



---

UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA  
FACULTAD DE CIENCIAS  
DEPARTAMENTO DE FÍSICA APLICADA

TFG en Física

# **Q-SWITCHING EN LÁSERES DE FIBRA ÓPTICA DOPADA CON ERBIO**

---

*Autor:* Pascual Gracia, Álvaro José

*Director:* Jarabo Lallana, Sebastián

En Zaragoza, curso 2014/2015



## Índice general

<b>1. Resumen y objetivos</b>	<b>2</b>
<b>2. Introducción</b>	<b>3</b>
2.1. Técnica del Q-switching activo . . . . .	3
2.2. Conmutación de Q con chopper . . . . .	5
<b>3. Desarrollo del montaje</b>	<b>7</b>
3.1. Componentes del experimento . . . . .	7
3.2. Pruebas . . . . .	10
<b>4. Teoría Q-switching activo</b>	<b>11</b>
4.1. Presentación del modelo. Algoritmo . . . . .	12
4.2. Magnitud S . . . . .	13
<b>5. Estudio experimental de la técnica</b>	<b>14</b>
5.1. Calibración detector . . . . .	14
5.2. Montaje final . . . . .	14
5.3. Series de medidas. Discusión . . . . .	15
5.3.1. Influencia de la frecuencia de modulación . . . . .	15
5.3.2. Evolución de la potencia del pico principal anchura a media altura en función de la potencia de bombeo . . . . .	18
5.3.3. Otros parámetros . . . . .	20
5.4. Otros resultados . . . . .	21
<b>6. Simulación</b>	<b>22</b>
6.1. Resultados . . . . .	22
<b>7. Conclusiones y comentarios finales</b>	<b>24</b>
7.1. Comentarios . . . . .	24
7.2. Conclusiones . . . . .	24
<b>8. Apéndice 1, sobre las conexiones</b>	<b>27</b>
<b>9. Apéndice 2, evolución parámetros relevantes</b>	<b>28</b>
<b>10. Apéndice 3, debug del algoritmo</b>	<b>29</b>

## Sección 1: Resumen y objetivos

En este documento se explica el desarrollo del trabajo ‘Q-switching en láseres de fibra óptica dopada con erbio en cavidad de anillo’. La carga experimental es notable aunque también hay una parte que podría considerarse más teórica, en la que se se lleva a cabo una simulación a partir de los datos de laboratorio.

La memoria consta de varias partes bien diferenciadas. La primera puede considerarse como una introducción muy general. Se comienza explicando la idea del Q-switching, técnica utilizada para que los láseres emitan de forma pulsada. A continuación, se muestra el montaje utilizado junto con los componentes principales del experimento, sus particularidades y su función. Finalmente se incluye la teoría a partir de un modelo de la bibliografía básica<sup>[1]</sup> y las bases de la simulación que se puede llevar a cabo con dicha teoría.

En la segunda parte de la memoria, se exponen los resultados experimentales con su correspondiente discusión y se discuten también las predicciones de la simulación.

Por último, se incluyen una serie de conclusiones y comentarios que pretenden dar una visión general del trabajo.

Por objetivos se tienen: estudiar la técnica de Q-switching y cotejar las medidas experimentales con un modelo teórico así como el análisis de sus predicciones, para ver hasta qué punto es este válido.

**Palabras clave:** Q-switching, láser, fibra óptica, erbio.

## Sección 2: Introducción

El público en general tiene una concepción de láser como fuente de luz que emite de forma continua, sin embargo es también común hacerlo trabajar en modo pulsado. Una de las dos formas principales de conseguirlo es el Q-switching, que consiste en ir interrumpiendo la acción láser a intervalos para almacenar energía y liberarla posteriormente en forma de pulsos.

La técnica Q-switching se desarrolló en los años 60. Hoy día, es una tecnología madura y ha sido implementada en una variedad de láseres, por ejemplo, con uno típico de Nd:YAG se consiguen anchuras de pulsos de decenas de ns y potencias de pico de kilowatios<sup>[4]</sup>. Las tasas de repetición se encuentran generalmente por debajo de los kilohertzios.

Algunas aplicaciones de los láseres pulsados mediante Q-switching son: el corte de metal, holografía pulsada, metrología, óptica no lineal o la eliminación de tatuajes.

### 2.1 Técnica del Q-switching activo

Antes de comenzar a explicar en qué consiste este método, se introducen someramente algunos conceptos fundamentales necesarios para entenderlo.

- En la cavidad de un láser, además de las pérdidas que introduce el espejo de salida (emisión de potencia) existen otras como por ejemplo, las debidas a la difracción o absorción de los diferentes elementos.
- En el medio activo de un láser, a mayor inversión de población entre los niveles de una transición, más ganancia presentará. Esta ganancia debe compensar las pérdidas de la cavidad para tener acción láser. Expresado matemáticamente:  $N \geq N_c$ , es decir, la inversión de población debe ser mayor o igual que un umbral, denominado inversión de población crítica. Para un láser operando en CW, en el estacionario se tiene que  $N = N_c$ .

Dicho umbral depende de las pérdidas, si son altas, es alto (se necesita mayor inversión de población para tener acción láser), y si son bajas, el umbral es más bajo.

La idea de la técnica Q-switching consiste en prevenir la acción láser para almacenar energía en el medio activo en forma de inversión de población entre los niveles de la transición láser, y su posterior liberación repentina cuando se permita la acción láser. Se deja de trabajar en modo continuo (CW) para emitir potencia en forma de pulsos.

Para permitir/prevenir la acción láser hay que incluir en la cavidad un conmutador, que introduzca, a conveniencia, además de las pérdidas propias de la cavidad, o bien pérdidas muy altas, o bien muy bajas (idealmente cero).

En la técnica Q-switching hay dos situaciones que se van sucediendo periódicamente: almacenamiento de energía y emisión de energía acumulada.

**1. Almacenamiento de energía:** se cambian a un valor muy elevado las pérdidas de la cavidad (se cierra el conmutador), de esta forma se tiene una inversión de población crítica muy alta y no se podrá conseguir  $N > N_c$  por mucha potencia o por mucho tiempo que se bombee. Así, no se tiene acción láser y mientras las pérdidas sean muy elevadas, los iones que se vayan excitando se acumulan en el nivel superior de la transición láser.

**2. Liberación de energía:** En el segundo paso, se disminuyen repentinamente las pérdidas del conmutador. Cuando este se abre, las pérdidas que presenta la cavidad son las propias de esta, mucho menores que cuando el conmutador está cerrado y por tanto, el umbral para que haya acción láser también es mucho menor. Si se ha bombeado con suficiente potencia y se ha cargado durante suficiente tiempo, en este momento se tiene que  $N > N_c$ , el medio amplificador presenta una ganancia que supera las pérdidas, entonces hay acción láser y se libera de este modo la energía almacenada en forma de pulso de luz, tanto más intenso conforme mayor sea  $N$  respecto de  $N_c$ .

A continuación se vuelven a conmutar las pérdidas a un valor alto y el proceso comienza de nuevo.

En este trabajo, las aspas de un chopper llevan a cabo la conmutación. Si las aspas bloquean el haz, las pérdidas son muy altas. Si no lo bloquean, la cavidad presenta las pérdidas propias de esta. Normalmente se utilizan conmutadores electro-ópticos (basados en el efecto Pockels), o también puede utilizarse un absorbente saturable, este último caso se corresponde a Q-switching pasivo, donde, al contrario que el activo, no puede controlarse la frecuencia de conmutación.

Como este método consiste en ir cambiando a intervalos el factor  $Q$  de la cavidad<sup>1</sup> de un valor alto a uno bajo, la técnica se ha denominado Q-switching. Resaltar que en este caso el láser se alimenta con una potencia continua.

---

<sup>1</sup>En particular, para una cavidad óptica resonante, se define el factor  $Q$  de la cavidad como:  $Q = 2\pi \cdot \text{Energía almacenada} / \text{Energía perdida en una oscilación}$ , así, un factor  $Q$  alto implica bajas pérdidas y viceversa.

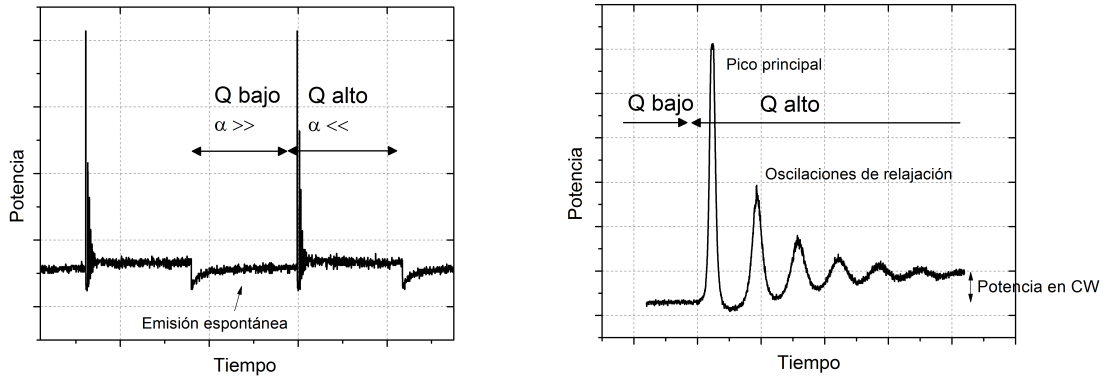


Figura 2.1: Secuencia de pulsos obtenidos mediante la técnica Q-switching: Q-bajo, el haz es bloqueado, las pérdidas (denotadas como  $\alpha$ ) son altas y no lasea. Q-alto, pérdidas bajas y comienza la acción láser. A la derecha, detalle de los pulsos.

La figura 2.1 muestra el régimen de salida de potencia del láser, los pulsos se repiten periódicamente. Cuando las pérdidas son altas y no se tiene acción láser, al detector llega emisión espontánea.

Las oscilaciones tras el primer pico (fig. 2.1 derecha), denominadas oscilaciones de relajación, se deben a que tras la emisión de este, la potencia de salida del láser evoluciona progresivamente hacia CW, hasta que se conmuten las pérdidas a un valor alto y se detenga la acción láser.

Se estudiará la evolución del pico principal: anchura a media altura, potencia de pico y energía. Un pulso bueno se entiende que es aquel que presente un pico más alto y más estrecho. De aquí en adelante el término pulso se refiere al pico principal más las oscilaciones de relajación. Y con pico, al principal.

## 2.2 Conmutación de Q con chopper

En primer lugar, hay que decidir cuales son las aspas más adecuadas. De cara a conseguir los mejores pulsos, interesa efectuar un corte del haz (eq. conmutación) rápido a la vez que un tiempo de carga lo mayor posible, se seleccionan las aspas más anchas de la fig. 2.2:

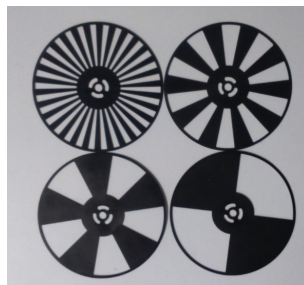


Figura 2.2: Diferentes tipos de aspas para el chopper.

Todas las aspas (fig. 2.2) tienen un tiempo de corte del haz similar, sin embargo las aspas más anchas son las que permiten un tiempo de carga mayor. Ya que la acción láser queda interrumpida durante más tiempo.

El hecho de utilizarlo tiene fines didácticos, porque es una forma de conmutar las pérdidas de la cavidad muy visual. Hay dos consecuencias fundamentales si se utiliza un chopper como conmutador:

Primero, el corte es lento, lo que ensancha los pulsos, la figura 2.3 inferior muestra el tiempo que le cuesta a las aspas conmutar las pérdidas (cortar el haz).

Segundo, el tiempo de Q alto es igual al tiempo de Q bajo (ver fig. superior 2.3). Una vez se emite el pico principal, interesa conmutar de nuevo las pérdidas para volver a cargar. Al utilizar un chopper esto no se puede controlar y aparecen oscilaciones de relajación.

En el apéndice 2 se proporciona un ejemplo de conmutación buena, las pérdidas (denotadas como  $\gamma(t)$ ) se mantienen bajas el tiempo justo para que se emita el pico principal, eliminando la aparición de posteriores oscilaciones.

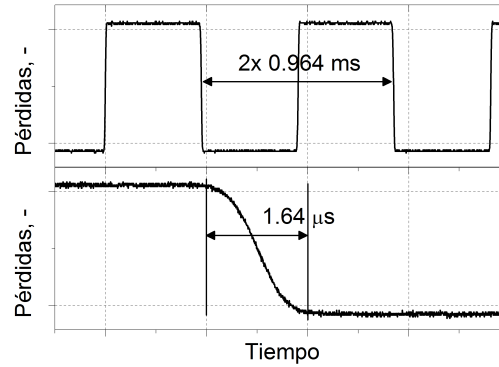


Figura 2.3: Arriba: Conmutación de las pérdidas en la cavidad. Abajo: Detalle del paso de las pérdidas de altas a bajas. Los valores numéricos se corresponden a una frecuencia de modulación del chopper de 250 Hz.

Por último, sobre el chopper, comentar que el tiempo que las aspas están bloqueando al haz y el tiempo que le cuesta a las aspas cortar el spot del haz vienen simultáneamente fijados por la frecuencia de modulación (velocidad giro del motor), ver tabla 2.1:

$\nu$ modulación, Hz	250	200	150	100
Tiempo corte haz, $\mu s$	1.64	2.60	3.22	3.91
Tiempo carga, ms	0.964	1.61	1.93	2.40

Tabla 2.1: Tabla de equivalencias entre la frecuencia de modulación del chopper y el tiempo de carga y el tiempo de corte del haz.



### Sección 3: Desarrollo del montaje

La familiarización con el experimento, pruebas, etc, conlleva aproximadamente la mitad de las horas de laboratorio que, en término general, constituyen el 20-25 % del tiempo dedicado al trabajo. Por ejemplo, solo ensamblar, alinear y comprobar el sistema de lentes conlleva 8 horas.

El estudio de la técnica se lleva a cabo sobre el siguiente montaje (fig. 3.1). Se muestra el láser que se utiliza, de fibra en cavidad de anillo y un esquema completo.

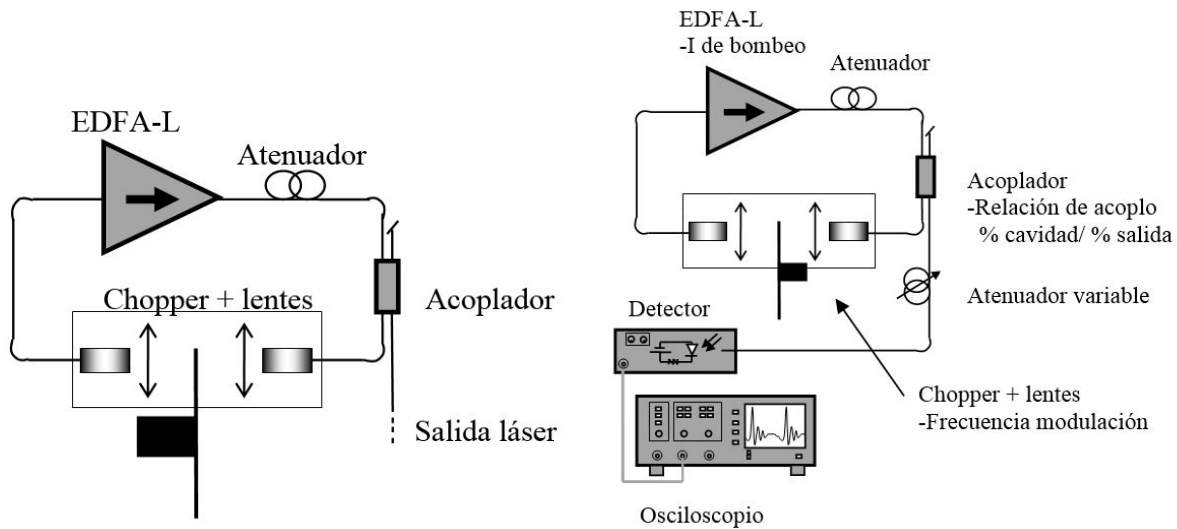


Figura 3.1: Esquema del láser y montaje para estudiar la técnica Q-switching.

Durante la evolución del trabajo, retrasó bastante el hecho de que se rompieran los conectores de fibra (opcional, consultar apéndice 1) al alimentar al láser con una potencia moderada. Hubo que ver el límite que aguantaba el sistema e incluir un atenuador intracavidad para poder hacer un estudio adecuado.

#### 3.1 Componentes del experimento

La técnica Q-switching no tiene por qué implementarse en un láser de fibra. Típicamente, en un láser convencional se tiene, entre dos espejos que conforman la cavidad, un medio activo y un conmutador. Este caso difiere de lo habitual en los componentes utilizados y en que la cavidad es un anillo. En este sentido se destina una parte de la memoria para explicar la función de los diferentes elementos que forman parte del experimento:

##### El EDFA-L

El EDFA es un amplificador de fibra dopada con erbio con ganancia en banda L, medida experimentalmente (fig. 3.2, 1570-1620 nm aprox.). Consta de dos láseres de bombeo,

la alimentación de uno de ellos se fija a 600 mA y es el otro el que se utiliza para variar la intensidad de bombeo, o equivalentemente, potencia de bombeo. Así, cuando aparezcan valores de intensidad se referirán a la alimentación de este segundo láser. En analogía con otros láseres, el EDFA constituye el medio activo.

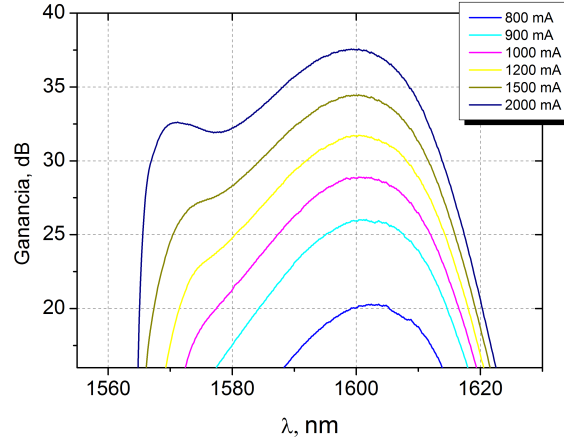


Figura 3.2: Ganancia del EDFA-L para distintas intensidades de bombeo.

## Detector

El detector consiste en un APD, fotodiodo de avalancha, de InGaAs<sup>[5]</sup>, adecuado para la banda de trabajo.

La señal de salida, se conecta a un osciloscopio, donde se visualiza (fig 3.1 derecha). Este detector presenta ancho de banda de alrededor del GHz, por lo que no hay problema en muestrear los pulsos, de extensión temporal del orden del microsegundo en el mejor caso.

## Chopper y lentes: plano-convezas y GRIN

El sistema de lentes y chopper (fig. 3.3) se coloca dentro de la cavidad, constituye el conmutador, necesario para pulsar el láser. Se descarta modificarlo debido al tiempo que cuesta alinear en IR.

Consiste en: una lente GRIN con pigtail de fibra por la cual se emite la luz colimada (diámetro spot de  $\sim 0.2$  mm), una lente convergente que focaliza el haz, otra lente igual que realiza el proceso inverso y finalmente otra lente GRIN que recoge la luz colimada y la acopla a la fibra óptica.

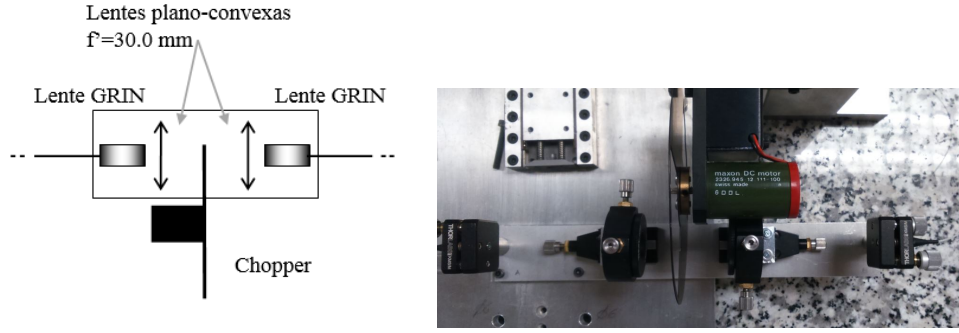


Figura 3.3: Montaje de lentes más chopper.

Las aspas del chopper se colocan en dirección perpendicular a la dirección de propagación de la luz, en el punto donde el haz está focalizado. A medida que gira el motor, las aspas dejan pasar o no la luz, conmutando así las pérdidas de la cavidad.

El chopper se aleja del eje del sistema de modo que sea la parte más exterior de las aspas, con mayor velocidad lineal, la que corte el haz, para conseguir una conmutación lo más rápida posible.

Además se coloca a mitad de distancia entre las dos lentes plano-convexas, se comprueba experimentalmente que esta posición no es crítica, i. e. pequeños movimientos hacia la derecha o izquierda no cambian el tiempo de corte del haz (focalización débil).

### Acoplador

Los acopladores son dispositivos recíprocos que se utilizan, en este caso, para dividir la potencia que va por una fibra en otras dos, con una relación dada, por ejemplo 90/10 o 50/50.

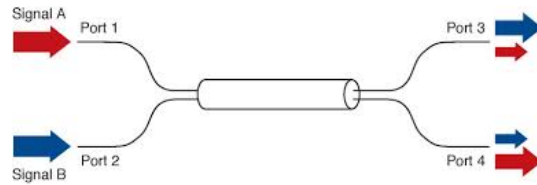


Figura 3.4: Esquema de funcionamiento de un acoplador de fibra óptica. De la señal que llega por A parte sale por el puerto 3 y el resto por el 4.

El acoplador es un elemento que forma parte de la cavidad del láser, la luz que sale del EDFA (ver figura 3.1), tras atenuarse, va a una de las entradas de un acoplador. A continuación este dispositivo divide la potencia entrante entre dos fibras. Parte de ella sigue por la cavidad y el resto es la potencia de salida del láser.

La función del acoplador es la misma que el espejo de salida de un láser si se tiene una cavidad resonante lineal con un espejo M2, la parte que refleja M2 es la que permanece en

la cavidad y el resto, transmitido, la potencia de salida.

### Atenuador variable

El uso de este dispositivo se debe a que se satura el detector, al utilizar niveles de potencia en la fibra relativamente altos. Además se controla que los niveles de luz que inciden en el detector estén dentro del rango donde el detector está calibrado. Una vez se mide, se tiene en cuenta el factor de atenuación que introduce a la hora de calcular potencias.

### Atenuador

Como ya se ha mencionado, experimentalmente, se encuentra que es necesario añadir un atenuador a la cavidad para realizar el estudio, incluye pérdidas de alrededor de -9.7 dB.

## 3.2 Pruebas

Decir que el montaje que se utiliza para estudiar la técnica no viene dado de antemano. Hay que hacer un desarrollo experimental, hasta la elección del montaje definitivo (fig. 3.1). Para ello, se realizan diversas pruebas y se miden algunos resultados preliminares hasta tener uno por una parte no muy complicado y por otra, que permita estudiar convenientemente la técnica.

Por ejemplo, una de las cosas que se probó fue la inclusión de un filtro selector de longitud de onda en la cavidad, porque disminuye sustancialmente los niveles de ASE (emisión espontánea amplificada). Dicho filtro (Bragg), fija la longitud de emisión del láser en torno a 1612 nm, se incluye en la cavidad mediante un circulador tal y como muestra la imagen 3.5:

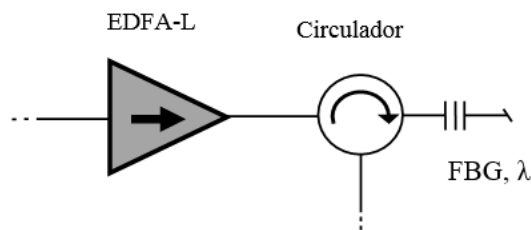


Figura 3.5: Esquema inclusión filtro selector de onda en la cavidad.

Finalmente, se optó por no añadirlo. El conjunto circulador-filtro Bragg complicaba la cavidad láser y no mejoraba las características de los pulsos notablemente.

## Sección 4: Teoría Q-switching activo

Una vez conocida la idea, es necesario tener presentes algunos detalles fundamentales de la teoría del proceso y las aproximaciones que se han hecho, de este modo se tiene una base para discutir los resultados experimentales. Se presenta a continuación una descripción cuantitativa de la técnica Q-switching<sup>[1]</sup> así como la base de la simulación que se realiza a partir de las medidas experimentales.

Ecuaciones para la energía, potencia de pico y duración (aproximada) de lo que se ha denominado pico principal:

$$E_p = \frac{\alpha_c}{\alpha} E_0 (n_i - n_f) \quad (4.1)$$

$$P_p = \frac{\alpha_c}{\alpha} \frac{E_0}{\tau_c} \left[ n_i - n_p - n_p \ln \left( \frac{n_i}{n_p} \right) \right] \quad (4.2)$$

$$\Delta\tau_p = \frac{E_p}{P_p} \quad (4.3)$$

La anchura puede ser reescrita de la forma:

$$\Delta\tau_p = \tau_c \frac{\eta_E \frac{N_i}{N_p}}{\frac{N_i}{N_p} - \ln \left( \frac{N_i}{N_p} \right) - 1} \quad (4.4)$$

Siendo

- $\alpha$  las pérdidas totales por paso de la cavidad, con el conmutador abierto, incluyendo a las del acoplador. Definidas de manera logarítmica.
- $\alpha_c$  las que introduce el acoplador en la cavidad, por paso, también definidas de manera logarítmica<sup>1</sup>
- $E_0$  relacionado con la energía máxima acumulable en el medio activo. Depende de las características de este.
- $n_i$ ,  $n_f$  y  $n_p$  son las inversiones de poblaciones inicial (antes de emitir el pico principal), final (tras la emisión de este) y en el pico. Normalizadas respecto a la concentración de iones en la fibra dopada,  $N_T$ , i.e.  $N_i/N_T$ ,  $N_f/N_T$  y  $N_p/N_T$ .
- $\tau_c$  es el tiempo de vida media del fotón en la cavidad.
- $\eta_E$  da cuenta del aprovechamiento de la energía y se define:  $\eta_E = \frac{N_i - N_f}{N_i}$

La inversión de población que se alcanza previniendo la acción láser durante un tiempo  $t$  (mientras las aspas bloquean el haz), bombeando a potencia constante<sup>2</sup>:

$$N(t) = N_{MAX} \{1 - \exp[-t(W_p + 1/\tau)]\} \quad (4.5)$$

<sup>1</sup>En las ecuaciones, las pérdidas están definidas de manera logarítmica:  $-\ln(\alpha/100)$  donde  $\alpha$  es por ejemplo 20 %, el tanto por ciento de luz que queda en la cavidad tras una vuelta.

<sup>2</sup>Esta ecuación es válida cuando, tras la emisión del pulso más las oscilaciones, la inversión de población en el momento que se conmutan las pérdidas para volver a cargar, es despreciable frente a la se alcanzará tras un tiempo de carga  $t$ ,  $N_i$ .

Por tanto, si se mantiene Q bajo durante un tiempo de carga  $t_{car}$  y se conmuta repentinamente, la inversión de población inicial será:  $N_i = N(t_{car})$ .

Se tiene que

- $W_p$  y  $N_{MAX}$  ambos relacionados con la potencia de bombeo, crecen conforme aumenta esta.
- $\tau$  es la vida media del nivel superior de la transición láser, en este caso, unos 10 ms.

El límite inferior a la anchura de los pulsos viene dado por:

$$\Delta\tau_p \approx \tau_c = \frac{L_e}{\alpha c} \quad (4.6)$$

situación que se da si  $n_i \gg n_p$ .

- $L_e$  es la longitud efectiva de la cavidad (camino óptico).
- $c$  es la velocidad de la luz en el vacío.

Por último decir que  $n_p$ , o equivalentemente,  $N_p$  es proporcional a las pérdidas de la cavidad (cuando las aspas no bloquean el haz).

Sobre el tiempo de vida media del fotón en la cavidad, en este experimento se sitúa en torno a 80 nanosegundos. La conmutación de las pérdidas más rápida que se puede hacer es de  $20\tau_c$ , mientras que la teoría supone conmutación instantánea. Por eso, como se comentaba en el punto 2.2, se está en un caso de Q-switching lento y los pulsos serán más anchos.

#### 4.1 Presentación del modelo. Algoritmo

Partiendo de las ecuaciones para la energía, potencia y anchura temporal de los picos, 4.1, 4.2 y 4.3 respectivamente, operando, y tras definir convenientemente algunas cantidades, se encuentra que el modelo predice una dependencia lineal de las pérdidas que introduce el acoplador:

$$\alpha_c = \frac{L_e}{c} S - \alpha_0 \quad (4.7)$$

Con

- $\alpha_0$  las pérdidas internas de la cavidad, con el conmutador abierto, sin contar el acoplador.
- $S$ , que no tiene significado físico directo, depende de  $E_0$ , la energía y de la anchura temporal de los picos y del acoplo.

La idea de la simulación es, si se obtienen para una misma frecuencia de modulación y un bombeo<sup>3</sup>, datos de la potencia de pico y duraciones, para diferentes acoplos, se pueden calcular pares de puntos  $(\alpha_{cj}, S_j)$ , suponiendo un valor conocido para  $E_0$ .

---

<sup>3</sup>Una misma frecuencia de modulación y un mismo bombeo implican que  $n_i$  sea igual para todos los acoplos, mientras que el bombeo sea suficientemente alto. Estas condiciones no son difíciles de tener en la práctica, así se tiene un código más sencillo, con un único grado de libertad, el cambio del acoplador.

Entonces, solo falta conocer  $E_0$  para poder calcular S en función del acoplo y ver si el modelo concuerda con la experimentación.

El proceso<sup>4</sup> es el siguiente:

- Suponer un valor conocido para  $E_0$  y calcular los pares de puntos  $(\alpha_{cj}, S_j)$ , a partir de las medidas experimentales.
- Ajustarlos a una recta, obtener pendiente y ordenada. Estos datos permiten calcular las potencias de pico y anchuras que tendrían los picos con el valor de  $E_0$  supuesto.
- Determinar el valor de una función de mérito (FDM) definida, que contemple las diferencias entre las potencias de pico y anchuras experimentales y las calculadas.
- Encontrar el valor de  $E_0$  que minimice FDM.

Los tres primeros puntos anteriores los lleva a cabo una función que se encuentra en el seno de un algoritmo de optimización, encargado de ir variando  $E_0$  convenientemente hasta dar con la solución que mejor ajuste. El algoritmo que se utiliza se denomina Simulated Annealing. Resaltar que es preciso indicarle al algoritmo un valor inicial de  $E_0$  a partir del cual empieza a buscar la solución.

Este modelo permite calcular la longitud efectiva y  $\alpha_0$ . Sin embargo, lo más interesante es que permite observar hasta qué punto se ajusta bien el comportamiento del láser pulsado con la teoría, sin más que observar cómo se ajustan los datos a una línea recta, predice asimismo el acoplo óptimo, para potencia de pico, anchura o energía.

## 4.2 Magnitud S

En caso de que sea de interés para el lector, se define a continuación la magnitud S, aunque no es necesario conocerla para entender el trabajo.

Definiendo previamente Z:

$$Z = \frac{E_p \sigma_e l N_T}{\alpha_c E_0} \quad (4.8)$$

S se define como:

$$S = \frac{1}{\Delta \tau_p} \frac{Z}{\frac{Z}{1-e^{-Z}} - 1 - \ln\left(\frac{Z}{1-e^{-Z}}\right)} \quad (4.9)$$

- $\sigma_e$  es la sección eficaz de emisión de los iones de erbio.
- $l$  es la longitud del medio activo, es decir, la longitud de la fibra dopada con erbio.

---

<sup>4</sup>Se omiten una cantidad matices, pasos de cálculos intermedios así como definiciones de puro sentido matemático para no sobrecargar el modelo.

## Sección 5: Estudio experimental de la técnica

La parte experimental de este trabajo se puede dividir en dos: la preparación del montaje, y la segunda parte, consistente en la toma de medidas con su correspondiente discusión.

### 5.1 Calibración detector

Como paso previo a la medida de los parámetros del pico principal, se realiza una calibración del detector que permitirá determinar valores de potencia.

La salida del detector, llevada a un osciloscopio, proporciona una lectura de voltaje en relación a la potencia instantánea que le llega. La idea es, trabajando con el láser en CW, realizar una asignación de las lecturas de voltaje del detector con las de potencia de un medidor de potencia.

Para ello, se lleva a cabo el siguiente montaje, fig. 5.1:

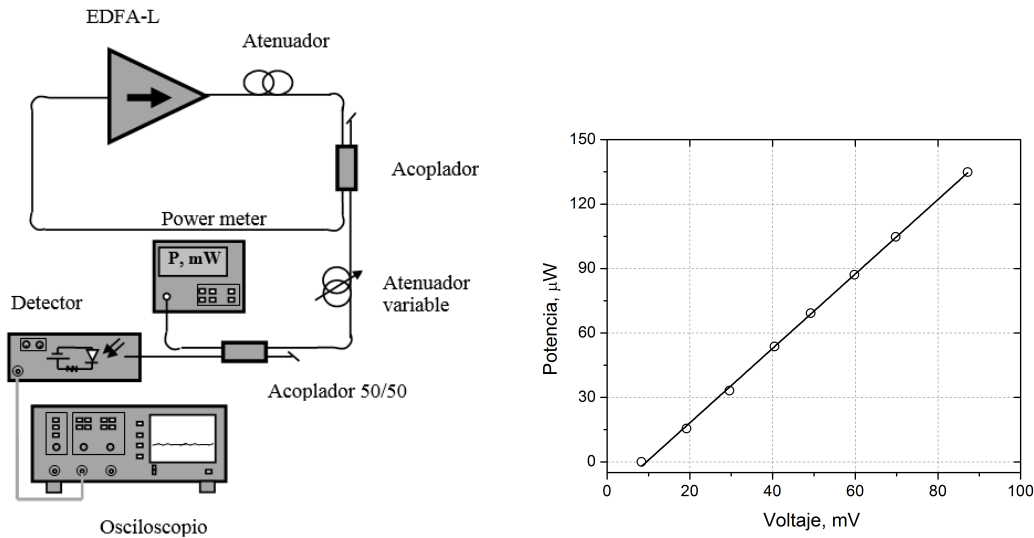


Figura 5.1: Montaje utilizado para la calibración del detector.

Si se coloca un acoplador 50/50, llega la misma potencia a ambos aparatos, de este modo, a cada voltaje medido en el osciloscopio se le asigna directamente el valor que mide el detector de potencia.

### 5.2 Montaje final

En la configuración del montaje final, son 3 las variables que se pueden cambiar para ver la evolución de los pulsos, como se muestra en la imagen 3.1.

- Frecuencia de modulación del chopper. Por una parte, una mayor velocidad de las aspas



del chopper produce un corte más rápido, pero también un tiempo de carga menor<sup>1</sup>.

Las frecuencias de modulación que se utilizan son: 100, 150, 200 y 250 Hz. Los valores numéricos de tiempo de carga y de tiempo de corte del haz para una frecuencia de modulación vienen dados en la tabla 2.1.

- Potencia de bombeo (Intensidad de alimentación del segundo láser de bombeo). A mayor bombeo, más estrechos y altos son los picos. Se estudia la evolución de estos con la potencia que se suministra. En un intervalo de 1300 a 1700 mA aprox.
- Relación de acoplo X/Y entre la cavidad y salida del láser, las relaciones de acoplo que se estudian son: 30, 40, 50, 60 y 70 % a la cavidad.

### 5.3 Series de medidas. Discusión

Se realizan series de medidas variando los parámetros anteriormente comentados. El proceso de medida es el siguiente:

Se fija un valor para el acoplo, frecuencia de modulación e intensidad de bombeo, se captura la traza en el osciloscopio del detalle del pulso, como en la figura 2.1 y posteriormente, de dicha traza se obtiene la altura, la anchura o la energía del pico principal.

#### 5.3.1. Influencia de la frecuencia de modulación

En primer lugar tener presente que 250 Hz, es la mayor frecuencia de modulación disponible y que, por debajo de los 100 Hz, el comportamiento del láser se va pareciendo progresivamente a CW.

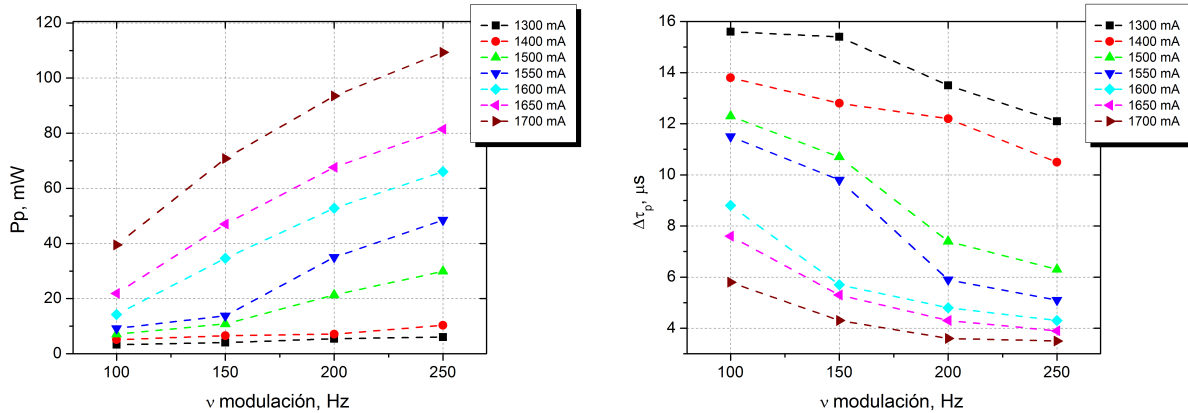


Figura 5.2: Anchura del pico principal a mitad de altura ( $\Delta\tau_p$ ) y potencia de pico del pico principal ( $P_p$ ) en función de la frecuencia de modulación del chopper para diferentes bombeos y para un acoplador del 50/50.

<sup>1</sup>Hacer énfasis en que no se puede variar el tiempo de carga (aspas bloqueando al haz) y el de corte (aspas cortando al haz) independientemente.

Los resultados de la evolución de potencia de pico y anchura a media altura del pico principal en función de la frecuencia de modulación se muestran en la imagen 5.2.

A la vista de los resultados, se elige como frecuencia de modulación 250 Hz para seguir con el estudio de los demás parámetros. Los mejores valores de potencias de pico y anchuras se obtienen con esta frecuencia de modulación todos los bombeos.

Para discutir las medidas de la manera más clara posible hay que tener en cuenta los siguientes hechos:

- La inversión de población evoluciona durante el tiempo de carga según la ecuación 4.5. Se muestra dicha evolución para dos bombeos diferentes (fig. 5.3):

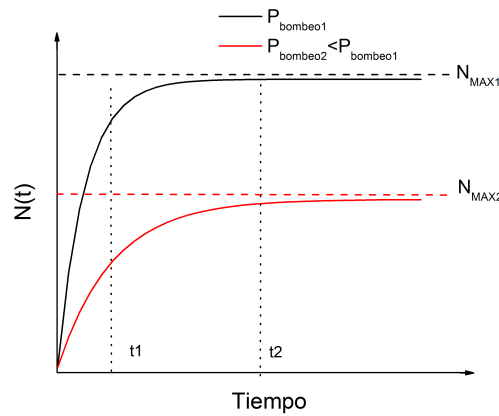


Figura 5.3: Evolución de la inversión de población en función del tiempo de carga para dos bombeos diferentes. A partir de  $t = 0$ , se activan las pérdidas altas y el láser deja de funcionar. Suponiendo  $N(0) = 0$  se comienza a almacenar energía en forma de inversión de población, en el momento en que se conmute,  $t$  se tendrá que  $N_i = N(t)$ .

- $P_{bombero}$  relacionada con  $W_p$  y, a mayor la primera, mayor la segunda.
- El tiempo de carga y el de corte compiten, dominando uno u otro según el bombeo. Para conseguir un pico estrecho y potente se necesita  $N_i$  cuanto mayor mejor. Entonces, según la ec. 4.5, se traduce en un tiempo de carga  $t$  lo mayor posible, es decir, frecuencia de modulación lo más baja que se pueda. Sin embargo, cuanto menor es la frecuencia de modulación, más lento es el corte, y el pico principal va acompañándolo y empeora.
- Notar en la fig. 5.3: a medida que aumenta el bombeo, la condición de saturación,  $N(t)$  prácticamente  $N_{MAX}$ , a partir de la cual ya no tiene sentido seguir cargando, se produce antes.

Experimentalmente se obtiene que hay una mejora de la altura y anchura, si bien esta mejora cada vez es menor conforme se aumenta la frecuencia de modulación (disminuye el tiempo de carga), dicha mejora de los parámetros explica del siguiente modo:

Si  $W_p$  (o equivalentemente bombeo) es suficientemente alta para los tiempos de carga que se dan ( $\sim 1$  ms), se está en una zona de  $t > t_2$  (fig. 5.3) esto indica que la inversión de población inicial  $N_i$  es prácticamente independiente de la frecuencia de modulación.

Así, mientras se trabaje con frecuencias de modulación que den tiempos de carga hasta  $t_2$  aprox., la inversión inicial será la misma. Es entonces el tiempo de corte el que limita la extensión temporal y potencia de pico<sup>2</sup>, de este modo, conforme se mejora el corte, se mejoran también los parámetros.

El hecho de que cada vez se mejore menos refleja que experimentalmente se está en una zona de  $t \lesssim t_2$ . Si se carga menos tiempo que  $t_2$  (ver fig. 5.3 para  $P_{bombeo2}$ ), la inversión de población inicial ya no es máxima y se empiezan a equilibrar tiempo de corte con tiempo de carga.

Habría sido interesante poder estudiar un intervalo con frecuencias de modulación mayor, para ver si, tal y como parece, las curvas tienden a ser horizontales (al menos un tramo), donde el tiempo de corte y el de carga estarían totalmente equilibrados.<sup>3</sup>

Sobre la evolución en función del bombeo: por ejemplo, prestando atención al más alto y bajo (1700 mA y 1300 mA), la mejora para la anchura de uno y otro es, 66 % y 30 %<sup>4</sup> respectivamente, entre 100 y 250 Hz. Y para las potencias del pico principal: 64 % y 46 %.

Esto se explica de la siguiente manera: para un bombeo bajo el tiempo de carga con el de corte empiezan a estar reñidos para frecuencias de modulación más bajas comparados con un bombeo alto (ver en fig. 5.3 que para  $t < t_2$  para el bombeo 2 la inversión inicial empieza a decrecer mientras que para el bombeo 1 todavía se puede bajar algo más de  $t_2$ ). Entonces, la mejora es menor que si el bombeo es alto, al influir la  $N_i$ , que no es todo lo alta que podría ser.

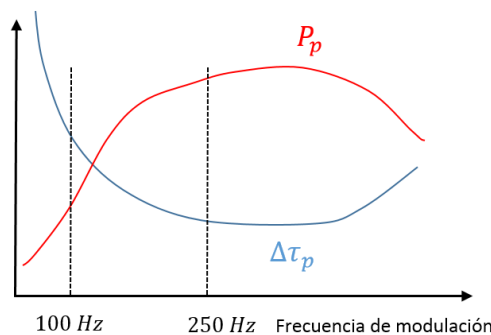


Figura 5.4: Evolución cualitativa de la anchura del pico principal y potencia de pico en función de la frecuencia de modulación en el supuesto que se pudiera barrer desde  $(0, \infty)$ , para un bombeo y acoplo fijos.

<sup>2</sup>Un corte lento implica el ensanchamiento del pico principal y, además, al distribuirse la energía en un intervalo temporal mayor, disminuye la potencia de pico.

<sup>3</sup>Lo que se mejorara por una parte haciendo un corte más rápido, se perdería por otra ya que se cargaría durante menos tiempo y no se alcanzaría entonces la máxima  $N_i$ , se entraría en la zona entre  $t_2$  y  $t_1$ , fig. 5.3.

<sup>4</sup>Una mejora del 100 % supone que la anchura del pulso se reduzca a la mitad.

La imagen 5.4 ilustra cualitativamente la evolución de la técnica si se pudiese tener un intervalo de frecuencias de modulación infinito. Las líneas verticales punteadas indican la zona que se ha barrido experimentalmente.

Con un bombeo fijo, por ejemplo  $P_{bombeo1}$  en fig 5.3. Al principio se tendría pulsos anchos y de poca potencia de pico debido a que el corte sería muy lento, a pesar de tener  $N_i$  máxima (tiempos de carga mayores que  $t_2$  según fig. 5.3).

Conforme se aumentase la frecuencia de modulación y hasta que  $N_i$  fuera aproximadamente máxima (hasta  $t_2$ ), se tendría mejora de ambos parámetros, más o menos hasta la línea vertical de 100 Hz. A partir de ahí, tiempo de corte y carga competirían y se mejoraría cada vez menos (tiempos de carga entre  $t_2$  y  $t_1$ ).

Finalmente se llegaría a una frecuencia de modulación muy alta con tiempo de carga  $t < t_1$  donde, a pesar de tener un corte bueno,  $N_i$  sería pequeña y la técnica volvería a empeorar.

### 5.3.2. Evolución de la potencia del pico principal anchura a media altura en función de la potencia de bombeo

Una vez fijada la frecuencia de modulación, se pasa a estudiar el comportamiento del sistema para las otras dos variables, que son: potencia de bombeo y relación de acoplo.

Para ilustrar, se presenta la evolución de los pulsos en función del bombeo para una modulación y acoplo dados, fig. 5.5:

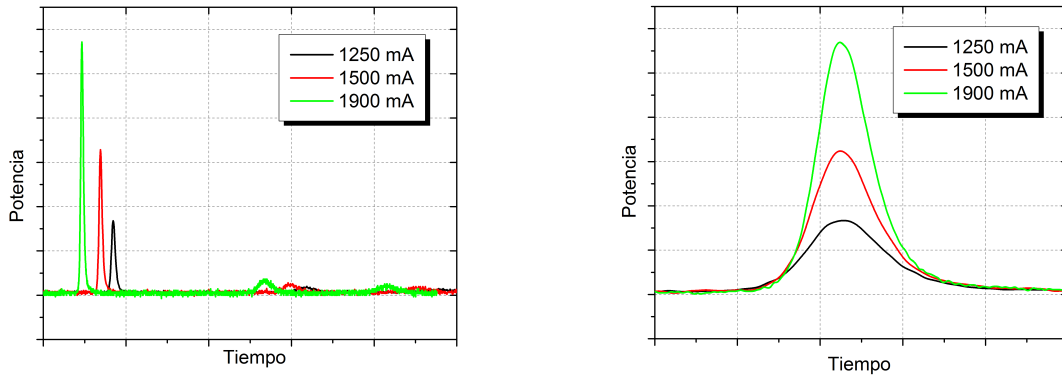


Figura 5.5: Ejemplo de evolución de (izquierda) los pulsos, (derecha) el pico principal, para un mismo acoplo y frecuencia de modulación. Los orígenes de tiempo se han ajustado en ambos casos para que se observe mejor la evolución.

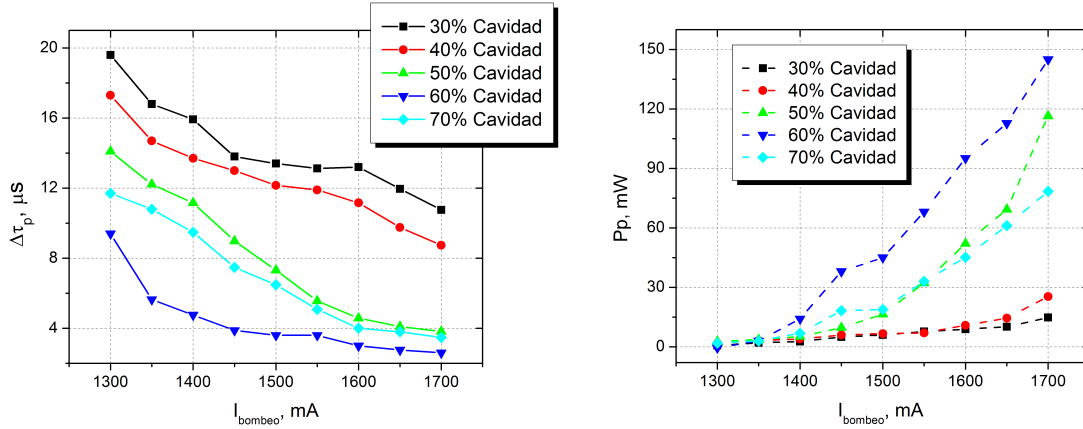


Figura 5.6: Anchura del pico principal a mitad de altura ( $\Delta\tau_p$ ) y potencia de pico del pico principal ( $P_p$ ) en función de la intensidad de bombeo para diferentes acoplos.

Los resultados de la evolución de potencia de pico y anchura a media altura del pico principal en función de la potencia de bombeo, para una frecuencia de modulación fija y para diferentes relaciones de acoplo se muestran en la imagen 5.6.

Notar en primer lugar que, tanto la anchura a media altura como la potencia de pico del pico principal, son óptimos para el acoplo del 60 % a la cavidad, y empeoran para el 50 % y 70 %, lo que indica que en esta zona hay un óptimo, como se verá en la simulación.

En el contexto de que el bombeo es suficientemente alto (comparado con el tiempo de carga) se han podido explicar las dependencias anteriores. Ahora, para un tiempo de carga fijo, la suposición de bombeo alto, de tal modo que  $N_i \gg N_p$  también explica aproximadamente las dependencias siguientes. Bajo esta suposición se puede llegar a que:

$$P_p = K_1 [x - 1 - \ln x] \quad (5.1)$$

$$\Delta\tau_p = K_2 \left[ \frac{x}{x - 1 - \ln x} \right] \quad (5.2)$$

siendo  $x = N_i/N_p = n_i/n_p$ .  $K_1$  y  $K_2$  constantes que dependen, entre otros factores, de las pérdidas que introduce el acoplador. Teniendo en cuenta que  $N_i$  es proporcional a la potencia de bombeo, se pueden representar las funciones anteriores, tomando  $K_1 = K_2 = 1$  y ver que, efectivamente, la teoría predice de forma aproximada el comportamiento experimental, para todos los acopladores (fig. 5.7).

Resaltar el hecho de que, a pesar de que la teoría supone conmutación instantánea (en la práctica sería aceptable  $0.1 \tau_c$ ) y en este caso se tiene un tiempo de conmutación de  $20 \tau_c$ , las predicciones concuerdan aceptablemente con el comportamiento experimental.

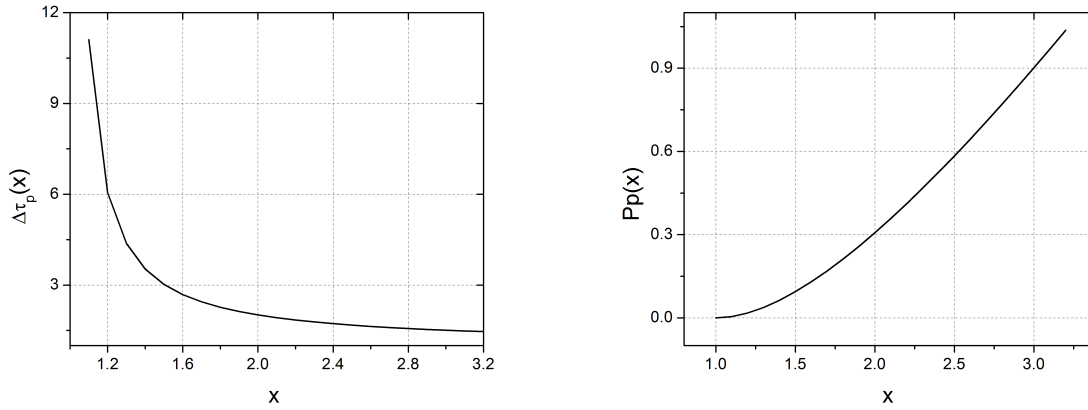


Figura 5.7: Forma funcional de la anchura y potencia de pico del pico principal.

La influencia de los resultados según el acoplo se analiza en la siguiente sección, ‘simulación’.

### 5.3.3. Otros parámetros

Hasta ahora solamente se han considerado la altura del pico principal y la anchura a media altura como parámetros para caracterizar los picos, sin embargo, también es de interés la energía del pico principal. Esta se obtiene mediante integración numérica de la traza capturada en el osciloscopio.

Para un acoplador de 70 % a la cavidad y  $\nu$  modulación 250 Hz se obtiene (fig. 5.8):

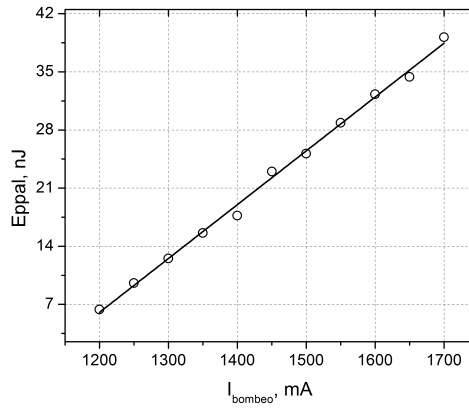


Figura 5.8: Energía del pico principal, en función de la intensidad de bombeo para un acoplo del 70 % a la cavidad y una frecuencia de modulación de 250 Hz.

La serie de datos experimentales de la fig. 5.8,  $E_{ppal}$ , que lleva un comportamiento lineal, tiene la siguiente explicación: cuando la técnica está optimizada (los pulsos más potentes), la inversión de población final es despreciable frente a la inicial, así en la ecuación 4.1, queda

$E_p$ , proporcional a  $n_i$  y proporcional entonces a la potencia de bombeo.<sup>5</sup>

### 5.4 Otros resultados

De cara a una posible aplicación práctica del láser, se retira el atenuador intracavidad y se estudian los picos en función del bombeo para 250 Hz como frecuencia de modulación y acoplador del 70 % a la cavidad. Quitarlo mejora los picos aunque se corre el riesgo de ruptura de conectores por demasiada potencia, sin embargo, como las medidas ya están tomadas no se pierde nada por medir lo máximo que el sistema podría dar de sí.

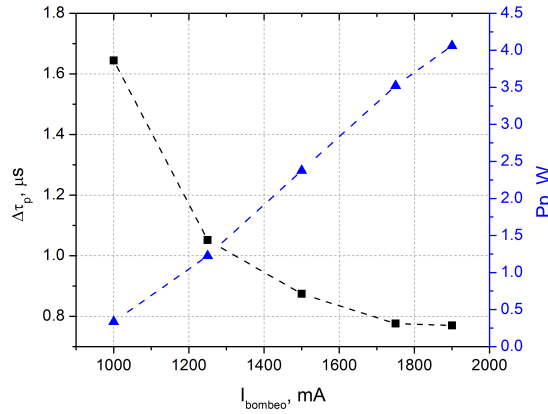


Figura 5.9: Evolución de la potencia de pico y anchura a media altura del pico principal para  $\nu$  modulación de 250 Hz y acoplo del 70 % a la cavidad.

Con respecto a la potencia, se observa el comportamiento lineal incluso para los bombeos más bajos. Esto se debe a que, al retirar el atenuador, la condición  $n_i \gg n_p$ , responsable del comportamiento lineal, ocurre antes.<sup>6</sup>

A partir de un bombeo dado, póngase 1300 mA y hasta 1900 mA, la anchura del pico principal mejora en un 35 %, mientras que cuando se trabaja con el atenuador, para la misma relación de acoplo, entre 1300 y 1700 mA, se mejora aproximadamente el doble (100 %), de 5  $\mu\text{s}$  pasa a 2.5  $\mu\text{s}$ .

Esto indica que para el primer caso se está en una zona de  $x$  alta ( $2.0 < x < 2.8$  aprox.) y la otra de  $x$  baja ( $1.4 < x < 2.2$  aprox.) consecuencia también de que se han disminuido las pérdidas al retirar el atenuador intracavidad (ver nota 6).

Atención al cambio en orden de magnitud de la potencia de pico principal (mW a W), y la mejora de las anchuras al retirar el atenuador, el mejor pico presenta 4 W y 800 ns.

<sup>5</sup>Si se sube el bombeo a un valor exageradamente alto, la inversión de población inicial deja de ser proporcional al bombeo, como hasta ahora se ha supuesto. Intuitivamente, una vez se han subido todos los átomos desde el nivel de bombeo al superior ya no se puede incrementar la inversión de población aunque se aumente el bombeo. El comportamiento anterior dejará de ser lineal para acercarse asintóticamente a un valor  $E_{pMAX}$ .

<sup>6</sup>Recordar  $x = N_i/N_p$ . Para un mismo bombeo, si aumenta  $N_p$  (se aumentan las pérdidas), el valor de  $x$  disminuye y el resultado es desplazarse hacia la zona de la izquierda de las gráficas 5.8. Si por el contrario las pérdidas se bajan,  $N_p$  disminuye y se tienen valores de  $x$  más altos.

## Sección 6: Simulación

Una vez se ha hecho el estudio experimental, se pasa a comparar el comportamiento pulsado del láser con el modelo teórico<sup>[1]</sup> introducido en la sección 4. Hay que recordar que este modelo, a partir de los datos experimentales, predice una dependencia de tipo lineal de la magnitud  $S$  en función de las pérdidas que introduce el acoplador en la cavidad,  $\alpha_c$ . Permite también calcular la anchura y potencia que tendrían los picos para una relación de acoplo arbitraria.

### 6.1 Resultados

Se estudian los datos correspondientes a un bombeo de 1650 mA y de 1700 mA. Con frecuencia de modulación de 250 Hz.

Sobre la dependencia lineal:

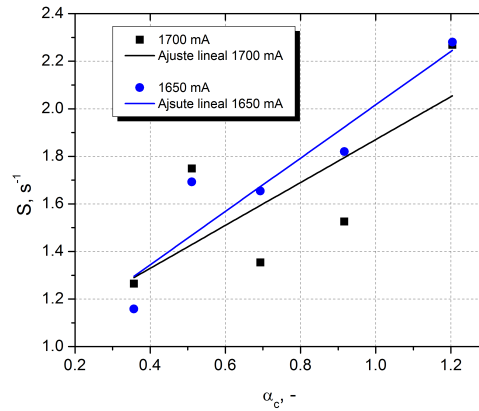


Figura 6.1:  $S$  en función de  $\alpha_c$ , a partir del ajuste con los datos experimentales, para las condiciones de bombeo y modulación arriba mencionadas.

Los valores de la pendiente y ordenada ajustados (recordar ecuación 4.7):

Parámetro	Real aproximado	Ajustado 1700 mA	Error 1700 mA	Ajustado 1650 mA	Error 1650 mA
$\alpha_0, -$	3.68	0.289	91 %	0.604	83 %
$L_e, m$	60	234	290 %	188	214 %

Tabla 6.1: Pérdidas de la cavidad sin contar el acoplador,  $\alpha_0$  y longitud efectiva calculadas con el modelo a partir de la experimentación y comparación con valores conocidos aproximados.

El ajuste a una recta de los puntos experimentales es más bien escaso (fig. 6.1). Esto se debe a que la conmutación es lenta, de alrededor de  $20\tau_c$ , mientras la teoría supone que es instantánea, como ya se ha comentado varias veces. Al ser el límite inferior a la anchura de los pulsos de  $\tau_c$ , se considera aceptable un tiempo de conmutación de  $0.1\tau_c$ . En este caso, se tiene que la suposición de la teoría es totalmente inadecuada.



Así y todo el algoritmo logra ajustar los datos experimentales: la influencia del tiempo de corte viene implícita en la longitud efectiva de la cavidad y las pérdidas de esta. Recordando que la anchura de los picos es proporcional a  $\tau_c$  (ec. 4.4), el algoritmo predice un tiempo  $\tau_{ceff} > \tau_c$ , de este modo, se logra encajar que los pulsos sean más anchos.

$$\tau_{ceff} = \frac{L_{eff}}{\alpha_{eff}C} \quad (6.1)$$

Para que  $\tau_{ceff}$  sea mayor, se tiene una longitud de la cavidad mayor y pérdidas menores. Como se puede estimar con cierta precisión estas dos magnitudes, en la tabla 6.1 aparecen tanto las ‘reales’ como las calculadas por el modelo. Ver que las pérdidas son menores y la longitud de la cavidad es mayor.

Por otra parte, la influencia del corte no es la misma para todos los acopladores. En función del acoplo y para el mismo bombeo y modulación, las anchuras de los picos varían (fig. 6.2 derecha). Por ejemplo, si se tiene un pico que, en caso de tener conmutación instantánea, su anchura sería de 10 veces el tiempo de corte del haz. Y otro que fuera 10 veces menos, es obvio que el tiempo de corte no va a afectar igual a los dos picos.

De este modo, los datos no se dispersan por igual respecto de la predicción del modelo, y el comportamiento del sistema se aleja de la linealidad.

### Sobre el acoplo óptimo:

Se calculan con el modelo anchuras y potencias de pico para un acoplo cualquiera:

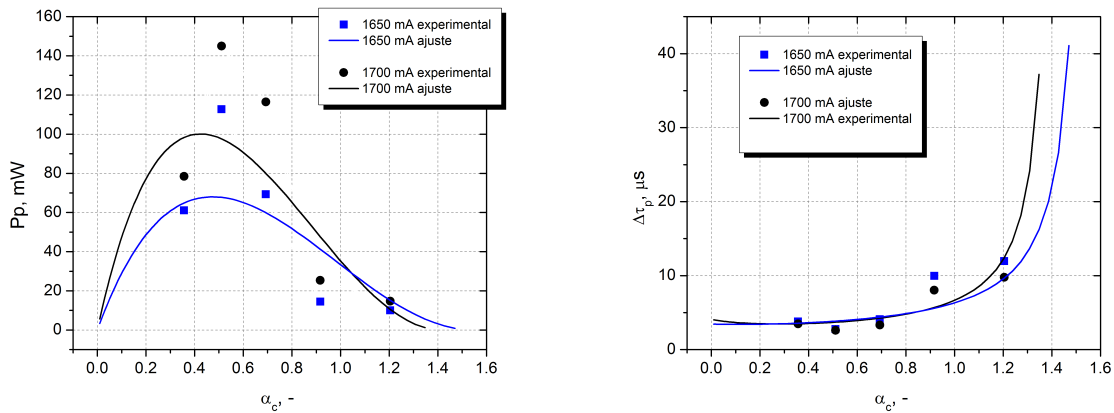


Figura 6.2: Anchuras y potencias de los picos predichos por el modelo y ajustados por el algoritmo para los datos de prueba.

Las discrepancias con los valores calculados por el modelo (fig. 6.2) se deben a: (1) la influencia del tiempo de corte no afecta por igual a todos los acopladores y (2) dispersión en las medidas, mencionado en los comentarios finales. A pesar de esta discrepancia, el modelo predice un valor de acoplo óptimo cercano al que se tendría experimentalmente (en torno al 60 % a la cavidad).

## Sección 7: Conclusiones y comentarios finales

### 7.1 Comentarios

Se ha dedicado una parte de la memoria a la explicación de la teoría o los elementos del experimento, en detrimento de un análisis más exhaustivo de los resultados, en particular, los referidos a la simulación.

Si bien utilizar un chopper como conmutador da pie a una discusión muy interesante de los resultados experimentales en función de la frecuencia de modulación, no permite un ajuste bueno de los datos con la simulación. Puesto que el corte no es suficientemente rápido.

Así, este trabajo podría continuarse incluyendo en la simulación los efectos del corte lento en la teoría. Asimismo, también podría continuarse realizando el mismo estudio con una conmutación más rápida.

Cuando se habla del sistema de chopper más lentos, en el punto 3.1, se comenta de pasada que la focalización del haz es débil. Sería conveniente adaptar el diámetro del haz al de la lente plano convexa, se tendría mejor focalización y en última instancia se conseguiría un corte mejor.

La aproximación que se hace en 4.5 supone despreciar la inversión de población en el medio activo en el momento en el que se comienza a cargar, en el caso que se ha estudiado tiene un valor en torno a  $N_p$ , es decir, se supone que  $N_i \gg N_p$ .

Es difícil conocer  $N_i$  de forma precisa, por lo que esta aproximación se hace a priori y más tarde se comprueba que la fenomenología puede explicarse utilizando dicha aproximación. Si las medidas experimentales no hubiesen estado de acuerdo con las predicciones de la teoría, se hubiera tenido que incluir el efecto de  $N_p$  en la discusión de los resultados.

Aunque no se ha hablado nada a lo largo del trabajo, las medidas experimentales presentan cierta incertidumbre, que se traduce en dispersión entre medidas. Por ejemplo, el ruido del detector que influye sobre todo para los bombeos más bajos. Lo más crítico es que el voltaje de offset del detector no es estable, i. e. tras medir una serie de datos este pasa de por ejemplo -1 mV a 7 mV. Por este motivo, siendo rigurosos habría que hacer una calibración inicial y final del detector y descartar las medidas en caso de que pendiente u ordenada hubieran cambiado un cierto valor umbral. Además, la velocidad de giro del chopper no es totalmente estable ( $\pm 10\%$ ) que influye de manera directa sobre la anchura a media altura y potencia de pico.

### 7.2 Conclusiones

Se ha demostrado experimentalmente cómo puede hacerse un láser pulsado mediante Q-switching de manera sencilla y visual empleando un chopper. En particular, se han mostrado

las peculiaridades de hacerlo con fibra óptica.

Se han obtenido y explicado resultados experimentales que ilustran cómo varía la anchura a media altura, potencia de pico y energía del pico principal en función de los parámetros más interesantes.

Además, se ha desarrollado un método de ajuste a partir de un modelo teórico sencillo (sección 6, simulación). Aunque en este caso hay ciertas discrepancias entre los datos experimentales y las predicciones de la simulación, la importancia estriba en el hecho de que este método es válido para cualquier láser pulsado mediante Q-switching.

Se espera obtener resultados más acordes con los datos de laboratorio a medida que se reduzca el tiempo de corte.

Por último algunas conclusiones de carácter personal:

En primer lugar destacar el aprendizaje, no solo los conocimientos sobre esta técnica, si no también la adquisición de soltura en el laboratorio a la hora de resolver problemas experimentales reales, a los que hasta ahora no me había tenido que enfrentar.

Por otra parte, una impresión personal que me llevo y de la que estoy satisfecho es que, dadas las características de este trabajo, he podido explorar el método científico con mayor generalidad respecto de otros trabajos que hubieran sido de una carga, o bien totalmente experimental, o bien totalmente teórica.

Asimismo, quiero aprovechar las últimas líneas de este trabajo para agradecer a todas aquellas personas que han influido, de un modo u otro, en el desarrollo positivo de esta tarea, por citar, mi madre, mi tutor y mi familia y amigos.

## Bibliografía

- [1] ORAZIO SVELTO, *Principles Of Lasers*, cuarta edición, Plenum publishers, Nueva York, 1998.
- [2] P. J. M. VAN LAARHOVEN y E. H. L. AARTS, *Simulated Annealing: Theory and Applications*, edición de 1992, Holanda, 1987.
- [3] SILFVAST, W. T., *Laser Fundamentals* pp. 439-450, segunda edición, Cambridge University Press, 2004.
- [4] Q-SWITCHING [en línea], consultado: 7 de mayo de 2015. Disponible en: <http://en.wikipedia.org/wiki/Q-switching>
- [5] INFORMACIÓN SOBRE EL DETECTOR [en línea], consultado: 10 de mayo de 2015. Disponible en: [http://www.artisanng.com/TestMeasurement/60806-5/JDSU\\_BCP\\_310\\_High\\_Gain\\_Wideband\\_O\\_E\\_Converter](http://www.artisanng.com/TestMeasurement/60806-5/JDSU_BCP_310_High_Gain_Wideband_O_E_Converter)