bias} + C_{loss}(f_R) \frac{2\sqrt{2}V_{RF}}{Z_0 + Z_l} \sin(2\pi f_R t) \quad (3.2)$$

Tal y como se vió en el apartado 1.4.1 la calidad del Gain-Switching viene dada tanto por la intensidad de los picos como por duración del pulso. De esta manera, se ha procedido a caracterizar los peines ópticos de frecuencia en función del Gain-Switching aplicado modificando la frecuencia de oscilación y la amplitud de la corriente inyectada. Para el estudio del Gain-Switching en función de la frecuencia de oscilación se ha modificado el valor de f_R , estudiando primero los OFC para altas frecuencias ($f_R = 5.0$ GHz) y para bajas frecuencias ($f_R = 500$ MHz). Cabe destacar que al variar el valor de la frecuencia de oscilación f_R , la impedancia del láser Z_l también cambia y así la suma $Z_0 + Z_l$.

Para ambos valores de frecuencias f_r se han estudiado los efectos producidos al variar la amplitud de la corriente de inyección, comparando tanto los OFC obtenidos como las ecuaciones de balance para diferentes amplitudes. Para el estudio con diferentes amplitudes ha bastado con modificar los valores de V_{RF} , ya que se ha tomado para toda la simulación $C_{loss}(f_R) = 1$ constante y $(Z_0 + Z_l)$ solo varía para la frecuencia.

3.2.1. Efecto de la amplitud de modulación a altas frecuencias

Para el estudio del efecto de la amplitud de modulación a altas frecuencias se ha trabajado con una corriente de polarización $I_{bias} = 30$ mA y una frecuencia $f_R = 5.0$ GHz. Tal y como se vió en el apartado 3.1.2, la frecuencia de relajación del láser para $I_{bias} = 30$ mA es de $\nu_{RoF} \approx 5.9$ GHz, del orden de la frecuencia de oscilación de la corriente de inyección f_R . Se han obtenido las ecuaciones de balance y los OFC para tres amplitudes diferentes, tomando tres valores diferentes para V_{RF} : 0.05 V, 1.00 V y 1.50 V.

En la Figura 3.3 se muestra la evolución temporal de la corriente de inyección $I(t)$, la densidad de fotones $S(t)$, la densidad de portadores de carga $N(t)$ y del *Chirp* en función de V_{RF} pasada la zona del transitorio.

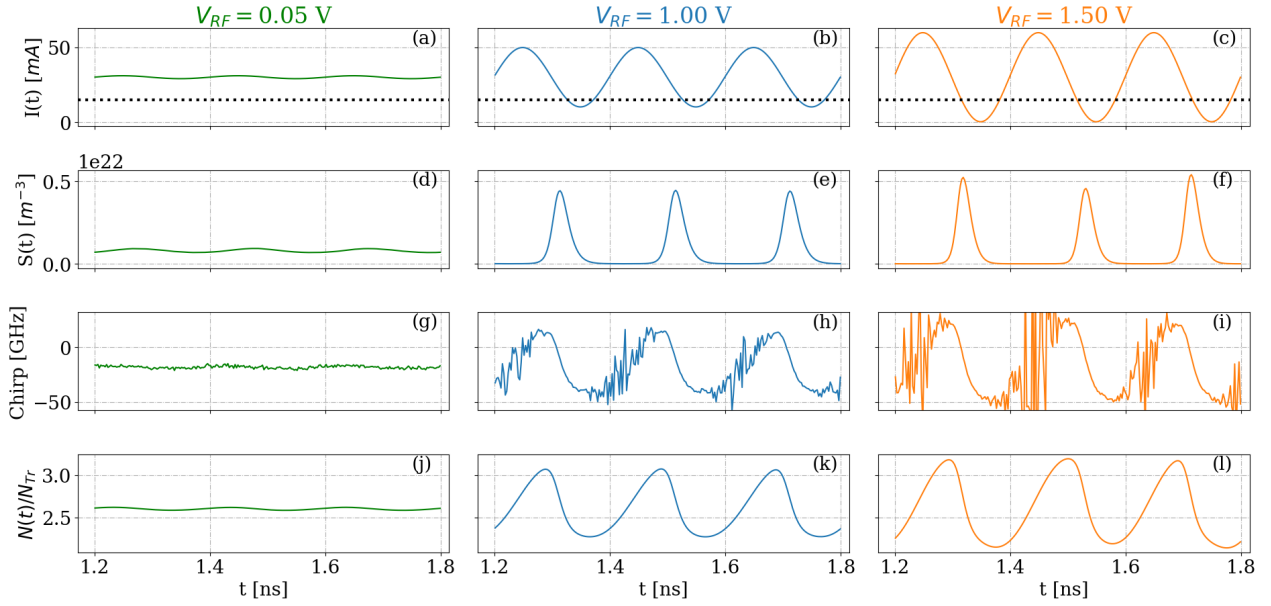


Figura 3.3: Evolución temporal de la corriente de inyección $I(t)$ ((a)-(c)), la densidad de fotones $S(t)$ ((d)-(f)), la densidad de portadores de carga $N(t)$ ((g)-(i)) y del Chirp ((j)-(l)) en función de V_{RF} pasada la zona del transitorio. Para la corriente de inyección $I(t)$ se ha marcado la corriente umbral del láser $I_{th} = 14.8$ mA con una línea horizontal discontinua. En la primera columna se muestran las evoluciones temporales para una amplitud de la corriente equivalente a $V_{RF} = 0.05$ V (verde), en la segunda columna para $V_{RF} = 1.00$ V (azul) y en la tercera columna de $V_{RF} = 1.50$ V (naranja).

Mientras que para el caso del láser en corriente continua ($I(t) = I_{bias}$) estudiado en la sección anterior (sección 3.1), en que $S(t)$, $N(t)$ y el Chirp alcanzaban un valor constante pasado el transitorio, las oscilaciones en la corriente producen oscilaciones de igual manera en $S(t)$, $N(t)$ y el Chirp. De esta forma, se observan oscilaciones con el mismo periodo para las cuatro magnitudes, y un aumento de la amplitud en $S(t)$, $N(t)$ y el Chirp al aumentar la amplitud de la corriente. Además, se puede observar la misma relación entre las oscilaciones de $S(t)$, $N(t)$ y el Chirp que en la Figura 3.2, a excepción de la atenuación. Es decir, se observa como las oscilaciones en $N(t)$ y el Chirp son iguales en el tiempo (máximos en el mismo tiempo t), mientras que los máximos de $S(t)$ se obtienen cuando $N(t)$ decae a N_{th} .

Sin embargo, para el caso de $V_{RF} = 0.05$ V, con una menor amplitud, se observa que las oscilaciones en la corriente (Figura 3.3 (a)) son despreciables frente a las otras amplitudes, y así se mantiene próximo a I_{bias} y cercano a I_{th} . Al igual que la corriente; la densidad de fotones $S(t)$, la densidad de portadores de carga $N(t)$ y el Chirp también presentan oscilaciones despreciables y tienen un comportamiento similar al de corriente continua. Cabe destacar que para este caso de amplitud pequeña, la densidad de fotones $S(t)$ (Figura 3.3 (d)) toma valores cercanos a cero, al no producirse ningún pico de intensidad. Esto produce que la emisión estimulada no tome valores suficientemente altos como para que la emisión espontánea sea despreciable y así, se puede observar en el Chirp (Figura 3.3 (g)) el ruido debido a la emisión espontánea.

Al aumentar la amplitud de la corriente a $V_{RF} = 1$ V (Figura 3.3 (b)) se observa como los aumentos de la corriente durante la oscilación coinciden con el crecimiento de densidad de portadores de carga $N(t)$ (Figura 3.3 (k)), haciendo que tome valores muy superiores a N_{th} . A su vez, esto

produce que, al superar $N(t)$ el valor del umbral N_{th} , la densidad de fotones $S(t)$ (Figura 3.3 (e)) también tenga un pico superior al valor del láser en corriente continua. De igual forma que ocurría en el transitorio, al aumentar $S(t)$ y dominar la emisión estimulada, $N(t)$ comienza a disminuir, alcanzando un máximo. Sin embargo, en el momento en el que $N(t)$ alcanza el mínimo, la corriente se encuentra por debajo de la corriente umbral I_{th} , y $N(t)$ no puede aumentar hasta que $I(t)$ toma nuevamente valores mayores de I_{th} . Debido a este tiempo t en el que $N(t)$ no es capaz de volver a aumentar, compensando la disminución de densidad de fotones $S(t)$, hay un mayor tiempo t en el que $S(t)$ es cero, y así no hay emisión estimulada. Esta alternancia entre el dominio de la emisión estimulada y la emisión espontánea se puede parecer en el *Chirp* (Figura 3.3 (h)), en la que se aprecia el ruido debido a la emisión espontánea cuando la densidad de fotones es cero, mientras que durante los picos de $S(t)$ el ruido es despreciable y no se observa.

Para la amplitud de $V_{RF} = 1.5$ V se observa la misma tendencia que para $V_{RF} = 1$ V, a excepción de que en este caso, al aumentar la amplitud aumenta el tiempo en el que la corriente es menor que I_{th} y así el tiempo en el que $S(t)$ es cero y domina la emisión espontánea.

En la Figura 3.4 se muestran los espectros de los OFC obtenidos mediante Gain-Switching para las tres amplitudes de la Figura 3.3.

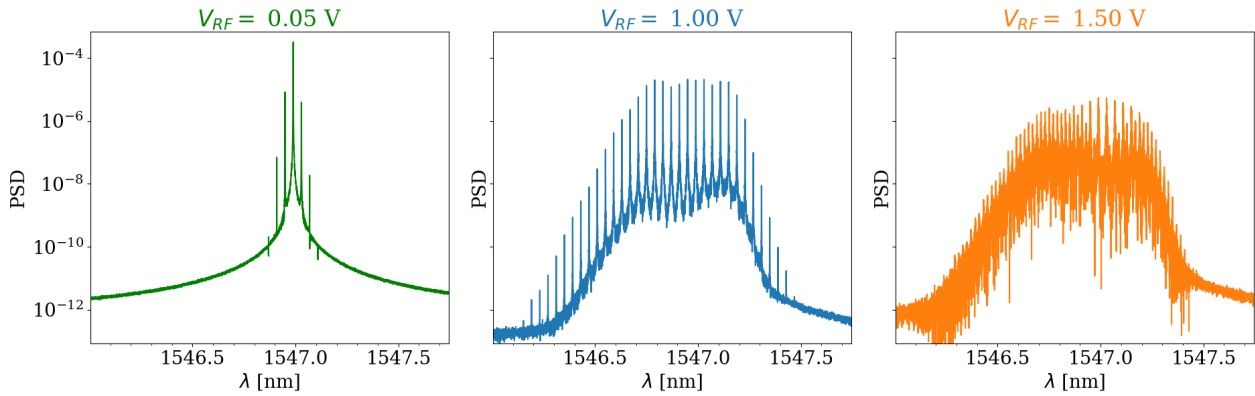


Figura 3.4: Espectros de los OFC obtenidos mediante Gain-Switching para $I_{bias} = 30$ mA, $f_R = 5$ GHz y amplitud de modulación $V_{RF} = 0.05$ V (verde), 1.00 V (azul) y 1.50 V (naranja).

Al igual que se obtuvo en la Figura 3.3, se puede observar como el caso de la amplitud de modulación $V_{RF} = 0.05$ V se asemeja al del láser en corriente continua, obteniendo un espectro (Figura 3.4 (verde)) con la frecuencia de emisión dominante de la Figura 3.1. Como consecuencia del Gain-Switching realizado se observan excitadas las frecuencias de emisión, apareciendo nuevas líneas de emisión a los lados de la emisión principal.

Para el caso de $V_{RF} = 1$ V se observa un OFC (Figura 3.4 (azul)) de gran calidad formado por numerosas líneas de emisión equiespaciadas y bien definidas. Se ha obtenido una región de longitudes de onda con líneas de emisión de la misma densidad espectral de potencia lo cuál resulta en una gran calidad del OFC.

Por otro lado, se observa que para el caso de $V_{RF} = 1.5$ V (Figura 3.4 (naranja)) el OFC se destruye debido al ruido de la emisión espontánea, obteniendo líneas de emisión poco definidas, con un espaciado variado y mucho ruido.

De esta forma, se ha podido caracterizar la calidad de los OFC, y del Gain-Switching, para altas

frecuencias en función de la amplitud de modulación. Se ha podido observar la creación del OFC para $V_{RF} = 1$ V, así como la destrucción de este para altas amplitudes, con $V_{RF} = 1.5$ V.

Tal y como se ha comentado a partir de los resultados de la Figura 3.3, uno de los efectos de aumentar la amplitud de modulación es la disminución de la corriente por debajo de I_{th} por un tiempo t , que aumenta con la amplitud. Sin embargo, ésto también se puede controlar para una amplitud fija, variando la corriente de polarización.

En la Figura 3.5 se muestran la potencia $P(t)$, obtenida a partir de la densidad de fotones $S(t)$ 2.1, y los espectros de los OFC con $f_R = 5$ GHz, $V_{RF} = 1$ V e $I_{bias} = 30$ mA y 50 mA.

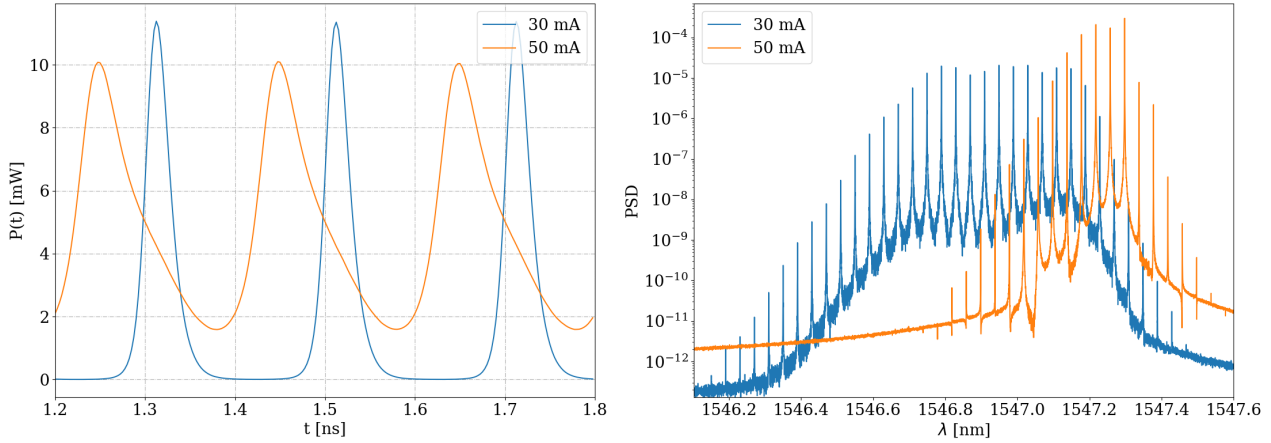


Figura 3.5: Perfil temporal de las potencias $P(t)$ (izquierda) y espectros (derecha) de OFC con $f_R = 5$ GHz, $V_{RF} = 1$ V e $I_{bias} = 30$ mA (azul) y 50 mA (naranja).

En el perfil temporal de la potencia $P(t)$ de $I_{bias} = 30$ mA (Figura 3.5 (izquierda, azul)) se observan las zonas de tiempo con $P(t) \propto S(t) = 0$ vistas en la Figura 3.3, debidas a que la corriente toma valores por debajo de I_{th} y así densidad de portadores de carga $N(t)$ no puede aumentar. De igual manera se ha obtenido un OFC de gran calidad (Figura 3.5 (derecha, azul)) como el obtenido en la Figura 3.4.

Sin embargo, en el caso de $I_{bias} = 50$ mA, al aumentar la corriente de polarización, ésta desplaza la función sinusoidal de la intensidad alejandola de I_{th} y así la amplitud de modulación no es suficiente para llegar a cruzar I_{th} . Esto se puede observar en que el perfil temporal de $P(t)$ (Figura 3.5 (izquierda, naranja)) no toma nunca el valor cero y así realiza oscilaciones completas. Puesto que la frecuencia f_R y la amplitud V_{RF} de modulación sí son suficientes com para que se dé Gain-Swithing, se observa un espectro (Figura 3.5 (derecha, naranja)) con un OFC formado por líneas bien definidas e igualmente espaciadas. No obstante, el OFC obtenido para $I_{bias} = 50$ mA es más estrecho que el obtenido para $I_{bias} = 30$ mA, careciendo de una meseta bien definida con líneas de emisión con densidad espectral de potencia similar. Debido a esto, el OFC obtenido para $I_{bias} = 30$ mA es de mayor calidad que el obtenido para $I_{bias} = 50$ mA.

Otro de los efectos de aumentar la I_{bias} de tal manera que no cruce la I_{th} es la falta de una región donde domine la emisión espontánea, como ocurría en la Figura 3.3. Esto se puede observar en el menor ruido obtenido en el espectro para $I_{bias} = 50$ mA (Figura 3.5 (derecha, naranja)) frente al obtenido en el espectro de $I_{bias} = 30$ mA (Figura 3.5 (derecha, azul)).

3.2.2. Efecto de la amplitud de modulación a bajas frecuencias

Para el estudio del efecto de la amplitud de modulación a bajas frecuencias se ha trabajado con una corriente de polarización $I_{bias} = 50$ mA y una frecuencia $f_R = 500$ MHz. Se han obtenido la potencia $P(t)$ y los OFC para cuatro amplitudes diferentes, tomando cuatro valores distintos para V_{RF} : 0.05 V, 0.4 V, 1.0 V y 1.2 V.

En la Figura 3.6 se muestran los perfiles temporales de la potencia $P(t)$ y los espectros de los OFC para $I_{bias} = 50$ mA, $f_R = 500$ MHz y $V_{RF} = 0.05$ V, 0.4 V, 1.0 V y 1.2 V.

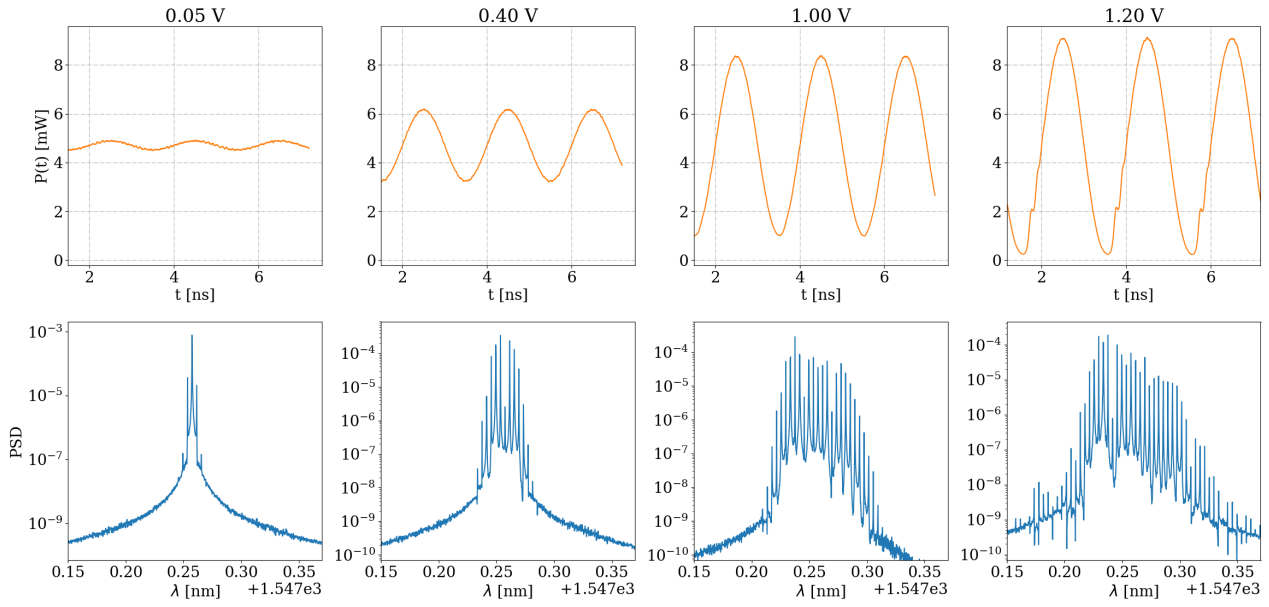


Figura 3.6: Perfiles temporales de la potencia $P(t)$ (fila superior) y espectros (fila inferior) de los OFC para $I_{bias} = 50$ mA, $f_R = 500$ MHz y $V_{RF} = 0.05$ V (primera columna), 0.4 V (segunda columna), 1.0 V (tercera columna) y 1.2 V (cuarta columna).

Al igual que se obtuvo en el apartado anterior para el caso de altas frecuencias con $I_{bias} = 50$ mA (Figura 3.5), se observan en la Figura 3.6 perfiles temporales de la potencia oscilantes entorno al valor de la potencia en corriente continua ($P_{CW} \approx 4.7$ mW), variando su amplitud en función de la amplitud de modulación. Al tener una I_{bias} muy superior a I_{th} y una frecuencia baja, la amplitud de modulación no permite mantener la corriente de inyección por debajo de la corriente umbral un tiempo suficiente como para que $P(t) \propto S(t) = 0$, tal y como se observa en las Figuras 3.6 (fila superior).

Para el caso de la amplitud de modulación pequeña con $V_{RF} = 0.05$ V, se ha obtenido un comportamiento muy similar a la corriente continua, al igual que para altas frecuencias. El espectro obtenido para esta amplitud de modulación es similar al de la Figura 3.4 (verde) del apartado anterior, obteniendo un pico de emisión dominante correspondiente a la emisión en continua y dos picos a cada lado debidos a la excitación de la frecuencia de oscilación.

Se observa como, al igual que ocurría en a altas frecuencias, a medida que aumenta la amplitud de modulación aumenta el número de líneas de emisión de espectro, llegando a destruirse para altas amplitudes de modulación. Sin embargo, al trabajar a bajar frecuencias se observa una clara irregularidad en el perfil del OFC, tomando los picos valores muy diversos de la densidad espectral

de potencia. Esto implica una pérdida de la calidad de los OFC a bajas frecuencias con respecto a altas frecuencias.

DEBERIA HABLAR SOBRE LOS PICOS QUE SE OBSERVAN EN LA POTENCIA PARA $V = 1.2$

En la Figura 3.7 se muestran los perfiles temporales de la potencia $P(t)$ y los espectros de los OFC para $I_{bias} = 50$ mA, $f_R = 500$ MHz y $V_{RF} = 0.1$ V, 0.4 V, 1.2 V y 1.6 V obtenidos experimentalmente [2].

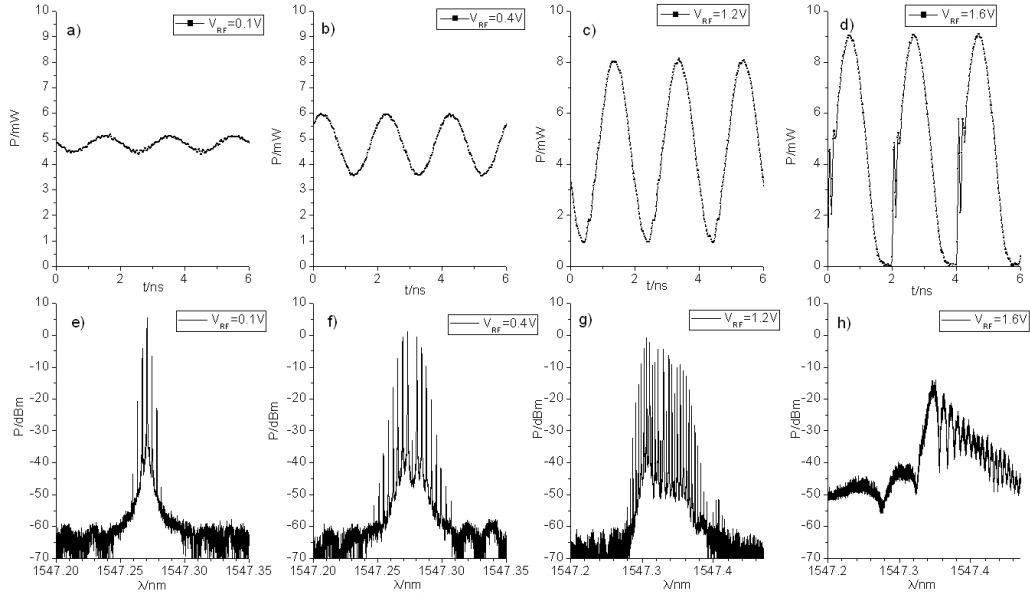


Figura 3.7: Perfiles temporales de la potencia $P(t)$ (fila superior) y espectros (fila inferior) de los OFC para $I_{bias} = 50$ mA, $f_R = 500$ MHz y $V_{RF} = 0.1$ V (primera columna), 0.4 V (segunda columna), 1.2 V (tercera columna) y 1.6 V (cuarta columna) obtenidos experimentalmente [2].

En la Figura 3.7 se muestran la potencia $P(t)$ y los espectros experimentales para diferentes amplitudes de modulación, permitiendo comparar los resultados obtenidos mediante simulación con los obtenidos en el laboratorio.

En la cuarta columna de la Figura 3.7 se muestran los resultados obtenidos para una amplitud de $V_{RF} = 1.6$ V, observando como el espectro de frecuencia se encuentra completamente destruido. Dichos resultados no pudieron ser obtenidos mediante la simulación debido al problema en el transitorio con $\sqrt{S(t)}$. En la primera columna de la Figura 3.7 se muestran los resultados para una amplitud de modulación pequeña de $V_{RF} = 0.1$ V. Al igual que en los resultados de la simulación, se obtiene un comportamiento similar al de la corriente continua con un pico de emisión dominante. No obstante, al tratarse de el doble de la amplitud utilizada en la simulación de la Figura 3.6 se obtienen un mayor número de picos de emisión estimulados. Los resultados que se muestran en la segunda columna de la Figura 3.7 para $V_{RF} = 0.4$ V equivalen a los resultados de la simulación de la segunda columna de la Figura 3.6. En ambas figuras se pueden observar un OFC con un perfil aproximadamente simétrico con un pico de menor intensidad en el centro. Por último, la tercera columna de la Figura 3.7 equivale a la cuarta columna de la Figura 3.6. Ambos espectros presentan

un perfil similar con un aumento brusco de la densidad espectral de potencia de los picos para bajas longitudes de onda, seguido de una disminución más tenue para longitudes de onda mayores. Ambos perfiles temporales de potencia presentan LOS PICOS DE LOS QUE HE DE HABLAR.

El excelente acuerdo entre los resultados de la simulación de la Figura 3.6 y los resultados experimentales de la Figura 3.7 indican la capacidad de la simulación de explicar los procesos que involucra el Gain-Switching en la generación de OFC, pudiendo servir para la caracterización de la calidad de los OFC.

Capítulo 4

Inyeccion de Luz

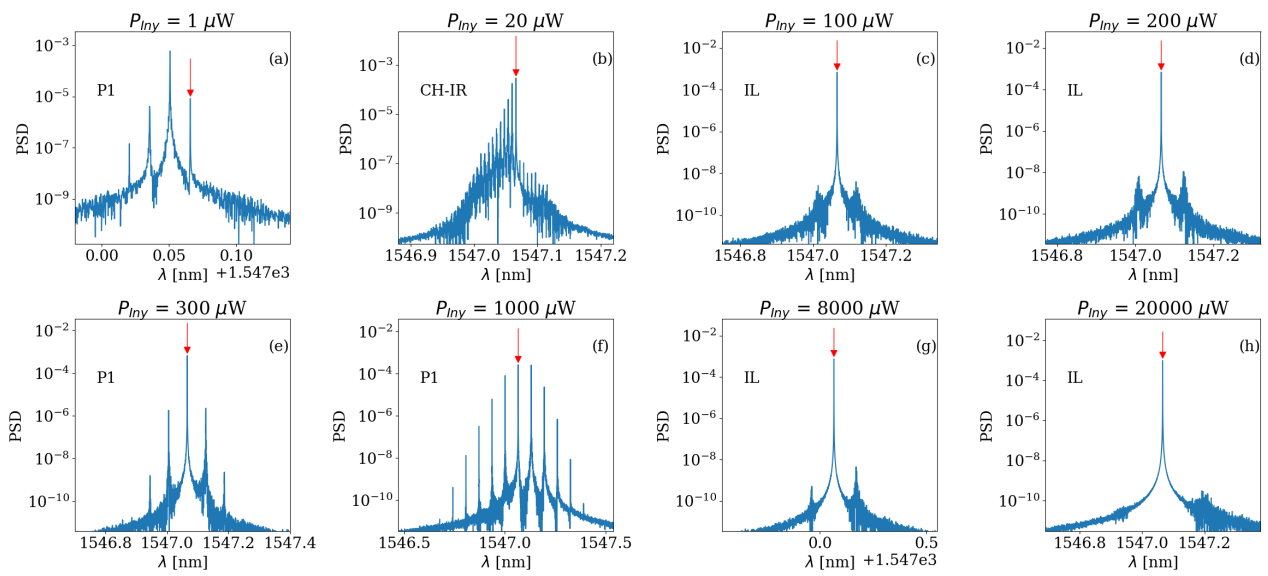


Figura 4.1: el pie de pagina que le quieras poner a la imagen

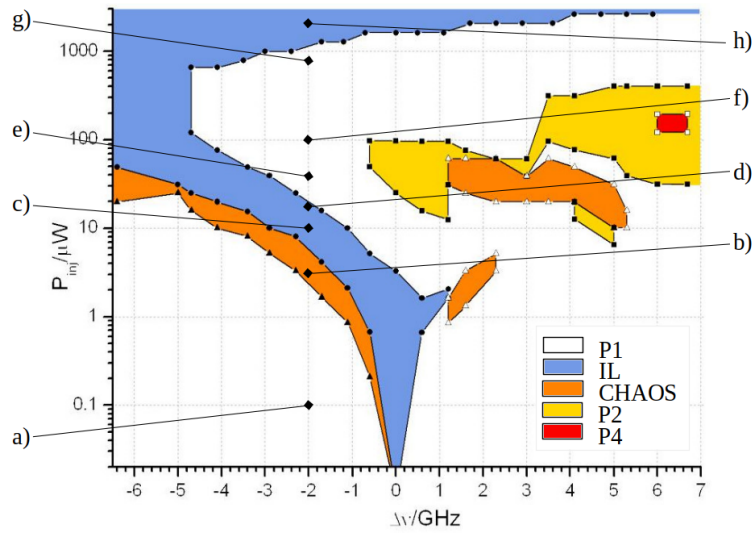


Figura 4.2: Map

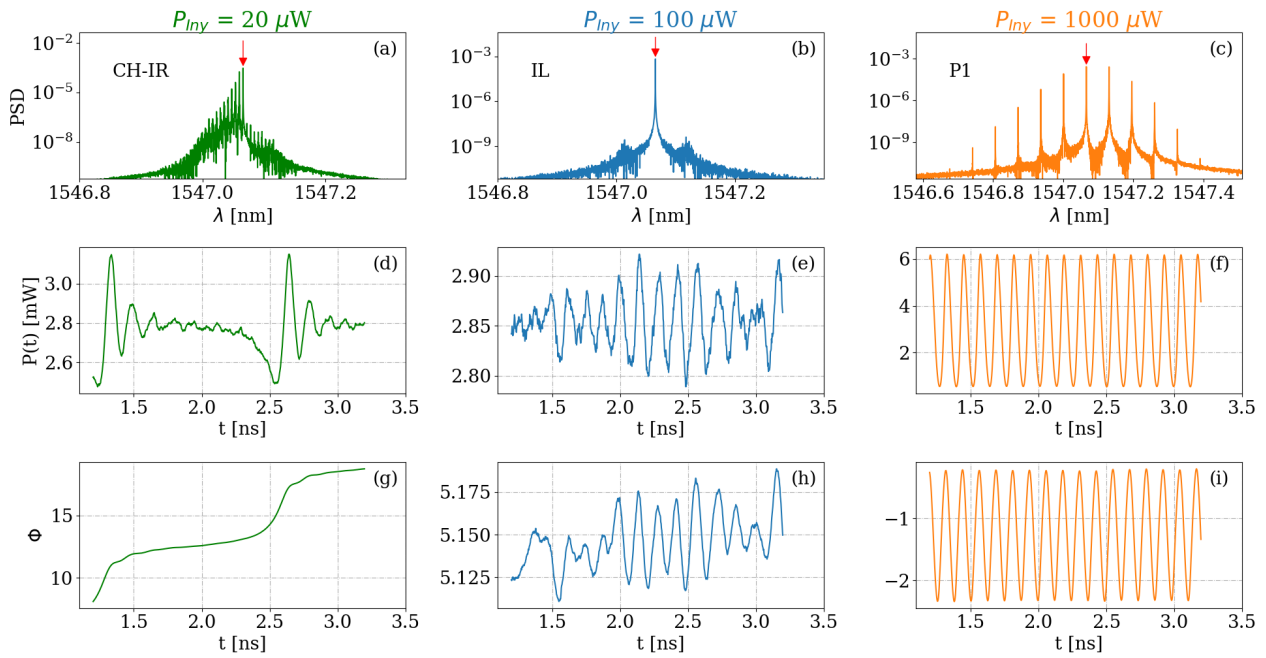


Figura 4.3: ZoneRtEq

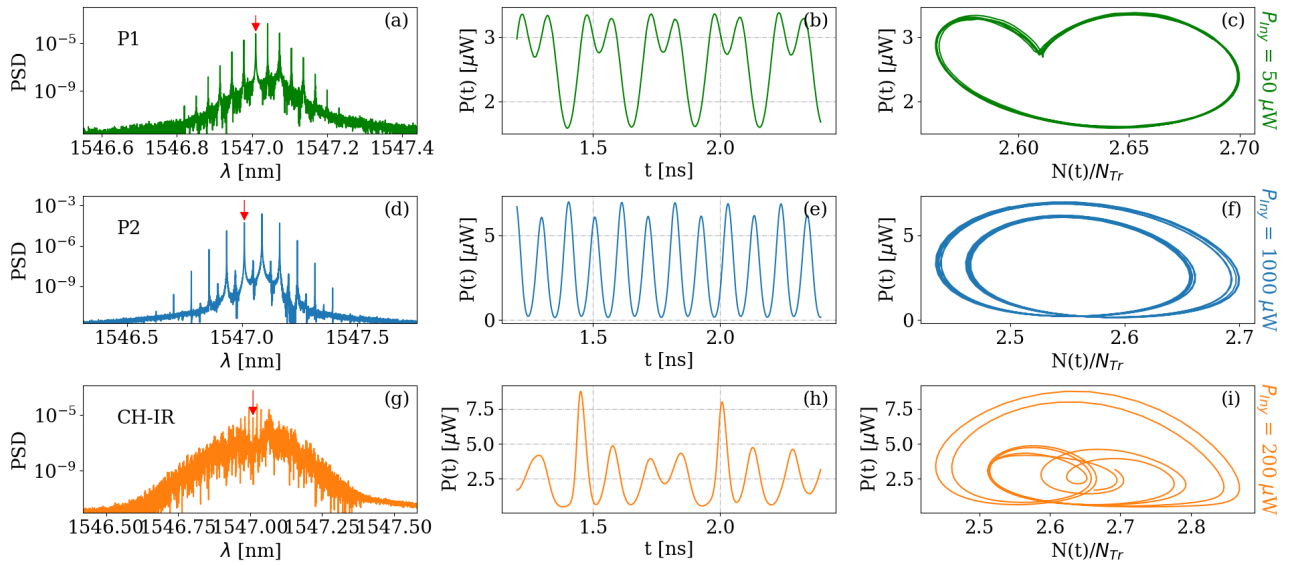


Figura 4.4: P2zone

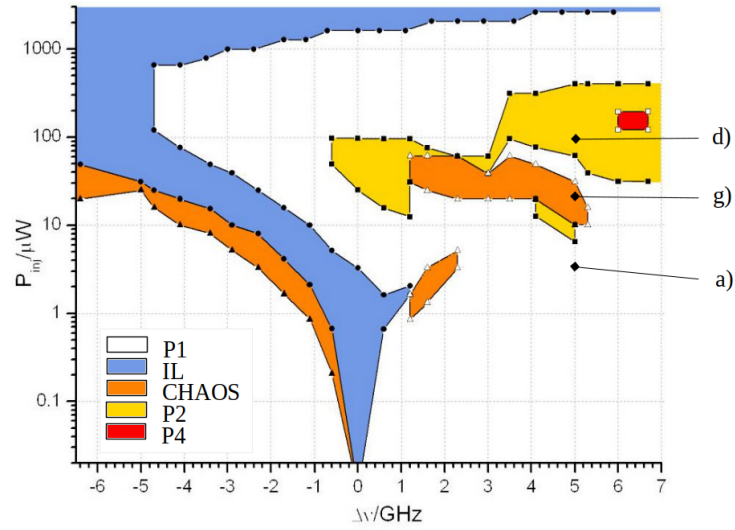


Figura 4.5: Maps2

Capítulo 5

Inyección de luz en OFC

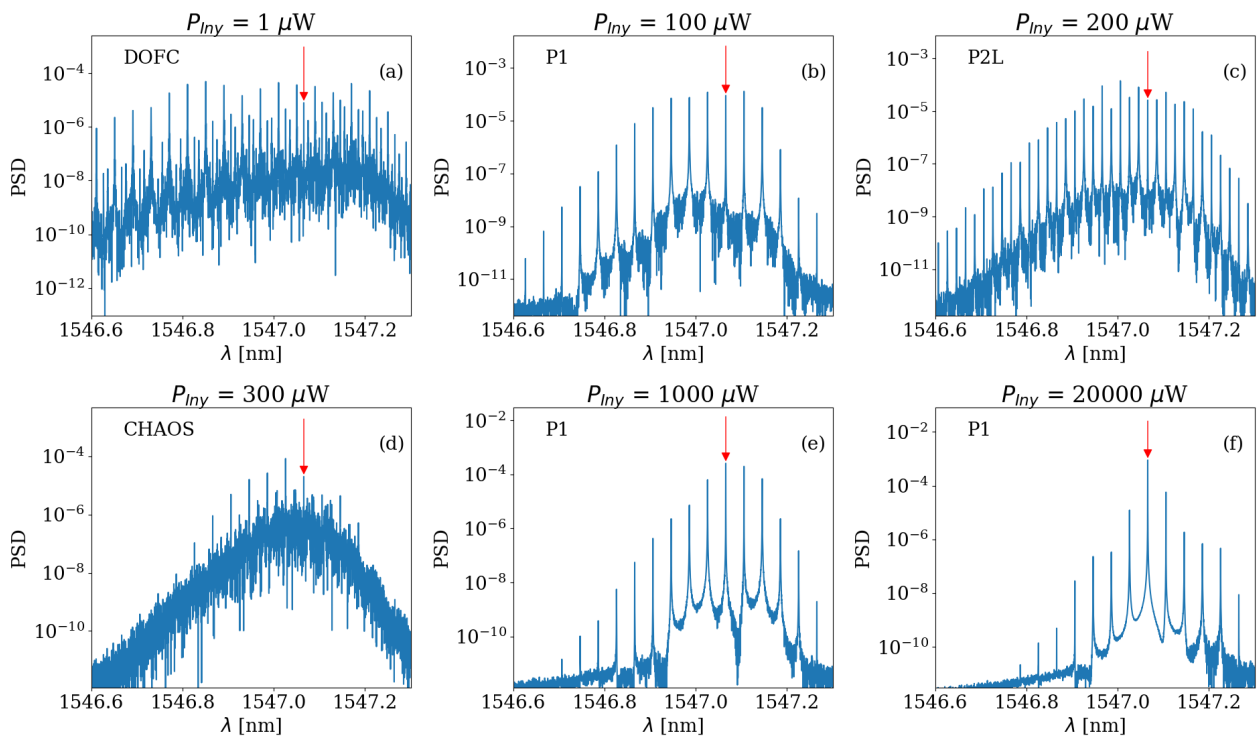
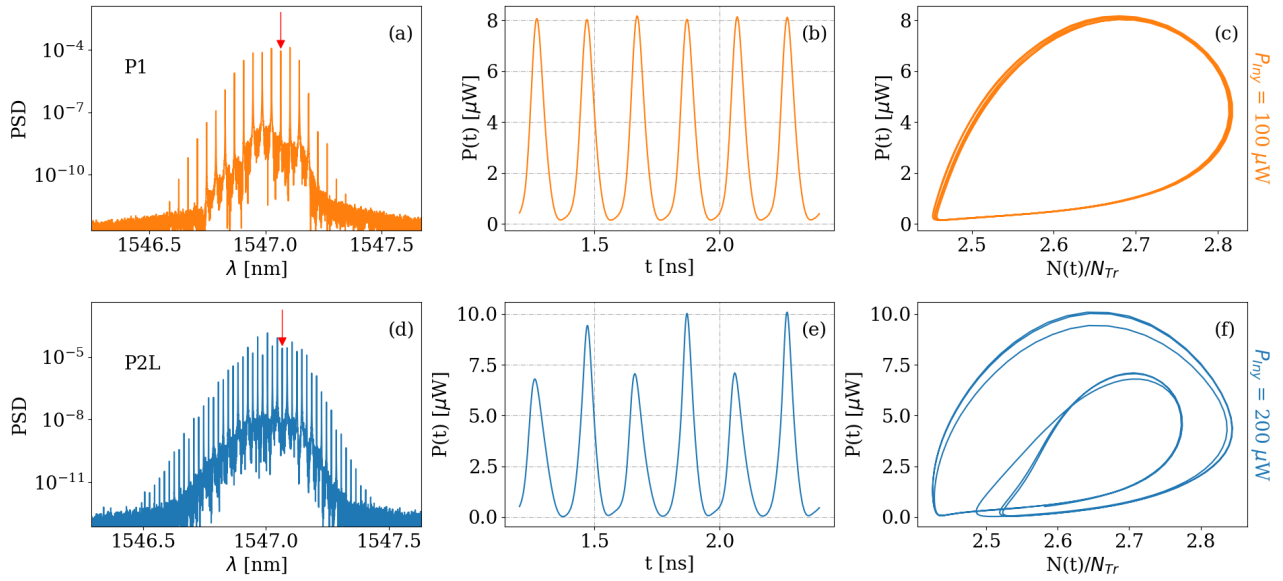
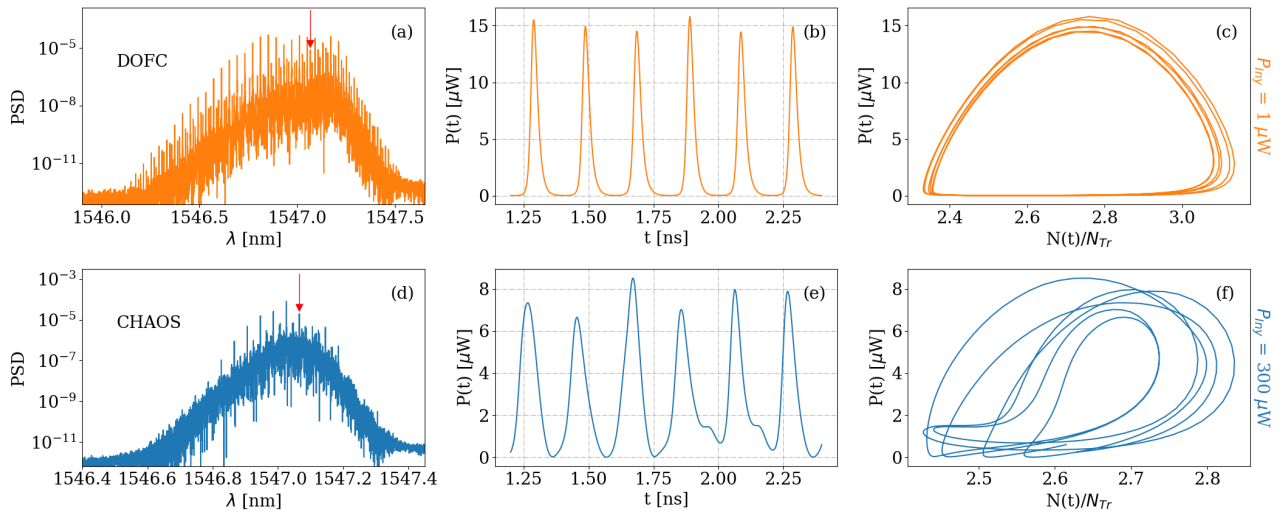


Figura 5.1: el pie de pagina que le quieras poner a la imagen

Figura 5.2: $p1$ - $P2$ Figura 5.3: *Chaos*

Capítulo 6

Conclusiones

hola a todos

Bibliografía

- [1] Orazio Svelto and David C Hanna. *Principles of lasers*, volume 4. Springer, 1998.
- [2] Diego Chaves Carriles and Ángel Alberto Valle Gutierrez. Peines de frecuencia óptica generados por láseres de semiconductor. *Trabajo Fin de Grado*, 2020.

Apéndice A

Código de la simulación

```
+----- 18 lines -----+
19 import numpy as np
20
21 from Constants import *
22 from getDictValues import *
23
24 class Simulation():
25
26     def __init__(self, iBias, vRF, fR, pwrInjct=0, nuDetng=0, numWindw=1):
```

```
+----- 18 lines -----+
44         #                2 sqrt(2) vRF
45         # I_bias + cLoss ----- sin(2 pi fR t)
46         #                z0 + zL
47         self.current = lambda t: (self.iBias*10**(-12)
48                                   + (cLoss*2.0*np.sqrt(2)*self.vRF
49                                       * np.sin(2*np.pi*fR*t)) / rInt
50                                   )
51
52         self.tWindw = 40.96
53         self.tTrans = 2.2
```

```
+----- 24 lines -----+
77         mWindw = int(self.tWindw / delta)
78         mTrans = int(self.tTrans / delta)
79         tTotal = self.tWindw + self.tTrans
80         mTotal = int(tTotal / delta)
81         nTotal = mTotal*ndelta #int(tTotal / tIntev)
```

```
+----- 15 lines -----+
96     def allSimulation(self):
```

```
+----- 20 lines -----+
116         for win in range(0, self.numWindw):
117
118             #-----
119             # Gaussian arrays N(0,1) for the Noise
120             #-----
121             X = np.random.normal(0, 1, nTotal)
122             Y = np.random.normal(0, 1, nTotal)
123
124             # Initial conditions are defined in order to resolved the SDE
125             tempN = nTr
126             tempS = float(10**(15))
127             tempPhi = 0
128
129             for q in range(0, mTrans):
```

```

130         for k in range(0, ndelta):
131
132             index = q*ndelta + k
133
134             bTN = bTIntv * tempN * tempN
135             invS = 1 / ((1/tempS) + epsilon)
136             sqrtS = np.sqrt(abs(tempS))
137             cosPhi = np.cos(tempPhi)
138             senPhi = np.sin(tempPhi)
139
140             tempPhi = (tempPhi + aphvgTGmm*tempN - self.phaseTerm
141                       + noisePhi*tempN*Y[index]/sqrtS
142                       - (ampInject/sqrtS)*senPhi*cosInject[index]
143                       + (ampInject/sqrtS)*cosPhi*senInject[index]
144                       )
145
146             tempS = (tempS + vgTGmm*tempN*invS - vgTGmmN*invS
147                     - intTtau*tempS + btGmm*bTN
148                     + noiseS*tempN*sqrtS*X[index]
149                     + 2*ampInject*sqrtS*cosPhi*cosInject[index]
150                     + 2*ampInject*sqrtS*senPhi*senInject[index]
151                     )
152
153             tempN = (tempN + self.currentTerm[index] - aTIntv*tempN
154                     - bTN - cTIntv*tempN**3 - vgT*tempN*invS + vgtN*invS
155                     )

```

+----- 10 lines -----+

```

165     for q in range(mTrans, mTotal):
166         for k in range(0, ndelta):
167
168             index = q*ndelta + k
169
170             bTN = bTIntv * tempN * tempN
171             invS = 1 / ((1/tempS) + epsilon)
172             sqrtS = np.sqrt(tempS)
173             cosPhi = np.cos(tempPhi)
174             senPhi = np.sin(tempPhi)
175
176             tempPhi = (tempPhi + aphvgTGmm*tempN - self.phaseTerm
177                       + noisePhi*tempN*Y[index]/sqrtS
178                       - (ampInject/sqrtS)*senPhi*cosInject[index]
179                       + (ampInject/sqrtS)*cosPhi*senInject[index]
180                       )
181
182             tempS = (tempS + vgTGmm*tempN*invS - vgTGmmN*invS
183                     - intTtau*tempS + btGmm*bTN
184                     + noiseS*tempN*sqrtS*X[index]
185                     + 2*ampInject*sqrtS*cosPhi*cosInject[index]
186                     + 2*ampInject*sqrtS*senPhi*senInject[index]
187                     )
188
189             tempN = (tempN + self.currentTerm[index]
190                     - aTIntv*tempN - bTN - (cTIntv*tempN**3)
191                     - vgT*tempN*invS + vgtN*invS
192                     )

```

+----- 10 lines -----+

```

202     self.opField[q-mTrans] = (np.sqrt(constP*tempS)
203                               * np.exp(1j*tempPhi)
204                               + opFldInject
205                               * np.exp(1j*angInject[index]))
206     )

```



```

+----- 6 lines -----+
212     transFourier = np.fft.fft(self.opField)
213     self.TFavg += (abs(np.fft.fftshift(transFourier))
214                   * abs(np.fft.fftshift(transFourier))
215                     / float(self.numWindw)
216                   )
217
218     self.TFang += (np.angle(np.fft.fftshift(transFourier))
219                   / float(self.numWindw)
220                   )
+----- 39 lines -----+
```