

**UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS DE GRAN CANARIA**

**ESCUELA DE INGENIERÍA DE  
TELECOMUNICACIÓN Y ELECTRÓNICA**



**PROYECTO FIN DE CARRERA**

**ESTUDIO DE LA INFLUENCIA TÉRMICA EN LAS  
MEDIDAS DE LA GANANCIA ÓPTICA MODAL**

**Presidente:**

**Secretario:**

**Vocal:**

**Tutores:**

**Autor:**

**NOTA :** .....

**TITULACIÓN :** Ingeniería Electrónica

**TUTOR/ES :** Bauke W. Tilma (TUE, Netherlands)

Erwin A.J.M. Bente (TUE, Netherlands)

Francisco J. Del Pino (ULPGC, Spain)

Sunil Lalchand K (ULPGC, Spain)

**AUTOR :** Sergio Rosino Rincón

**FECHA :** Marzo de 2012



**UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS DE GRAN CANARIA**

**ESCUELA DE INGENIERÍA DE  
TELECOMUNICACIÓN Y ELECTRÓNICA**



**PROYECTO FIN DE CARRERA**

**ESTUDIO DE LA INFLUENCIA TÉRMICA EN LAS  
MEDIDAS DE LA GANANCIA ÓPTICA MODAL**

**TITULACIÓN : Ingeniería Electrónica**

**TUTOR/ES : Bauke W. Tilma (TUE, Netherlands)**  
**Erwin A.J.M. Bente (TUE, Netherlands)**  
**Francisco J. Del Pino (ULPGC, Spain)**  
**Sunil Lalchand K (ULPGC, Spain)**

**AUTOR : Sergio Rosino Rincón**

**FECHA : Marzo de 2012**



# **ESTUDIO DE LA INFLUENCIA TÉRMICA EN LAS MEDIDAS DE LA GANANCIA ÓPTICA MODAL**

*Dedicado a mis padres, Juan Antonio y María Luisa, a mis hermanas Elena y Raquel, y a mi novia Matilde como agradecimiento por su infinita paciencia.*



# Índice

<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	1
1.1 Objetivos	8
1.2 Estructura de la Memoria	8
1.3 Peticionario	9
<b>2. TEORIA</b>	11
2.1 Láser	11
2.1.1 Principios de Funcionamiento del Láser	12
2.1.2 Tipos de Láser	13
2.1.2.1 Láser Semiconductor de Puntos Quánticos	13
2.1.2.2 Láser Semiconductor Multisección	15
2.2 Emisión Estimulada Amplificada	16
2.3 Relación entre la Ganancia y la Temperatura Real en el Chip	17
2.4 Técnicas de Medida de la Ganancia Óptica Modal	21
2.4.1 Hakki-Paoli	22
2.4.1.1 Descripción	22
2.4.1.2 Ventajas y Problemas	22
2.4.2 Henry	23
2.4.2.1 Descripción	23
2.4.2.2 Ventajas y Problemas	24
2.4.3 Thomson	24
2.4.3.1 Descripción	24
2.4.3.2 Ventajas y Problemas	26
2.5 Modificación de la Técnica de Thomson	27
2.5.1 Descripción	27
2.6 Limitaciones (Área de Trabajo)	27
2.7 Resumen	30
<b>3. FABRICACIÓN DEL CHIP</b>	30

<b>4. TOMA DE MEDIDAS</b>	37
<b>4.1 SETUP I - Densidad de Corriente Continua</b>	38
4.1.1 Descripción	38
4.1.2 Sistemas	40
4.1.2.1 Control de Temperatura	40
4.1.2.2 Alimentación	42
4.1.2.3 Alineamiento	43
4.1.2.4 Medida	44
<b>4.2 SETUP II - Densidad de Corriente Pulsada</b>	45
4.2.1 Descripción	45
4.2.2 Sistemas	47
4.2.2.1 Alimentación	47
4.2.2.2 Medida	48
<b>4.3 Set de Medidas de las ASE</b>	49
<b>4.4 Problemas Encontrados</b>	50
4.4.1 Forma de las Medidas de la ASE	50
4.4.2 Precisión en las Medidas	51
4.4.3 Adecuación de la Distribución de Potencia	52
4.4.4 Limitaciones Térmicas	52
4.4.5 Vibraciones	52
4.4.6 Área de Contacto	53
<b>5. PROCESADO DE DATOS</b>	55
<b>5.1 Ficheros de Medidas de las ASE</b>	55
<b>5.2 Algoritmo de Ajuste</b>	57
<b>5.3 Resultados de las Ganancias Ópticas Modales</b>	58
5.3.1 Densidad de Corriente Inyectada con un Ciclo de Trabajo del 100% (Setup I)	59
5.3.2 Densidad de Corriente Inyectada con un Ciclo de Trabajo del 1% (Setup II)	60
<b>5.4 Área de Trabajo</b>	61
5.4.1 Densidad de Corriente Inyectada con un Ciclo de Trabajo del 100% (Setup I)	62
5.4.2 Densidad de Corriente Inyectada con un Ciclo de Trabajo del 1% (Setup II)	63
<b>5.5 Distancias</b>	64
5.5.1 Correlación Cruzada	64
5.5.2 Distancia de Euclides	64

5.5.3 Distancia de Mahalanobis	65
<b>5.6 Variación Térmica</b>	<b>65</b>
5.6.1 Análisis de los Resultados Obtenidos	70
<b>6. CONCLUSIONES</b>	<b>71</b>
6.1 Continuidad de este Trabajo	72
<b>PRESUPUESTOS</b>	<b>77</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>87</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>93</b>
ANEXO.A: Código Software	93
ANEXO.B: Ganancias Ópticas Modales	102
ANEXO.C: Final Thesis Summary	116



---

## INTRODUCCIÓN

Un láser modulable es un láser cuya longitud de onda de trabajo puede ser alterada de manera controlada. Hay muchos tipos y categorías de láseres modulables. Existen en estado sólido, líquido y gaseoso. Atendiendo al desplazamiento de la longitud de onda central, podemos clasificar los láseres en tres grandes grupos.

- Modulación en múltiples bandas (seleccionan entre diferentes longitudes de onda) [1].
  - Argon-ion lasers.
  - CO:He, CO:N<sub>2</sub>, and CO:O<sub>2</sub> lasers.
- Láser de modulación continua de banda estrecha (<10nm rango) [2].
  - Distributed Feedback (DFB).
  - Distributed Bragg reflector (DBR).
  - MEMS based external cavity lasers.
- Láser de modulación continua de banda ancha (>10nm rango) [3].
  - SG-DBR lasers.
  - DFB laser arrays.
  - DBRs on steroids.

Los láseres que pueden realizar escáner en longitud de onda sobre un banda ancha son herramientas muy útiles para un sinfín de aplicaciones. Dentro del campo de las comunicaciones ópticas, los láseres modulables son comúnmente usados para realizar el ajuste de la longitud de onda de la señal en los sistemas basados en multiplexación por división en longitudes de onda densas (DWDM), y se espera que en un futuro cercano los láseres modulables nos introduzcan en una nueva era en el ámbito de las redes de trabajo ópticas. Por otro lado, el desarrollo de láseres modulables ha sido especialmente útil en el ámbito de los análisis ópticos, tales como la espectroscopia, la detección de gases y la tomografía óptica coherente en el dominio de la frecuencia (FDOCT), los cuales han tenido un efecto positivo sobre otros muchos y diferentes campos, pudiéndose destacar las aplicaciones biofotónicas. La ventaja inherente de utilizar señales ópticas en el estudio del ser humano es el hecho de que la radiación óptica es inocua para la salud humana.

Tradicionalmente, los sistemas láser de modulación continua de banda ancha ( $>10\text{nm}$  rango) son sistemas láseres de estado sólido “bulk” que realizan un escaneado opto-mecánico u opto-acústico. Dichos sistemas tienen sin embargo una velocidad de trabajo muy limitada debido a su forma y tamaño. Además son sistemas voluminosos y caros, por lo que se hace necesario desarrollar una solución puramente electro-óptica a fin de obtener un dispositivo pequeño, rápido y barato.

Durante la última década se han realizado grandes progresos en nanotecnología, especialmente en el campo de los puntos cuánticos (QDs). Este progreso ha dado como resultado el desarrollo de numerosos dispositivos basados en los puntos cuánticos que se han ido introduciendo en diferentes áreas de la ciencia, pudiéndose destacar la computación, el desarrollo de células fotovoltaicas y dispositivos emisores de luz, biología, etc. Además, la comunidad científica espera que en un futuro cercano futuro haya un aumento de la penetración y la diversificación de los dispositivos basados en puntos cuánticos.

Sus proporciones y pequeño tamaño (unos cientos de átomos) proporcionan a los puntos cuánticos unas extraordinarias propiedades ópticas, las cuales pueden ser optimizadas modificando el tamaño o composición de los puntos. Como resultado de esto, los sistemas láseres que utilizan puntos cuánticos como región activa tienen una muy baja densidad de corriente por capa de puntos cuánticos, una ganancia de banda ancha y una menor densidad de corriente umbral comparados con los láseres bulk o de pozos cuánticos [4]. Además, las regiones activas basadas en puntos cuánticos tienen la ventaja, sobre otro tipo de regiones activas, de tener un menor espaciamiento y tasa de recombinación de los portadores inyectados [5]. Estas propiedades se derivan del confinamiento cuántico de los electrones.

Por otro lado, los sistemas implementados con materiales basados en fosfuro de indio (InP) pueden cubrir fácilmente el rango de longitudes de onda de las redes de trabajo ópticas (en torno a los  $1.55\text{ }\mu\text{m}$ ) utilizando bulk, pozos cuánticos o puntos cuánticos como región activa. Además, son ideales para la integración fotónica monolítica, soportando sobre un mismo chip todo tipo de funciones ópticas incluyendo;

láseres, SOA, detectores, moduladores de fase y guías de onda pasivas. De hecho, son estas propiedades de los puntos cuánticos añadidas a las ventajas de utilizar materiales basados en *InP*, las que convierten a los sistemas láser que utilizan materiales basados en *InP* con puntos cuánticos como región activa en unos perfectos candidatos para el desarrollo de un sistema láser modulable de banda ancha compacto, barato y rápido. El principal inconveniente a la hora de trabajar con puntos cuánticos como región activa es el hecho de estar trabajando en un nuevo campo, lo que implica que la teoría sobre los puntos cuánticos no es completa, existiendo efectos y comportamientos que no han sido aun completamente explicados y o comprendidos.

Una vez seleccionado los materiales con los que vamos a desarrollar nuestro sistema láser modulable de banda ancha, trataremos ahora de explicar su funcionamiento. Existen diferentes estrategias para modular la longitud de onda, la que pasamos a explicar a continuación ha sido elegida porque nos permite desarrollar un sistema láser modulable puramente opto-electrónico.

En nuestro caso, la técnica de modulación se basará en que la longitud de onda de salida de un sistema láser coincide siempre con la longitud de onda correspondiente al pico de la ganancia óptica modal total del sistema  $G_T$ .

$$G_T = G_{\text{Amplificador}} - L_{\text{Sistema}} \quad (1.1)$$

Donde, la ganancia total del sistema láser es la ganancia del amplificador óptico menos las perdidas del sistema, comúnmente debidas a los espejos de la cavidad de Fabry–Pérot. Normalmente, en la mayoría de los sistemas láser suponemos que las pérdidas tienen un comportamiento plano con respecto a la longitud de onda ( $L_S(\lambda) = \text{cte}$ ), por lo que cabe esperar que la longitud de onda de salida del sistemas láser esté siempre alrededor del pico de la ganancia óptica modal del amplificador óptico. Este proceso se muestra en las figuras 1.1.A, 1.1.B. y 1.1.C.

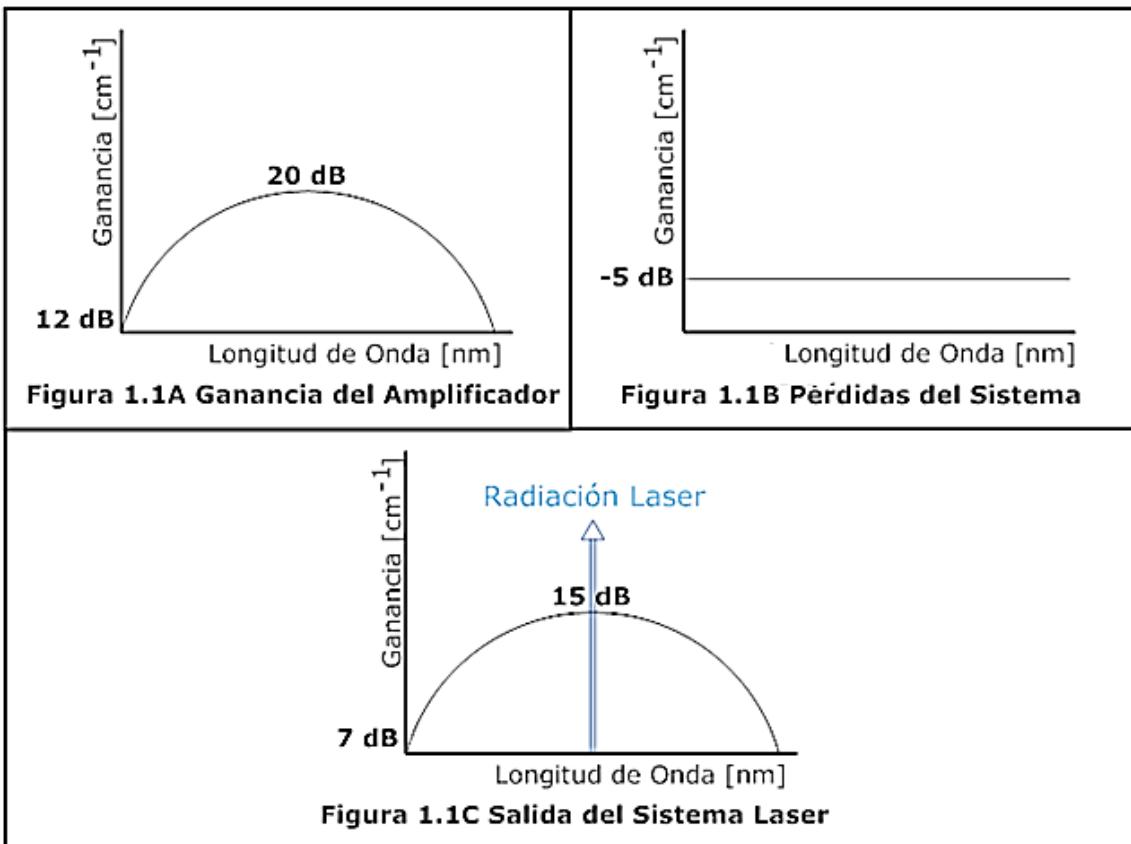


Figura 1.1 Respuesta de un sistema láser simple

Usando este principio, el departamento de dispositivos optoelectrónicas de la Universidad Técnica de Eindhoven pretende desarrollar un láser modulable puramente electro-óptico a través del control de las pérdidas del sistema, utilizando para ello un filtro paso banda eléctricamente modulable integrado en el sistema láser. Ambos dispositivos, el amplificador y el filtro, deben estar interconectados formando un circuito realimentado, como el mostrado en la figura 1.2.

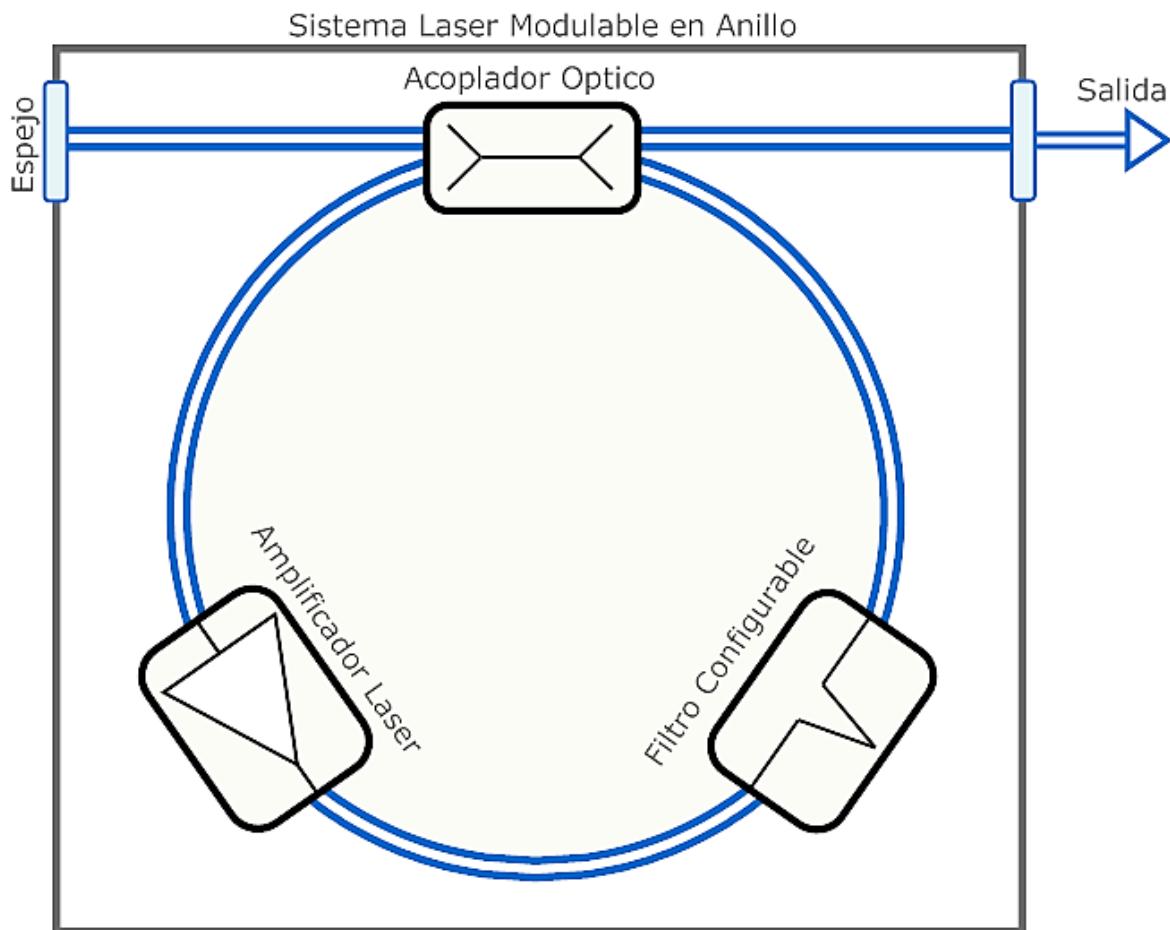


Figura 1.2 Sistema láser modular en anillo

Como resultado de esta nueva configuración, la ganancia óptica modal del sistema láser es la ganancia óptica modal del amplificador, menos las perdidas del sistema y menos las perdidas del filtro. Esta relación se muestra en la ecuación 1.2, de donde podemos extraer que si controlamos las perdidas del filtro, controlamos la ganancia óptica total del sistema y con ello la longitud de onda de la señal de salida.

$$G_T = G_{Amplifier} - L_{Filter} - L_{Sistema} \quad (1.2)$$

Las figuras 1.3.A, 1.3.B, 1.3.C y 1.3.D muestran una representación visual de este proceso.

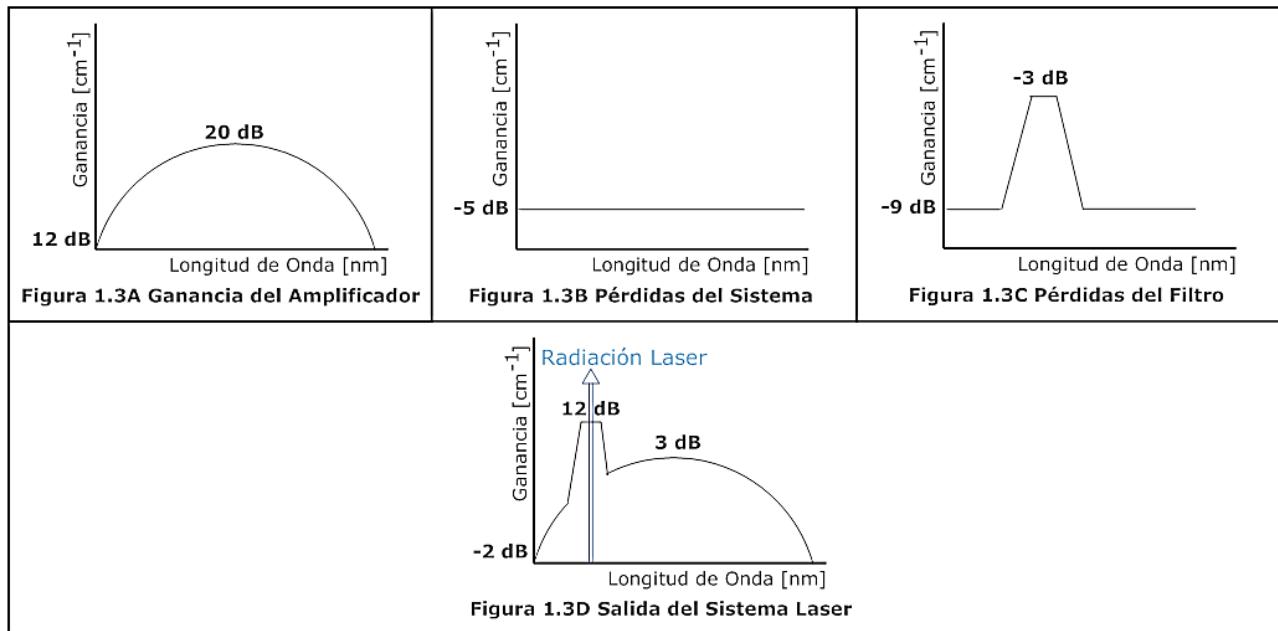


Figura 1.3 Respuesta del sistema láser modulable

Para ser más específicos acerca de nuestro láser modulable, en los últimos años, varios proyectos que actualmente se están desarrollando en el departamento de dispositivos opto-electrónicos de la Universidad Técnica de Eindhoven, requieren disponer de un amplificador óptico con una estructura de *InAs/InGaAsP/InP* (100) que utilice puntos cuánticos como región activa y abarque el rango de 1600nm a 1800nm, para el desarrollo de un láser en anillo integrado modulable para aplicaciones biofotónicas. Dicho amplificador debe poder usarse en circuitos integrados fotónicos (PIC) basados en *InP* con integración activa/pasiva [6-7].

El desarrollo de este dispositivo nos proporcionará una herramienta pequeña, barata y rápida que podría ser muy útil en diferentes áreas de la ciencia, pero para su diseño es necesario un gran conocimiento y control de la ganancia óptica modal del amplificador en función de la longitud de onda, la temperatura y la densidad de corriente. Sin embargo, debido al alto nivel de integración de los dispositivos, los sistemas de control térmico que utilizamos comúnmente en el laboratorio durante la toma de medidas no nos permiten controlar la temperatura real en el chip. La siguiente figura muestra el esquema conceptual del sistema de control térmico comúnmente utilizado en el estudio de este tipo de dispositivos.

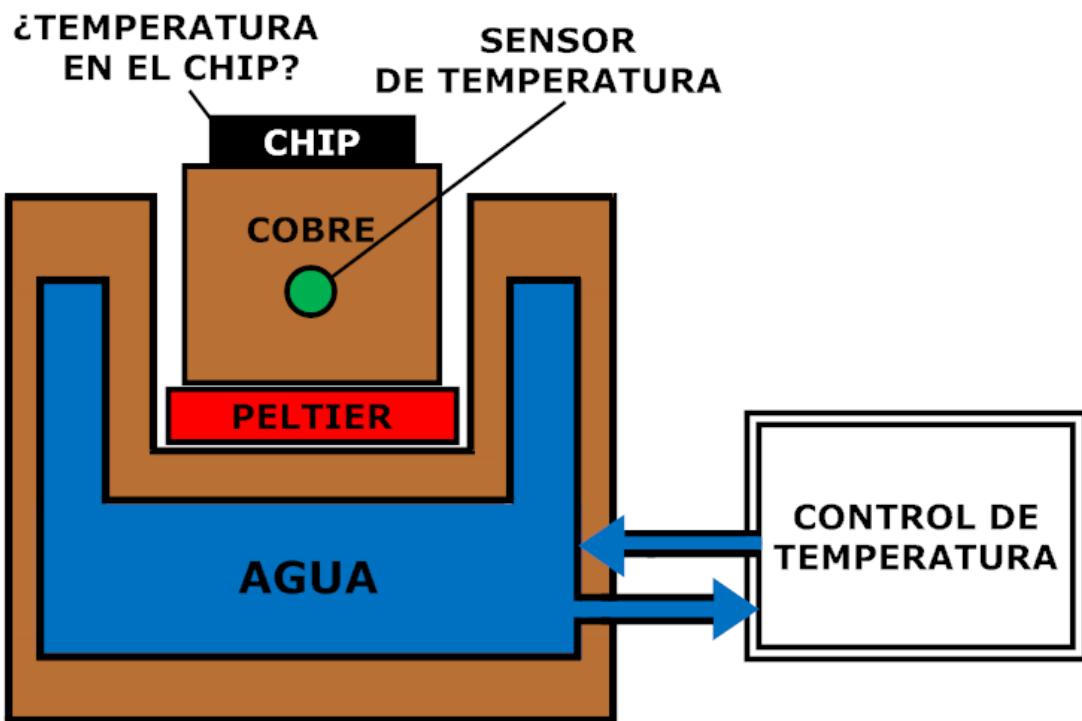


Figura 1.4 Sistema de control térmico

Cuando alimentamos el chip, aplicamos energía y la mayor parte de esa energía se transforma en calor a través de efecto Joule. Dicho calor se propaga a la estructura de cobre, llegando al sensor de temperatura y se elimina a través del refrigerador hidráulico. Dicho proceso no es un proceso instantáneo, lo que implica que existe una diferencia, entre la temperatura que podemos medir y controlar y la temperatura real del chip. No importa si estamos calentando o enfriando porque primero se fija la temperatura y después se añade energía, como podemos ver en la figura 1.5.

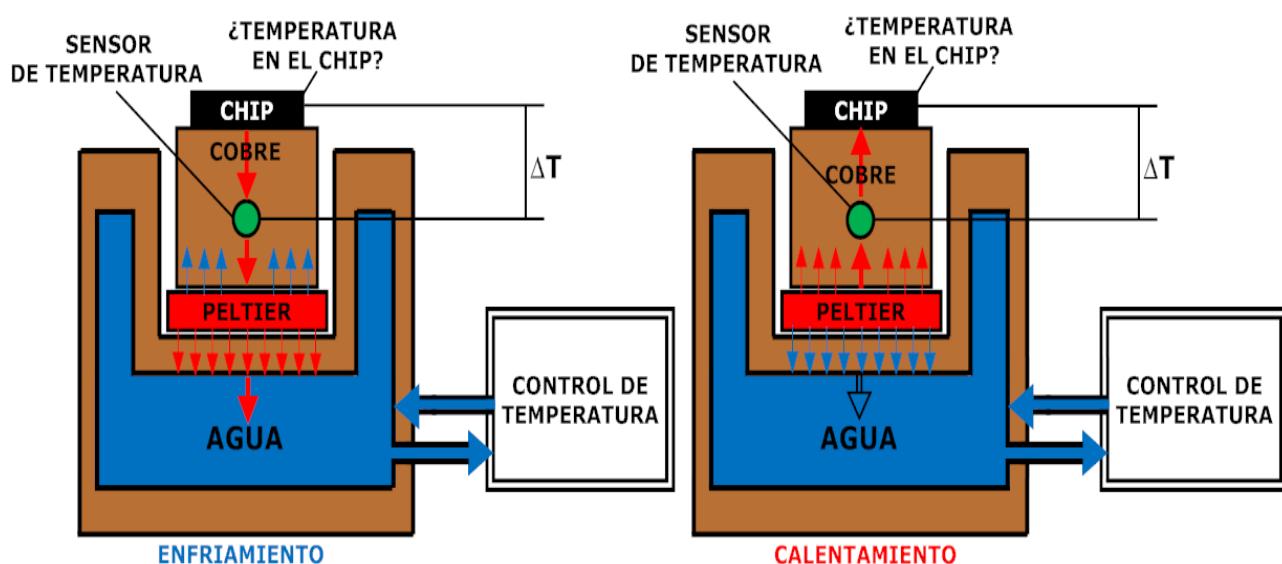


Figura 1.5 Limitaciones del sistema de control térmico

El objetivo principal de este proyecto fin de carrera es describir y modelar como esta diferencia de temperaturas afecta a las medidas de la ganancia óptica modal. Para realizar dicha tarea se pretende llevar a cabo un análisis comparativo de muestras de la ganancia óptica modal bajo diferentes densidades de corriente, temperaturas y ciclos de trabajo.

## **1.1    Objetivos**

El objetivo principal de este proyecto fin de carrera es conocer y entender la influencia térmica en las medidas de la ganancia óptica modal en un amplificador de fosfuro de indio que utiliza puntos cuánticos como región activa.

## **1.2    Estructura de la Memoria**

En este primer capítulo se han presentado los principales tipos de láser que son capaces de modificar la longitud de onda de salida, centrándonos en aquellos que pueden hacerlo en una banda ancha. Se ha visto qué motiva el desarrollo de este tipo de láseres y se ha justificado porque es necesario disponer de un buen conocimiento de la ganancia óptica modal de la cavidad amplificadora del sistema láser. Por último, se han explicado y fijado los objetivos del proyecto.

En el capítulo 2 abordaremos el estudio de las características de los sistemas láser. Se comenzará con una explicación general de las características, propiedades y tipos más comunes de láser para posteriormente centrarnos en aquellos que se basan en puntos cuánticos. A continuación, se estudiará en detalle las técnicas más comunes para obtener la ganancia óptica modal. También se analizará de manera teórica las ventajas, limitaciones e implicaciones que se derivan tanto de la técnica escogida para obtener la ganancia óptica modal como de las características del proceso de medida en el laboratorio. Finalmente resumiremos las motivaciones del estudio.

En el capítulo 3 nos centraremos en las características del chip que utilizaremos en nuestro experimento y analizaremos las técnicas empleadas para fabricarlo.

En el capítulo 4 analizaremos el proceso de toma de medidas. Comenzaremos analizando los set de medida que emplearemos en el laboratorio para obtener las medidas de la emisión espontánea amplificada que nos permitirá estimar las ganancias. Después analizaremos las características de las medidas y finalmente estudiaremos las precauciones que debemos tomar durante la obtención de dichas medidas.

En el capítulo 5 nos centraremos en el procesado de los datos obtenidos en el laboratorio. Comenzaremos analizando el fichero que servirá de base de datos para los distintos códigos que nos permitirá estimar la ganancia óptica modal a partir de las medidas de la emisión espontánea amplificada o

ASE. Despues analizaremos el algoritmo de ajuste y los resultados obtenidos. Posteriormente se estudiarán diferentes técnicas matemáticas que nos permite comparar las ganancias. A continuación se compendian y comparan los datos obtenidos utilizando para ello la distancia de Mahalanobis. Finalmente se mostrará la relación entre el exceso de temperatura introducido en el chip y la densidad de corriente utilizada para alimentarlo. Para realizar todos estos cálculos se utilizará el software Matlab.

Finalmente, en el capítulo 6 se resumen las principales conclusiones y resultados obtenidos.

### **1.3 Peticionario**

Actúa como peticionario para este proyecto fin de carrera el “OPTOELECTRONIC DEVICE DEPARTMENT” de la Technische Universiteit Eindhoven (TUE), Holanda.



---

## TEORIA

Para poder alcanzar el principal objetivo planteado de este proyecto de fin de carrera, que fue analizado en el capítulo anterior, tal y como se explicará detalladamente en capítulos posteriores, es necesario hacer un estudio comparativo entre medidas de la ganancia óptica modal tomadas bajo diferentes condiciones de temperatura, corriente y tipo de densidad de corriente aplicada, continua o pulsada. Pero previamente se hace necesario explicar algunos conceptos básicos que nos permitan entender qué es un láser, cómo funcionan los láseres cuya región activa está basada en puntos cuánticos, qué es la emisión estimulada amplificada o qué es la ganancia óptica modal. Además, también es necesario realizar un estudio de las diferentes técnicas que existen para calcular la ganancia óptica modal, analizando sus ventajas, inconvenientes y limitaciones, de forma que podamos entender y justificar qué técnica y porqué se ajusta mejor a los láseres semiconductores de puntos cuánticos.

### 2.1 Láser

La palabra LÁSER corresponde al acrónimo en inglés de las palabras que definen este tipo de radiación, y que son **Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation**, es decir luz amplificada por la emisión estimulada de radiación. Los láseres son aparatos que amplifican la luz y producen haces de

luz coherente; su frecuencia va desde el infrarrojo hasta los rayos X. Un haz de luz es coherente cuando sus ondas, o fotones, se propagan de forma acompasada, o en fase. Esto hace que la luz láser pueda ser extremadamente intensa, muy direccional, y con un estrecho margen espectral.

### 2.1.1 Principios de Funcionamiento del Láser

Los láseres obligan a los átomos a almacenar luz y emitirla en forma coherente. Primero, los electrones de los átomos del láser son bombeados hasta un estado excitado por una fuente de energía. Después, se los estimula mediante fotones externos para que emitan la energía almacenada en forma de fotones, mediante un proceso conocido como emisión estimulada. Los fotones emitidos tienen una frecuencia que depende de los átomos en cuestión y se desplazan en fase con los fotones que los estimulan. La figura 2.1 muestra el proceso de emisión estimulada en el que se basa cualquier láser.

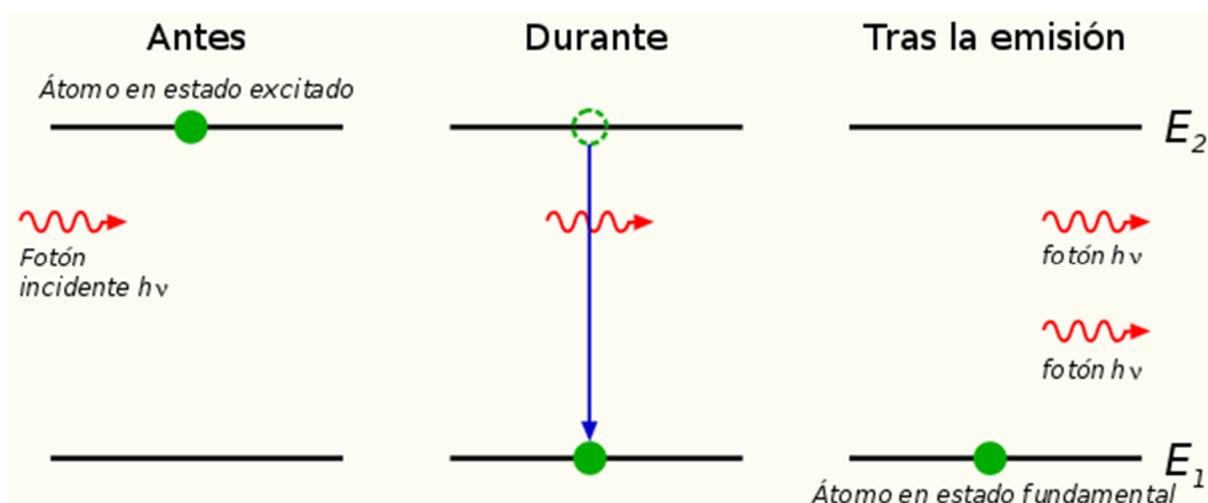


Figura 2.1 Proceso de emisión estimulada

Los fotones emitidos chocan a su vez con otros átomos excitados y liberan nuevos fotones. La luz se amplifica a medida que los fotones se desplazan hacia atrás y hacia adelante entre dos espejos paralelos desencadenando nuevas emisiones estimuladas. Al mismo tiempo, la luz láser, intensa, direccional y monocromática, se 'filtra' por uno de los espejos (acoplador de salida), que es sólo parcialmente reflectante. La figura 2.2 muestra un diagrama que ilustra la composición de un sistema láser.

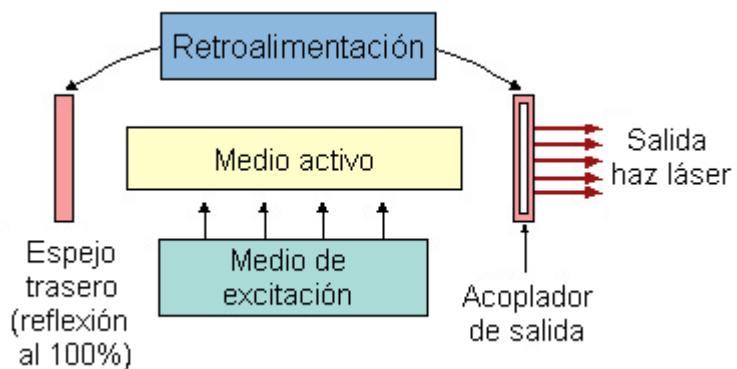


Figura 2.2 Sistema láser

Como vemos en la figura 2.2, un sistema láser consta de un medio activo, un mecanismo de excitación (feedback), un mecanismo de retroalimentación óptica (espejos), y un acoplador de salida.

## 2.1.2 Tipos de Láser

Según el medio que emplean, los láseres suelen denominarse de estado sólido, de gas, de semiconductores o líquidos. Si bien en lo referente a este proyecto siempre hablaremos de láseres de semiconductores. Esta clase de láser son los más compactos, y suelen estar formados por una unión entre capas de semiconductores con diferentes propiedades de conducción eléctrica. La cavidad del láser se mantiene confinada en la zona de la unión mediante dos límites reflectantes. El arseniuro de galio es el semiconductor más usado. Entre los usos más comunes de los láseres de semiconductores están los reproductores de discos compactos.

### 2.1.2.1 Láser Semiconductor de Puntos Quánticos

No es objetivo del presente trabajo ilustrar o analizar ni los fundamentos de la física cuántica ni los extensos desarrollos matemáticos que explican el funcionamiento de los láseres de puntos cuánticos, de los que por otra parte existen numerosas publicaciones [16] y [17], si bien trataremos de ilustrar de manera sencilla las características, ventajas y estructura de este tipo de dispositivos.

Un láser de punto cuántico es un láser semiconductor que usa puntos cuánticos como el medio activo en su región de emisión de luz. Si bien este tipo de tecnología es aún poco madura y el estudio de algunas de sus características es incompleto, podemos aventurar algunas conclusiones sobre los rendimientos esperados de esta tecnología.

Debido al apretado confinamiento de los portadores de carga en los puntos cuánticos estos exhiben una estructura electrónica similar a la de los átomos. Los láseres fabricados con medios tan activos exhiben

un comportamiento bastante cercano a los láseres de gas, pero no presentan algunos de los inconvenientes asociados a los tradicionales láseres de semiconductores basados en medios activos sólidos o de pozo cuántico. Se han observado mejoras en la modulación de ancho de banda, umbral de excitación, ruido relativo de intensidad, factor de realce de ancho de línea y estabilidad con la temperatura. La región activa del punto cuántico puede diseñarse para operar con diferentes longitudes de onda variando el tamaño y la composición de los puntos cuánticos. Esto permite que este tipo de láser pueda fabricarse para operar en longitudes de onda imposibles de obtenerse con la tecnología de láser semiconductor tradicional. Por otro lado, en comparación a las prestaciones de los láseres de pozo cuántico convencionales, los láseres de punto cuántico alcanzan una estabilidad ante la temperatura perceptiblemente mayor.

Recientemente, los dispositivos basados en medios activos de punto cuántico están encontrando aplicaciones comerciales en la medicina (bisturí láser, tomografía de coherencia óptica), tecnologías de exhibición de imágenes (proyección, TV láser), espectroscopia y telecomunicaciones. Con esta tecnología, se ha desarrollado un láser de punto cuántico de hasta 10 Gbit/s para uso en comunicaciones ópticas de datos y redes ópticas que es insensible a la fluctuación de la temperatura. El láser es capaz de operar a alta velocidad en longitudes de onda de 1.3  $\mu\text{m}$ , en un rango de temperaturas de entre 20 °C y 70 °C. Trabaja en sistemas ópticos de transmisión de datos, LANs ópticos y sistemas de Red de Área Metropolitana.

En este proyecto utilizaremos como base para nuestro estudio un conjunto de láseres semiconductores de punto cuántico cuya estructura es muy similar a la mostrada en la figura 2.3. En el capítulo 3 de este proyecto se analizará detalladamente la fabricación y estructura de los láseres empleados en este proyecto, si bien para facilitar la comprensión del funcionamiento de este tipo de dispositivos a continuación pasaremos a estudiar a modo de ejemplo el láser mostrado en la figura 2.3, debido a que es considerablemente más sencillo. Si bien debe quedar claro que la principal diferencia entre el láser que pasamos a describir a continuación y los que utilizaremos en nuestro experimento, es que éste se basa en *AsGa* y los empleados en nuestro análisis se basan en *InP*.

Como podemos ver en dicha figura, este tipo de láser se construye apilando múltiples capas muy finas de materiales semiconductores dopados para que entre dichas capas aparezcan los puntos cuánticos.

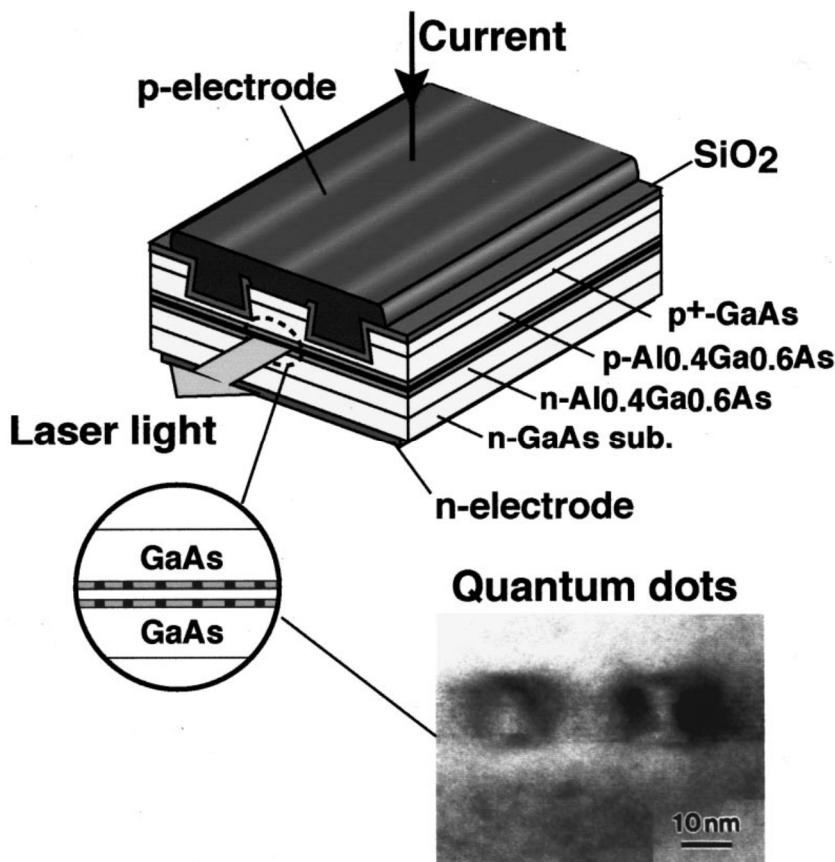


Figura 2.3 Sección de un láser de puntos cuánticos

Tal y como se ha dicho anteriormente, la estructura de este tipo de láser de puntos cuánticos ha sido crecida sobre un sustrato tipo n de *GaAs* (001) a través del proceso de *Stranski-Krastanov*. Como región activa disponen de 3 capas de *GaAs*, siendo el ancho la capa interior de 20 nm, de forma que se crean dos capas que contienen puntos cuánticos alienados en columnas. Las 3 capas de *GaAs* están localizadas en el centro de una capa de guía de onda óptica de *AlGaAs* que hace de núcleo del sistema. Las capas de QD están diseñadas para emitir fotones cuya potencia espectral esté en un rango de longitudes de onda que va desde los 1600 a los 1800 nanómetros. El recubrimiento exterior del núcleo es una fina capa de *GaAs*, y el recubrimiento exterior del sistema láser es una capa de *SiO<sub>2</sub>*. Finalmente, como capa de contacto se utiliza una capa *GaAs* tipo p. Este sistema compuesto por múltiples capas apiladas es compatible con un proceso de integración extremo-junta activo-pasivo o *butt-joint active-passive*. La longitud de la cavidad láser es de 300  $\mu$ m y su ancho de 3  $\mu$ m. La refractividad del espejo que actúa como acoplador de salida es de un 95%. En la parte de abajo del sistema, el sustrato de *GaAs* tipo n se metaliza de forma que se cree un único contacto común para las dos secciones. Es posible encontrar más información acerca del dispositivo mostrado en la figura 2.3 en la documentación existente, [16].

#### 2.1.2.2 Láser Semiconductor Multisección

En general, la inmensa mayoría de los dispositivos láser empleados en la mayoría de las aplicaciones siguen el esquema mostrado en la figura 2.2. No obstante, si lo que se pretende es medir la emisión espontánea amplificada propia del amplificador del sistema láser en ausencia de realimentación, como es nuestro caso, debemos recurrir a un dispositivo que siga el esquema mostrado en la figura 2.4.

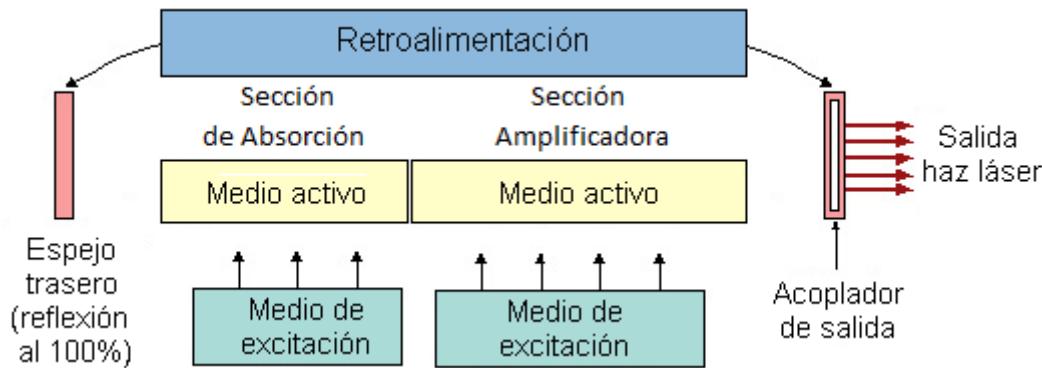


Figura 2.4 Sistema láser multisección

Como puede observarse en la figura anterior, en esencia el funcionamiento de los sistemas láser multisección, figura 2.4, es igual al de los sistemas láser convencionales, figura 2.2, con la diferencia de que el medio activo o amplificador está dividido en dos secciones eléctricamente aisladas pero ópticamente unidas. De forma que si excitamos ambas secciones positivamente, tal y como hacíamos con los láser convencionales, habrá inversión de población y emisión estimulada en ambas secciones con lo que el comportamiento del sistema láser multisección no será distingible del comportamiento del sistema láser tradicional.

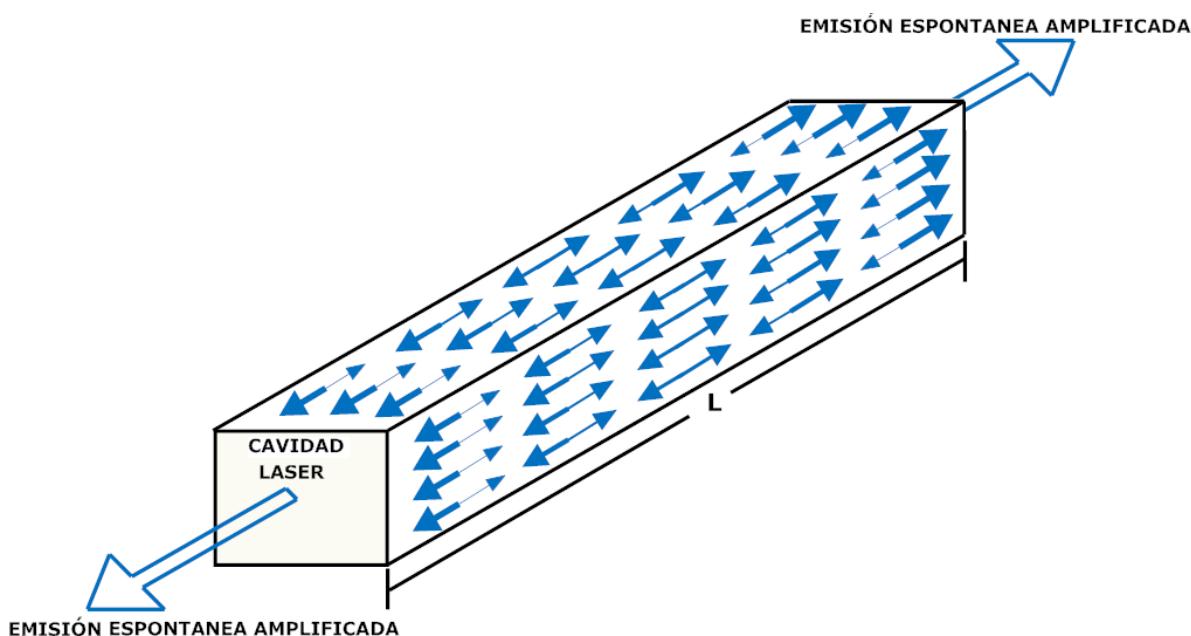
No obstante, si excitamos positivamente la sección más cercana a la salida del sistema láser, a la que a partir de ahora llamaremos sección amplificadora, y negativamente la más lejana, a la que a partir de ahora llamaremos sección de absorción, en esta última obtendremos el efecto contrario al de la primera. Por lo que los fotones generados a través de la emisión amplificada estimulada en la sección amplificadora que se dirijan a la sección de absorción serán reabsorbidos antes de llegar al espejo reflectante cortándose así la realimentación del sistema, de forma que la salida del sistema láser estará compuesta exclusivamente por la emisión amplificada estimulada procedente de la sección de amplificación. A lo largo de este documento ahondaremos más detalladamente en el funcionamiento y la necesidad de utilizar este tipo de dispositivos.

## 2.2 Emisión Estimulada Amplificada

El término emisión espontánea amplificada o ASE del inglés *Amplified Spontaneous Emission*, hace referencia a la luz producida por emisión espontánea en un medio activo, que se ha amplificado a través del proceso de emisión estimulada al atravesar dicho medio activo. Esta emisión es intrínseca al funcionamiento

de la cavidad láser y está plenamente relacionada con las características y propiedad de esta. Para generar la emisión espontánea que posteriormente será amplificada a lo largo de su recorrido por la cavidad debemos inyectar portadores hasta alcanzar la inversión de población. Por otro lado, en un sistema láser es la realimentación a través de los espejos de esta emisión lo que induce el comportamiento láser del sistema.

En conclusión, la emisión espontánea amplificada es la emisión fotónica de un sistema láser en ausencia de realimentación. O dicho en otras palabras, si habiendo alcanzado la inversión de población eliminamos los espejos que conforman el sistema de realimentación de la cavidad láser y medimos la emisión emitida por un extremo de la cavidad láser obtendríamos la emisión espontánea amplificada o ASE. La figura 2.5 ilustra el funcionamiento del sistema láser en ausencia de realimentación.



**Figura 2.5 Comportamiento de la ASE para ganancias ópticas modales mayores a uno en un sistema láser sin realimentación**

Debemos tener en cuenta que dicha emisión no tiene por qué estar plenamente relacionada con la longitud total del sistema láser, ya que si la energía que alimenta el sistema láser es insuficiente puede darse el caso de que aquellos fotones generados lejos de la salida del sistema nunca la alcancen. Ahondaremos más detalladamente esta posibilidad en el apartado 2.6.

En general un exceso de ASE en un sistema láser es algo indeseado, pues limita el valor máximo la ganancia que puede alcanzar la cavidad láser. Este problema se agrava si la cavidad láser en cuestión es muy larga o si la ganancia de la cavidad es demasiado alta. Sin embargo la emisión de la ASE es función de las propiedades y características de la cavidad láser, lo cual nos permite utilizarlo para obtener la ganancia óptica modal de la cavidad. En el apartado 2.4.3 analizaremos detalladamente la relación existente entre la ganancia óptica modal y la ASE.

## 2.3 Relación entre la Ganancia y la Temperatura Real en el Chip

Como mencionamos en el capítulo uno, un conocimiento detallado de la relación entre la ganancia y las características del material que compone la sección amplificadora del sistema láser es esencial para el desarrollo del citado sistema láser de longitud configurable. Así mismo también debemos conocer y controlar de manera precisa la ganancia óptica modal respecto de la longitud de onda, la temperatura y la densidad de corriente inyectada. Sin embargo el sistema térmico que fija, mide y control de temperatura en el chip que normalmente se emplea en este tipo de medidas en laboratorio no nos proporciona un valor real de la temperatura en el chip durante el proceso la toma de medidas. La figura 2.6 muestra el diagrama general de dicho sistema de control de temperatura.

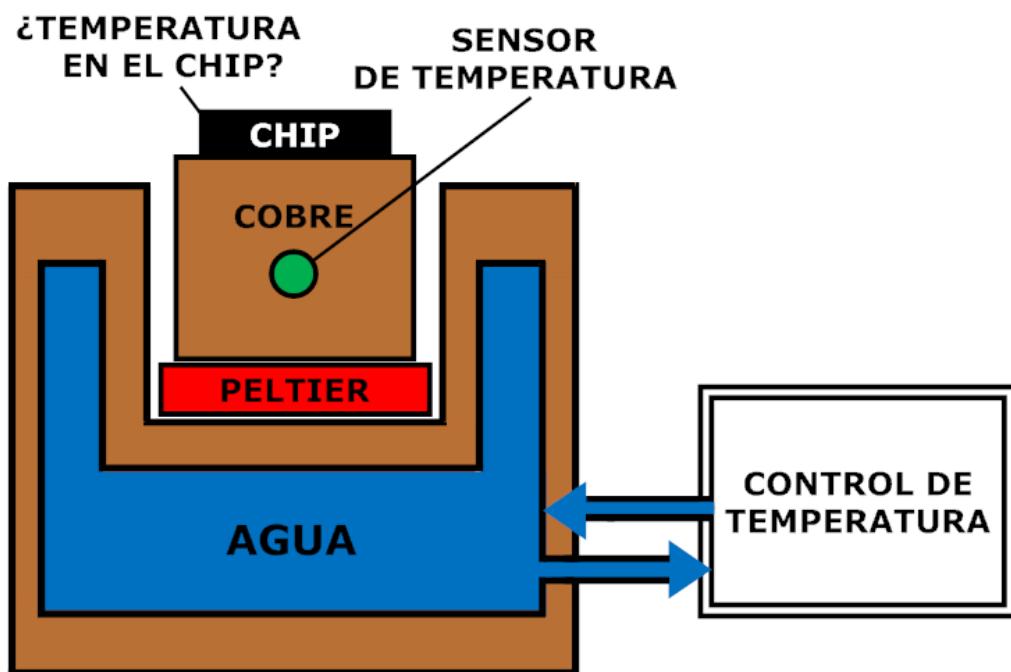


Figura 2.6 Sistema de control térmico

Cuando alimentamos el chip estamos suministrando energía eléctrica, una parte de dicha energía se convierte en luz a través de la emisión estimulada pero la mayor parte de dicha energía se ve transformada en calor a través del efecto Joule. Dicho calor es transferido a través de la estructura de cobre y evacuado a través de un sistema de refrigeración por agua fría, pero dicho proceso de refrigeración no es instantáneo. Como podemos ver en la figura 2.7, el sensor de temperatura que se utiliza como referencia para medir, fijar y controlar la temperatura, esta incrustado en el centro de la estructura de cobre que soporta el chip, de forma que existe una diferencia entre la temperatura que nosotros podemos controlar y medir en el laboratorio, y la temperatura real del chip. Tal y como podemos ver en la figura 2.7, no importa si nuestro sistema de control de temperatura está enfriando o calentando, porque primero nuestro sistema fija y estabiliza la temperatura y después nosotros aplicamos energía, con lo que siempre va a existir una diferencia de temperatura mientras apliquemos energía.

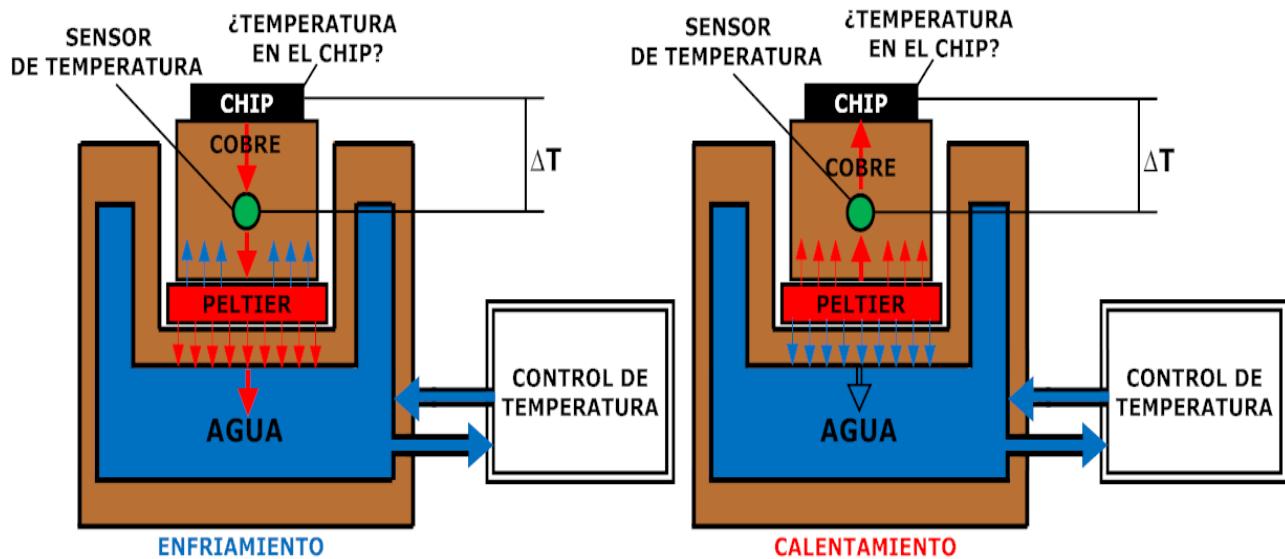


Figura 2.7 Transferencia de temperatura

El objetivo principal de este trabajo es determinar cómo afecta esta diferencia a las medidas de la ganancia óptica modal. Para poder hacerlo nuestra principal tarea y piedra angular de este proyecto será averiguar el valor real de la temperatura en el chip.

El principal motivo por el cual no se elimina el exceso de calor en el chip es porque normalmente alimentamos el chip con corrientes continuas o que tienen un ciclo de trabajo del 100%, en otras palabras estamos manteniendo la diferencia de temperatura. Este es un problema bien conocido por todos aquellos que trabajan con láseres y SOAs bajo condiciones de alimentación continua de alta potencia, especialmente cuando los contactos metal-semiconductor no son óptimos. Sin embargo, si alimentamos el chip con una corriente pulsada que tenga un ciclo de trabajo de un 1%, durante el 99% del tiempo de cada clico, el sistema de refrigeración puede extraer el exceso de energía introducido durante el 1% del tiempo de ciclo. Además, de esta forma estamos aplicando 20 dB menos potencia, lo que significa menos temperatura. La figura 2.8 Ilustra esta idea.

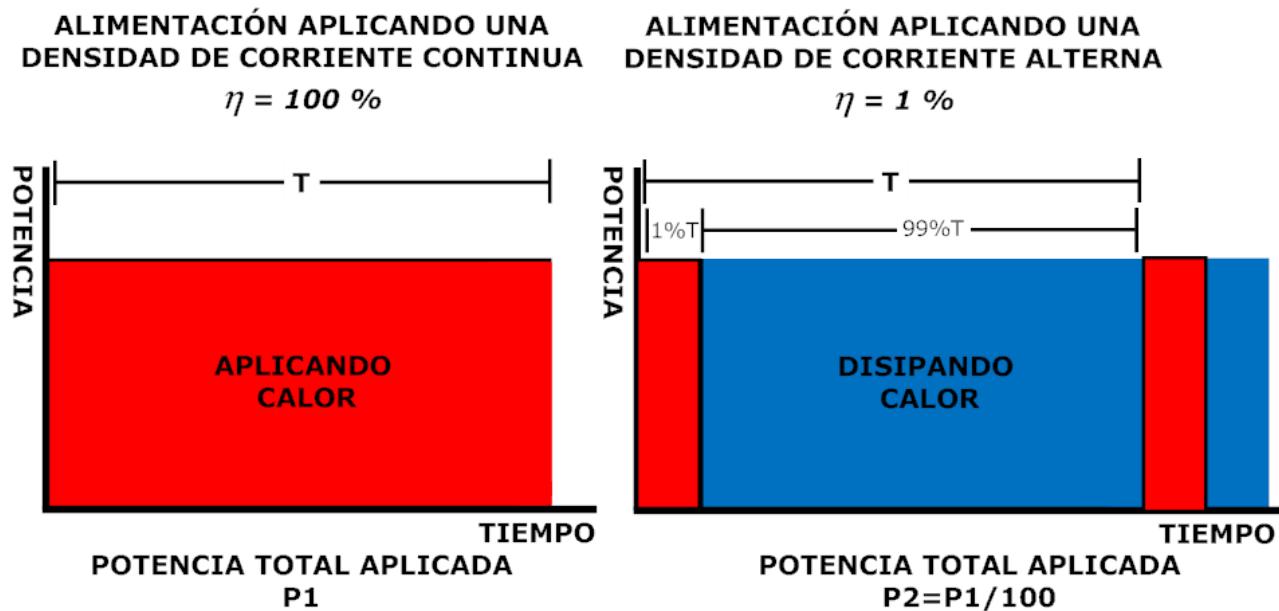


Figure 2.8 Densidad de corriente continua (100%) vs pulsada (1%)

De forma que si asumimos que cuando trabajamos con un ciclo de trabajo del 1% la diferencia entre la temperatura del sensor y la del chip es cero, podemos realizar un análisis comparativo de las ganancias ópticas modales para corrientes pulsadas y continuas para conocer la diferencia de temperatura existente entre el chip y el sensor ( $\Delta T$ ) en función de la densidad de corriente, cuando trabajamos con corrientes continuas.

Supongamos, tal y como se muestra en la figura 2.9, que tenemos dos sistemas de medida o Setup y dos chips idénticos que están trabajando con la misma densidad de corriente pero a diferentes temperaturas  $T_1$  y  $T_2$ , con lo que existen dos diferencias de temperatura entre los sensores y los chips  $\Delta T_1$  y  $\Delta T_2$ , y que usan además dos tipos de alimentación diferente; continua (100%) y pulsada (1%). Si como dijimos antes suponemos que cuando trabajamos alimentando con un ciclo de trabajo de un 1%, la diferencia de temperatura entre el sensor y el chip es nula, entonces  $\Delta T_2 \approx 0$ .

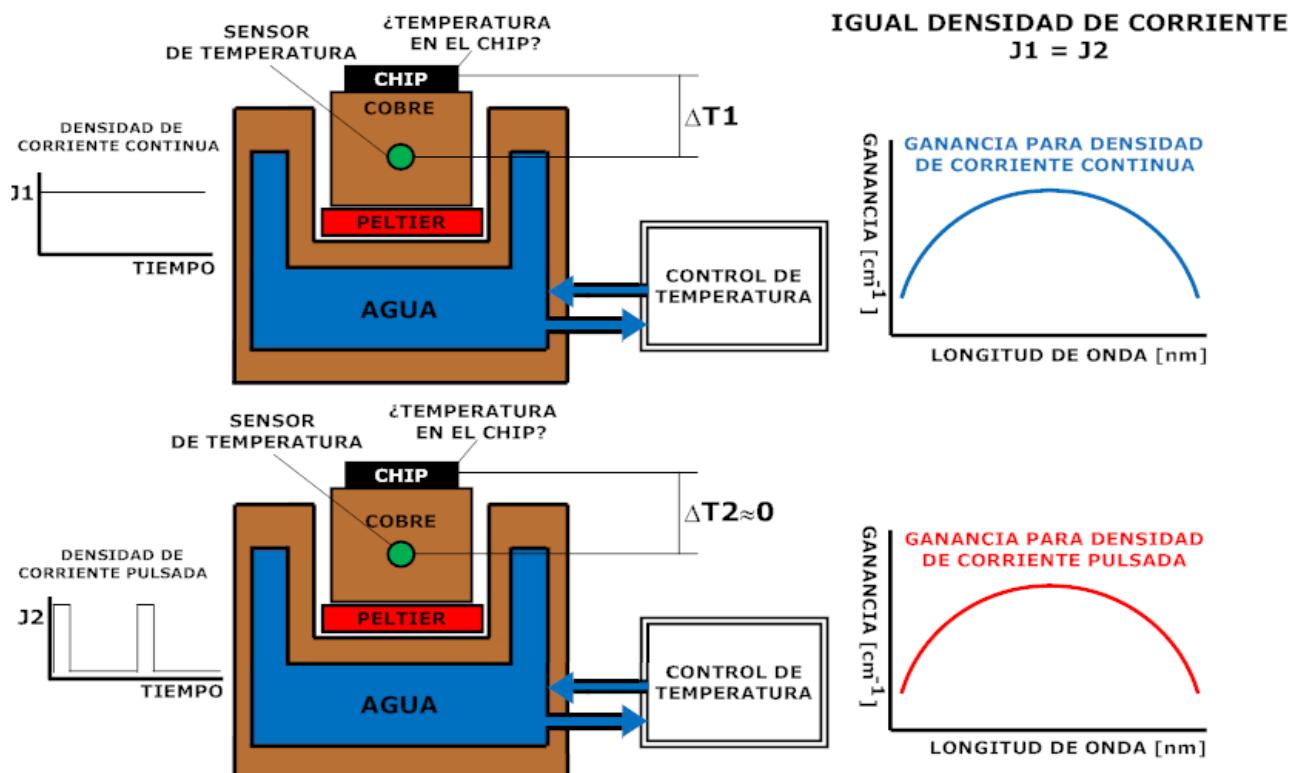


Figura 2.9 Ganancia óptica modal del Setup I vs Setup II

Si usando estos Setups y chips, trabajando bajo la misma densidad de corriente, obtenemos la misma ganancia óptica modal, eso significa que la temperatura en ambos chips debe ser la misma, por lo que  $\Delta T_1 = T_2 - T_1$ . O dicho de otra forma, la temperatura real en el chip del Setup I (ciclo de trabajo del 100%) es igual a la temperatura en el sensor del Setup II (ciclo de trabajo del 1%).

## 2.4 Técnicas de Medida de la Ganancia Óptica Modal

Si bien puede estimarse, no es posible medir la ganancia óptica modal de manera directa pues este parámetro depende de las características físicas del amplificador láser, por lo que se hace necesario calcular otro parámetro del amplificador láser que esté relacionado con la ganancia óptima modal. Los métodos o técnicas más comúnmente empleados a la hora de medir la ganancia óptica modal de un amplificador láser se basan en el análisis de los modos longitudinales de la emisión estimulada (Hakki-Paoli [6], [7], [8]), la emisión espontánea amplificada en función de la longitud de onda (Thomson [11], [12], [14]) o bien deduciéndose de las medidas del espectro de emisión espontánea, la energía lineal del láser y la diferencia en la eficiencia cuántica (Henry [9], [10]). Existen también modificaciones a estas técnicas que tratan de mejorar algunas de las deficiencias o limitaciones que presentan. En este apartado analizaremos estas diferentes técnicas de medida de la ganancia óptica modal y sus modificaciones, mostrando las ventajas y limitaciones de cada una de ellas. Con esta información seremos capaces de explicar y mostrar por qué hemos elegido la técnica de Thomson modificada y qué tipo de dispositivo amplificador vamos a necesitar para nuestro experimento.

Así mismo, también analizaremos que tareas debemos cumplir y que parámetros debemos tener controlados a fin de obtener un conjunto o set de medidas valido para el estudio comparativo que pretendemos realizar.

## 2.4.1 Hakki-Paoli

### 2.4.1.1 Descripción

La técnica de Hakki-Paoli es posiblemente la manera más conocida de determinar la ganancia óptica modal de un amplificador láser. En esta técnica la ganancia se obtiene a través del análisis de la forma de las modulaciones en el espectro del ASE causado por las resonancias de la cavidad láser operando por encima del umbral. En otras palabras, se obtiene la ganancia midiendo la profundidad de la modulación del espectro de emisión causada por la resonancia de la cavidad láser. Barriendo los picos y valles de dicho espectro es posible localizar el valor máximo y mínimo de la resonancia de la cavidad láser, tal y como vemos en la figura 2.10. [6].

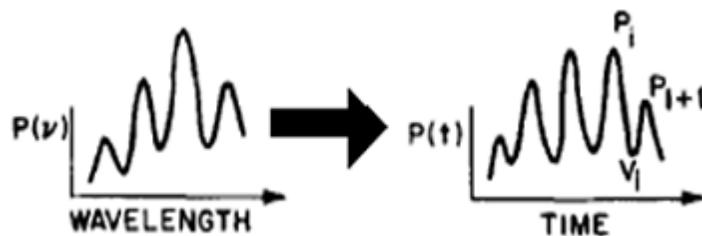


Figura 2.10 Hakki-Paoli emisión espectral

Si dividimos el promedio del pico máximo y su consecutivo ( $\frac{1}{2}(P_i + P_{i+1})$ ) por la profundidad del valle ( $V_i$ ) que hay entre ambos, se obtiene el ratio de profundidad de la modulación  $r_i$ . Existe una simple relación matemática entre la ganancia óptica modal y el  $r_i$  medido a la frecuencia óptica para la cual se satisfacen las condiciones de resonancia y anti-resonancia de la cavidad láser. Existe numerosa documentación donde es posible encontrar más información acerca de esta técnica de medida [6].

### 2.4.1.2 Ventajas y Problemas

El principal inconveniente de esta técnica radica en el hecho de que las medidas espetrales deben realizarse a través de una espectrometría de alta resolución a fin de resolver los modos espetrales y no distorsionar las mediciones del ratio de profundidad de modulación [7], por lo que el resultado de la medida depende en gran medida de la calidad del equipamiento empleado para realizarla, o lo que es lo mismo de la función de respuesta de dichos instrumentos. Para resolver este problema existe una modificación de la técnica

de Hakki-Paoli, propuesta por Cassidy [8], cuyos requisitos respecto de la resolución de la longitud de onda son menos exigentes. Dicha modificación hace menos sensible la medida de la ganancia a la función de respuesta de los instrumentos. La mayoría de los efectos y limitaciones asociadas a los instrumentos de medida se ven significativamente reducidos a través de la deconvolución, para lo cual solo necesitamos conocer la función de respuesta de los instrumentos de medida. Es posible encontrar más información acerca de la técnica de Cassidy en la numerosa documentación existente [8].

Si tenemos en cuenta que la distancia entre modos es inversamente proporcional a la longitud de la cavidad del amplificador láser, podemos decir que tanto la técnica de Hakki-Paoli como la modificación propuesta por Cassidy funcionan bien cuando la longitud de la cavidad láser es menor al milímetro. Esto hace inviable esta técnica cuando trabajamos con amplificadores láser basados en puntos cuánticos, debido a la relativamente baja ganancia óptica de los materiales que conforman la región activa de puntos cuánticos, lo que implica que para poder obtener un espectro medible el rango de longitudes de la cavidad láser en este tipo de láseres debe ser de varios milímetros. Por lo que en conclusión, no podemos utilizar esta común técnica de medida para obtener la ganancia óptica modal debido al pequeño tamaño de la distancia entre modos.

## **2.4.2 Henry**

### **2.4.2.1 Descripción**

La técnica propuesta por Henry obtiene el espectro de la ganancia óptica deduciéndolo de las medidas del espectro de emisión espontánea, la energía lineal del láser y la diferencia en la eficiencia cuántica, parámetros que si pueden medirse de manera directa. Para deducir la ganancia se analiza la relación existente entre los ratios de emisión espontánea, emisión estimulada y absorción óptica que se mantienen pese a la naturaleza de las transiciones ópticas láser.

La clave para determinar la ganancia óptica modal a través del espectro de emisión espontánea es conocer la separación entre los quasi-niveles de Fermi  $\Delta E_F$  y la constante de escalado que nos permita pasar de unidades espectrales arbitrarias a una ganancia modal. Estos datos se extraen normalmente a través del ajuste de la curva de medida al modelo teórico de la misma [9], [10].

Para reducir la distorsión que el efecto de reabsorción fotónica produce en esta técnica es común usar la exclusivamente cuando se trabaja con láseres de heteroestructuras de bloque o “buried”, porque en este tipo de láseres la densidad de corriente en la capa activa es uniforme y la emisión espectral se ve distorsionada exclusivamente por el proceso de reabsorción de la capa activa, que suele ser muy estrecha. Por

lo que en este tipo de láseres se puede afirmar que la distorsión del espectro de emisión es despreciable en las cercanías de la longitud de onda de la emisión láser. Es posible encontrar más información acerca de la técnica de Henry en la numerosa documentación existente [9].

#### **2.4.2.2 Ventajas y Problemas**

La principal desventaja de esta técnica es que utiliza un medio indirecto para calcular la separación de los niveles de energía de Fermi lo cual no proporciona una ganancia en unidades absolutas que debe ser calibrada.

### **2.4.3 Thomson**

#### **2.4.3.1 Descripción**

Otra técnica comúnmente empleada para obtener la ganancia óptica modal es la técnica de Thomson [11], donde la ganancia se obtiene a través de la medida de la emisión espontánea amplificada o ASE en un dispositivo multisección [11], [12]. La técnica de Thomson está basada en una técnica previa en la que la ganancia espectral se obtenía utilizando un dispositivo láser segmentado [12]. La idea fundamental en la que se basa esta técnica es analizar el espectro del ASE de un conjunto de láseres de diferente longitud fabricados todos en la misma pastilla, de forma que podamos asumir que todos los láseres son idénticos salvo en la longitud de su sección amplificadora. Si esto es así podemos relacionar la potencia de salida del ASE con la longitud de la sección amplificador del láser [14].

Para poder realizar este tipo de medidas lo primero que necesitamos es obtener nuestro dispositivo multisección. La figura 2.11 muestra el tipo de dispositivo empleado por Thomson en este tipo de medidas. En dicha figura podemos ver que el dispositivo láser consta de cinco secciones amplificadoras iguales, las cuales tienen contactos de alimentación y tierra independientes. Además se ha dispuesto de una región de absorción en el extremo final del dispositivo láser a fin de asegurar que no se producen realimentaciones, y se han ajustado la corriente de inyección y la geometría del dispositivo para asegurar que la potencia de salida del dispositivo es igual al ASE de la región amplificadora del dispositivo. La longitud de dicha región amplificadora es configurable entre una y cinco secciones en función de si las alimentamos o no, de forma que podemos obtener una medida de la potencia salida del dispositivo para diferentes longitudes del mismo. Para simplificar el estudio se suele utilizar la misma densidad de corriente en cada sección amplificadora. Para que este tipo de medidas sean validas debe asegurarse que no existe realimentación y que el sistema láser multisección no entra en saturación.

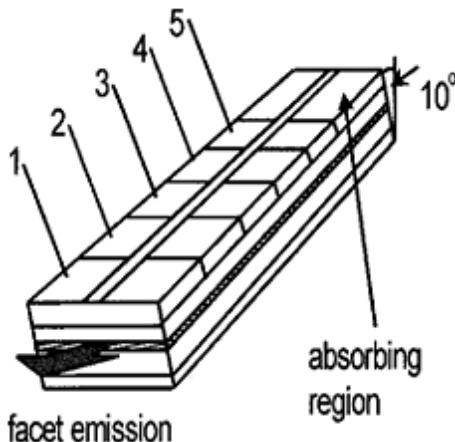


Figura 2.11 Esquema del dispositivo multisección empleado para obtener la ganancia óptica modal

Para obtener la ganancia lo que tenemos que hacer es obtener un conjunto o *set* de medidas compuesto por medidas de la potencia de salida para diferentes longitudes. Comenzaremos inyectando corriente en una única sección y midiendo la salida, posteriormente continuaremos con dos, tres,... hasta completar la longitud total del dispositivo.

La intensidad de la emisión espontánea amplificada debe medirse a través de un polarizador de forma que podamos medir simultáneamente la ganancia polarizada magnéticamente y eléctricamente. Integrando a lo largo de todo el dispositivo la expresión que define la amplificación de la luz generada por un diferencial de longitud,  $dL$ , a una distancia  $L$  de la superficie de emisión del láser la ganancia óptica modal puede relacionarse con la intensidad o la potencia del ASE a través de la ecuación 2.1. Una representación esquemática del sistema láser utilizado para el planteamiento de la ecuación se muestra en la figura 2.12.

Como podemos ver en la figura 2.12, en una pequeña sección de la sección amplificadora de longitud  $dL$  se genera una cantidad de potencia lumínica  $A$ . Asumiendo que en la totalidad de la sección amplificadora, la cantidad de potencia lumínica generada por  $dL$  es constante y que dicha cantidad de potencia se ve amplificada o atenuada por el trayecto a través de la cavidad en un factor de  $e^{GL}$ , donde  $G$  es la ganancia óptica modal de la sección amplificadora y  $L$  la distancia recorrida por el paquete de potencia lumínica  $A$ . De lo que se deduce que si  $G > 1$ ,  $A$  se ve amplificado a medida que atraviesa la cavidad por lo que más longitud significa mayor potencia del ASE a la salida, por el contrario si  $G < 1$  se ve atenuado con lo que la potencia de salida se reduce pudiendo llegar incluso a no poder alcanzar la salida. En apartados posteriores se hará un análisis más exhaustivo del comportamiento de los paquetes de luz en el interior del dispositivo láser multisección.

Como resultado de todo este análisis se obtiene la ecuación 2.1 que no nos permite relacionar de un modo directo la ganancia óptica modal y la longitud del dispositivo, haciendo inútil una medida de manera aislada.

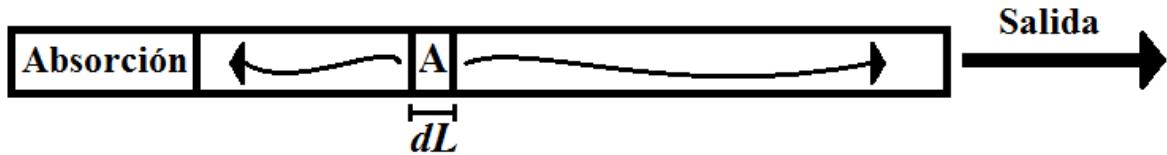


Figura 2.12 Sistema láser de dos secciones

$$\int_0^{L_T} A e^{GL} dL = \frac{A}{G} [e^{GL_T} - 1] \quad (2.1)$$

En base a la ecuación anterior, y si aseguramos que no existe realimentación y que el sistema láser multisección no entra en saturación, podemos relacionar la ganancia óptica modal  $G$  con la potencia de ASE, tal y como muestra la ecuación 2.2.

$$P = \frac{P_{sp}}{G} (e^{GL} - 1) \quad (2.2)$$

Donde  $P_{sp}$  es la potencia de emisión espontánea. La ecuación 2.2 tampoco nos proporciona un método directo de obtención de la ganancia óptica modal, si bien al comparar las medidas del espectro ASE para dos longitudes diferentes es posible obtener la expresión analítica de la ganancia óptica modal, tal y como ilustra la ecuación 2.3.

$$G = \frac{1}{L} \left[ \ln \left( \frac{P_{2L}}{P_L} - 1 \right) \right] \quad (2.3)$$

Esta ecuación modela el sencillo método de Thomson para obtener en unidades absolutas la ganancia a través de la medida del espectro de ASE para dos longitudes diferentes.

#### 2.4.3.2 Ventajas y Problemas

La principal ventaja del método de Thomson es que no requiere de una alta resolución espectral, y al estar basado en la medida de la emisión espontánea amplificada que se obtiene en unidades absolutas la ganancia también nos es dada en unidades absolutas. De esta forma se resuelven los principales problemas de las otras dos técnicas de medida analizadas a lo largo de este capítulo. Por esta razón, la técnica de medida que emplearemos en nuestro proyecto estará basada en la técnica de Thomson.

El principal problema de esta técnica es que los métodos de medida requieren de una cuidadosa implementación, debido a que un pequeño error en los instrumentos de medida u otra cuestión similar podrían causar un desfase entre los resultados obtenidos y los reales.

## 2.5 Modificación de la Técnica de Thomson

### 2.5.1 Descripción

A continuación analizaremos una modificación de la técnica de Thomson que mejora la precisión de la técnica. Como vimos en el análisis anterior, en esencia la técnica de Thomson utiliza un único dispositivo multisección, en el que cuando se asegura que no hay realimentación óptica ni saturación de la ganancia, podemos relacional la ganancia óptica modal  $G$  del material óptico semiconductor que actúa como sección amplificadora o *Semiconductor Optical Amplifier* (SOA) del sistema láser, con la potencia de salida del espectro de ASE (ecuación 2.1). Usando dicha ecuación podemos obtener de manera analítica la expresión de  $G$  tal y como se muestra en la ecuación 2.2, donde basta con comparar las medidas de dos SOA de longitudes  $L$  y  $2L$ .

Para solventar el principal problema de la técnica de Thomson, su pobre precisión, se puede recurrir a una modificación de la técnica que se basa en obtener la expresión analítica de  $G$  utilizando las medidas comparadas de tantos SOA de longitudes diferentes como sea posible, de forma que podamos calibrar y ajustar la ecuación 2.2 [13]. El proceso de ajuste de la ecuación 2.2 a través de un conjunto o *set* de medidas de  $P$  para diferentes valores de  $L$  ofrece dos ventajas en comparación con la técnica original basada en la ecuación 2.3. La primera, debemos tener en cuenta que las medidas de la potencia del espectro de ASE siempre contienen ruido o pequeñas desviaciones respecto a la situación ideal mostrada en la ecuación 2.2, con lo que al utilizar un amplio set de medidas para obtener la ganancia, dichas desviaciones se ven promediadas a través del proceso de ajuste de la curva de  $G$ . Y la segunda, aquellas medidas cuyos resultados muestren una gran desviación respecto del conjunto de las medidas debido a errores de fabricación o a desalineaciones en el circuito óptico, pueden ser detectadas de manera sencilla, eliminadas y repetidas.

Debido a sus múltiples ventajas, la modificación de la técnica de Thomson será la técnica que emplearemos en nuestro proyecto para obtener la ganancia óptica modal. Para poder realizar dichas medidas es necesario disponer de un conjunto de amplificadores multisección de diferentes longitudes integrados todos en una misma pastilla. Las características de nuestro chip se analizarán detalladamente en el capítulo 3.

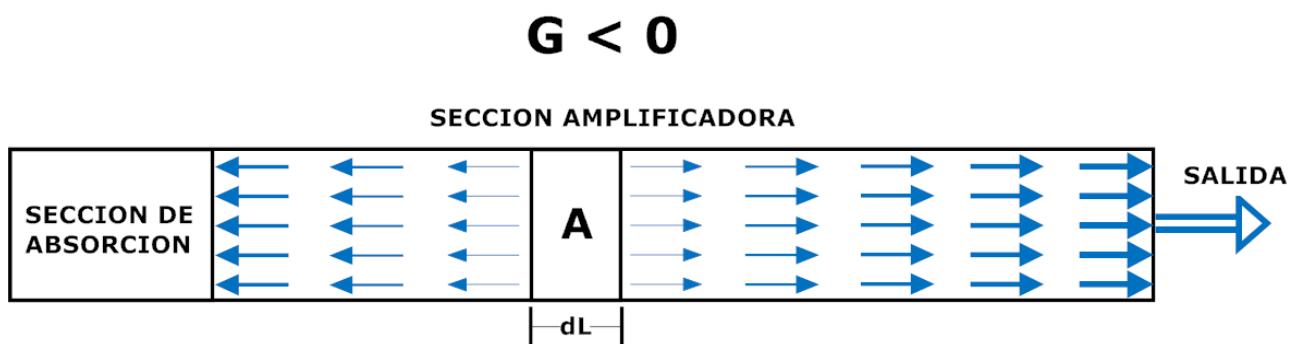
## 2.6 Limitaciones (Área de Trabajo)

A lo largo de este capítulo se ha comentado en numerosas ocasiones que para que las ecuaciones planteadas sean validas debe cumplirse que en el sistema láser multisección no exista realimentación alguna ni saturación de la ganancia, ahondemos ahora en el porqué de estas limitaciones y en cómo afectan al trabajo que pretendemos realizar.

La forma en que dichas limitaciones se reflejan en nuestro trabajo es limitando el valor máximo y mínimo de la densidad de corriente que nos proporciona una potencia de salida del espectro de la ASE adecuada.

Si inyectamos demasiada densidad de corriente aparece la realimentación y se satura el sistema láser comenzando a comportarse como un láser. El valor de densidad de corriente para el cual el sistema láser comienza a emitir luz láser depende de la temperatura, la longitud del SOA y el tipo de alimentación, pulsada o continua. El control de dicha limitación resulta fácil pues es posible revisar la forma de la medida del espectro de emisión de salida del sistema láser multisección en la pantalla del analizador de espectros, y verificar si su forma corresponde a una emisión ASE o a una emisión láser. En el capítulo 4.4.1 se analizará con detalle las formas de las emisiones ASE y láser de forma que podamos entender fácilmente cuando descartar una medida y cuando nos es útil.

La segunda limitación está relacionada con el valor de la ganancia óptica modal  $G$ . Teóricamente, la ecuación 2.2 es válida independientemente del valor de  $G$ , con lo que si  $G > 1$  la emisión espontánea se ve amplificada a lo largo del su recorrido a través del SOA, lo que significa que a más longitud mayor potencia de salida y que dicha potencia es función de las dimensiones del SOA. Este caso se ilustra en la figura 2.13.



**Figure 2.13 Funcionamiento del sistema láser de dos secciones cuando la ganancia es positiva ( $G > 0$ )**

Sin embargo, cuando la ganancia es negativa la emisión espontánea se ve atenuada a lo largo de su recorrido a través del SOA, tal y como muestra la ecuación 2.4.

$$P = \frac{P_{SP}}{G} [e^{GL_T} - 1] = - \frac{P_{SP}}{G} \left[ \frac{1}{e^{abs(G)L_T}} - 1 \right] \quad (2.4)$$

Esto significa que parte de los fotones generados por la emisión espontánea nunca alcanzan la salida, porque son reabsorbidos a lo largo de su viaje por la sección amplificadora del sistema láser. De forma que solo podemos detectar aquellos fotones que se han generado cerca de la salida ( $L \cong 0$ ). Por lo que la potencia de salida es independiente de la longitud de la sección amplificadora y las medidas obtenidas bajo estas

condiciones inútiles para nuestro estudio. La figura 2.14 nos muestra este proceso.

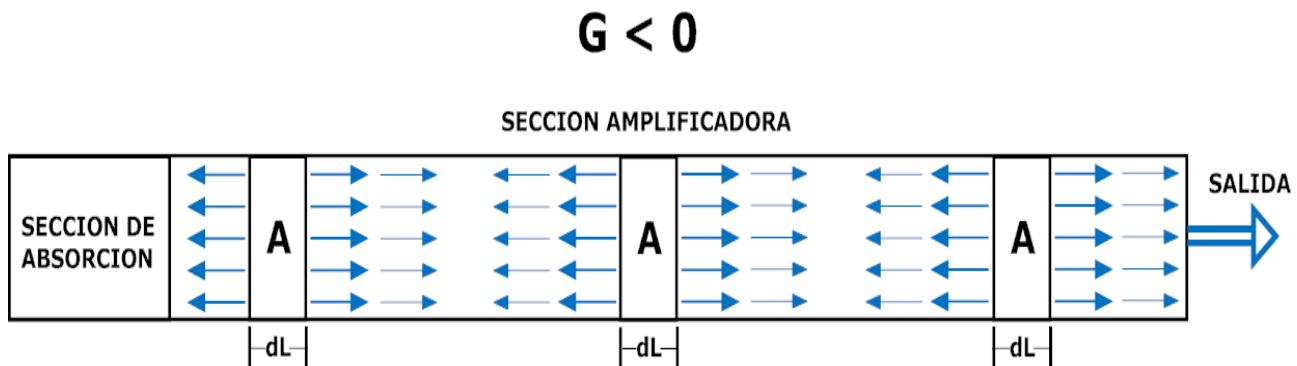


Figura 2.14 Funcionamiento del sistema láser de dos secciones cuando la ganancia es negativa ( $G < 0$ )

Podemos concluir que si la densidad de corriente aplicada es muy baja,  $G$  será menor a 0 y los resultados obtenidos inútiles. Esto implica que existe un límite inferior para la densidad de corriente que podemos aplicar que depende de la longitud del dispositivo, la temperatura del láser y el ciclo de trabajo (continuo o pulsado). El control de dicho límite es realmente complicado pues la única forma de verificar si en una medida  $G$  es mayor que cero es observando la forma de la ganancia óptica modal para lo cual es necesario recopilar un amplio conjunto de medidas de potencia y procesarlas. De forma que para nuestro estudio primero deberán tomarse las medidas de ASE y después de ser procesadas se deberá determinar si dichas medidas son válidas o no. En el capítulo cinco analizaremos detalladamente las diferentes formas que adopta la ganancia óptica modal y como determinar cuales nos son útiles. Tanto el límite superior como inferior de la densidad de corriente que puede aplicarse para obtener una medida valida de la potencia espectral de la emisión estimulada amplificada dependen de la temperatura del sistema láser, la longitud del láser y el ciclo de trabajo de la densidad de corriente, continuo o pulsado. Necesitamos definir de manera empírica los rangos válidos de la densidad de corriente en función de las variables antes mencionadas o área de trabajo, de forma que podemos realizar un trabajo adecuado.

Para hacer más comprensible las implicaciones que las limitaciones anteriormente analizadas tienen sobre nuestro experimento, si obviamos la dependencia de las medidas respecto a la variación de la longitud de los láser, lo que debemos obtener son dos diagramas en los que se representen el área de trabajo de nuestro experimento en función de la densidad de corriente y la temperatura, uno para el conjunto de medidas generadas usando una densidad de corriente continua (100%) y otra para aquellas en las que se usa una densidad de corriente pulsada (1%). La figura 2.15 muestra dicho diagrama de manera teórica.

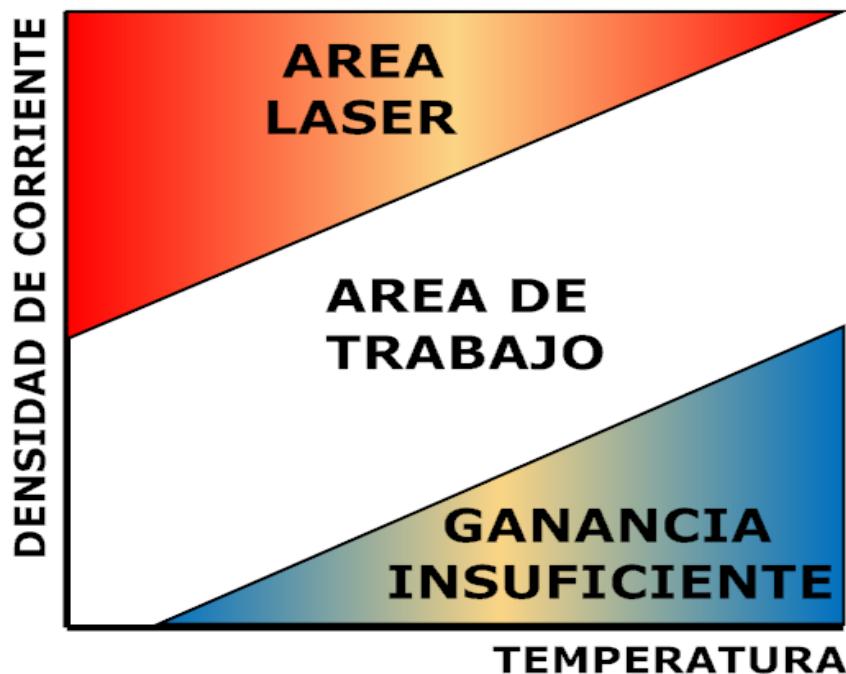


Figura 2.15 Área de trabajo

## 2.7 Resumen

El principal objetivo de este proyecto es describir la influencia de la temperatura en las medidas de la ganancia óptica modal, para lo cual recurriremos al experimento planteado en el capítulo 2.3 en el que a través de un análisis comparativo de la ganancia óptica modal se puede establecer el valor de la diferencia de temperatura existente entre el chip que utilizamos para realizar las medidas y el sensor de temperatura,  $\Delta T_x$ .

La idea es obtener un conjunto o set de medidas de la potencia de salida del espectro de la ASE de un amplio número de SOA de diferentes longitudes. De esta forma podemos obtener la expresión analítica de la ganancia a través de la curva de ajuste de  $G$  en base a la ecuación 2.2. Esta técnica es una modificación de la técnica de Thomson [14]. Posteriormente debemos repetir este proceso bajo diferentes condiciones de temperatura y densidad de corriente a lo largo del área de trabajo analizado de manera teórica en el apartado anterior, y que se concretara de manera empírica durante el proceso de medida a través del análisis de los resultados obtenidos. Esta última tarea debe hacerse dos veces una para corrientes de alimentación continua y otras para pulsada con un ciclo de trabajo del 1%. De esta forma obtenemos dos grandes conjuntos o set de medidas de la ganancia bajo diferentes condiciones de temperatura y densidad de corriente, cada uno para un tipo de alimentación, que podemos comparar entre sí. Si asumimos que cuando trabajamos alimentando el dispositivo láser con un ciclo de trabajo de un 1% la diferencia entre la temperatura real en el chip y la temperatura en el sensor de temperatura es cero, podemos obtener la diferencia existente cuando alimentamos el dispositivo con un ciclo de trabajo de 100%,  $\Delta T_x$ .

Debemos tener en cuenta que para poder realizar la comparación entre los resultados de los dos sets de ganancias debemos recurrir a alguna ecuación matemática que nos permita medir la distancia existente entre dos ganancias ópticas modales. Este tema es tratado en profundidad en el capítulo 5.



---

## FABRICACIÓN DEL CHIP

Para poder realizar nuestro estudio necesitamos fabricar en serie y de manera integrada en un mismo chip un conjunto de amplificadores ópticos, modelo guía de onda en cresta o *ridge waveguide* donde la cresta se orienta perpendicularmente a los planos de la cavidad, de diferentes longitudes pero idénticas características, de forma que podamos medir la emisión estimulada amplificada o ASE en ausencia de realimentación. Cada uno de estos amplificadores estará dividido en dos secciones eléctricamente independientes y aisladas, tal y como se puede observar en la figura 3.1. La sección más larga es alimentada de forma que actúe como sección amplificadora generando la potencia de salida de ASE que pretendemos medir, y que estará relacionado exclusivamente con el tamaño del esta sección del sistema láser. Por otro lado, para evitar que se produzca realimentación en el sistema y poder relacionar de manera directa la potencia de salida con la longitud de la sección amplificadora, la parte más corta se alimenta de manera inversa de forma que actué como sección atenuadora absorbiendo tanto los fotones emitidos en dirección contraria a la salida del sistema por la sección amplificadora como aquellos procedentes de la realimentación del sistema, ver figura 2.4. Con este sistema doble, las reflexiones de la cara final del sistema no deberían poder alcanzar la salida siempre y cuando trabajemos por debajo de la potencia de saturación del sistema láser, lo cual es una condición fácil de satisfacer dada la naturaleza de nuestro experimento. En la figura 3.1 se muestra el layout del chip, y en la 3.2 podemos ver una foto de dicho chip ya fabricado.

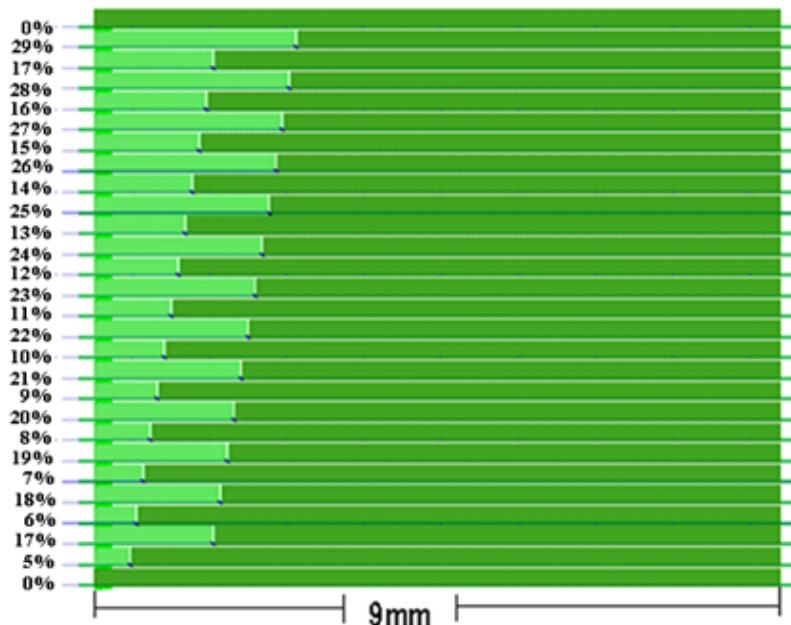
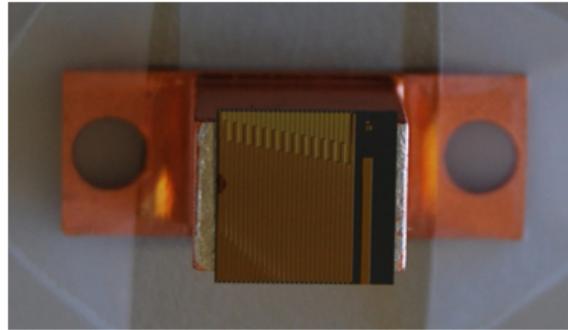


Figura 3.1 Layout del chip

La estructura de nuestros láser de puntos cuánticos ha sido crecida sobre un sustrato tipo n de *InP* (100) a través de un proceso de deposición epitaxial de vapor metal-orgánico o *metal-organic vaporphase epitaxy (MOVPE)*, como el que se detalla en [15]. Como región activa disponen de cinco finas capas apiladas de *InAs*, llamadas capas de puntos cuánticos o QD, entre cuyas superficies de contacto se crean puntos cuánticos o QD. Dichas capas están localizadas en el centro de una capa de guía de onda óptica de *InGaAsPn* de 500nm de longitud que hace de núcleo del sistema. Las capas de QD están diseñadas para emitir fotones cuya potencia espectral esté en el rango de longitudes de onda que va desde los 1600 a los 1800 nanómetros. El recubrimiento exterior del núcleo es una fina capa de 500 nm de grosor de *InP* tipo n, y el recubrimiento exterior del sistema láser es una capa de 1.5  $\mu\text{m}$  de grosor de *InP* tipo p. Finalmente, como capa de contacto se utiliza una composición graduada de 300 nm de grosor de *InGaAs* tipo p. Este sistema compuesto por múltiples capas apiladas es compatible con un proceso de integración extremo-junta activo-pasivo o *butt-joint active-passive*. Una guía de ondas integra la sección de amplificación y la absorción conformando el cuerpo del sistema láser. Dichas guías tienen un ancho de 2  $\mu\text{m}$  y están recubiertas por una capa de *InGaAs* tipo P de 100 nm de grosor. Para que las dos secciones de la guía de onda queden eléctricamente aisladas, se utiliza un dopaje altamente superior las superficies de contacto de las capas que las recubren. La canalización y aislamiento de ambas secciones se obtiene usando un proceso optimizado de acabado en seco en dos pasos a través iones reactivos *CH4 / H2* u *optimized CH4 / H2 two-step reactive-ion dry etch process*. Estas estructuras apiladas se aplana utilizando un polímero que contiene amideina. La evaporación y deposición de los metales que conforman los contactos o Pads de la parte superior del sistema se realizan de forma que se creen contactos independientes para ambas secciones. En la parte de abajo del sistema, el sustrato de *InP* tipo n se metaliza de forma que se cree un único contacto común para las dos secciones. El dispositivo final se monta en una estructura de cobre cuya superficie de contacto es tipo p. Es posible encontrar más información acerca de la fabricación de esta clase de chips en la documentación existente al respecto, [13].

Como se puede ver en la figura 3.1, en nuestro experimento contaremos con un chip en el que se han integrado en serie un total de 26 sistemas láser de 9 mm de longitud divididos en dos secciones cada uno. La longitud de la sección amplificadora varía entre los 6.30 mm, donde la sección atenuadora ocupa el 29% de la longitud total, a los 8.55 mm donde la sección atenuadora es solo el 5%. La figura 3.2 muestra una imagen real de nuestro chip. Dicho chip fue diseñado y fabricado por Bauke W. Tilma, tutor de este trabajo [14].



**Figura 3.2 Chip**



---

## TOMA DE MEDIDAS

Como explicamos en los capítulos anteriores, pretendemos realizar un estudio comparativo, de diferentes ganancias ópticas modales a diferentes temperaturas y para diferentes densidades de corriente, entre las muestras tomadas utilizando una corriente pulsada (1%) y las tomadas utilizando corriente continua (100%), para poder clarificar la influencia de la temperatura en las medidas de la ganancia óptica modal. Para lograrlo, obtendremos la ganancia óptica modal a través del proceso de ajuste de la ecuación 2.2, para lo cual debemos tomar un conjunto amplio de medidas de la ASE procedentes de amplificadores láser de diferente longitud. Esta técnica de medida se basa en una modificación de la técnica de Thomson.

Para poder obtener medidas de la ASE, del chip analizado en el capítulo 3, válidas para nuestro estudio debemos interconectar diferentes dispositivos de forma que podamos controlar el proceso de medida. Para empezar debemos ser capaces de canalizar la potencia de salida de la ASE hacia un analizador de espectros. Pero además, es necesario tener durante la toma de medidas un control preciso de la temperatura, la densidad de corriente aplicada en la sección amplificadora, la tensión aplicada a la sección de absorción y cuando trabajamos con señales pulsadas, el ciclo de trabajo de estas. El conjunto de los diferentes dispositivos que debemos utilizar para realizar la medida se conoce con el nombre de “Setup” y en nuestro caso debemos implementar dos Setup; uno para las medidas de la ASE en las que utilizamos densidad de

corriente continua o cuyo ciclo de trabajo es del 100% (Setup I), y otro para cuando utilizamos una densidad de corriente pulsada con un ciclo de trabajo del 1% (Setup II).

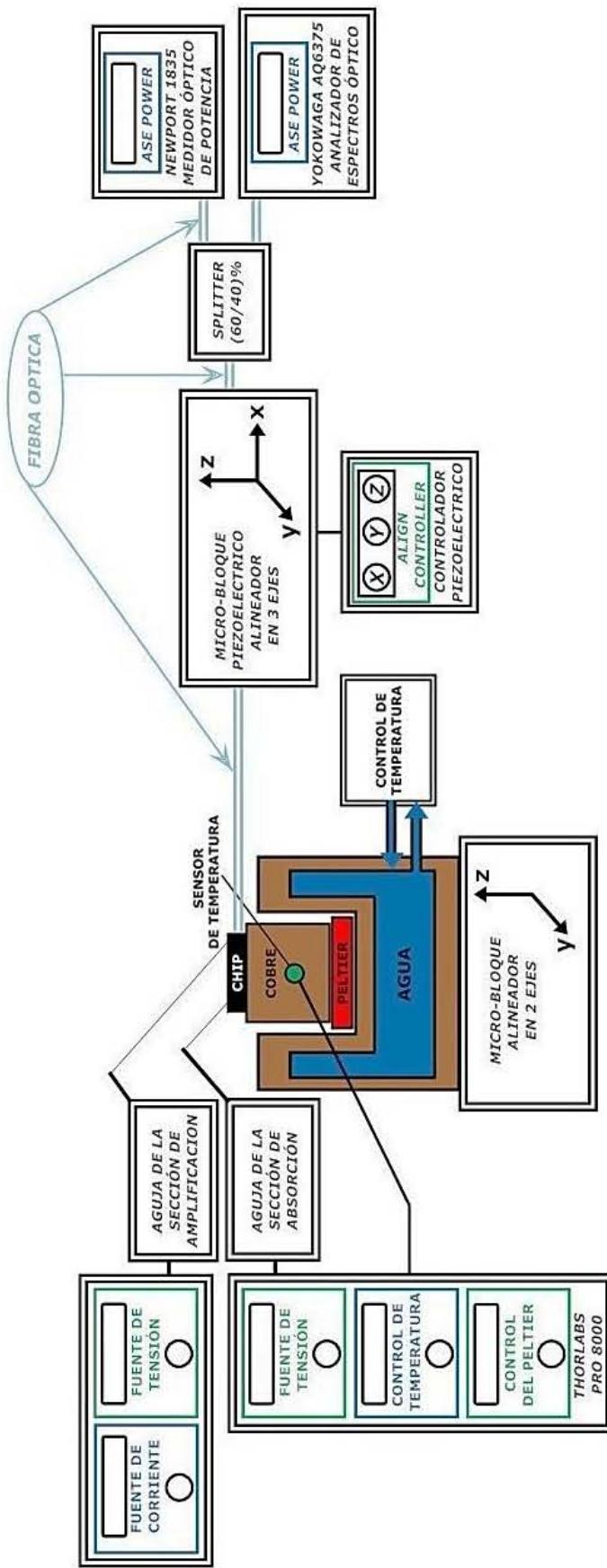
Por otro lado, para simplificar la explicación y comprensión del funcionamiento de ambos Setups, los dividiremos en diferentes sistemas en función de la tarea que desempeñan. Ambos Setups tienen los mismos subsistemas, pero con algunas diferencias. Los cuatro subsistemas que componen nuestros Setups son; el sistema de control de temperatura, el sistema de alimentación, el sistema de alineamiento y el sistema de medida. En este capítulo explicaremos cómo funcionan los Setups y los diferentes sistemas que los componen. Además, estudiaremos las diferentes precauciones que deben tomarse y los posibles problemas que pueden surgir durante el proceso de toma de medidas.

## 4.1 SETUP I - Densidad de Corriente Continua

### 4.1.1 Descripción

La figura 4.1 muestra un diagrama esquemático del Setup I (utilizando en la sección amplificadora una densidad de corriente continua, 100%), en el que se detallan los diferentes sistemas y los dispositivos que los componen.

*Estudio de la influencia térmica en las medidas de la ganancia óptica modal*



**Figura 4.1 Setup I.** Los bloques azules representan los dispositivos que miden, controlan y muestran la señal que aplicamos, mientras que los bloques verdes representan los dispositivos que generan las señales que se aplican al sistema.

## 4.1.2 Sistemas

### 4.1.2.1 Control de Temperatura

Como muestra la figura 4.2 nuestro sistema de control térmico esta subdivido en dos partes y su principal función es proporcionarnos un control efectivo de la temperatura. La primera parte del sistema está compuesta por una pequeña estructura sólida de cobre, el chip, un sensor de temperatura y un peltier. Un peltier es un dispositivo termoeléctrico compuesto por diferentes secciones semiconductoras tipo p y n alternadas interconectadas a través de conectores metálicos. Este dispositivo se basa en el efecto Peltier, del que recibe su nombre, y se controla por tensión permitiendo introducir o extraer calor. El peltier se controla a través del sistema de control de temperatura. Para mejorar la dispersión térmica entre nuestro chip y la estructura de cobre que lo soporta se esparce entre la superficie de contacto entre ambos un tipo especial de pasta conductora de temperatura llamada comúnmente “epotec”. Para controlar la temperatura en el chip introduciremos un sensor de temperatura en el centro de la estructura de cobre, pues no es posible colocarlo en contacto con el chip debido a su reducido tamaño y a su fragilidad, de forma que como ya estudiamos no medimos la temperatura real en el chip durante el proceso de toma de medida. No obstante es previsible, debido a la buena conductividad térmica del cobre y la pasta “epotec”, que la diferencia entre la temperatura medida y la real sea pequeña.

Por otro lado, la segunda parte del sistema de control térmico está compuesta por una gran estructura hueca de cobre por la que interiormente circula agua y que exteriormente contiene al sistema anterior. Conectando a esta estructura de cobre un dispositivo de control térmico a través del agua se elimina el exceso de calor generado por el peltier y se fija, aunque de manera poco precisa, la temperatura de la estructura de cobre hueca.

En ambos casos las estructuras de cobre utilizadas gozan de una buena conductividad térmica. Es necesario que las dos partes del sistema permanezcan fijas y que exista una buena conductividad térmica entre ellas, para lograrlo se utilizan una pareja de tornillos para fijar las estructuras y nuevamente se recurre a embadurnar las superficies de contacto con la pasta “epotec”.

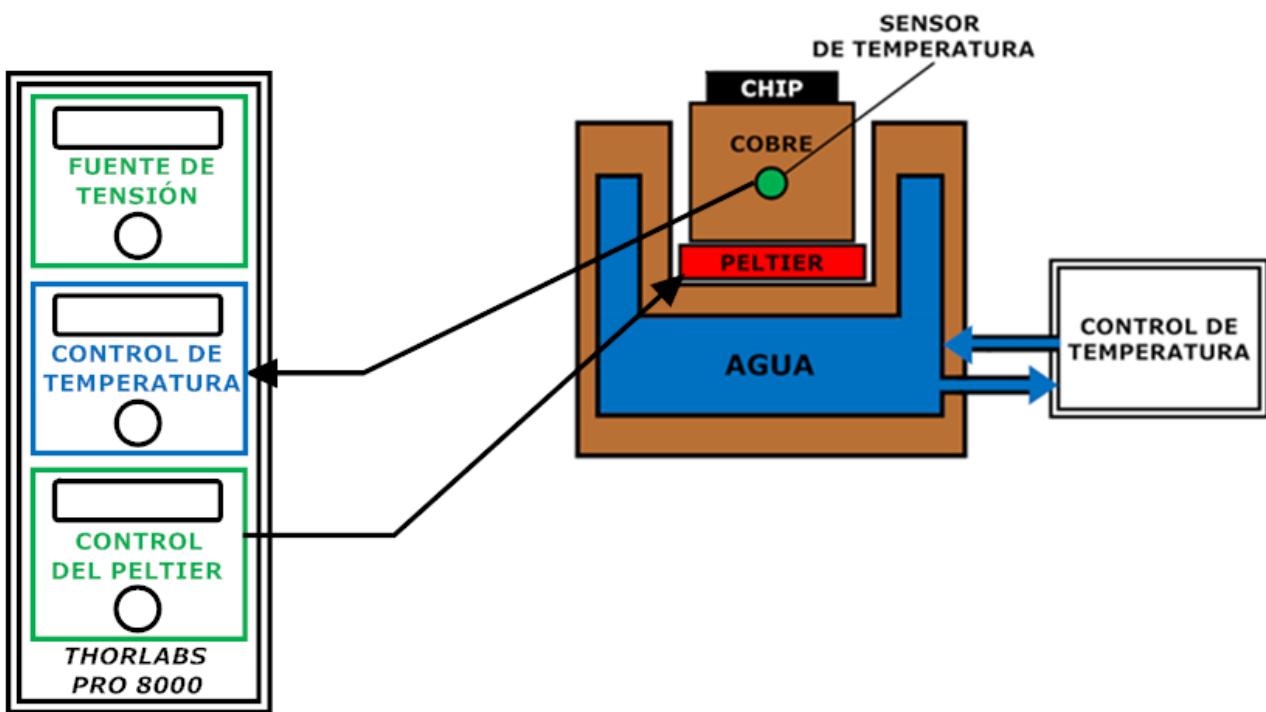


Figura 4.2 Sistema de control de temperatura. Los bloques azules representan los dispositivos que mide, controla y muestra la señal que aplicamos a la aguja, mientras que los bloques verdes representan los dispositivos que generan la señal que se aplican al sistema.

En la figura 4.3.A y 4.3.B podemos contemplar el funcionamiento del sistema de control térmico en sus dos fases. En la figura 4.3.A se muestra el proceso de transferencia de calor del chip al peltier, mientras que en la figura 4.3.B observamos el proceso contrario.

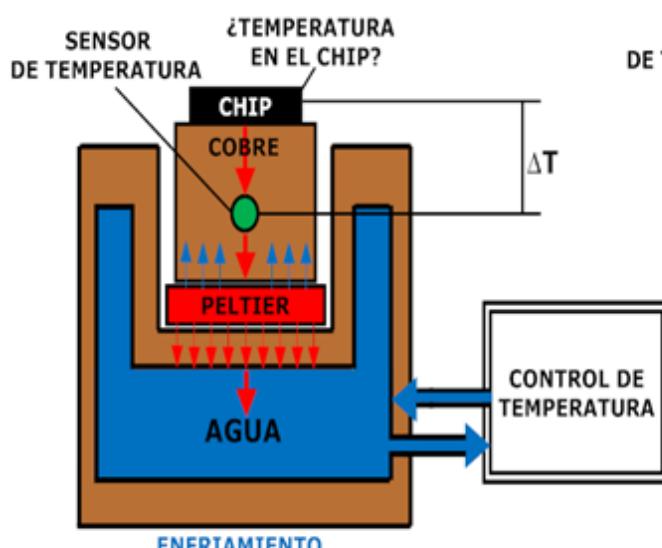


Figura 4.3.A

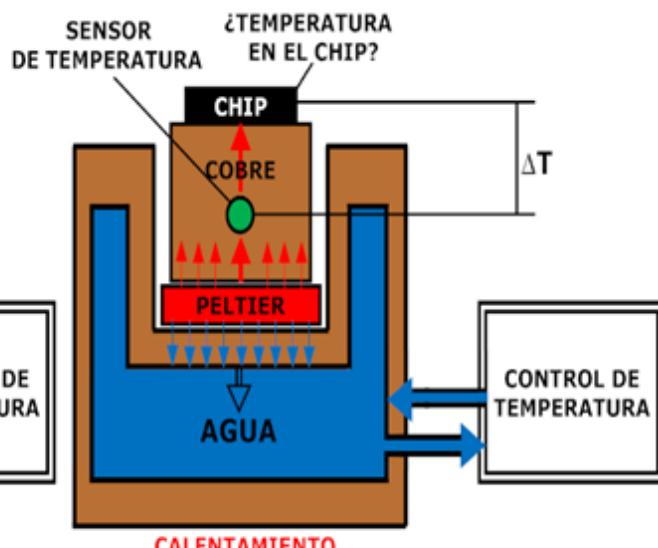


Figura 4.3.B

Figura 4.3 Modos de Operación del Sistema de Control de Temperatura. En la Figura 4.3.A el sistema está enfriando. En la Figura 4.3.B el sistema está calentando.

El ajuste general de la temperatura se realiza a través del refrigerador hidráulico. Este dispositivo fija la temperatura del agua que circula por el interior de la estructura de cobre hueca con una precisión de  $\pm 0.1$  grados y se encarga de compensar las variaciones de energía calorífica que introduce el peltier. Además, actúa como bomba hidráulica haciendo circular el agua por el interior de la estructura hueca de cobre. Sin embargo, el control de la temperatura a través del agua es lento e impreciso, a lo cual se debe la imprecisión de  $\pm 0.1$  grados en la temperatura, por lo que debemos asumir que con este sistema de control de la temperatura esta no queda fija a un valor, sino que oscila continuamente en torno a él haciendo que la temperatura del chip también oscile. Estas oscilaciones en la temperatura del chip se traducen en movimientos en la salida de la sección amplificadora lo cual reduce y dificulta la precisión del alineamiento.

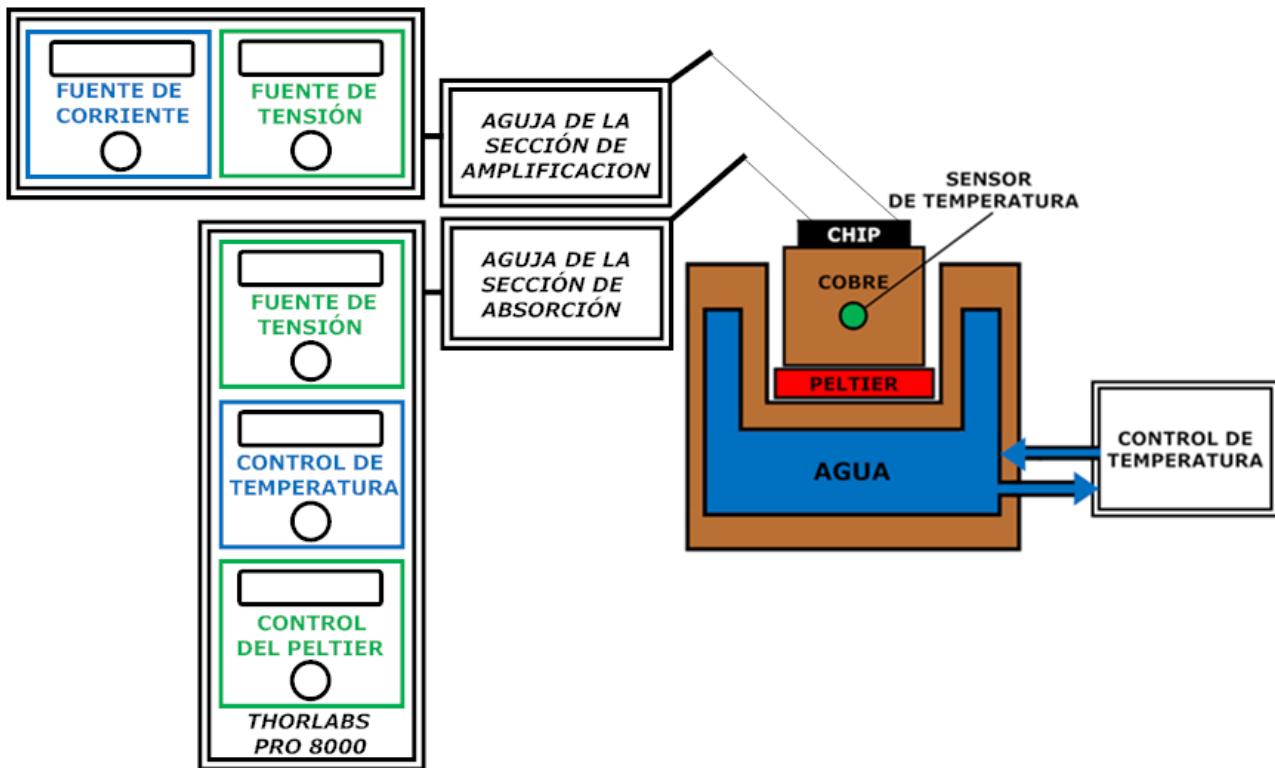
Para mejorar la calidad, precisión y estabilidad de nuestro sistema de control térmico utilizamos un peltier controlado a través de un sistema realimentado de controlador de temperatura. Dicho sistema utiliza las medidas del sensor de temperatura para regular las tensiones de alimentación del peltier, siendo capaz de fijar la temperatura en el chip de manera más rápida y con una precisión de  $\pm 0.001$  grados. Además con este sistema somos capaces de evitar las oscilaciones de temperatura en el chip, lo que simplifica el alineamiento. Como se explicó en el capítulo anterior, en nuestro chip hay integrados 26 sistemas láser de dos secciones de diferentes longitudes.

#### **4.1.2.2 Alimentación**

Ambas secciones de cada amplificador, la sección amplificadora, de mayor tamaño, y la sección de absorción deben estar correctamente alimentadas a fin de obtener las condiciones adecuadas que nos permitan realizar una medida de la ASE que podamos usar para realizar el ajuste de la ecuación 2.2.

La sección más corta del láser que utilizaremos para absorber fotones debe ser alimentada negativa o inversamente, aplicando un valor de tensión constante. Esto permite que esta sección elimine los fotones procedentes de la sección amplificadora y evite cualquier realimentación. El cumplimiento de esta última condición es vital para poder obtener medidas válidas de la ASE.

La sección más larga se alimenta positivamente con lo que actúa de sección amplificadora, utilizando para ello diferentes densidades de corriente generadas a través de una fuente de corriente. Con ello se consigue que el efecto de emisión estimulada que se ve amplificada a través del recorrido de los fotones por la cavidad láser, haciendo que la emisión de potencia ASE esté directamente relacionada con la longitud del láser siendo perfectamente válida para utilizarse como medida en el ajuste de la ganancia a través de la ecuación 2.2. La figura 4.4 nos muestra los diferentes dispositivos que componen el sistema de alimentación.



**Figura 4.4 Sistema de alimentación.** Los bloques azules representan los dispositivo que mide, controla y muestra la señal que aplicamos a la aguja, mientras que los bloques verdes representan los dispositivos que generan las señal que se aplican al sistema.

Debido al reducido tamaño de los amplificadores es necesario usar un tipo especial de agujas conductoras para poder transportar las distintas corrientes y tensiones desde sus fuentes a las secciones del amplificador. Además es necesario colocar la punta de la aguja sobre la superficie de dichas secciones las cuales son extremadamente delicadas. Este proceso se debe realizar manualmente a través del control visual utilizando un microscopio y un sistema de posicionamiento basado en engranajes. Todos los amplificadores tienen sus conexiones traseras o tomas de tierra interconectadas al sustrato del circuito, por lo que utilizaremos un hilo de cobre para interconectar el sustrato del chip con la estructura de cobre que lo soporta y cerrar así el circuito eléctrico.

### 4.1.2.3 Alineamiento

La potencia ASE emitida en la salida de la sección amplificadora debe ser canalizada hacia el interior de una fibra óptica. Para ello, necesitamos poder realizar un alineamiento preciso entre la salida del sistema láser y la entrada de fibra. Igual que en el caso del sistema de control térmico realizaremos el proceso de alineamiento en dos pasos, uno más general y otro mucho más preciso. La figura 4.5 nos muestra los distintos dispositivos que componen el sistema de alineamiento.

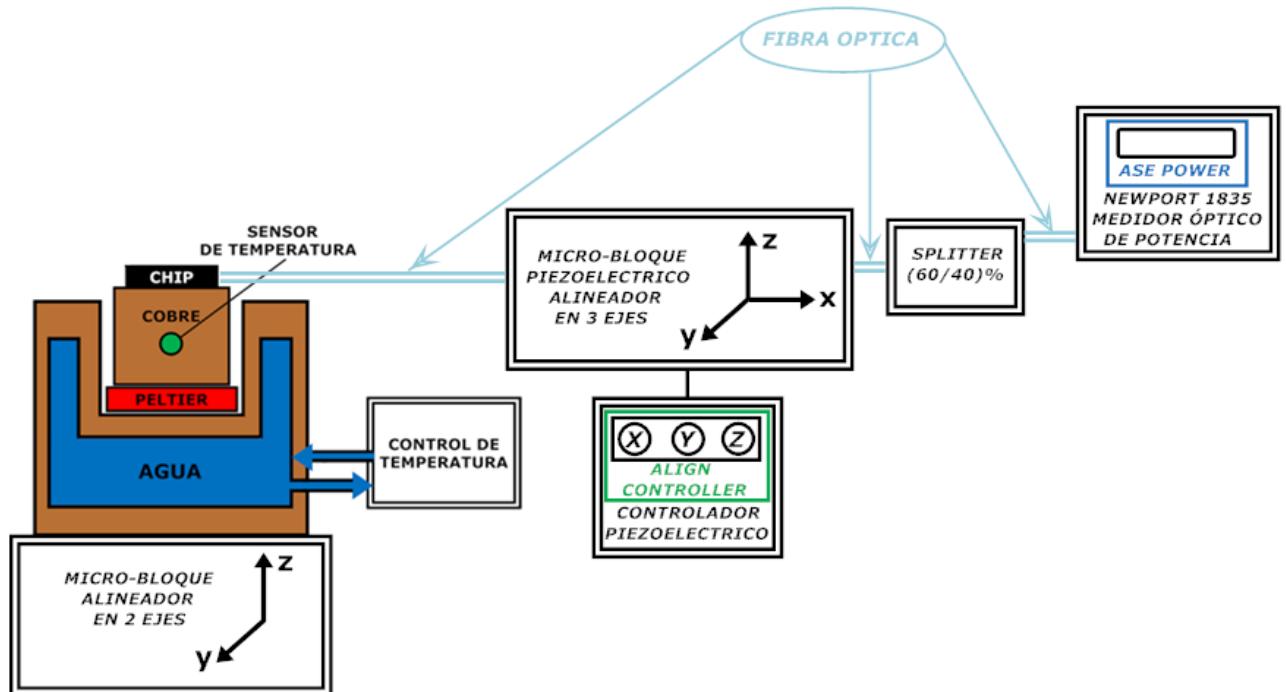


Figura 4.5 Sistema de alineamiento. Los bloques azules representan los dispositivo que mide, controla y muestra la señal que aplicamos a la aguja, mientras que los bloques verdes representan los dispositivos que generan las señal que se aplican al sistema.

El primer paso del proceso es el alineamiento general que se realiza manualmente a través de un sistema de engranajes. La idea es enfrentar la salida del sistema láser que pretendemos medir con la fibra óptica. Este proceso se controla visualmente con la ayuda de un microscopio y de un medidor de potencia óptica marca Netport modelo 1835. Comenzamos, utilizando el sistema de engranajes mientras miramos por el microscopio enfrentamos el láser y la fibra, y después con el mismo sistema de engranajes ajustamos el alineamiento utilizando el medidor de potencia óptica tratando de canalizar la máxima potencia posible. Debemos tener en cuenta que el medidor de potencia óptico debe estar calibrado para trabajar a la longitud central del espectro de emisión.

El segundo paso del proceso está enfocado a aumentar la precisión de nuestro alineamiento utilizando para ello un Controlador Piezoelectrónico. Tal y como se ve en la figura anterior, este dispositivo esta interconectado al sistema de engranajes de la fibra óptica y puede controlarlo, si bien los rangos de desplazamiento son muy limitados. Nuevamente este proceso se controla a través del medidor de potencia óptica, llegando a conseguirse con este sistema doble alineaciones realmente precisas. No obstante, cada vez que modifiquemos la temperatura del sistema o la densidad de corriente aplicada se modificará la temperatura en el chip, lo cual generara perturbaciones que desajustaran el alineamiento, por lo que será necesario repetir este segundo paso del proceso.

#### 4.1.2.4 Medida

Una vez ajustada la temperatura, la alimentación del sistema y el alineamiento del láser y la fibra podemos retirar el medidor óptico de potencia y utilizar el analizador de espectros para obtener y guardar las medidas de la ASE. Dichas medidas se tomarán con una resolución espectroscópica de 1 nm sobre 300nm (SPAN), siendo la longitud de onda central de la medida 1700nm y disponiendo para la interpolación de la imagen de un total de 3001 puntos. Las medidas se guardan en un fichero de formato CVC que puede ser fácilmente manipulado por la herramienta software MatLab. Con esta configuración nuestro analizador de espectros tarda aproximadamente tres minutos en tomar una medida. La figura 4.6 muestra el único dispositivo que compone el sistema de medidas.

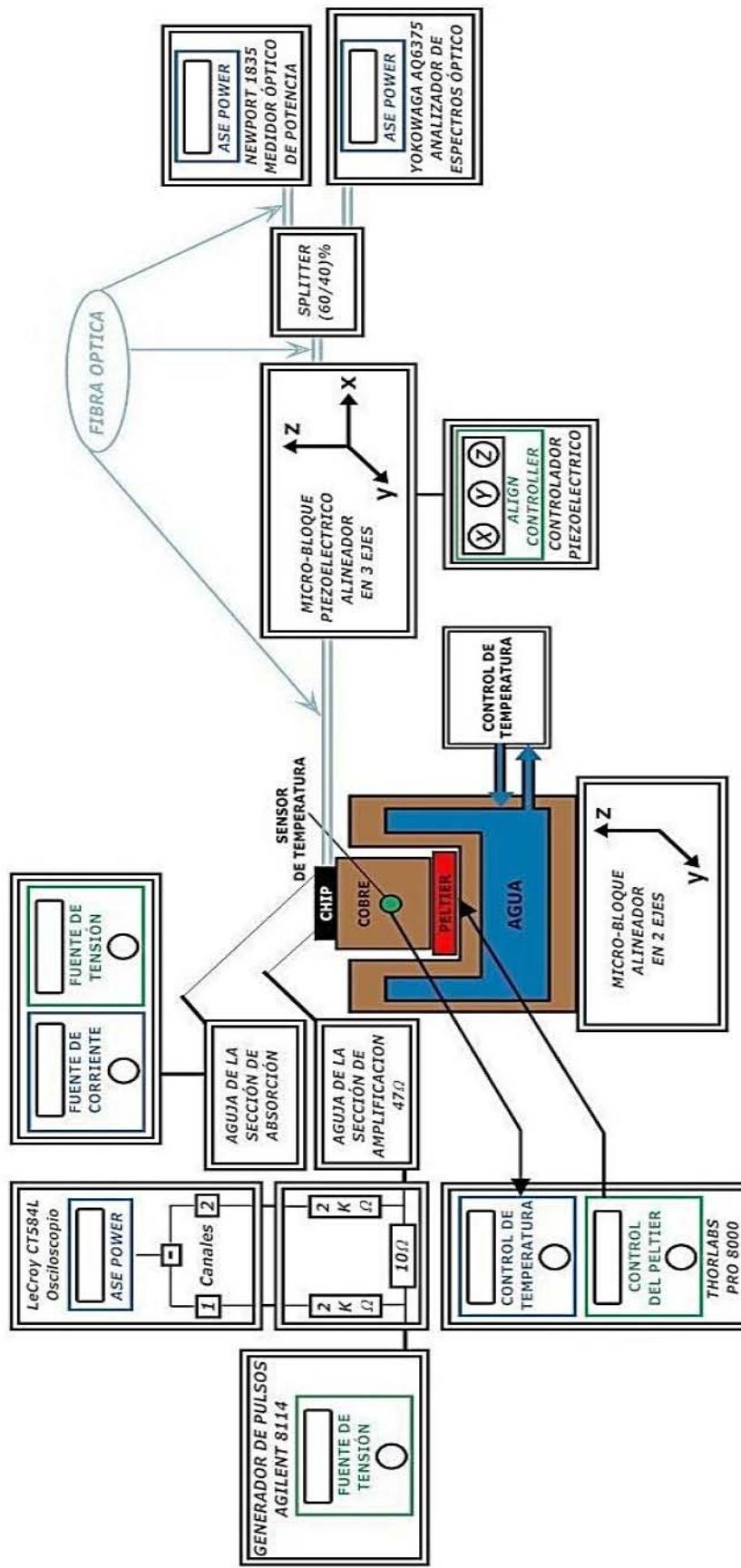


Figura 4.6 Sistema de medida

## 4.2 SETUP II- Densidad de Corriente Pulsada

### 4.2.1.1 Descripción

La figura 4.7 muestra el diagrama esquemático del Setup II detallando los diferentes sistemas y los dispositivos que los componen.



**Figura 4.7 Setup II.** Los bloques azules representan los dispositivos que mide, controla y muestra la señal que aplicamos a la aguja, mientras que los bloques verdes representan los dispositivos que generan la señal que se aplican al sistema.

## 4.2.2 Sistemas

Como podemos ver los sistemas de control de temperatura y el sistema de alineamiento son exactamente iguales a los del Setup I, que ya quedaron completamente definidos por lo que nos limitaremos a centrarnos en los sistemas de alimentación y medida.

### 4.2.2.1 Alimentación

Tal y como vemos en la figura 4.8, para generar una densidad de corriente pulsada estable con un ciclo de trabajo del 1% debemos remplazar la fuente de corriente por un generador de pulsos marca Agilent modelo 8114, un osciloscopio y un divisor de corriente.

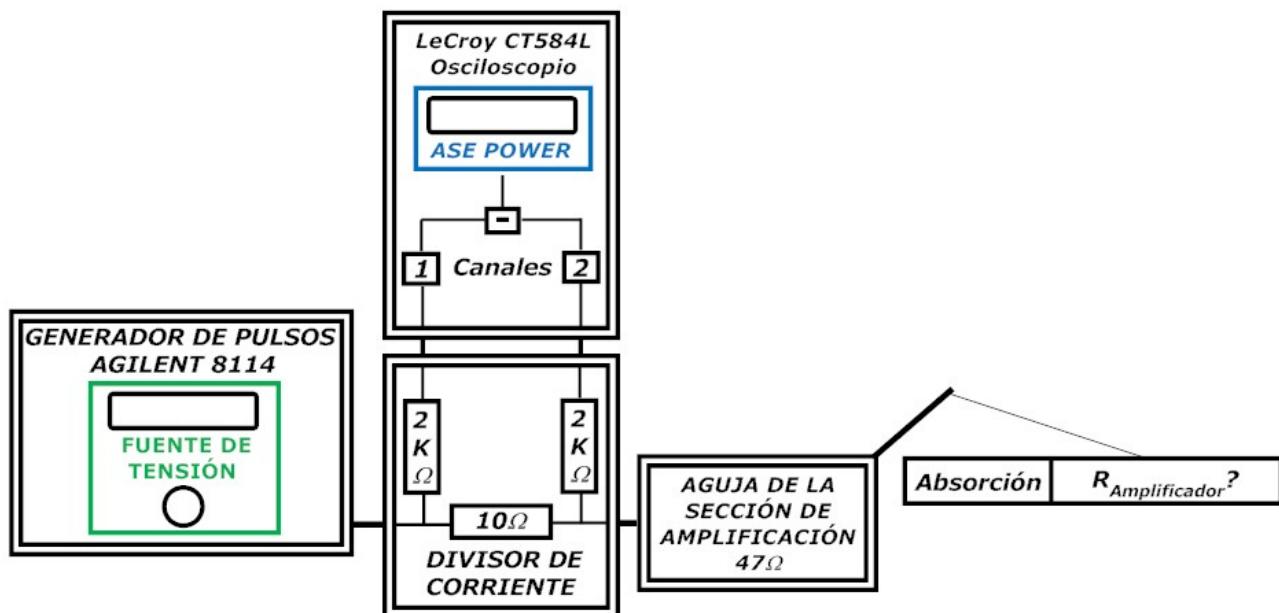


Figura 4.8 Sistema generador de pulsos. Los bloques azules representan los dispositivos que mide, controla y muestra la señal que aplicamos a la aguja, mientras que los bloques verdes representan los dispositivos que generan la señal que se aplican al sistema.

Con el generador de pulsos podemos controlar la frecuencia y el ciclo de trabajo de la señal, sin embargo este dispositivo solo nos permite fijar la tensión de la señal no la densidad de corriente, que es lo que necesitamos controlar para obtener el set de medidas de la ASE de este segundo Setup II. Para solventar esta limitación utilizaremos el divisor de potencia mostrado en la figura 4.8, donde se muestra que la señal de tensión de salida del generador de pulsos se distribuye en su mayoría en dos resistencias de  $2\text{ K}\Omega$ , si bien una pequeña parte del total de la potencia se aplica a una resistencia de  $10\text{ }\Omega$ . Usando un osciloscopio podemos medir el nivel de tensión que aplicamos a ambos brazos del divisor de potencia (las resistencias de  $2\text{ K}\Omega$ ) y representar la diferencia entre ellos debida a la resistencia de  $10\text{ }\Omega$ . Conociendo el valor de la tensión que cae en la resistencia de  $10\text{ }\Omega$  y aplicando la ley de Kirchhoff conocemos el valor aproximado de la corriente que

sale del divisor de potencia y alimenta la sección amplificadora. Como conocemos las dimensiones de dicha sección podemos calcular la densidad de corriente aplicada. Como podemos ver en la figura 4.8 la aguja que antes utilizábamos para alimentar la sección amplificadora ha sido remplazada por una cuya impedancia es fija y conocida  $47\ \Omega$ . Dicho valor se debe a que el valor total de resistencia de salida, que es la suma de la resistencia de la aguja y la resistencia de la sección amplificadora, debe ser cercano a los  $50\Omega$ , para asegurar una buena transferencia de potencia entre la salida del divisor de potencia y la sección amplificadora.

Sin embargo debemos tener en cuenta que la resistencia de la sección amplificadora depende de su longitud, por lo cual debemos averiguar si dichas variaciones afectan a la densidad de corriente que aplicamos. La única forma de averiguarlo es comparando la cantidad de corriente que atraviesa la resistencia de  $10\Omega$  cuando la aguja alimenta la sección amplificadora de mayor tamaño con cuando alimenta la de menor tamaño, bajo las mismas condiciones de temperatura, frecuencia, tensión y ciclo de trabajo. Para intentar maximizar esta diferencia, se utilizó la mayor densidad de corriente permitida para no dañar el láser, que es de  $5000\text{A}/\text{cm}^2$ . No obstante no fue posible percibir diferencia alguna, y se achaca al hecho de que la resistencia de  $47\ \Omega$  de la aguja es muy grande en comparación con la del amplificador que se sitúa en torno a los  $6\Omega$ .

Por otro lado, nuestro generador de pulsos se configura para trabajar con un ciclo de trabajo de un 1% y a una frecuencia de 2KHz, por lo cual solamente durante el uno por ciento del tiempo estamos aplicando energía, lo que significa que en comparación con el Setup I en este estamos aplicando 20dB menos de potencia. En otras palabras, la potencia que aplicamos a la sección amplificadora ( $VxI$ ) se ve multiplicada por el ciclo de trabajo ( $\tau$ ).

#### **4.2.2.2 Medida**

Como comentamos al final del párrafo anterior, al trabajar con una corriente pulsada aplicamos 20dB menos de potencia en comparación con el Setup I, lo que significa que la potencia de la ASE emitida es 20dB menor y está 20dB más cerca del umbral o falda de ruido. Como consecuencia de todo esto, las medidas tomadas en el Setup II son considerablemente más ruidosas que las del primero, siendo necesario realizar algunas modificaciones en la configuración del analizador de espectros para obtener mejores resultados. Lo que haremos será aumentar la resolución, lo cual vuelve la toma de medidas del analizador de espectro considerablemente más lenta aumentando el tiempo que debe emplearse para obtener el set de medidas del Setup II. Basándonos en la experiencia obtenida del estudio de la forma de las ASE del Setup I se llegó a la conclusión de que puede utilizarse un SPAN menor al del dicho setup, pues las emisiones espectrales de salida de los láser se confunden con la falda de ruido a  $\pm 100\text{nm}$  de la longitud de onda central, 1700 nm. Por ello, para reducir el tiempo que tarda el analizador de espectros en tomar una medida se reducirá

el SPAN hasta los 200nm.

Para el Setup II, las medidas se tomarán con una resolución espectroscópica de 0.5 nm sobre 200nm (SPAN), siendo la longitud de onda central de la medida 1700nm y disponiendo para la interpolación de la imagen de un total de 3001 puntos. Las medidas se guardan en un fichero de formato CVC que puede ser fácilmente manipulado por la herramienta software MatLab. Con esta configuración nuestro analizador de espectros tarda aproximadamente cinco minutos en tomar una medida.

### **4.3 Set de Medidas de las ASE**

Debemos determinar de manera empírica el número de medidas de la ASE que consideramos suficiente para poder obtener de ellas una estimación viable de la ganancia óptica modal. Para poder determinar dicho número debemos tomar medidas de los 26 sistemas láseres que conforman nuestro chip bajo las mismas condiciones de temperatura y densidad de corriente, tanto para el Setup I como el Setup II. Despues de esto, estimaremos la ganancia óptica modal utilizando tan solo 3 medidas de la ASE. Posteriormente, iremos estimando la misma ganancia óptica modal utilizando cada vez un número mayor de medidas, hasta calibrar el número adecuado de medidas que nos permita obtener resultados óptimos de la ganancia sin emplear un tiempo excesivo durante el proceso de toma de medidas.

Utilizando este proceso descubrimos que para el Setup I bastó con utilizar solo 7 medidas de la ASE procedentes de amplificadores de diferentes longitudes para obtener una medida adecua de la ganancia óptica modal. Sin embargo, para el Setup II fueron necesarias hasta 14 medidas para obtener unos resultados de calidad similar a la del Setup I. El motivo es que en el Setup II estamos aplicando 20 dB menos de potencia que en el Setup I, por lo que las medidas obtenidas de la ASE están 20dB más cerca de la falda de ruido, haciendo necesario utilizar más medidas. En ambos casos añadir más medidas a la estimación no mejoraba la calidad de la medida de la ganancia óptica modal estimada.

Como finalmente no utilizaremos todos los dispositivos láseres del chip debemos, a fin de obtener unos mejores resultados, maximizar el rango completo de longitud de los amplificadores ópticos que utilizaremos para realizar nuestros Sets de medidas y tratar de maximizar la distancia entre ellos. No obstante durante el proceso de toma de medidas algunos sistemas láseres se dañaron irreversiblemente, por lo que no fue posible utilizar siempre los mismos para todas las medidas, si bien se trato de preservar la máxima anunciada anteriormente. Los diferentes motivos que dañaron a los sistemas láseres se analizarán en secciones posteriores de este mismo capítulo. En el apéndice B se muestra una información detallada y precisa acerca del algoritmo utilizado para estimar la ganancia óptica modal a partir de las medidas de la ASE.

Por otro lado, durante el proceso de toma de medidas con el que pretendemos conformar nuestros sets de medidas utilizaremos un rango de densidades de corriente de 500 a 5000 A/cm<sup>2</sup> con un paso de 500A/cm<sup>2</sup>. Respecto al rango de temperaturas para ambos Setups será de entre 10 y 40 grados centígrados si bien el paso variará, siendo de 3 y 2 grados para el Setup I (10,13,15,17,20,...,40) y de 5 grados para el Setup II (10,15,20,25,...,40). De esta forma obtendremos dos grandes grupos o sets de medidas; uno utilizando una densidad de corriente con un ciclo de trabajo del 100% (Setup I) que está compuesto de 910 medidas de la ASE ( $13*10^7$ ) y otro utilizando un ciclo de trabajo 1% (Setup II) compuesto de 980 medidas de la ASE ( $7*10^{14}$ ). Sin embargo debemos recordar las limitaciones existentes, analizadas en el capítulo 2.6, a la hora de obtener medidas de la ASE válidas para estimar de manera analítica la ganancia óptica modal a través de la ecuación 2.2. Esto significa que existen combinaciones de temperatura, densidad de corriente, longitud de la sección amplificadora y ciclo de trabajo de la densidad de corriente para las cuales no es posible obtener una medida válida de la ASE, porque para dicha combinación o bien se está produciendo saturación en la región de absorción y realimentación en el sistema láser o bien la ganancia óptica modal emitida es demasiado débil y no representa la totalidad de la longitud de la sección amplificadora.

De manera empírica, durante el proceso de medida, podemos reducir el número de medidas que debemos tomar teniendo en cuenta la primera de las dos limitaciones planteadas anteriormente. En otras palabras, si para una relación dada de temperatura, densidad de corriente y longitud de la sección amplificadora del sistema láser la saturación está teniendo lugar en la región de absorción y hay realimentación en el sistema, en el resto de medidas que impliquen aumentar la densidad de corriente o reducir tanto la longitud de la sección amplificadora como la temperatura ocurrirá lo mismo.

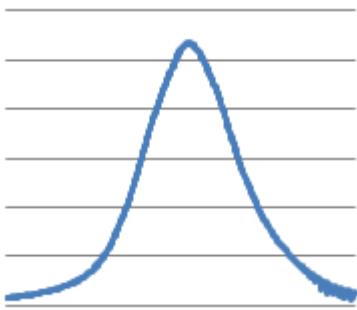
## 4.4 Problemas Encontrados y Precauciones

En este apartado hablaremos acerca de los problemas encontrados durante la toma de medidas y de las precauciones que deben tomarse para prevenir posibles daños sobre el chip.

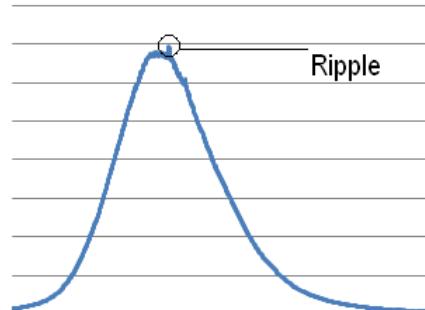
### 4.4.1 Forma de las Medidas de la ASE

Es necesario estar seguro de que todas las medidas que utilicemos han sido tomadas de forma adecuada satisfaciendo las condiciones que nos permitan aplicar la ecuación 2.6. Como comentamos anteriormente, podemos controlar el correcto funcionamiento de la sección de absorción, asegurando que la saturación no toma lugar, revisando la forma de la medida de la ASE en la pantalla del analizador de espectros.

Las figuras 4.9.A y 4.9.B nos muestran dos posibles formas que puede adoptar las medidas del espectro de la ASE. En la figura 4.9.A se muestra una medida en la que la saturación no está tomando lugar en la sección de absorción por lo que la medida es perfectamente válida, mientras que en la figura 4.9.B podemos ver como en torno al pico de la respuesta de la ASE aparecen pequeños picos, de lo que se deduce que la sección de absorción comienza a estar saturada, por lo que la medida no nos es útil. En otras palabras, algunos fotones están consiguiendo atravesar y volver de la sección de absorción añadiéndose a la emisión estimulada amplificada, lo cual motiva la aparición del comportamiento láser del sistema y se ve reflejado en la pantalla del espectro en forma de pequeños picos entorno al máximo de la ASE.



**Figure 4.9.A** Respuesta óptima de la ASE



**Figuras 4.9** Formas de la emisión espontánea amplificada

Resumiendo, podemos controlar el correcto funcionamiento de la sección de absorción mirando la forma de la medida, con lo que sabes a simple vista si es útil o no. En principio podríamos pensar en aumentar la cantidad de densidad de corriente que recorre la sección de absorción para evitar que ocurra la saturación sin embargo el tamaño de dicha sección es muy reducido y se corre el riesgo de dañar el sistema láser. Por ello fijaremos la densidad de corriente a  $100 \text{ A/cm}^2$ .

#### 4.4.2 Precisión en las Medidas

Debemos tener en cuenta que en nuestro sistema de medida existe un error de precisión significativo, es decir que si tomamos dos medidas sobre el mismo dispositivo bajo las mismas condiciones de densidad de corriente, temperatura, ciclo de trabajo, etc, pero en días diferentes, los resultados no son iguales. El motivo es que existen diversos factores que pueden tener cierto grado de influencia en la emisión espontánea amplificada, como por ejemplo una ligera diferencia en el alineamiento. Estos pequeños errores pueden acabar afectando al algoritmo de ajuste que utilizamos para estimar de la ganancia óptica modal.

Para poder reducir o minimizar las consecuencias de esta falta de precisión en nuestro sistema de medida siempre que calibremos y ajustemos el Setup para tomar una medida de un amplificador aprovecharemos para tomar consecutivamente medidas del resto de amplificadores de forma que no tengamos

que variar ni la temperatura ni la densidad de corriente solo la longitud del sistema láser. De esta forma obtendremos de manera consecutiva las 7 (Setup I) o 14 (Setup II) medidas que necesitamos para obtener una estimación de la ganancia óptica modal.

#### **4.4.3 Adecuación de la Distribución de Potencia**

Para poder obtener una medida lo más correcta posible de la potencia de la ASE emitida, debemos tratar de tener una distribución de potencia homogénea a lo largo y ancho de las secciones de absorción y amplificación.

Para tratar de asegurar que dicha distribución sea homogénea debemos colocar la punta de las agujas que utilizamos para alimentar ambas secciones en el centro de las mismas. De no hacerse así y colocarse la aguja cerca de alguno de los extremos del sistema láser, que actúan como fronteras de aislamiento eléctrico, corremos el riesgo de que antes de distribuirse la corriente aplicada atraviese el aislamiento dañando irremisiblemente las dos secciones que pretendíamos aislar.

Por otro lado debemos tener en cuenta que el proceso de aterrizaje de la punta sobre la superficie de las distintas secciones debe realizarse muy cuidadosamente pues la superficie de contacto es muy frágil, y además la punta debe tener contacto completo con la superficie del chip porque si el contacto solo es parcial podemos dañar el chip al aplicar mucha corriente sobre un área de contacto muy pequeña.

#### **4.4.4 Limitaciones Térmicas**

Debemos tener en cuenta que nuestro chip tiene unas limitaciones físicas en lo relativo a la temperatura que puede soportar, por lo que debemos limitar el margen de temperaturas en las que nuestro chip puede trabajar sin sufrir daños. Si aplicamos al chip una temperatura demasiado baja, se corre el riesgo de condensar sobre la superficie del chip el agua que contiene el aire lo cual lo dañaría, por otro lado si el chip se ve sometido a temperaturas demasiado altas posiblemente se producirán daños en la estructura interna del chip. Por ello para este estudio se eligió un rango seguro de temperaturas que va desde los 10 a los 40 grados centígrados.

#### **4.4.5 Vibraciones**

Las superficies de contacto sobre la que se apoyan las agujas que utilizamos para alimentar las secciones de absorción y amplificación de nuestro sistema láser son extremadamente frágiles, por lo que el proceso de aterrizaje de la punta sobre la superficie de las distintas secciones debe realizarse muy cuidadosamente

para prevenir cualquier daño posible sobre la superficie. Pero además, debemos tener en cuenta que cualquier vibración que afecte al chip o a la aguja puede destrozar completamente todo lo que se encuentre a su paso. Para limitar el daño que pueden causar las vibraciones nuestros setups se construyen sobre una sólida mesa que se apoya sobre unas patas que expulsan aire de forma que entre la superficie de contacto de la mesa y la pata existe un colchón de aire que amortigua las vibraciones aislando la mesa del suelo.

#### **4.4.6 Área de Contacto**

Debido al pequeño tamaño de la punta de la aguja y a las altas densidades de corriente que vamos a utilizar, debemos prevenir que durante el proceso e aterrizaje de la aguja sobre las superficies de absorción o amplificación se cree un arco eléctrico desde la punta de la aguja hacia la superficie del chip que irremisiblemente lo dañaría. Para prevenir esta posibilidad, siempre que realicemos el proceso de aterrizaje o retirada de la aguja, esta debe estar descargada.



---

## PROCESADO DE DATOS

En este capítulo hablaremos sobre como estimar la ganancia óptica modal a partir de las medidas de la ASE que hemos obtenido utilizando los Setup analizados en el capítulo 4. Lo primero que tenemos que hacer es organizar las medidas de la ASE en carpetas de forma que podamos acceder a ellas de manera rápida y sencilla. Después analizaremos como podemos ajustar la ecuación 2.2 para que utilizando las medidas de la ASE podamos obtener la ganancia óptica modal. Posteriormente, hablaremos sobre las características de la ganancia óptica modal. A continuación clasificaremos las ganancias ópticas modales agrupando aquellas que utilizan la misma densidad de corriente y ciclo de trabajo, pero bajo diferentes temperaturas, para poder describir cómo influye la temperatura en las medidas de la ganancia óptica modal. Finalmente, realizaremos un estudio sobre las diferentes técnicas matemáticas que podemos utilizar para comparar las diferentes ganancias ópticas modales, ya que una comparación meramente visual no es suficiente. Tanto para estimar la ganancia óptica modal como para realizar el estudio comparativo entre ellas utilizaremos la herramienta software MatLab.

### 5.1.1 Ficheros de Medidas de las ASE

Para comenzar debemos organizar las distintas medidas de la ASE de forma que todas las medidas necesarias para obtener una única ganancia óptica modal estén en una única carpeta. Además, para poder realizar ajustes de parámetros de manera secuencial y reducir así el número de carpetas, agruparemos en carpetas las medidas necesarias para obtener una única ganancia óptica modal tomadas bajo las mismas temperaturas y ciclos de trabajo.

En la figura 5.1 se muestra una captura de un documento de Microsoft Excel, donde podemos ver una descripción de las características de las medidas de la ASE necesarias para obtener las ganancias ópticas modales para una determinada temperatura. Este fichero esta divido en bloques de columnas que describen las medidas de la ASE para una determinada densidad de corriente. Estos bloques se disponen consecutivamente en función del valor de la densidad de corriente, desde los 5000 hasta los  $500 \text{ A/cm}^2$  con pasos de  $500 \text{ A/cm}^2$ . Las columnas que conforman cada bloque muestra por este orden; el porcentaje sobre la longitud total del sistema láser que ocupa la sección de absorción, la longitud en milímetros de la sección de amplificación, la densidad de corriente aplicada, la potencia en dB captada por el medidor de potencia óptico y el nombre del fichero generado por el analizador de espectros al capturar la medida. De esta forma conformamos un único documento que compendia todas las medidas y sus características, para una temperatura y un Setup concreto. Esto nos servirá para detectar y corregir errores, además de servir como base de datos para el proceso de estimación paramétrico de las ganancias ópticas modales. Al usar en el Setup I siete temperaturas diferentes y trece en el Setup 2, debemos llenar un total de veinte ficheros.

% of the absorption section	Current Density	Name of the ASE Spectrum Power File	Name of the ASE Spectrum Power File	Current Density	Name of the ASE Spectrum Power File
0	0	5000	-7.63 W_fk1_30	4500	-8.84 W_fk1_30 ....
0	0	5000	-26.9 W_fk2_30	4500	-27.46 W_fk2_30 ....
29	6390	5000	0 WD006_30	4500	-18.85 WD007_30 ....
27	6570	5000	0 XXXXXXXX	4500	-18.25 WH010_30 ....
24	6840	5000	0 WC007_30	4500	-18.12 WC008_30 ....
21	7110	5000	0 XXXXXXXX	4500	-17.6 WG009_30 ....
18	7380	5000	0 XXXXXXXX	4500	0 XXXXXXXX ....
15	7650	5000	0 XXXXXXXX	4500	0 XXXXXXXX ....
12	7920	5000	0 XXXXXXXX	4500	0 XXXXXXXX ....
8	8280	5000	0 XXXXXXXX	4500	0 XXXXXXXX ....
5	8850	5000	0 XXXXXXXX	4500	0 XXXXXXXX ....
Length of the amplifier Section		Total ASE Spectrum Power	Total ASE Spectrum Power	Total ASE Spectrum Power	Total ASE Spectrum Power

Figura 5.1 Fichero Microsoft Excel

Por cuestión de espacio en la figura 5.1 solo se muestran 3 de los 10 bloques. Los valores mostrados corresponden con el Setup I para una temperatura de 30 grados. La notación “XXXXXXX” como valor del campo nombre del fichero que contiene la medida, significa que para esa combinación de temperatura y densidad de corriente la medida obtenida no era válida.

## 5.2 Algoritmo de Ajuste

La herramienta software MatLab dispone de un amplio conjunto de funciones matemáticas apiladas en toolbox. Recurrirremos a la función “fit” para realizar el ajuste de la curva de la ganancia óptica modal basado en el análisis paramétrico de la ecuación 2.2. Esta función para poder ser utilizada debe ser configurada adecuadamente, es decir proporcionarle tanto las medidas de la ASE que le van a servir como datos de entrada como valores de configuración tales como; el punto de partida, el número máximo de iteraciones, el método de ajuste, etc. Con todos estos datos, la función “fit” calcula la curva de ajuste. Sin embargo debemos tener en cuenta que el algoritmo de ajuste aplica una desviación gaussiana estándar a cada una de las medida de la ASE que utiliza para calcular la ganancia óptica modal, esto significa que la curva de ajuste y la ganancia óptica modal obtenidas tienen también una desviación gaussiana estándar. Dicha desviación es proporcional al total de energía de la medida de la ASE, de forma que a mayor potencia mayor desviación absoluta.

La figura 5.2 nos muestra en color rojo la curva de ajuste de la ecuación 2.2, usando para obtenerla un total de 7 medidas de la ASE de secciones amplificadoras de diferente longitud procedentes del Setup II, para una densidad de corriente de  $2500 \text{ A/cm}^2$  y 17 grados de temperatura. Cada punto azul representa el valor de potencia total de una medida de la ASE, mientras que las líneas azules que salen del punto representan la desviación gaussiana estándar que se aplica a dicho valor.

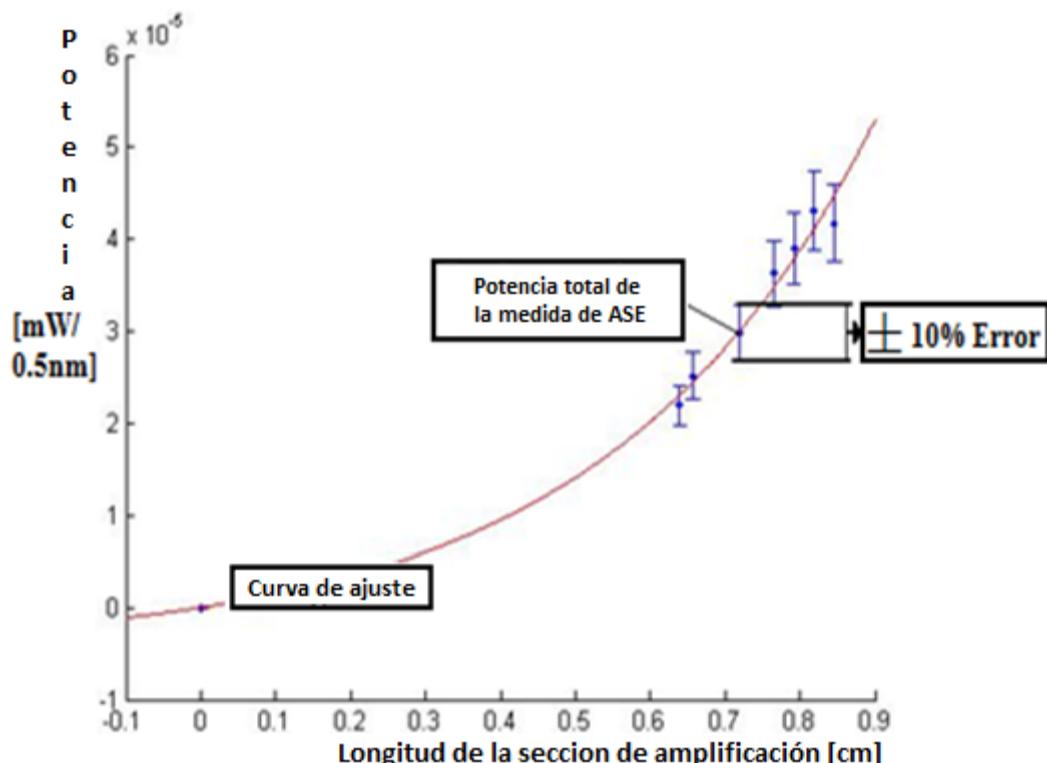


Figura 5.2 Curva de ajuste

Una vez obtenida la curva de ajuste debemos extraer la ganancia óptica modal de ella, y para hacer esto y obtener unos buenos resultados hay que fijar de manera empírica algunos parámetros, como por ejemplo el rango de ajuste de la ganancia óptica modal que fue fijado a  $-2\text{cm}^{-1}$ . Se puede encontrar más información acerca de los algoritmos empleados para obtener la ganancia óptica modal en los apéndices. La figura 5.3 muestra la ganancia óptica modal obtenida y sus dos curvas de desviación gaussiana estándar, generadas utilizando la curva de ajuste mostrada en la figura anterior.

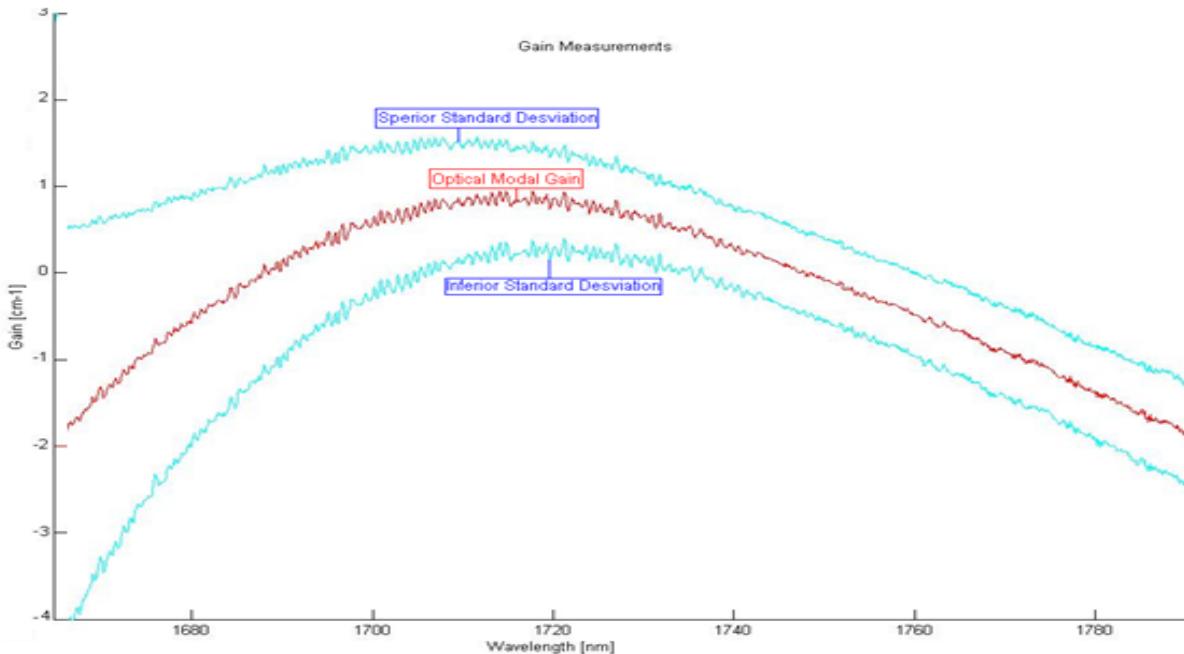


Figura 5.3 Ganancia óptica modal y sus desviaciones gaussianas estándar

### 5.3 Resultados de las Ganancias Ópticas Modales

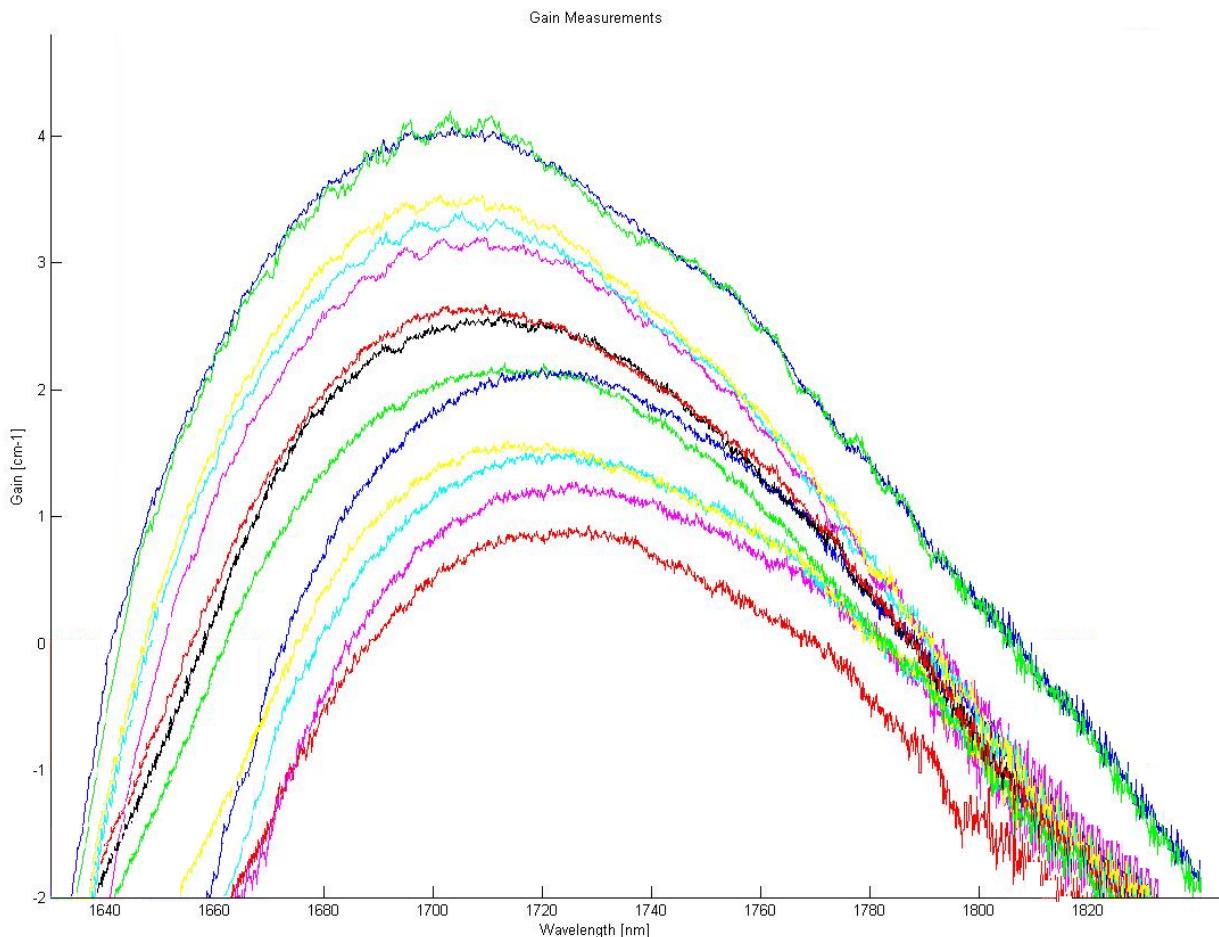
Debemos clasificar las distintas ganancias ópticas agrupando aquellas que utilizan la misma densidad de corriente y ciclo de trabajo, pero bajo diferentes temperaturas, para poder describir cómo influye la temperatura en las medidas la ganancia óptica modal. Para comenzar crearemos dos grandes grupos uno con las ganancias ópticas modales del Setup I y otro con las del Setup II. Teóricamente debería haber 130 ganancias ópticas modales en el grupo del Setup I y 70 en el del Setup II, sin embargo para algunas combinaciones de temperatura y densidad de corriente no ha sido posible obtener medidas viables de la ASE (apartado 2.6 limitaciones). Por ejemplo, todas las ganancias ópticas modales obtenidas utilizando medidas de la ASE que fueron tomadas usando una densidad de corriente de  $1000\text{ A/cm}^2$  o menor, no son útiles porque dichas ganancias ópticas modales salieron con valores negativos independientemente de la temperatura o el Setup, lo cual reduce el rango de densidades de corriente, abarcando ahora desde los 2000 a los  $5000\text{ A/cm}^2$ .

### **5.3.1 Densidad de Corriente Inyectada con un Ciclo de Trabajo del 100% (Setup I)**

En este apartado mostraremos los resultados obtenidos de la ganancia óptica modal procedentes del Setup I, es decir trabajando con una densidad de corriente cuyo ciclo de trabajo es del 100%. La tabla siguiente muestra un resumen del set de medidas del Setup I para una densidad de corriente de  $2500 \text{ A/cm}^2$  pero usando el rango completo de temperaturas. Dicha tabla está asociada a la figura 5.4 donde se muestra las ganancia ópticas modales del Setup I a diferentes temperaturas para una densidad de corriente de  $2500 \text{ A/cm}^2$ . En dicha tabla se muestra la temperatura, el porcentaje de longitud que ocupa la sección de absorción del total del sistema láser empleado para general la ASE, la densidad de corriente aplicada y el color de la ganancia óptica modal en la figura 5.4. El resto de las ganancias ópticas modales con sus respectivas tablas se muestra en el apéndice B.

**Tabla 5.1 Características de las medidas de las ASE utilizadas para generar las ganancias mostradas en la figura 5.4**

Temperatura [°]	Longitud de la sección absorción en %	Densidad de corriente [ $\text{A/cm}^2$ ]	Color
10	29-27-20-15-12-9	2500	AZUL
13	29-27-20-15-12-9	2500	VERDE
15	29-27-20-15-12-9	2500	NEGRO
17	29-27-20-15-12-9	2500	ROSA
20	29-27-20-15-12-9	2500	AMARILLO
23	29-27-24-21-18-15-12-8	2500	CIAN
25	29-27-24-21-18-15-12-8	2500	VERDE
27	29-27-21-18-15-12-8	2500	ROSA
30	29-27-24-21-18-15-12-8	2500	NEGRO
33	29-27-24-18-15-12-8	2500	ROSA
35	29-27-24-17-15-12-8	2500	AMARILLO
37	29-27-24-17-15-12-8	2500	CIAN
40	29-27-24-21-15-12-8	2500	ROJO



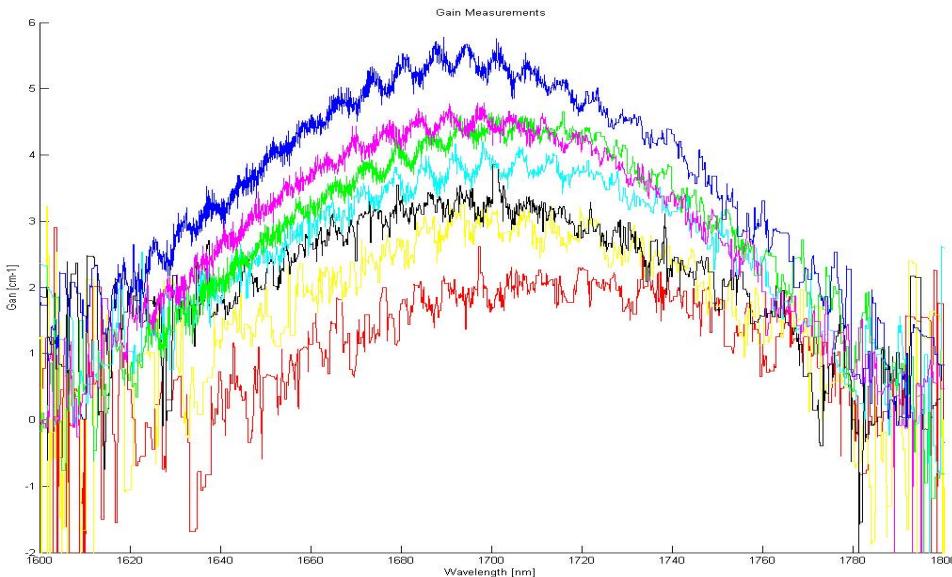
**Figura 5.4 Ganancias ópticas modales para todas las temperaturas válidas, procedentes del Setup I, bajo una densidad de corriente de  $2500 \text{ A/cm}^2$**

### 5.3.2 Densidad de Corriente Inyectada con un Ciclo de Trabajo del 1% (Setup II)

En este apartado mostraremos los resultados de la ganancia óptica modal procedentes del Setup II, el decir utilizando como alimentación de la sección amplificadora una densidad de corriente un ciclo de trabajo de un 1% y una frecuencia de 2KHz. La figura 5.5 nos muestra las ganancias ópticas modales para distintas temperaturas que fueron obtenidas utilizando medidas de la ASE con una densidad de corriente de 2500. De igual manera que en apartado anterior, también se muestra una tabla relacionada con la imagen donde aparece la información relativa a las distintas ganancias. Las imágenes y tablas asociadas al resto de valores de la densidad de corriente se muestran en el apéndice.

**Tabla 5.2 Características de las medidas de las ASE utilizadas para generar las ganancias mostradas en la figura 5.5**

Temperatura [°]	Longitud de la sección absorción en %	Densidad de corriente[A/cm <sup>2</sup> ]	Color
10	29-28-27-26-23-22-20-16-15-13-12-11-10-7	2500	AZUL
15	29-28-27-26-23-22-20-16-15-13-12-11-10-7	2500	ROSA
20	29-28-27-26-23-22-20-16-15-13-12-11-10-7	2500	VERDE
25	29-28-27-26-23-22-20-16-15-13-12-11-10-7	2500	CIAN
30	29-28-27-26-23-22-20-16-15-13-12-11-10-7	2500	NEGRO
35	29-28-27-26-23-22-20-16-15-13-12-11-10-7	2500	AMARILLO
40	29-28-27-26-23-22-20-16-15-13-12-11-10-7	2500	ROJO



**Figura 5.5 Ganancias ópticas modales para todas las temperaturas válidas, procedentes del Setup II, bajo una densidad de corriente de 2500 A/cm<sup>2</sup>**

## 5.4 Área de Trabajo

En el capítulo 2 analizamos que tanto el límite superior como inferior de la densidad de corriente que puede aplicarse para obtener una medida válida de la potencia espectral de la emisión estimulada amplificada depende de la temperatura del sistema láser, la longitud del láser y el ciclo de trabajo de la densidad de corriente, continuo o pulsado. En dicho capítulo también se concluyó que es necesario definir de manera empírica los rangos válidos de la densidad de corriente o área de trabajo. En este apartado se muestra el área de trabajo real de nuestro experimento tanto para el Setup I como para el Setup II.

### 5.4.1 Densidad de Corriente Inyectada con un Ciclo de Trabajo del 100% (Setup I)

La tabla 5.3 y la figura 5.6 muestran la relación que debe cumplirse entre la densidad de corriente y la temperatura para obtener medidas de la ASE válidas para el Setup I.

Tabla 5.3 Rangos útiles de temperatura en función de la densidad de corriente para el Setup I

Densidad de Corriente [A/cm <sup>2</sup> ]	Rango válidos de temperatura [°]
2000	10-25
2500	10-40
3000	20-40
3500	25-40
4000	30-40
4500	35-40
5000	35-40

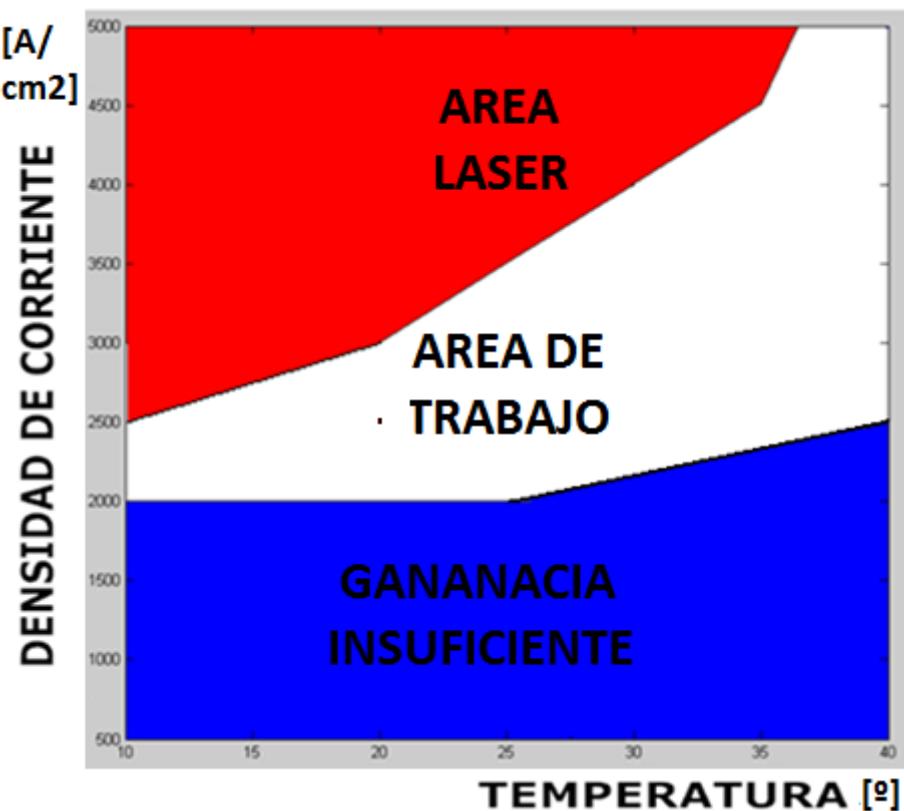


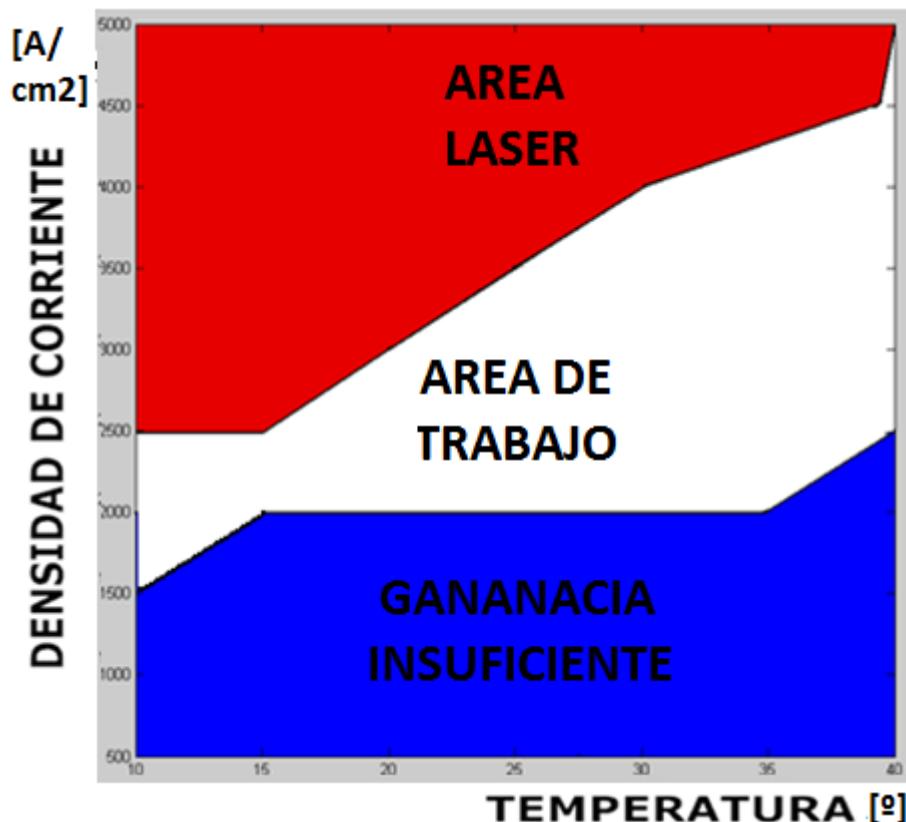
Figura 5.6 Área de trabajo para el Setup I

### 5.4.2 Densidad de Corriente Inyectada con un Ciclo de Trabajo del 1% (Setup II)

La tabla 5.4 y la figura 5.7 muestran la relación que debe cumplirse entre la densidad de corriente y la temperatura para obtener medidas de la ASE válidas para el Setup II.

**Tabla 5.4 Rangos útiles de temperatura en función de la densidad de corriente para el Setup II**

Densidad de Corriente [A/cm <sup>2</sup> ]	Rango válidos de temperatura [°]
1500	10-15
2000	10-35
2500	10-40
3000	20-40
3500	25-40
4000	35-40
4500	35-40
5000	40



**Figura 5.7 Área de trabajo para el Setup II**

## 5.5 Distancia

En este apartado realizaremos un estudio sobre las diferentes técnicas matemáticas que podemos utilizar para comparar las diferentes ganancias ópticas modales, ya que una comparación meramente visual no es suficiente. Además, debe tenerse en cuenta que tanto las curvas de ajuste como las ganancias ópticas modales tienen una desviación gaussiana estándar, por lo que para poder hacer una análisis comparativo adecuado entre las distintas ganancias ópticas modales debe ponderarse adecuadamente esta desviación gaussiana.

Lo que pretendemos es poder comparar las ganancias ópticas modales del Setup I con las del Setup II y conocer así como afecta a las medidas de la ganancia óptica modal el exceso de temperatura introducido al alimentar al chip, con una densidad de corriente cuyo ciclo de trabajo sea del 100%. O en otras palabras, si somos capaces de encontrar dos ganancias similares, una procedente del Setup I y la otra procedente del Setup II, generadas partiendo de medidas de la ASE obtenidas bajo la misma densidad de corriente pero distinta temperatura, la diferencia de temperatura entre ellas o distancia térmica equivaldrá al exceso de calor introducido por efecto Joule en el chip, en el Setup I, al alimentarlo. Siguiendo este proceso podremos conseguir el objetivo último de este proyecto, que no es otro que establecer una relación entre el exceso de calor introducido por efecto Joule al alimentar el chip y la densidad de corriente aplicada.

### 5.5.1 Correlación Cruzada

Para poder realizar nuestro estudio comparativo entre las diferentes ganancias ópticas modales, la primera herramienta matemática que pensamos en utilizar es la correlación cruzada. Sin embargo la correlación cruzada utiliza la forma de la señal y no su amplitud para realizar la comparación, por lo que nos es del todo inútil. Además, esta técnica no tiene encuentra la desviación gaussiana estándar de la ganancia óptica modal, solo la ganancia en sí.

Para funciones discretas, como por ejemplo  $f$  y  $g$ , la correlación cruzada se define en la ecuación (5.1).

$$(f * g)[n] = \sum_{m=-\infty}^{\infty} f^*[m] * g[n + m] \quad (5.1)$$

### 5.5.2 Distancia de Euclides

Posteriormente, tratamos de utilizar la distancia euclídea para realizar nuestro análisis comparativo pero en esencia esta técnica es equivalente a la mera observación visual, con lo que este tipo de análisis no fue capaz de proporcionarnos unos buenos resultados. Además nuevamente esta técnica no tienen en cuenta la desviación gaussiana estándar que tienen las ganancias ópticas modales que pretendemos comparar, solo la ganancia en sí.

Para funciones discretas, como por ejemplo  $f$  y  $g$ , la distancia euclídea se define en la ecuación (5.2).

$$d(f, g) = \sqrt{(f_1 - g_1)^2 + (f_2 - g_2)^2 + \dots + (f_n - g_n)^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (f_i - g_i)^2} \quad (5.2)$$

### 5.5.3 Distancia de Mahalanobis

Finalmente se optó por utilizar para nuestro estudio comparativo la distancia de Mahalanobis, famoso matemático hindú keynesiano del siglo XX, [18]. Esta herramienta o técnica matemática se basa en la correlación entre variables para las cuales se establecen patrones que nos sirven para identificarlas y analizarlas. La principal ventaja que nos ofrece la distancia de Mahalanobis, es que esta técnica sí tiene en cuenta la desviación gaussiana estándar asociada a las ganancias ópticas modales lo cual la convierte en idónea para nuestro estudio comparativo.

Para funciones discretas, como por ejemplo  $f$  y  $g$ , la distancia de Mahalanobis se define en la ecuación (5.3).

$$d(f, g) = \sqrt{\left( \left( \frac{f_{11} - g_{12}}{\sigma_1} \right)^2 + \left( \frac{f_{21} - g_{22}}{\sigma_2} \right)^2 \right) + \dots + \left( \left( \frac{f_{i1} - g_{i2}}{\sigma_i} \right)^2 + \left( \frac{f_{i+1,1} - g_{i+1,2}}{\sigma_{i+1}} \right)^2 \right)} \quad (5.3)$$

$$d(f, g) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \left( \frac{f_i - g_i}{\sigma_{fi}} \right)^2 + \left( \frac{f_i - g_i}{\sigma_{gi}} \right)^2 \right)} \quad (5.4)$$

Donde  $\sigma_{gi}$  y  $\sigma_{fi}$  son la varianza de la desviación de  $g$  y  $f$ , respectivamente, para el valor  $i$ .

## 5.6 Variación Térmica

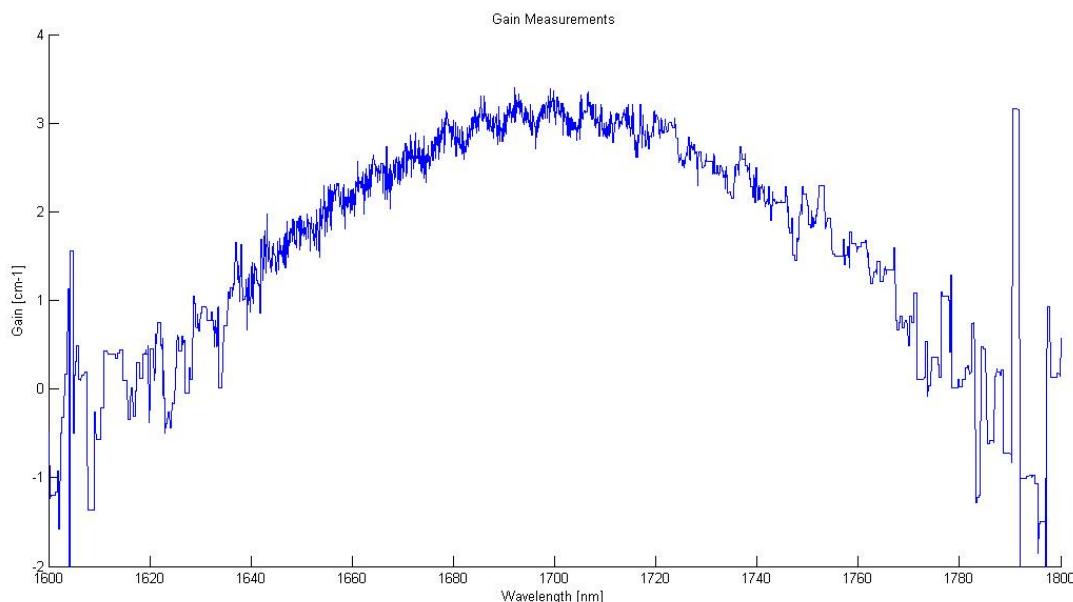
Usando la distancia de Mahalanobis podemos seleccionar una ganancia óptica modal procedente del Setup II para una determinada densidad de corriente, y compararla con todas las ganancias ópticas modales procedentes del Setup I, que tengan la misma densidad de corriente, de forma que podamos averiguar cuál es

la relación existente en entre el exceso de temperatura en el chip que se introduce al alimentarlo con el valor de la densidad de corriente que utilizamos para alimentar la sección amplificadora.

La figura 5.8 nos muestra la ganancia óptica modal generada usando catorce medidas de las ASE del Setup II, utilizando una densidad de corriente de  $3000 \text{ A/cm}^2$  con un ciclo de trabajo del 1% y una temperatura de 35 grados. Asociada a dicha figura, la tabla 5.5 nos muestra las características asociadas a la ganancia óptica modal.

**Tabla 5.5 Características de las medidas de las ASE utilizadas para generar la ganancia mostrada en la figura 5.8**

Temperatura [°]	Longitud de la sección absorción en %	Densidad de corriente [A/cm <sup>2</sup> ]	Color
35	29-28-27-26-23-22-20-16-15-13-12-11-10-7	3000	AZUL

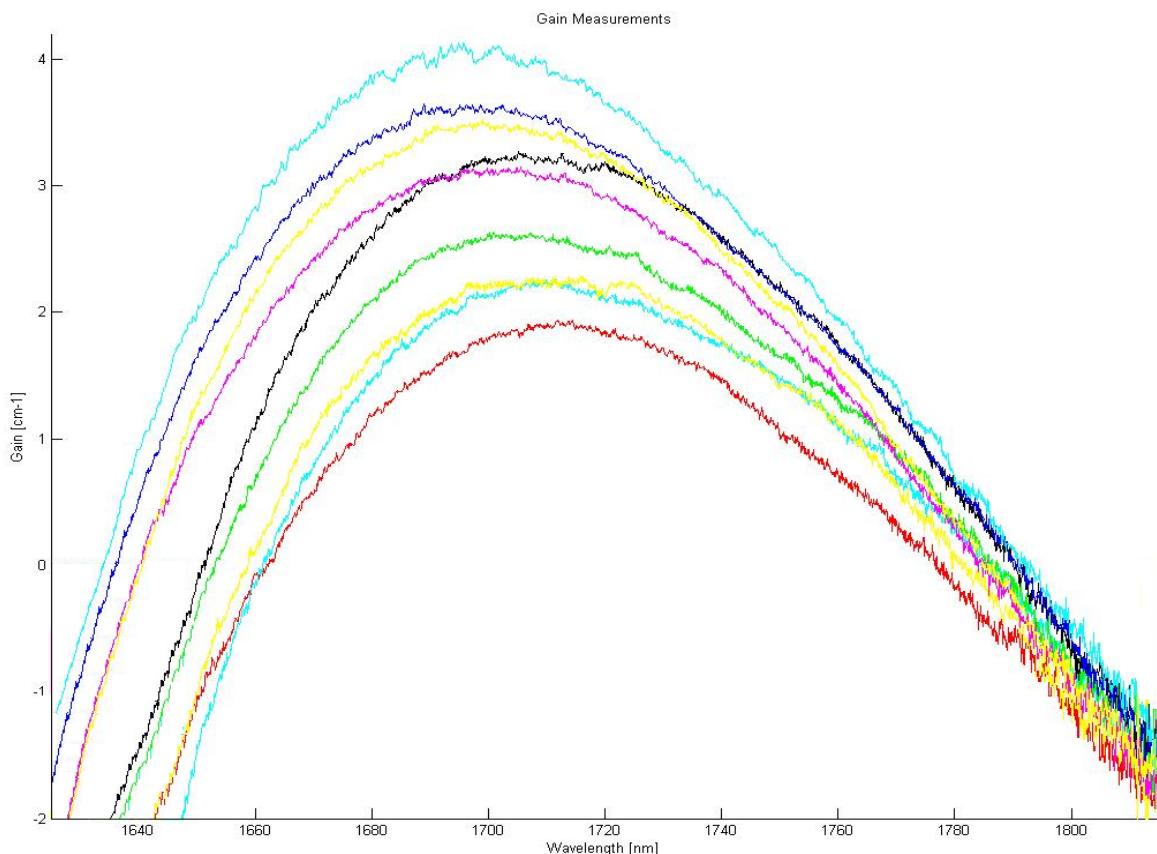


**Figura 5.8 Ganancia óptica modal a temperatura de 35 grados procedente del Setup II, bajo una densidad de corriente de  $3000 \text{ A/cm}^2$**

La figura 5.9 nos muestra las ganancias ópticas modales generadas usando medidas de las ASE del Setup I, utilizando una densidad de corriente de  $3000 \text{ A/cm}^2$  con un ciclo de trabajo de 100%, para todo el rango válido de temperaturas, de los 20 a los 40 grados. Asociada a dicha figura la tabla 5.6 nos muestra las características asociadas a las distintas ganancias ópticas modales.

**Tabla 5.6 Características de las medidas de las ASE utilizadas para generar las ganancias mostradas en la figura 5.9**

Temperatura [°]	Longitud de la sección absorción en %	Densidad de corriente [A/cm <sup>2</sup> ]	Color
20	29-27-20-15-12-9-5	3000	CIAN
23	29-27-24-21-18-15-12-8	3000	AZUL
25	29-27-24-21-18-15-12-8	3000	AMARILLO
27	29-27-21-18-15-12-8	3000	NEGRO
30	29-27-24-21-18-15-12-8	3000	ROSA
33	29-27-24-18-15-12-8	3000	VERDE
35	29-27-24-17-15-12-8	3000	AMARILLO
37	29-27-24-17-15-12-8	3000	CIAN
40	29-27-24-21-15-12-8	3000	ROJO



**Figura 5.9 Ganancias ópticas modales válidas en el rango de temperatura de los 20 a los 40 grados procedentes del Setup I, bajo una densidad de corriente de 3000 A/cm<sup>2</sup>**

La figura 5.10 nos muestra una superposición de lo mostrado en las figuras 5.8 y 5.9. Como comentamos anteriormente, la vista no es suficiente para determinar nada.

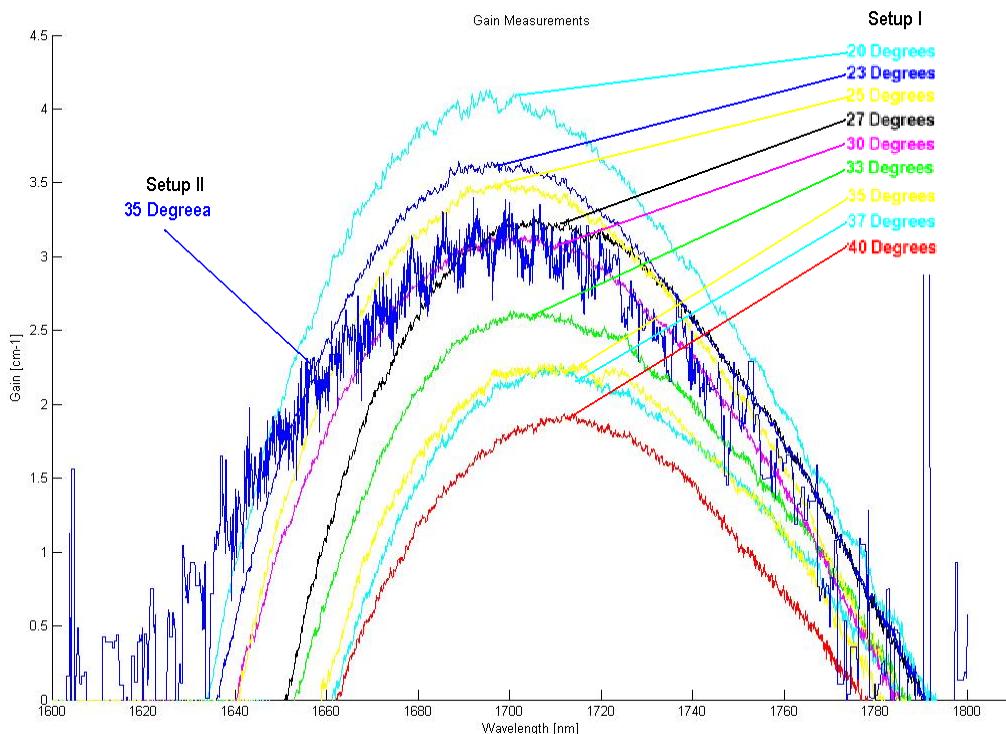


Figura 5.10 Superposición de las figuras 5.8 y 5.9

En las figuras 5.8, 5.9 y 5.10 mostradas anteriormente se han eliminado las graficas que representan la desviación gaussiana estándar de cada una de las ganancias ópticas modales, para facilitar la limpieza y la comprensión de las imágenes mostradas, pero dichas desviaciones existen y son tenidas en cuenta a la hora de calcular la distancia de Mahalanobis. La tabla 5.7 nos muestra los resultados de aplicar la distancia de Mahalanobis entre la ganancia mostrada en la figura 5.8 y cada una de las mostradas en la 5.9. La figura 5.11 nos muestra una representación visual de los resultados obtenidos. En esencia cuanto menor sea el valor de la distancia de Mahalanobis, más similares son las ganancias ópticas modales comparadas.

Tabla 5.7 Resultados análisis comparativo de la ganancia a través de la distancia de Mahalanobis

Ganancia Óptica Modal Setup II	C_T35								
Ganancia Óptica Modal Setup I	C_T40	C_T37	C_T35	C_T33	C_T30	C_T27	C_T25	C_T23	C_T20
Distancia de Mahalanobis	201.42	155.45	145.21	89.548	27.58	72.20	56.316	70.96	142.72

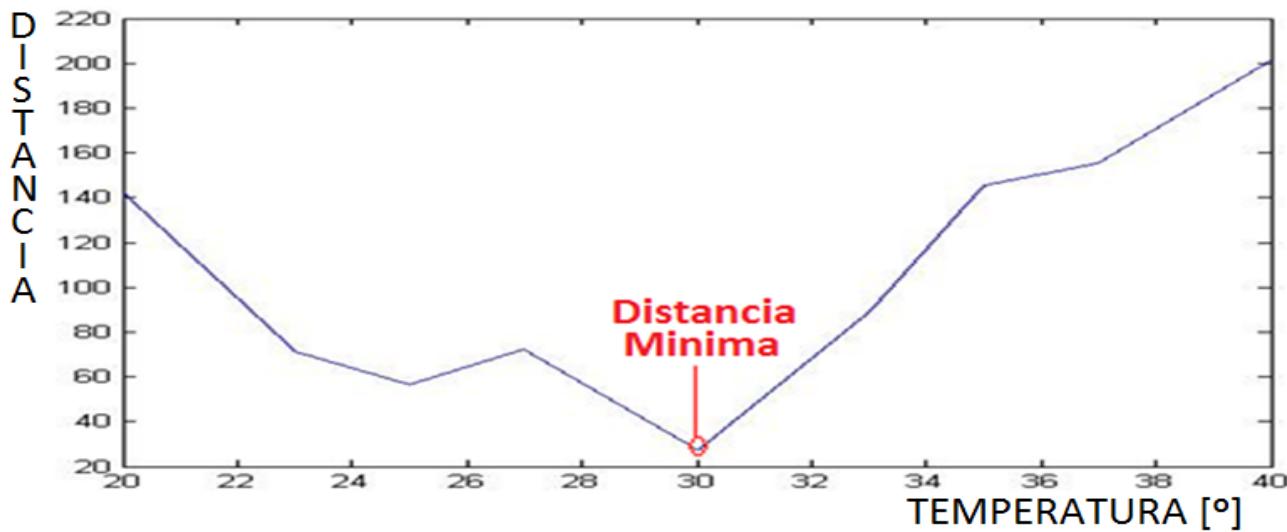


Figura 5.11 Distancia de Mahalanobis

En el ejemplo analizado las ganancias ópticas cuya distancia de Mahalanobis es menor, tienen entre ellas una diferencia térmica de cinco grados, 35 para la del Setup I y 30 para la del Setup II. De lo cual podemos extraer que cuando alimentamos en chip en el Setup I con una densidad de corriente de  $3000 \text{ A/cm}^2$ , se está aplicando aproximadamente a través del efecto Joule cinco grados de temperatura.

Si repetimos este proceso con todas las ganancias ópticas modales de nuestros Sets de medidas y ponderamos los resultados obtenidos, obtenemos el gráfico mostrado en la figura 5.12 en el que se muestra tanto el valor promedio de los excesos de temperatura como la desviación estándar. Asociado ha dicho gráfico la tabla 5.8 nos muestra los valores numéricos que lo determina. En dicha tabla podemos observar que para valores de densidad de corriente de  $1500 \text{ A/cm}^2$ , o menor no hay datos, debido al hecho de que para estos valores de corriente los valores de la ganancia óptica modal eran negativos. Además, para densidades de corriente iguales o mayores a  $4500 \text{ A/cm}^2$ , solo tenemos información acerca del límite inferior de la desviación estándar.

Tabla 5.8 Relación entre la densidad de corriente aplicada y el calor introducido en el chip

Densidad de corriente [ $\text{A/cm}^2$ ]	Exceso de Temperatura [°]	Desviación Estándar [°]
2000	3.5	$\pm 0.25$
2500	4.25	$\pm 0.5$
3000	4.75	$\pm 0.75$
3500	5.5	$\pm 0.5$
4000	6.5	$\pm 1$
4500	>5	-
5000	>5	-

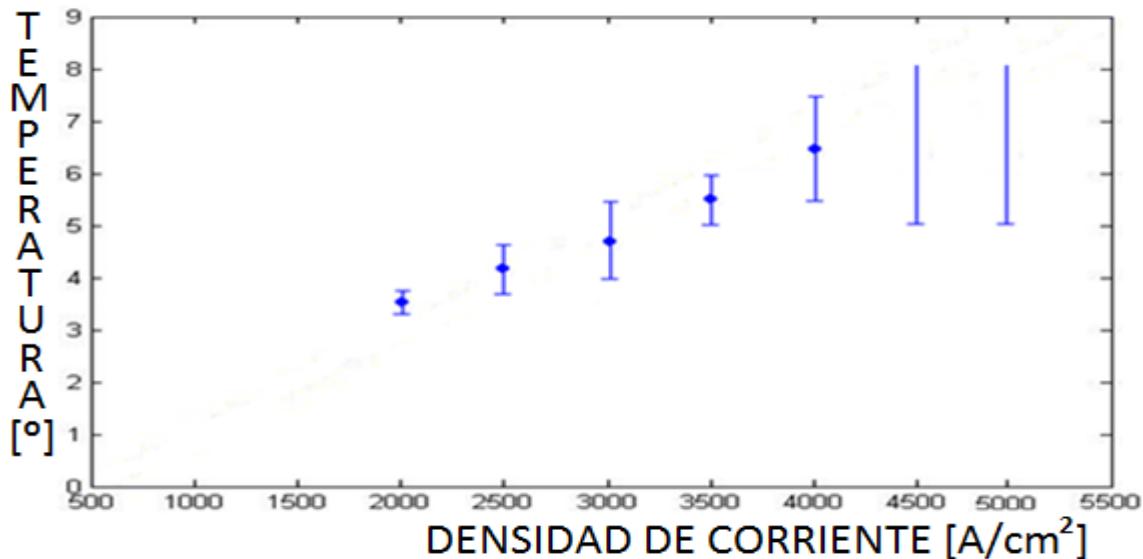


Figura 5.12 Relación entre el exceso de temperatura introducido en el chip y la densidad de corriente

### 5.6.1 Análisis de los Resultados Obtenidos

Analizando tanto las imágenes 5.4 y 5.5 como las que se muestran en los anexos, podemos sacar cuatro observaciones o conclusiones, que al coincidir plenamente con lo que teóricamente cabría esperar nos sirven para asumir que los resultados de las ganancias ópticas modales obtenidas son correctos.

Primero, la ganancia óptica modal es directamente proporcional a la densidad de corriente inyectada, lo que significa que a mayor densidad de corriente mayor ganancia.

Segundo, la ganancia óptica modal es inversamente proporcional a la temperatura, lo que significa que a mayor temperatura menor ganancia.

Tercero, para la misma temperatura y la misma densidad de corriente la ganancia óptica modal es mayor cuando utilizamos un ciclo de trabajo del 1%, Setup I, que cuando utilizamos uno del 100%, Setup II. Lo cual es lógico si aplicamos la premisa anterior, a mayor temperatura menor ganancia.

Y cuarto, la longitud de onda central de la ganancia óptica modal es directamente dependiente de la temperatura, es decir si la temperatura aumenta la longitud de onda central crece desplazándose a la derecha en la imagen, y viceversa.

Por otro lado, analizando la figura 5.12, queda demostrado que existe una relación directa entre el exceso de temperatura que aparece en el chip y la densidad de corriente que se utiliza para alimentarlo cuando trabajamos con un ciclo de trabajo del 100%. No obstante, al no disponer de datos suficientes no es posible afirmar si dicha relación es lineal, logarítmica, polinómica, etc.

---

## CONCLUSIONES

A lo largo de este trabajo hemos descubierto el gran número de posibilidad que los sistemas electro ópticos láser de longitud de onda configurable ofrecen y la importancia de disponer para su desarrollo de un conocimiento detallado de las características de los materiales que componen la región activa del sistema láser. Vimos que los sistemas láseres tradicionales de longitud de onda configurable son aparatosos, caros y lentos, por lo que el desarrollo de un dispositivo compacto, barato, veloz, eléctricamente controlable e integrado en un único chip, supondría un gran avance en infinidad de materias. Se ha explicado y demostrado como podemos estimar la ganancia óptica modal a través de las medidas de la ASE de sistemas láser cuya sección amplificadora sea de diferente longitud, usando para ello algoritmos de ajuste paramétrico basado en la ecuación 2.2, y como con ello es posible relacionar la densidad de corriente continua que aplicamos para alimentar la sección de amplificación con el exceso de temperatura introducido por el efecto Joule determinando como afecta ese exceso de temperatura a las medidas de la ganancia óptica modal. Para ello fue necesario analizar y estudiar diversos tipos de técnicas y herramientas matemáticas de forma que pudiéramos seleccionar y justificar las herramientas que necesitamos para nuestro estudio. Así mismo se estudió y analizó como obtener la mejor relación posible entre el número de medidas necesarias y el rango de resultados útiles, para tratar de reducir en lo posible el tiempo dedicado a la toma de medidas en el laboratorio.

También se realizo un estudio teórico y práctico sobre las limitaciones y rangos viables de temperatura, densidad de corriente y frecuencia de la señal pulsada del Setup II de nuestro experimento para poder obtener unos resultados válidos y componer a la vez el área de trabajo, figuras 5.6 y 5.7. Finalmente, se tomaron y procesaron los datos para obtener la relación existente entre la densidad de corriente aplicada para alimentar la sección de amplificación y el exceso de temperatura que dicha densidad de corriente introduce por el efecto Joule. La figura 5.12 muestra dicha relación, no obstante como puede verse en dicha figura no disponemos de valores suficientes para determinar categóricamente la dependencia entre la densidad de corriente y el exceso de temperatura, si bien parece intuirse una dependencia lineal o exponencial entre ambas.

## 6.1 Continuidad de este Trabajo

En trabajos futuros, para mejorar y expandir los resultados obtenidos en este proyecto, proponemos que se implementen las siguientes dos ideas:

Primero, podemos mejorar la precisión de nuestros resultados incrementando el margen de longitud de la sección amplificadora L, que en este experimento abarcaba desde los 5 a los 9 milímetros, obteniendo mayor precisión en la estimación de la ganancia óptica modal, ecuación (2.2). Para ello deberían fabricarse dos chip, uno cuyo rango de longitud que sea mayor a 9 milímetros y otro que sea menor a 5, similares al utilizado en este experimento. De esta forma podrían reutilizarse los sets de medidas utilizadas en este experimento.

Segundo, debemos incrementar el número de puntos de que disponemos para poder definir con más precisión la forma que describe la curva que relaciona el exceso de temperatura con la densidad de corriente aplicada, figura 5.12. Para ello podemos, o bien sencillamente añadir más puntos a costa de reducir el paso de barrido de la densidad de corriente,  $500 \text{ A/cm}^2$ , o de la temperatura,  $2-3^\circ$  para el Setup I y  $5^\circ$  para el Setup II, o ensanchar los rangos de temperatura ( $10-40^\circ$ ) y densidad de corriente ( $1000-5000 \text{ A/cm}^2$ ) sin modificar el paso o una combinación de las dos anteriores, es decir expandir el rango y recudir el paso. El problema es que los márgenes de temperatura se fijan para no dañar el chip, por lo que expandirlos dañaría el chip. Respecto a la densidad de corriente, el margen inferior se ha fijado en  $1 \text{ A/cm}^2$  porque para intensidades menores la emisión de la ASE no está relacionada con la longitud total de la sección amplificadora del sistema láser que tratamos de medir. Lo único que podemos hacer es tratar de incrementar el límite superior de la densidad de corriente, lo cual puede llevarse a cabo utilizando sistemas láser cuya longitud de la sección de absorción sea mayor. De esta forma podríamos utilizar densidades de corriente superiores a los

5000  $A/cm^2$  sin que en el sistema láser aparezca saturación ni realimentación.



# **PRESUPUESTO**



---

## PRESUPUESTO

Una vez completado nuestro estudio y obtenida la relación entre el exceso de temperatura introducido en el chip al alimentarlo y la densidad de corriente utilizada para ello, para concluir en este capítulo se muestra un análisis económico con los costes tanto parciales como totales del proyecto.

## Desglose del Presupuesto

Para la realización del presupuesto se han seguido las recomendaciones del Colegio oficial de Ingenieros de Telecomunicación (COIT) sobre los baremos orientativos mínimos para trabajos profesionales en 2010, [31]. El presupuesto se ha desglosado en varias secciones en las que se han separado los distintos costes asociados al desarrollo del proyecto. Estos costes se dividen en:

- Recursos materiales.
- Trabajo tarifado por tiempo empleado.
- Costes de redacción del proyecto.
- Costes de Fabricación.
- Material fungible.
- Derechos de visado del COIT.
- Gastos de tramitación y envío.
- Aplicación de impuestos.

### Recursos Materiales

En este apartado se realiza el análisis de los costes relacionados con el uso de paquetes software, material hardware y el mantenimiento de estos. Estos equipos hardware y paquetes software presentan un coste de amortización, en función del periodo de tiempo usado y el número de usuarios que accedan a estos, los cuales se han estimado en 100.

Tabla P.1 Costes de amortización de los recursos software y hardware

DESCRIPCIÓN	TIEMPO DE USO	DESCRIPCIÓN		TIEMPO DE USO
		TOTAL	USUARIO	
<b>Estación de Trabajo en el Laboratorio y Equipo de Alineamiento</b>	12 meses	11.500 €	115,00 €	95,00 €
<b>Osciloscopio LeCroy CT584L</b>	12 meses	6.900 €	69,00 €	69,00 €
<b>Analizador de Espectros Óptico Yokowaga AQ6375</b>	12 meses	7.400 €	74,00 €	74,00 €
<b>Fuente de Tensión Keithley</b>	12 meses	730 €	7,30 €	7,30 €
<b>Controlador de Temperatura Thorlabs PRO 8000</b>	12 meses	2000 €	20,00 €	20,00 €
<b>Generador de Pulses Agilent 8114</b>	12 meses	687 €	6,87 €	6,87 €

<b>Medidor de Potencia Óptica Newport 1835</b>	12 meses	1030 €	10,30 €	10,30 €
<b>Impresora Hewlett Packard Laserjet 4L</b>	12 meses	296 €	2,96 €	2,96 €
<b>Ordenador Personal Pentium IV 2 GHz</b>	12 meses	511 €	5,11 €	5,11 €
<b>MatLab</b>	12 meses	1.500 €	15 €	15 €
<b>Entorno Windows XP Profesional</b>	12 meses	306 €	3,06 €	3,06 €
<b>Microsoft Office XP</b>	12 meses	449 €	4,49 €	4,49 €
<b>TOTAL</b>				313,09 €

## Trabajo Tarifado por Tiempo Empleado

El proyectante ha invertido 12 meses en las tareas de formación, especificación, desarrollo y documentación necesarias para la elaboración del presente proyecto fin de carrera. El importe de las horas de trabajo empleadas para la realización del proyecto se calcula siguiendo las recomendaciones del COIT:

$$H = C_t \cdot 74,88 \cdot H_n + C_t \cdot 74,88 \cdot H_E (\text{€})$$

Donde:

- $H$  son los honorarios totales por el tiempo dedicado.
- $H_n$  son las horas normales trabajadas (dentro de la jornada laboral).
- $H_E$  son las horas especiales.
- $C_t$  es un factor de corrección función del número de horas trabajadas.

Teniendo en cuenta que el tiempo destinado para la formación y documentación no se incluye en el cálculo debido a que estas tareas son necesarias y benefician sólo al alumno, para la realización de este proyecto han sido necesarias 1600 horas (8 horas/día · 5 días/semana · 4 semanas/mes · 10 meses), todas ellas dentro del horario normal.

Según el COIT, el coeficiente  $C_t$  tiene un valor variable en función del número de horas empleadas de acuerdo con la siguiente tabla:

Tabla P.2 Factor de corrección en función del número de horas invertida

HORAS		COEFICIENTES
<b>Hasta</b>	36 horas	C=1
<b>Exceso de</b>	36 horas	C=0,9
<b>Exceso de</b>	72 horas	C=0,8
<b>Exceso de</b>	108 horas	C=0,7
<b>Exceso de</b>	144 horas	C=0,65
<b>Exceso de</b>	180 horas	C=0,60
<b>Exceso de</b>	360 horas	C=0,55
<b>Exceso de</b>	510 horas	C=0,50
<b>Exceso de</b>	720 horas	C=0,45
<b>Exceso de</b>	1.080 horas	C=0,40

Como se puede observar el número de horas es superior a 1080, con lo que según la tabla anterior  $C_t = 0,40$  por lo que según la ecuación del importe de horas de trabajo se obtiene una tarifa total por el tiempo empleado de 47923,20 €

$$H = 0,4 \cdot 74,88 \cdot 1600 + 0,4 \cdot 74,88 \cdot 0 = 47.923,20 \text{ €}$$

En la tabla siguiente se desglosa el tiempo de trabajo invertido.

Tabla P.3 Costes por tiempo empleado

COSTES POR TIEMPO EMPLEADO			
DESCRIPCIÓN	Tiempo	Tiempo/Mes	Importe
<b>Documentación</b>	1	0	0
<b>Formación</b>	1	0	0
<b>Especificaciones</b>	2	4792,32 €	9.584,64 €
<b>Desarrollo</b>	8	4792,32 €	38.338,56 €
<b>Costes Totales</b>		<b>47.923,20 €</b>	

Los honorarios totales por tiempo dedicado libres de impuestos ascienden a cuarenta y siete mil novecientos veintitrés euros con veinte céntimos (47.923,20 €).

## Costes de Redacción del Proyecto

El importe de la redacción del proyecto se calcula de acuerdo a la siguiente expresión:

$$R = 0,07 \cdot P \cdot C_h \text{ (€)}$$

Donde:

- $P$  es el presupuesto del proyecto.
- $C_h$  es el coeficiente de ponderación en función del presupuesto.

En la siguiente tabla se muestra el presupuesto calculado hasta el momento:

**Tabla P.4 Costes de redacción del proyecto**

<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>COSTES</b>
<b>Recursos Software y Hardware</b>	313,09 €
<b>Trabajo Tarificado Por Tiempo Empleado</b>	47.923,20 €
<b>Total</b>	<b>48.236,29 €</b>

El presupuesto  $P$  calculado hasta el momento asciende a 48.236,29 €. Como el coeficiente de ponderación para presupuestos de más de 42.070,70 € y menos de 63.106,05 € viene definido por el COIT con un valor de 0,45, el coste derivado de la redacción del proyecto es de:

$$R = 0,07 \cdot 48.236,29 \text{ €} \cdot 0,45 = 1.519,44 \text{ €}$$

Por tanto el coste libre de impuestos derivado de la redacción del proyecto es de mil quinientos diecinueve con cuarenta y cuatro céntimos (1.519,44 €).

## **Costes de Fabricación**

En este apartado se incluyen los costes derivados de la fabricación del chip desarrollado para realizar las medidas.

**Tabla P.5 Costes de fabricación**

<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>COSTES</b>
<b>Fabricación de los Circuitos</b>	2.600 €

## Material Fungible

Además de los recursos hardware y software, en este proyecto se han empleado otros materiales, como son los folios y el tóner de la impresora entre otros, Presupuesto que se especifican como material fungible. En la tabla siguiente se muestran los costes generados por estos recursos.

Tabla P.6 Costes del material fungible

DESCRIPCIÓN	COSTES
<b>Folios</b>	10 €
<b>Tones de Impresora</b>	75 €
<b>Encuadernación</b>	105 €
<b>Total</b>	<b>195 €</b>

## Derechos de visado del COIT

Los gastos de visado del COIT se tarifan mediante la siguiente expresión:

$$V = 0,006 \cdot P \cdot C_V \text{ (€)}$$

Donde:

- $P$  el presupuesto del proyecto.
- $C_V$  es el coeficiente reductor en función del presupuesto del proyecto.

El presupuesto  $P$  calculado hasta el momento asciende a la suma de los costes de ejecución material, de redacción, de fabricación y de material fungible.

$$P = 48.236,29 + 1519,44 + 2.600 + 195 = 52.550,73 \text{ €}$$

Como el coeficiente  $C_V$  para presupuestos de más de 30.050 € y menos de 60.101 € viene definido por el COIT con un valor de 0,90, el coste de los derechos de visado del proyecto asciende a la cantidad de:

$$V = 0,006 \cdot 52.550,73 \cdot 0,90 = 283,77 \text{ €}$$

Por tanto el coste de los derechos de visado del proyecto asciende a doscientos setenta y nueve euros con setenta y seis céntimos (283,77 €).

## **Gastos de Tramitación y Envío**

Los gastos de tramitación y envío están fijados en 6,01 €

## **Aplicación de Impuestos**

El coste total del proyecto, antes de aplicarle los correspondientes impuestos, asciende 53.153,68 € a lo que hay que sumarle el 5% de IGIC, con lo que el coste definitivo del proyecto es:

**Tabla P.7 Costes totales del proyecto**

<b>COSTES TOTATES DEL PROYECTO</b>	
<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>TOTAL</b>
<b>Recursos Materiales</b>	313,09 €
<b>Costes de Ingeniería</b>	48.236,29 €
<b>Costes de Redacción</b>	1.519,44 €
<b>Costes de Fabricación</b>	2.600 €
<b>Material Fungible</b>	195 €
<b>Derechos de Visado</b>	283,77 €
<b>Tramitación y Envió</b>	6,1 €
<b>Subtotal</b>	53.153,69 €
<b>Aplicación de Impuestos (5% I.G.I.C.)</b>	2.657,68 €
<b>Total</b>	<b>55.811,37 €</b>

El presupuesto total asciende a la cantidad de **cincuenta y cinco mil ochocientos once euros con treinta y siete céntimos (55.811,37 €)**.

Don Sergio Rosino Rincón, autor del presente Proyecto Fin de Carrera, declara que:

El Proyecto Fin de Carrera con título “*Estudio de la influencia térmica en las medidas de la ganancia óptica modal*”, desarrollado en la Escuela de Ingeniería de Telecomunicación y Electrónica, de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, en el período de un año, tiene un coste de desarrollo total de 55.811,37 €.

El autor del proyecto  
Sergio Rosino Rincón

Las Palmas de Gran Canaria a 19 de Marzo de 2012

# BIBLIOGRAFÍA



---

## BIBLIOGRAFÍA

### *Libros y documentos*

- [1] Vetoshkin, S.; Ionin, A.1; Klimachev, Yu.; Kozlov, A.; Kotkov, A.; Rulev, O.; Seleznev, L.; Sinitsyn, D. "Multiline laser probing of CO:He, CO:N2, and CO:O2 active media in a wide-aperture pulsed amplifier" Journal of Russian Laser Research, Volume 27, Number 1, January 2006 , pp. 33-69(37)
- [2] S. Murata, I. Mito "Frequency-tunable semiconductor lasers" Journal Optical and Quantum Electronics. Volume 22, Number 1 / January, 1990, 1-15.
- [3] D. F. G. Gallagher "Wavelength Tunable Lasers: Time-Domain Model for SG-DBR Lasers" Optoelectronic Devices Book, pp. 151-184 (2005).
- [4] M.V. Maksimov, Y.M. Shernyakov, and Z.I. Alferov "High-power 1.5  $\mu$ m InAs-InGaAs quantum dot lasers on GaAs substrates" Semiconductors, Vol. 38, No. 6, pp. 732–735, 2004.
- [5] N.N. Ledentsov, M.V. Maximov, and C.M. Sotomayor Torres "Optical spectroscopy of self-organized nanoscale heterostructures involving high-index surfaces" Microelectronics Journal 26, pp.871-879 (1995).

- [6] Y. Barbarin et al., "Characterization of a 15 GHz Integrated Bulk InGaAsP Passively Modelocked Ring Laser at 1.53 $\mu$ m", Optics Express, Vol. 14, Issue 21, pp. 9716-9727, (2006).
- [7] J. H. den Besten et al., "A Compact Digitally Tunable Seven-Channel Ring Laser", IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 14, No. 6, pp. 753-755, (2002).
- [8] B. W. Hakki and T. L. Paoli, "Gain spectra in GaAs double-heterostructure injection lasers", Journal of Applied Physics, Vol. 46, No. 3, pp. 1299-1306, (1975).
- [9] Y. Barbarin et al., "Gain Measurements of Fabry-Pérot InP/InGaAsP Lasers using an Ultra.
- [10] C. H. Henry, R. A. Logan, and F. R. Merritt, J. Appl. Phys. 51, 3042 ~1980!.
- [11] P. Blood, A. I. Kucharska, J. P. Jacobs, and K. Griffiths, J. Appl. Phys. 70, 1144~1991!.
- [12] S.D. McDougall and C.N. Ironside, "Measurements of reverse and forward bias absorption and gain spectra in semiconductor laser material", Electron. Letters, Vol. 31, No.25, pp. 2179-2181, (1995).
- [13] J. D. Thomson et al., "Determination of single-pass optical gain and internal loss using a multisection device", Applied Physics Letters, Vol. 75, No. 17, pp. 2527-2529, (1999). High Resolution Spectrometer" Applied Optics, Vol. 45, Issue 35, pp. 9007-9012, (2006).
- [14] B.W. Tilma, M.J.R. Heck, E.A.J.M. Bente and M.K. Smit. "Modal gain measurements in quantum dot amplifiers in the 1600nm-1800nm wavelength range". Proceedings Symposium IEEE/LEOS Benelux Chapter, 2008, Twente.
- [15] S. Anantathanasarn et al., "Lasing of wavelength-tunable (1.55  $\mu$ m region) InAs/InGaAsP/InP (100) quantum dots grown by metal organic vapor-phase epitaxy", Appl. Phys. Lett., Vol. 89, 073116, (2006).
- [16] M. Sugawara, K. Mukai, H. Ishikawa and Y. Nakata, et al., "Effect of homogeneous broadening of optical gain on lasing spectra in self-assembled In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As<sub>y</sub>Ga<sub>1-y</sub>As quantum dot lasers", Appl. Phys. Lett., Vol. 61, No. 11, (2000).
- [17] Mariangela Gioannini and Alberto Sevega, et al., "Simulations of differential gain and linewidth enhancement factor of quantum dot semiconductor lasers", Optical and Quantum Electronics.(2006).

- [18] Shiming Xiang, Feiping Nie and Changshui Zhang. "Learning a Mahalanobis distance metric for data clustering and classification". Department of Automation Tsinghua University, Beijing 100084, PR China. May 2008.



# ANEXOS



---

## ANEXOS

### Anexo A: Código Software

En este anexo analizaremos y expondremos los distintos programas o funciones de Matlab utilizados durante el procesado de las medidas de la ASE.

#### A.1 Analyze Saeed.m

Este es el programa o función principal desde el que se realizan las llamadas a los otros programas o funciones; Gainfit.m, ReadYoko.m y ReadExcel.m. Este programa extrae la ganancia óptica modal y las desviaciones estándar de este proveniente de las medidas de las ASE a través del ajuste de la ecuación 2.2. Para funcionar adecuadamente necesita poder leer el fichero “file\_name.csv” donde están las medidas de potencia de las ASE.

Entrada: El fichero “file\_name.csv” que contiene las medidas de la potencia de las ASE.

Salida: Ganancia Óptica Modal relacionada con el fichero “file\_name.csv” que utilizamos como entrada.

```

function []=Analyse_Saeed(J,K,R,file_name)

%R;           % Density Current Value
%K;           % Sorter Amplifier Section
%J;           % Longer Amplifier Section
%file_name   % File Name

%%

%%%%%%%%%%%%%%%
devices=[2,J:K];      %Devices desired for analysis P
WavelengthRange=1:3001; %Range
DesiredWavelength=1700; %Desired wavelength to observe the gain spectrum in nm
%ST=1;           %Gain Estimation

%%%%%%%%%%%%%%%
%define collors for graphs
CL(1)='y';CL(2)='m';CL(3)='c';CL(4)='r';CL(5)='g';CL(6)='b';CL(7)='k';CL(8)='y';
CL(9)='m';CL(10)='c';

CL(11:20)=CL(1:10);CL(21:30)=CL(1:10);

% read the Exel sheet with measurement data (exel sheet have to be made by hand.
[Perc,Length,CurDens,Power,PowermW,Name]=ReadExel(file_name);

k=1; %Movie frame index

if devices(1)==1
    sigma=1.32e-8*ones(1,3001);
elseif devices(1)==2
    sigma=xlsread('sigma.xls');
end

J=R:R; % P

%%
for j=J %:6 %Current Densities P
    % read the saved spectra
%%

```

```
for i=devices  %(7-CurDensNum(j)+1):7    %considering different devices
    % loop over all lengths
    Text=Name(i,j);
    Text=strcat(Text, '.CSV');
    Text=char(Text); %delete 2 in Text2
    [Info,Lambda,SpecPower(i,:)]=ReadYoko(Text); %Delete 2 in Text2
end
%%
for i=WavelengthRange
    if i/50==floor(i/50)
        disp('i=');disp(i);
    end
    if i==WavelengthRange(1) || i==WavelengthRange(2)
        ST_Mat=[1e-2,10,1e-5];    %P
    else
        %ST=G(j,i-1);
        %ST=-8/1500^2*(i-1501)^2+6;%G(j,i-1);%ceil(G(i-1)+3);%ST=2*G(j,i-1)-G(j,i-2);
        if G(j,i-1) == -2
            ST_Mat=[1e-2,10,1e-5];
        else
            ST_Mat=[Psp(j,i-1),G(j,i-1),BG(j,i-1)];
        end
        %ST_Mat=ST_Mat;
        %ST_Mat=[Psp(j,i-1),-8/1500^2*(i-1501)^2+6,BG(j,i-1)];
    end
    epsilon=0.1;
    [c2,Goodness,info,Psp(j,i),G(j,i),BG(j,i)]=gainfit(...Length(devices),SpecPower((devices),i),ST_Mat,epsilon,sigma(i));
    AA(:,i)=info.residuals;
    %Goodness Analysis
```

```

SSE_Mat(j,i)=Goodness.sse;
RSQ_Mat(j,i)=Goodness.rsquare;
AdjRSQ_Mat(j,i)=Goodness.adjrsquare;
RMSE_Mat(j,i)=Goodness.rmse;

%%%%%%%%%%%%%%%
%Confidence
confidence=confint(c2,0.68);
confidence_Psp(:,i)=confidence(:,1);
confidence_G(:,i)=confidence(:,2);
confidence_BG(:,i)=confidence(:,3);

%% Data and Fit Plot at Desired Wavelength
%%
if i==(DesiredWavelength-1550)/0.1+5
    %somewhere a plot of the fit
    figure(2);
    hold on;
    %plot(Length(devices),SpecPower(devices,i),'+')
    E=sqrt([sigma(i)^2;(epsilon*SpecPower(devices(2:length(devices)),i)).^2+sigma(i)^2]);
    errorbar(Length(devices),SpecPower(devices,i),E,'.');
    plot(c2);legend('off');
    %hold off;
    F(k)=getframe;
    k=k+1;
end
end

%% Gain Spectrum Plot
%%
for x=WavelengthRange

```

```
if confidence_G(1,x)>5
    confidence_G(1,x)=0;
end

if G(j,x)>5
    G(j,x)=0;
end
end

figure(1);
hold on;
plot(Lambda(WavelengthRange),confidence_G(1,WavelengthRange),'m');
plot(Lambda(WavelengthRange),(G(j,WavelengthRange)), 'r');%CL(j)
plot(Lambda(WavelengthRange),confidence_G(2,WavelengthRange),'m');
%legend(num2str(CurDens(j)));
xlabel('Wavelength [nm]');
ylabel('Gain [cm-1]');
title('Gain Measurements');
%
%% Fit Parameters Plot
%%
figure(3);
subplot(2,2,1);hold on;
plot(Lambda(WavelengthRange),Psp(j,WavelengthRange),CL(j));xlabel('Wavelength [nm]');ylabel('Psp [mW/nm/cm]');
%plot(Lambda(WavelengthRange),confidence_Psp(1,WavelengthRange),CL(j));
%plot(Lambda(WavelengthRange),confidence_Psp(2,WavelengthRange),CL(j));
subplot(1,2,2);hold on;
plot(Lambda(WavelengthRange),G(j,WavelengthRange),CL(j));xlabel('Wavelength [nm]');ylabel('G [1/cm]');
%plot(Lambda(WavelengthRange),confidence_G(1,WavelengthRange),CL(j));
%plot(Lambda(WavelengthRange),confidence_G(2,WavelengthRange),CL(j));
```

```

subplot(2,2,3);hold on;

plot(Lambda(WavelengthRange),BG(j,WavelengthRange),CL(j));xlabel('Wavelength [nm]');ylabel('BG [mW/nm]');

%plot(Lambda(WavelengthRange),confidence_BG(1,WavelengthRange),CL(j));

%plot(Lambda(WavelengthRange),confidence_BG(2,WavelengthRange),CL(j));

%}

%% Residual Analysis

%%{
figure(4);

hold on;

plot(Lambda(WavelengthRange),RMSE_Mat(j,WavelengthRange).^2,CL(j));

xlabel('Wavelength [nm]');

ylabel('Reduced Chi square');

end

disp('*****');

if devices(1)==1

disp('Fake Measurement 1: Mean')

elseif devices(1)==2

disp('Fake Measurement 2: Moving Average')

end

disp('*****');

disp('epsilon');disp(epsilon);

disp('*****');

disp('Desired Wavelength'); disp(DesiredWavelength);

disp('*****');

disp('Current Density number'); disp(J);

disp('*****');

contador=0;

for i=1:3001

filter(i)=contador;

```

```
if i==1670
    contador=1;
end
if i==1830
    contador=0;
end
end
```

## A.2 Gainfit.m

```
%%%%%%%%%%%%%
```

Este programa configura las opciones de la función “fit” y posteriormente utiliza dicha función para generar la curva de ajuste. El programa principal utiliza esta función para extraer la ganancia óptica modal usando la curva de ajuste. Para funcionar adecuadamente necesita disponer de todas las medidas de la ASE que puedan ser empleadas en la generación de una determinada ganancia óptica modal.

Entrada: Medidas de la potencia de las ASE.

Salida: Curva de ajuste de la ganancia óptica modal.

```
%%%%%%%%%%%%%
```

```
%%slightly revised Bauke Gain Fit
```

```
function
[c2,Goodness,info,Isp,G,BG]=gainfit(length1,data1,ST_Mat,epsilon,sigma_bkg)
G=ST_Mat(2);
ST=G;
%sigma_bkg=1.32e-8;
%epsilon=0.15;
Wfactor=1./[sigma_bkg^2 ; (epsilon*data1(2:length(data1))).^2+sigma_bkg^2];
%Wfactor=[(1/sigma_bkg);sqrt(1./((epsilon*data1(2:length(data1))).^2+sigma_bkg^2)));
%Wfactor=ones(1,length(data1));
while G==ST && ST~-2
    ST=ST-1;
    if ST== -2;
```

```

ST=-3;

end

s = fitoptions('Method','NonlinearLeastSquares',...
    'Weights',Wfactor,',...
    'TolFun',1e-40,',...
    'MaxIter',1e10,',...
    'Startpoint',ST_Mat);

f = fittype('(a/b)*(exp(x*b)-1)+c','options',s);

[c2,gof2,output] = fit(length1,data1,f);

Isp=c2.a; % here c2 is (a/b)*(exp(x*b)-1), and c2.a means a in the relation
G=c2.b; % here c2 is (a/b)*(exp(x*b)-1), and c2.b means b in the relation
BG=c2.c;

Goodness=gof2;

info=output;

end

if G<-2 || ST== -2 || ST== -3;

G=-2;

end

%G

```

### A.3 ReadExel.m

```
%%%%%%%%%%%%%%%
Este programa lee el fichero “file_name.csv” para extraer el nombre que nos permite referenciar los
fichero que contienen las medidas de potencia de la ASE.
```

Entrada: Fichero “file\_name.csv”.

Salida: Nombres de las mediadas de la ASE.

```
%%%%%%%%%%%%%%%
```

```

function [Perc,Length,CurDens,Power,PowermW,Name]=ReadExel(file_name)

fid1 = fopen(file_name,'r')

for i=1:18

```

```
Perc(i)=fscanf(fid1,'%e',1);  
k=fscanf(fid1,'%c',1);  
Length(i,1)=(fscanf(fid1,'%e',1))/1e4;  
k=fscanf(fid1,'%c',1);  
for j=1:10  
    CurDens(j)=fscanf(fid1,'%e',1);  
    k=fscanf(fid1,'%c',1);  
    Power(i,j)=fscanf(fid1,'%e',1);  
    PowermW(i,j)=10^(Power(i,j)/10);  
    k=fscanf(fid1,'%c',1);  
    %Text1=fscanf(fid1,'%c',1);  
    %Text2=fscanf(fid1,'%c',1);  
    %Text3=fscanf(fid1,'%c',1);  
    %Text4=fscanf(fid1,'%c',1);  
    %Text5=fscanf(fid1,'%c',1);  
    %Text=strcat(Text1,Text2,Text3,Text4,Text5)  
    %Name(i,j)=Text;  
    Name(i,j)=cellstr(fscanf(fid1,'%c',8));  
    k=fscanf(fid1,'%c',1);  
end  
end  
fclose(fid1);
```

#### **A.4 ReadYoko.m**

Este programa lee un fichero que contiene una medida de la ASE para calcular la potencia de salida total de cada una de las medidas.

Entrada: Fichero “file\_name.csv”.

Salida: Valor de potencia total de las medidas de la ASE.

```

function [Info,Lambda,Power]=ReadYoko(FileName)
FileName

fid1 = fopen(FileName, 'r')
Info=fscanf(fid1, '%c', 449);

for i=1:3001

Lambda(i)=fscanf(fid1, '%e', 1);

k=fscanf(fid1, '%c', 1);

Power(i)=fscanf(fid1, '%e', 1);

end

fclose(fid1);

```

## Anexo B: Ganancias Ópticas Modales

En este anexo analizaremos y expondremos las ganancias ópticas modales y sus características tanto para el Setup I como para el Setup II.

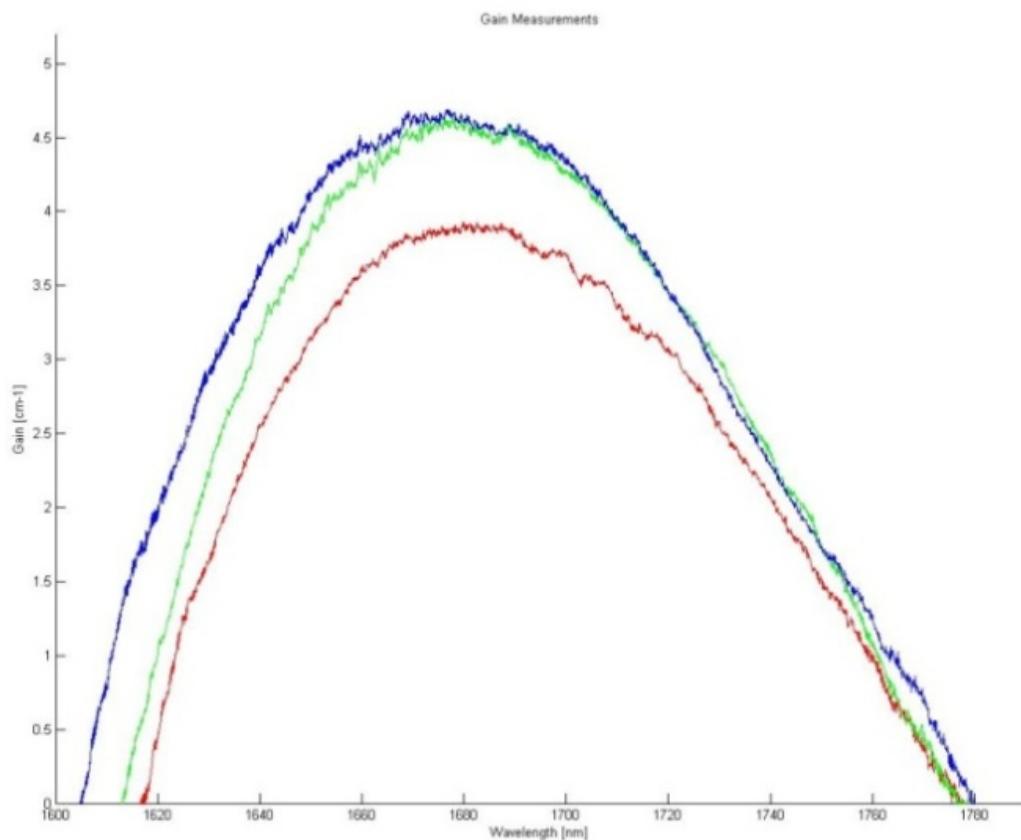
### B.1 Densidad de Corriente Continua, Ciclo de Trabajo de 100% (Setup I)

En la tabla B.1 se muestra las características de las ganancias ópticas modales del Setup I para una densidad de corriente de 5000 A/cm<sup>2</sup>.

**Tabla B.1 Características de las medidas de las ASE utilizadas para generar las ganancias mostradas en la figura B.1**

TEMPERATURA [°]	LONGITUD EN % DE LA SECCIÓN DE ABSORCIÓN	DENSIDAD DE CORRIENTE [A/cm <sup>2</sup> ]	COLOR
35	29-27-24-17-15-12-8	5000	AZUL
37	29-27-24-17-15-12-8	5000	VERDE
40	29-27-24-21-15-12-8	5000	ROJO

En la figura B.1 se muestra las ganancias ópticas modales asociadas a la tabla B.1.



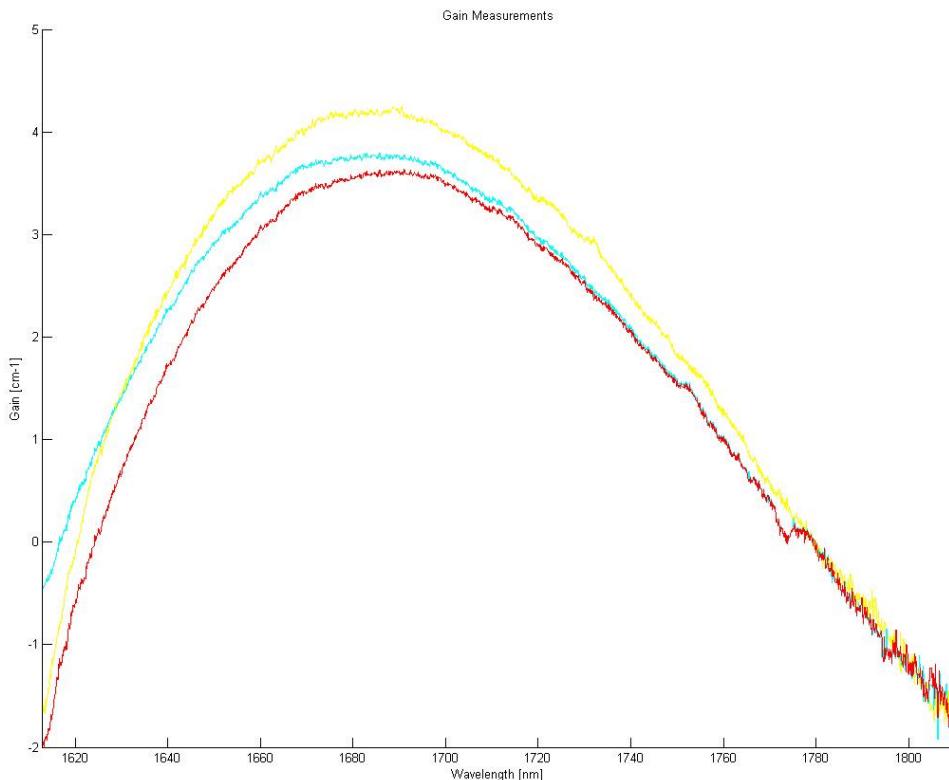
**Figura B.1 Ganancias ópticas modales asociadas a la tabla B.1**

En la tabla B.2 se muestra las características de las ganancias ópticas modales del Setup I para una densidad de corriente de  $4500 \text{ A/cm}^2$ .

**Tabla B.2 Características de las medidas de las ASE utilizadas para generar las ganancias mostradas en la figura B.2**

TEMPERATURA [°]	LONGITUD EN % DE LA SECCIÓN DE ABSORCIÓN	DENSIDAD DE CORRIENTE [A/cm <sup>2</sup> ]	COLOR
35	29-27-24-17-15-12-8	4500	AMARILLO
37	29-27-24-17-15-12-8	4500	CYAN
40	29-27-24-21-15-12-8	4500	ROJO

En la figura B.2 se muestra las ganancias ópticas modales asociadas a la tabla B.2.



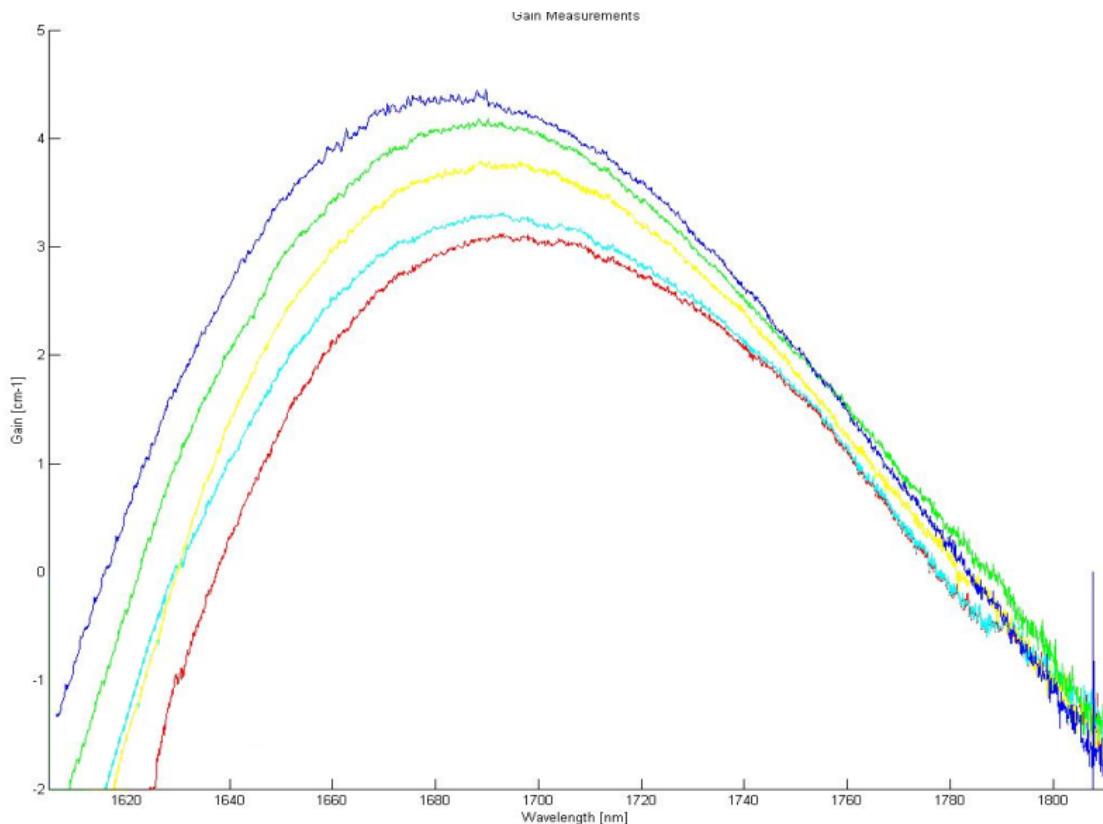
**Figura B.2 Ganancias ópticas modales asociadas a la tabla B.2**

En la tabla B.3 se muestra las características de las ganancias ópticas modales del Setup I para una densidad de corriente de  $4000 \text{ A/cm}^2$ .

**Tabla B.3 Características de las medidas de las ASE utilizadas para generar las ganancias mostradas en la figura B.3**

TEMPERATURA [°]	LONGITUD EN % DE LA SECCIÓN DE ABSORCIÓN	DENSIDAD DE CORRIENTE [A/cm <sup>2</sup> ]	COLOR
30	29-27-24-21-18-15-12-8	4000	AZUL
33	29-27-24-18-15-12-8	4000	VERDE
35	29-27-24-17-15-12-8	4000	AMARILLO
37	29-27-24-17-15-12-8	4000	CIAN
40	29-27-24-21-15-12-8	4000	ROJO

En la figura B.3 se muestra las ganancias ópticas modales asociadas a la tabla B.3.



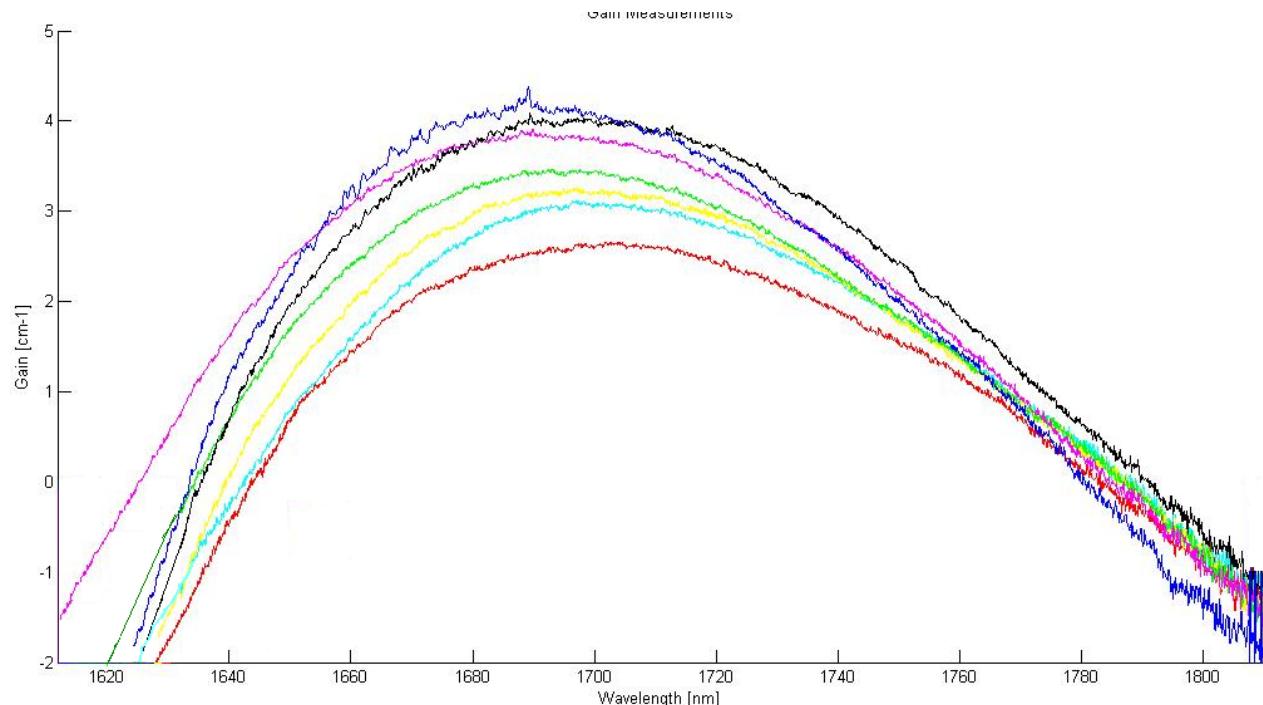
**Figura B.3 Ganancias ópticas modales asociadas a la tabla B.3**

En la tabla B.4 se muestra las características de las ganancias ópticas modales del Setup I para una densidad de corriente de  $3500 \text{ A/cm}^2$ .

**Tabla B.4 Características de las medidas de las ASE utilizadas para generar las ganancias mostradas en la figura B.4**

TEMPERATURA [°]	LONGITUD EN % DE LA SECCIÓN DE ABSORCIÓN	DENSIDAD DE CORRIENTE [A/cm <sup>2</sup> ]	COLOR
25	29-27-24-21-18-15-12-8	3500	AZUL
27	29-27-21-18-15-12-8	3500	NEGRO
30	29-27-24-21-18-15-12-8	3500	ROSA
33	29-27-24-18-15-12-8	3500	VERDE
35	29-27-24-17-15-12-8	3500	AMARILLO
37	29-27-24-17-15-12-8	3500	CIAN
40	29-27-24-21-15-12-8	3500	ROJO

En la figura B.4 se muestra las ganancias ópticas modales asociadas a la tabla B.4.



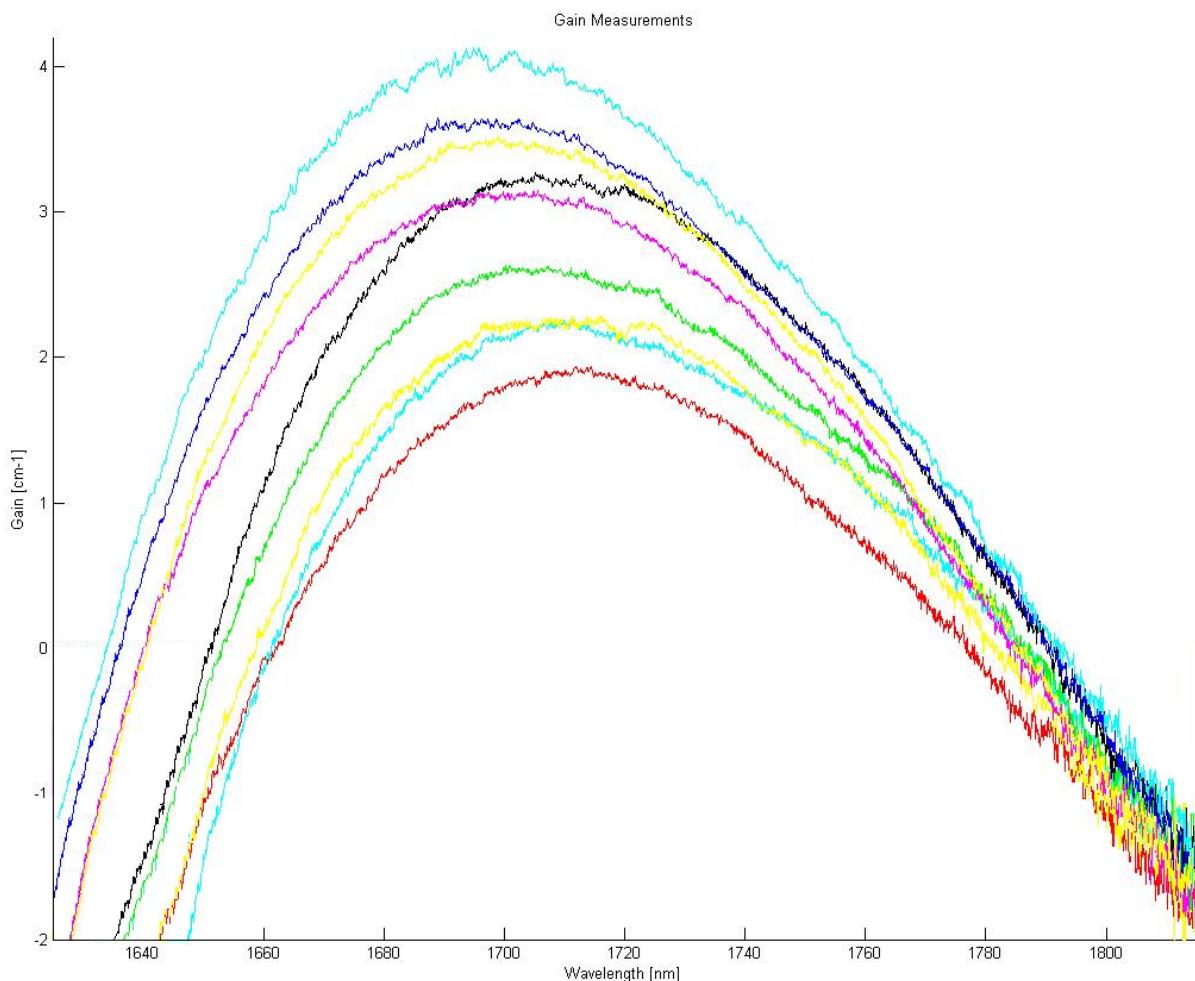
**Figura B.4 Ganancias ópticas modales asociadas a la tabla B.4**

En la tabla B.5 se muestra las características de las ganancias ópticas modales del Setup I para una densidad de corriente de  $3000 \text{ A/cm}^2$ .

**Tabla B.5 Características de las medidas de las ASE utilizadas para generar las ganancias mostradas en la figura B.5**

TEMPERATURA [°]	LONGITUD EN % DE LA SECCIÓN DE ABSORCIÓN	DENSIDAD DE CORRIENTE [A/cm <sup>2</sup> ]	COLOR
20	29-27-20-15-12-9-5	3000	CIAN
23	29-27-24-21-18-15-12-8	3000	AZUL
25	29-27-24-21-18-15-12-8	3000	AMARILLO
27	29-27-21-18-15-12-8	3000	NEGRO
30	29-27-24-21-18-15-12-8	3000	ROSA
33	29-27-24-18-15-12-8	3000	VERDE
35	29-27-24-17-15-12-8	3000	AMARILLO
37	29-27-24-17-15-12-8	3000	CIAN
40	29-27-24-21-15-12-8	3000	ROJO

En la figura B.5 se muestra las ganancias ópticas modales asociadas a la tabla B.5.



**Figura B.5 Ganancias ópticas modales asociadas a la tabla B.5**

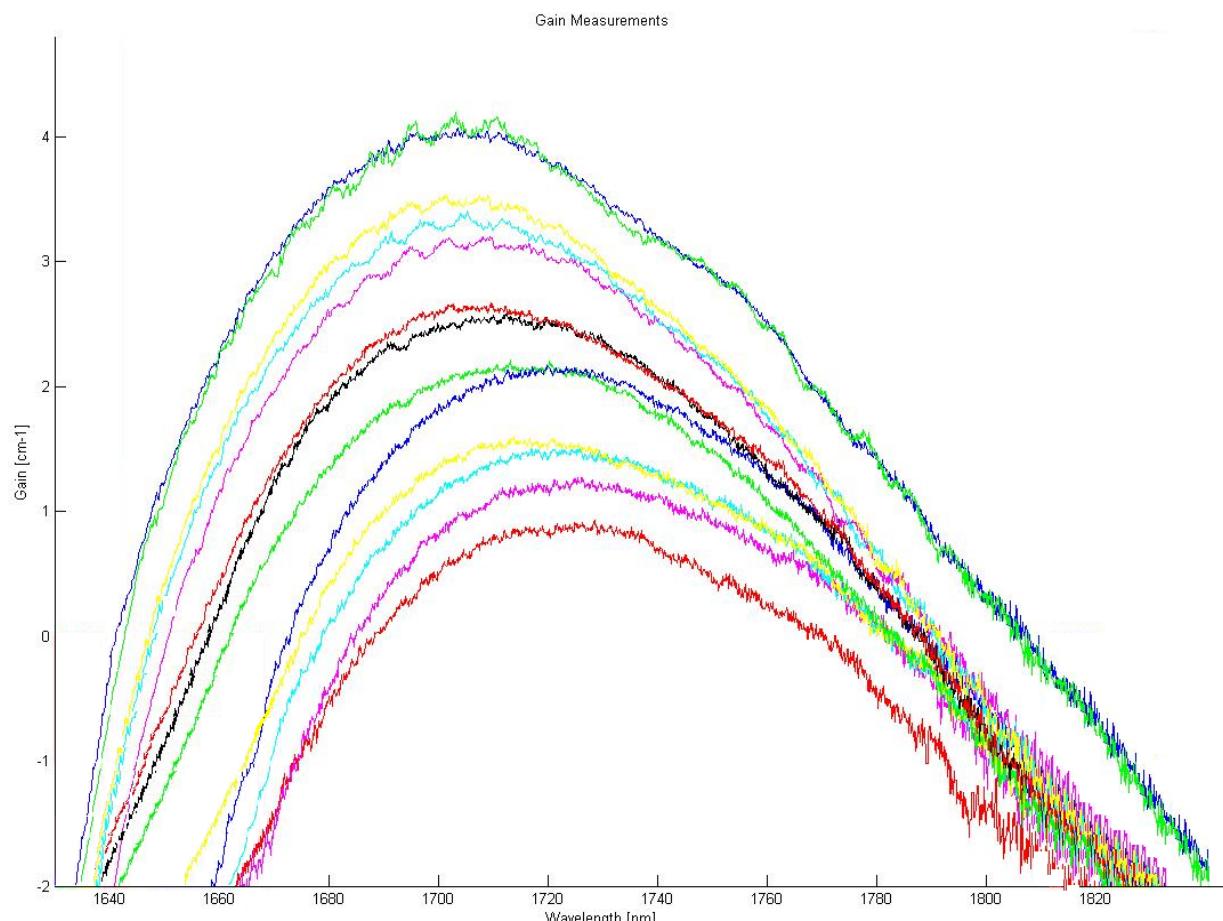
En la tabla B.6 se muestra las características de las ganancias ópticas modales del Setup I para una densidad de corriente de  $2500 \text{ A/cm}^2$ .

**Tabla B.6 Características de las medidas de las ASE utilizadas para generar las ganancias mostradas en la figura B.6**

TEMPERATURA [°]	LONGITUD EN % DE LA SECCIÓN DE ABSORCIÓN	DENSIDAD DE CORRIENTE [A/cm <sup>2</sup> ]	COLOR
10	29-27-20-15-12-9-5	2500	AZUL
13	29-27-20-15-12-9-5	2500	VERDE
15	29-27-20-15-12-9-5	2500	NEGRO
17	29-27-20-15-12-9-5	2500	ROSA
20	29-27-20-15-12-9-5	2500	AMARILLO
23	29-27-24-21-18-15-12-8	2500	CIAN
25	29-27-24-21-18-15-12-8	2500	VERDE

27	29-27-21-18-15-12-8	2500	AZUL
30	29-27-24-21-18-15-12-8	2500	NEGRO
33	29-27-24-18-15-12-8	2500	ROSA
35	29-27-24-17-15-12-8	2500	AMARILLO
37	29-27-24-17-15-12-8	2500	CIAN
40	29-27-24-21-15-12-8	2500	ROJO

En la figura B.6 se muestra las ganancias ópticas modales asociadas a la tabla B.6.



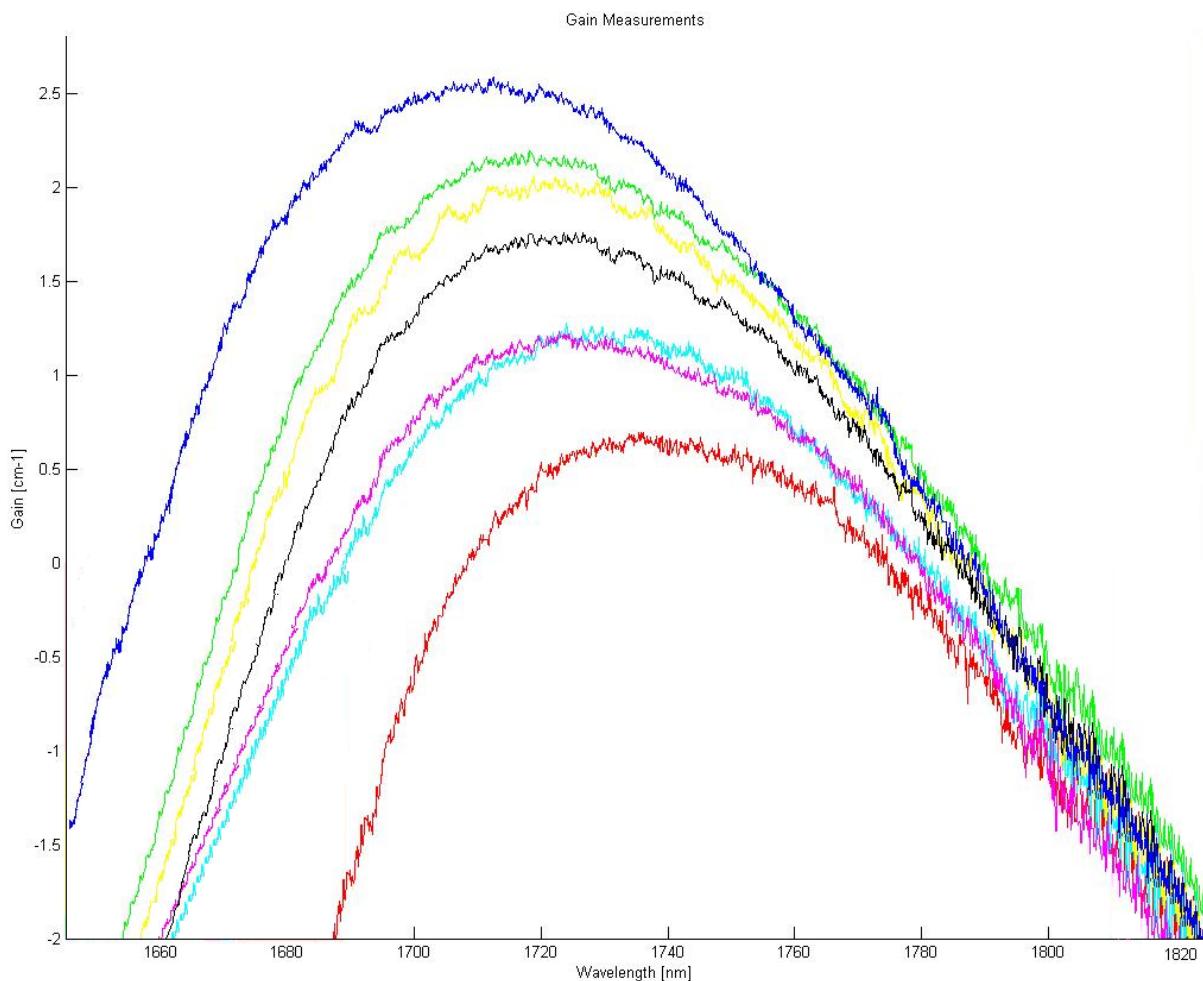
**Figura B.6 Ganancias ópticas modales asociadas a la tabla B.6**

En la tabla B.7 se muestra las características de las ganancias ópticas modales del Setup I para una densidad de corriente de 2000 A/cm<sup>2</sup>.

**Tabla B.7 Características de las medidas de las ASE utilizadas para generar las ganancias mostradas en la figura B.7**

TEMPERATURA [°]	LONGUITUD EN % DE LA SECCIÓN DE ABSORCIÓN	DENSIDAD DE CORRIENTE [A/cm <sup>2</sup> ]	COLOR
10	29-27-20-15-12-9-5	2000	AZUL
13	29-27-20-15-12-9-5	2000	VERDE
15	29-27-20-15-12-9-5	2000	AMARILLO
17	29-27-20-15-12-9-5	2000	NEGRO
20	29-27-20-15-12-9-5	2000	ROSA
23	29-27-24-21-18-15-12-8	2000	CIAN
25	29-27-24-21-18-15-12-8	2000	ROJO

En la figura B.7 se muestra las ganancias ópticas modales asociadas a la tabla B.7.



**Figura B.7 Ganancias ópticas modales asociadas a la tabla B.7**

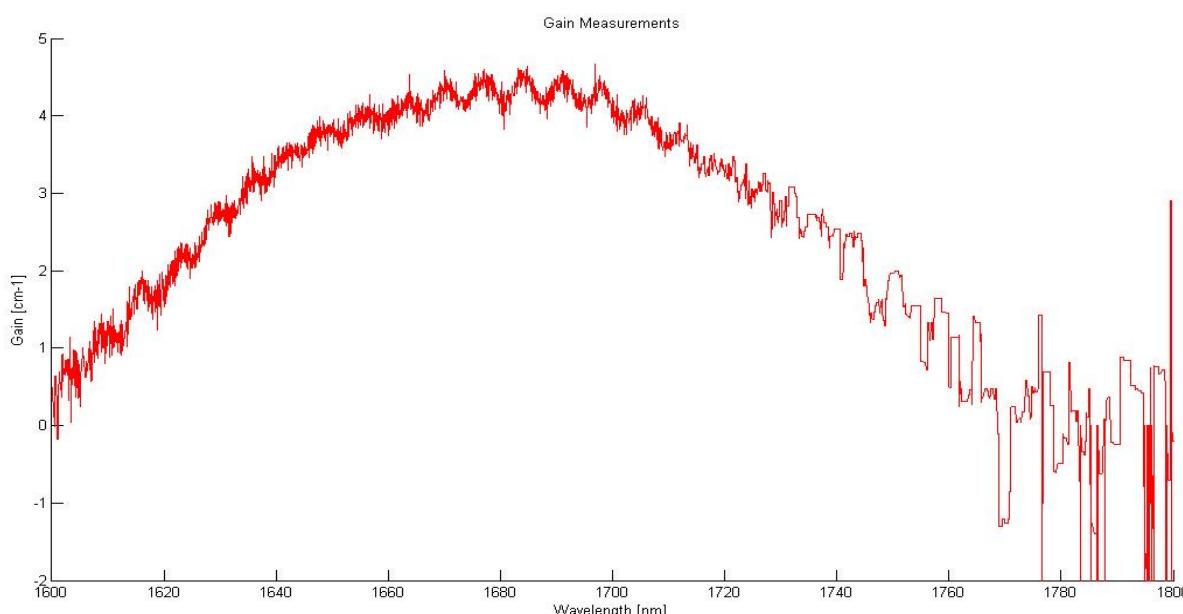
## B.2 Densidad de Corriente Pulsada, Ciclo de Trabajo de 1% (Setup II)

En la tabla B.8 se muestra las características de las ganancias ópticas modales del Setup II para una densidad de corriente de  $5000 \text{ A/cm}^2$ .

**Tabla B.8 Características de las medidas de las ASE utilizadas para generar las ganancias mostradas en la figura B.8**

TEMPERATURA [°]	LONGITUD EN % DE LA SECCIÓN DE ABSORCIÓN	DENSIDAD DE CORRIENTE [A/cm <sup>2</sup> ]	COLOR
40	29-28-27-26-23-22-20-16-15-13-12-11-10-7	5000	ROJO

En la figura B.8 se muestra la ganancia óptica modal asociada a la tabla B.8.



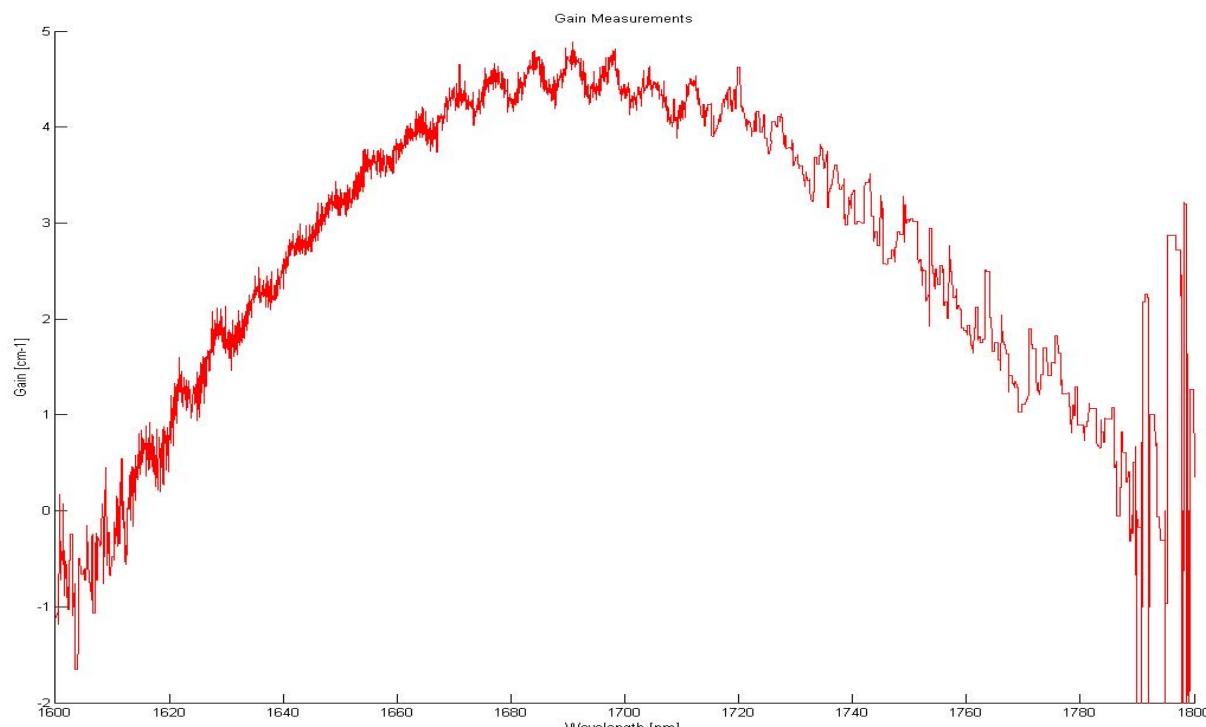
**Figura B.8 Ganancias ópticas modales asociadas a la tabla B.8**

En la tabla B.9 se muestra las características de las ganancias ópticas modales del Setup II para una densidad de corriente de  $4500 \text{ A/cm}^2$ .

**Tabla B.9 Características de las medidas de las ASE utilizadas para generar las ganancias mostradas en la figura B.9**

TEMPERATURA [°]	LONGITUD EN % DE LA SECCIÓN DE ABSORCIÓN	DENSIDAD DE CORRIENTE [A/cm <sup>2</sup> ]	COLOR
40	29-28-27-26-23-22-20-16-15-13-12-11-10-7	4500	ROJO

En la figura B.9 se muestra la ganancia óptica modal asociada a la tabla B.9.



**Figura B.9 Ganancias ópticas modales asociadas a la tabla B.9**

En la tabla B.10 se muestra las características de las ganancias ópticas modales del Setup II para una densidad de corriente de  $4000 \text{ A/cm}^2$ .

**Tabla B.10 Características de las medidas de las ASE utilizadas para generar las ganancias mostradas en la figura B.10**

TEMPERATURA [°]	LONGITUD EN % DE LA SECCIÓN DE ABSORCIÓN	DENSIDAD DE CORRIENTE [A/cm <sup>2</sup> ]	COLOR
30	29-28-27-26-23-22-20-16-15-13-12-11-10-7	4000	NEGRO
35	29-28-27-26-23-22-20-16-15-13-12-11-10-7	4000	AMARILLO
40	29-28-27-26-23-22-20-16-15-13-12-11-10-7	4000	ROJO

En la figura B.10 se muestra la ganancia óptica modal asociada a la tabla B.10.

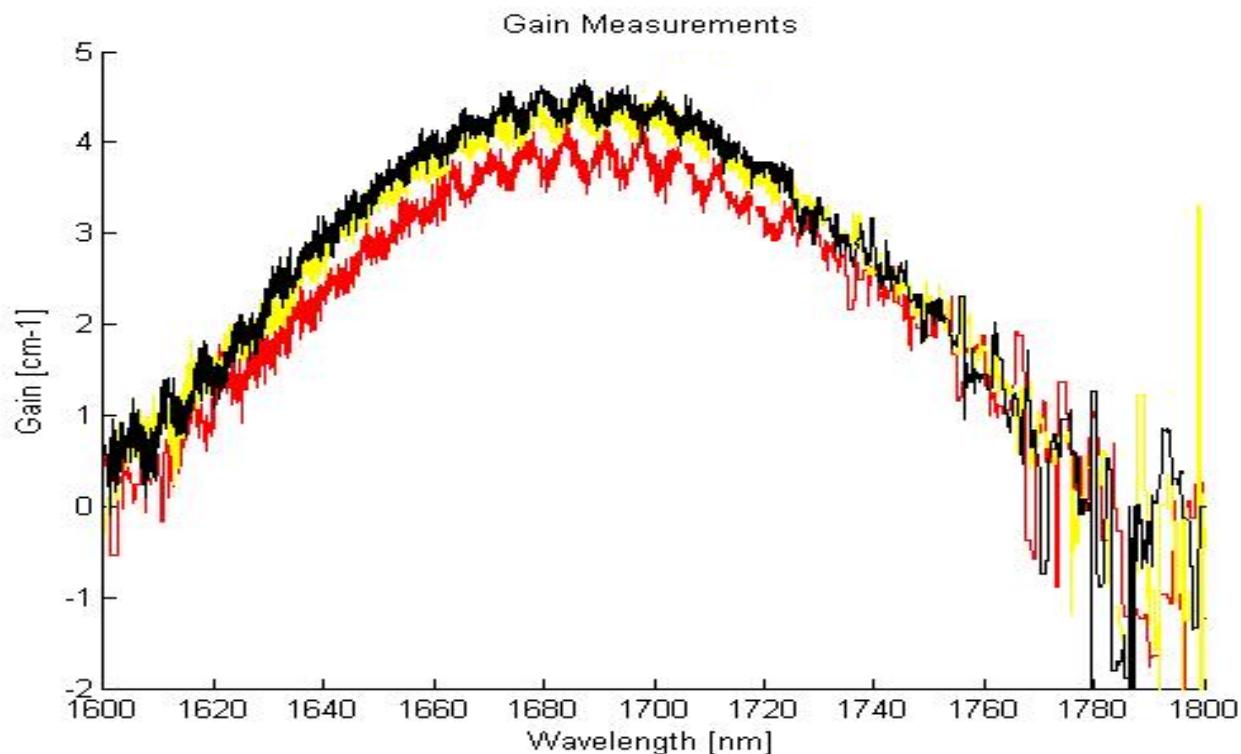


Figura B.10 Ganancias ópticas modales asociadas a la tabla B.10

En la tabla B.11 se muestra las características de las ganancias ópticas modales del Setup II para una densidad de corriente de  $3500 \text{ A/cm}^2$ .

**Tabla B.11 Características de las medidas de las ASE utilizadas para generar las ganancias mostradas en la figura B.11**

TEMPERATURA [°]	LONGITUD EN % DE LA SECCIÓN DE ABSORCIÓN	DENSIDAD DE CORRIENTE [A/cm <sup>2</sup> ]	COLOR
25	29-28-27-26-23-22-20-16-15-13-12-11-10-7	3500	AZUL
30	29-28-27-26-23-22-20-16-15-13-12-11-10-7	3500	VERDE
35	29-28-27-26-23-22-20-16-15-13-12-11-10-7	3500	CIAN
40	29-28-27-26-23-22-20-16-15-13-12-11-10-7	3500	ROJO

En la figura B.11 se muestra la ganancia óptica modal asociada a la tabla B.11.

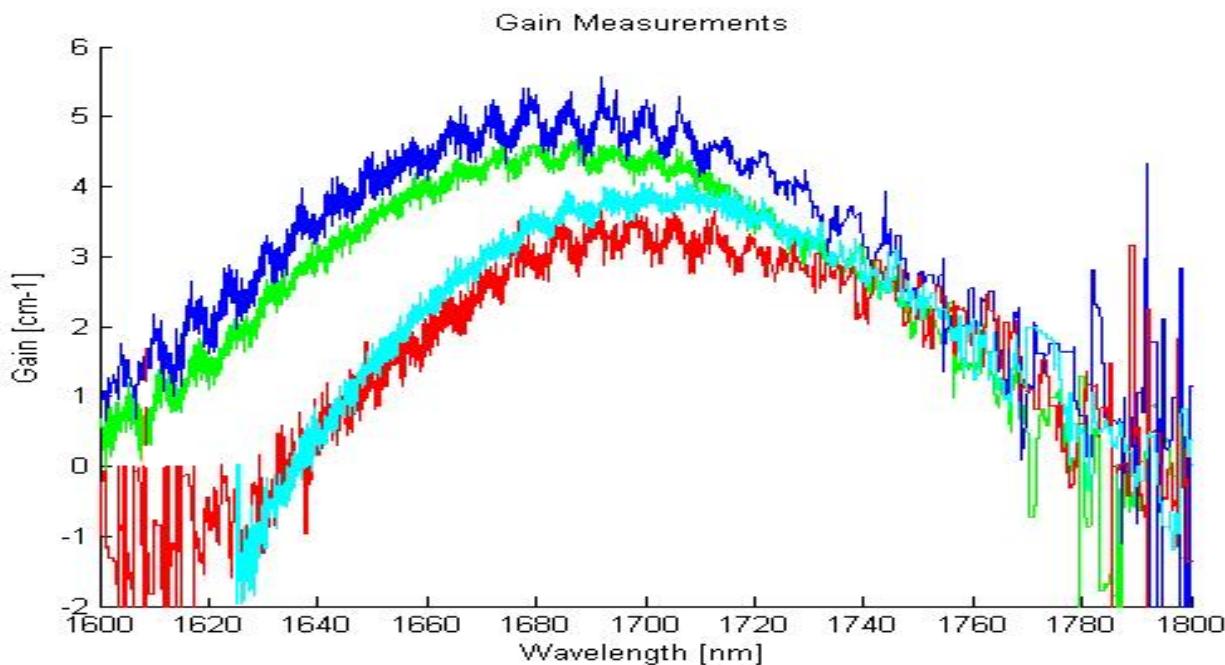


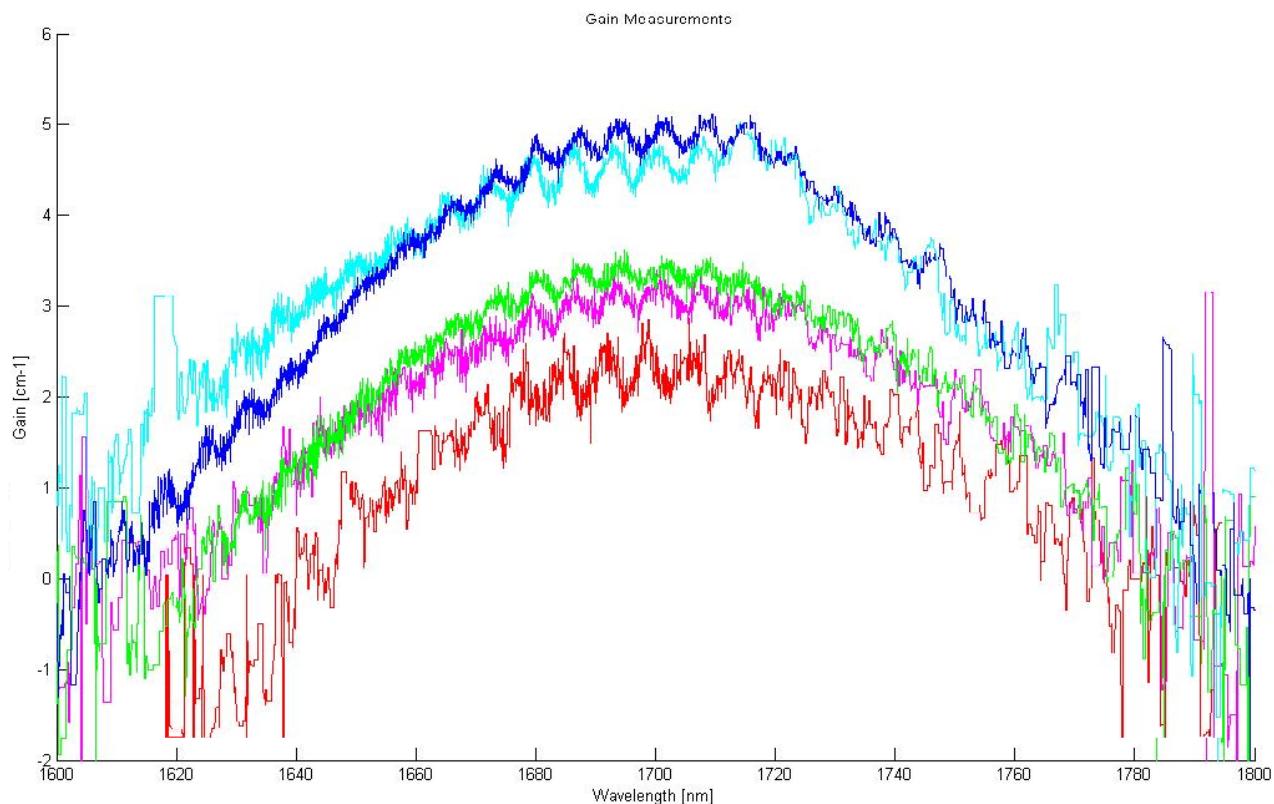
Figura B.11 Ganancias ópticas modales asociadas a la tabla B.11

En la tabla B.12 se muestra las características de las ganancias ópticas modales del Setup II para una densidad de corriente de  $3000 \text{ A/cm}^2$ .

Tabla B.12 Características de las medidas de las ASE utilizadas para generar las ganancias mostradas en la figura B.12

TEMPERATURA [°]	LONGITUD EN % DE LA SECCIÓN DE ABSORCIÓN	DENSIDAD DE CORRIENTE [A/cm <sup>2</sup> ]	COLOR
20	29-28-27-26-23-22-20-16-15-13-12-11-10-7	3000	AZUL
25	29-28-27-26-23-22-20-16-15-13-12-11-10-7	3000	CIAN
30	29-28-27-26-23-22-20-16-15-13-12-11-10-7	3000	VERDE
35	29-28-27-26-23-22-20-16-15-13-12-11-10-7	3000	ROSA
40	29-28-27-26-23-22-20-16-15-13-12-11-10-7	3000	ROJO

En la figura B.12 se muestra la ganancia óptica modal asociada a la tabla B.12.



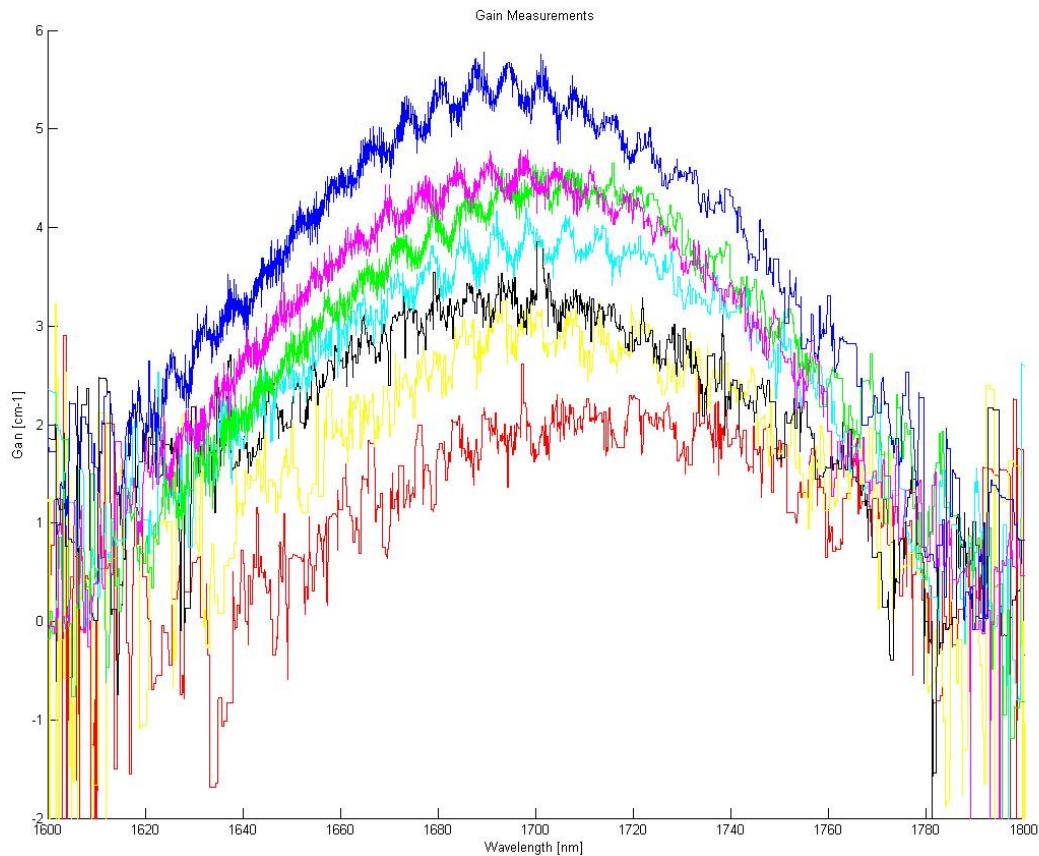
**Figura B.12 Ganancias ópticas modales asociadas a la tabla B.12**

En la tabla B.13 se muestra las características de las ganancias ópticas modales del Setup II para una densidad de corriente de  $2500 \text{ A/cm}^2$ .

**Tabla B.13 Características de las medidas de las ASE utilizadas para generar las ganancias mostradas en la figura B.13**

TEMPERATURA [°]	LONGITUD EN % DE LA SECCIÓN DE ABSORCIÓN	DENSIDAD DE CORRIENTE [A/cm <sup>2</sup> ]	COLOR
10	29-28-27-26-23-22-20-16-15-13-12-11-10-7	2500	AZUL
15	29-28-27-26-23-22-20-16-15-13-12-11-10-7	2500	ROSA
20	29-28-27-26-23-22-20-16-15-13-12-11-10-7	2500	VERDE
25	29-28-27-26-23-22-20-16-15-13-12-11-10-7	2500	CIAN
30	29-28-27-26-23-22-20-16-15-13-12-11-10-7	2500	NEGRO
35	29-28-27-26-23-22-20-16-15-13-12-11-10-7	2500	AMARILLO
40	29-28-27-26-23-22-20-16-15-13-12-11-10-7	2500	ROJO

En la figura B.13 se muestra la ganancia óptica modal asociada a la tabla B.13.



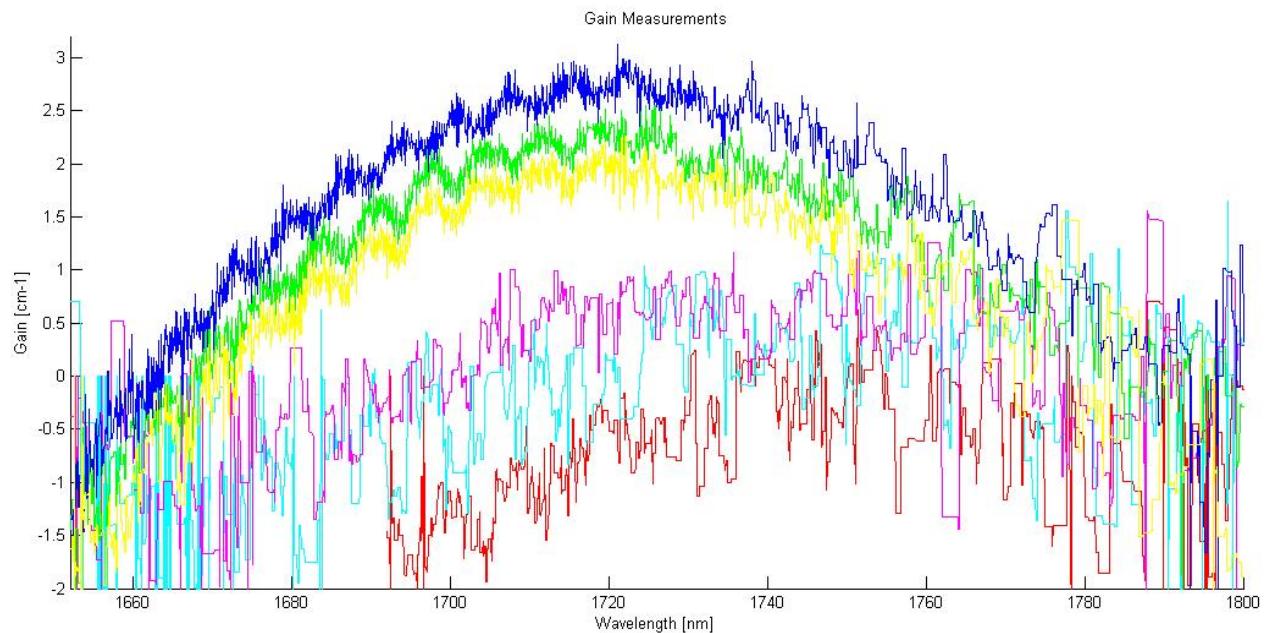
**Figura B.13 Ganancias ópticas modales asociadas a la tabla B.13**

En la tabla B.14 se muestra las características de las ganancias ópticas modales del Setup II para una densidad de corriente de  $2000 \text{ A/cm}^2$ .

**Tabla B.14 Características de las medidas de las ASE utilizadas para generar las ganancias mostradas en la figura B.14**

TEMPERATURA [°]	LONGITUD EN % DE LA SECCIÓN DE ABSORCIÓN	DENSIDAD DE CORRIENTE [ $\text{A/cm}^2$ ]	COLOR
10	29-28-27-26-23-22-20-16-15-13-12-11-10-7	2000	AZUL
15	29-28-27-26-23-22-20-16-15-13-12-11-10-7	2000	VERDE
20	29-28-27-26-23-22-20-16-15-13-12-11-10-7	2000	AMARILLO
25	29-28-27-26-23-22-20-16-15-13-12-11-10-7	2000	ROSA
30	29-28-27-26-23-22-20-16-15-13-12-11-10-7	2000	CIAN
35	29-28-27-26-23-22-20-16-15-13-12-11-10-7	2000	ROJO

En la figura B.14 se muestra la ganancia óptica modal asociada a la tabla B.14.



**Figura B.14 Ganancias ópticas modales asociadas a la tabla B.14**

## Anexo C: Final Thesis Summary

Este trabajo se realizó bajo un proyecto de intercambio de estudiantes universitarios europeo entre la Universidad de las Palmas de G.C (ULPGC) y la Eindhoven University of Technology(TU/e), en Holanda. La totalidad de este trabajo se desarrolló en Holanda bajo el programa de intercambio antes citado, y como final del mismo la TUE me requirió la elaboración de un documento en inglés que compendiará el trabajo realizado en dicha universidad durante el periodo de beca. A continuación se expone dicho documento.



## Graduation Thesis

# Temperature dependency within optical gain measurements

**Name:** Sergio Rosino Rincon.

**Student Number:** s087349.

**Date:** 10/01/2010.

**Institute:** Eindhoven University of Technology(TU/e).

Faculty of Electrical and Electronic Engineering

Telecommunication Technology and Electromagnetic (TTE).

Opto-Electronic Devices (OED).

**Supervisors TU/e:** Erwin A.J.M. Bente.

Bauke W. Tilma.

**Graduation Professor:** Javier del Pino.

COBRA Research Institute, Technische Universiteit Eindhoven,  
Postbus 513, 5600 MB Eindhoven, The Netherlands.

## Table of Contents

<b>1. Introduction .....</b>	<b>121</b>
1.1    Current Tunable Laser .....	122
1.2    InP-based QD Optical Amplifier.....	123
1.2.1    Characteristic.....	123
1.2.2    Advantage and problems.....	124
1.3    InP-based QD Tunable Laser .....	124
1.3.1    Synopsis of the motivation.....	126
1.4    About this report .....	126
<b>2. Theory and design .....</b>	<b>130</b>
2.1    Hakki-Paoli .....	130
2.1.1    Description .....	130
2.1.2    Advantages vs. problems .....	131
2.2    Henry .....	132
2.2.1    Description .....	132
2.2.2    Advantages vs. problems .....	132
2.3    Thomson .....	132
2.3.1    Description .....	132
2.3.2    Advantages vs. problems .....	134

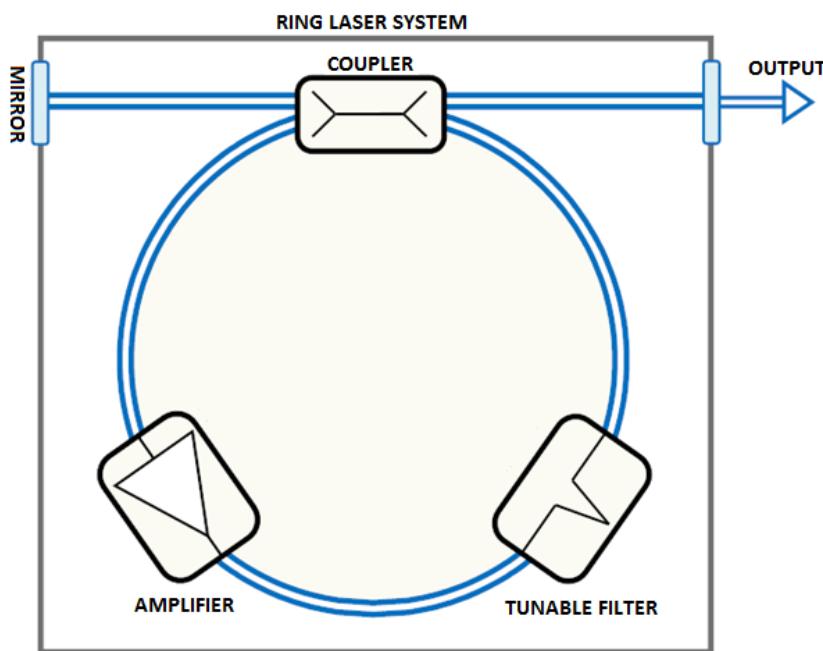
2.4	Multi-section Optical Gain Measure Techniques .....	135
2.4.1	Description .....	135
2.4.2	Influence of the kind of current in the temperature dependency within optical gain measurements .....	135
2.4.3	Limitation (working Area).....	136
<b>3.</b>	<b>Fabrication .....</b>	<b>139</b>
3.1	Chip Fabrication.....	139
3.1.1	Descriptions.....	139
<b>4.</b>	<b>Measurement Setup.....</b>	<b>141</b>
4.1	Continue Injection Current (Setup I) .....	141
4.1.1	Description .....	141
4.1.2	Systems .....	143
4.2	Pulse Injection Current Setup (Setup II).....	148
4.2.1	Description .....	148
4.2.2	Systems .....	150
4.3	Set of ASE Measurement .....	152
4.4	Problems Found .....	153
4.4.1	Precaution .....	153
<b>5.</b>	<b>Fitting of the ASE measurement .....</b>	<b>156</b>
5.1	ASE Measure Files.....	156
5.2	Fitting Algorithm.....	157
5.3	Optical Modal Gain Results.....	159
5.3.1	Continue Injection Current (Setup I).....	159
5.3.2	Pulse Injection Current (Setup II).....	161
5.3.3	General description of the temperature dependency within optical gain measurements. .	162
5.4	Working Area.....	163
5.4.1	Continue Injection Current (Setup I).....	163
5.4.2	Pulse Injection Current (Setup II).....	164
5.5	Distance .....	165
5.5.1	Cross Correlation .....	165
5.5.2	Euclidean Distance .....	166
5.5.3	Malahanobis Distance.....	166
5.6	Temperature Dependency .....	167
<b>6.</b>	<b>Conclusion .....</b>	<b>172</b>

6.1	Summary and discussion.....	172
6.2	Future work.....	172

# 1. Introduction

Tunable lasers have played a crucial and sustained role in advancements of fundamental physics and science. This kind of devices are specially used for optical analysis such as spectroscopy, gas detection and frequency domain optical coherence tomography (FDOCT) and have had a positive effect over many different fields, especially in biophotonics applications. Other applied fields that employ tunable lasers include communications, imaging, interferometry, microscopy, optical metrology and remote sensing. Tunable lasers are different to traditional lasers because their emission wavelength, or color can be changed within a limited spectral range.

The desired tunable laser to be created by the optoelectronic device department consists of an amplifier section and a tunable filter section within a laser cavity, as shown in the figure 1.1. In order to develop a tunable laser system, it is necessary to know and to understand the value and the behavior of the optical (modal) gain  $G$  from the amplifier as a function of the wavelength, the injected current and the temperature. This work intends to study the temperature dependency of the optical gain measurements.



**Figure 1.1: Tunable Ring Laser System**

In this report first, an introduction covering the basic characteristics, the advantages and the problems of the tunable laser devices and indium phosphate (InP) based quantum dot gain material is presented. After that, we shortly explain the common measurement techniques used to obtain the optical modal gain, their advantages and problems. We focus on a modification of the Thomson technique that extracts the optical modal gain from the amplifier spontaneous emission (ASE) by fitting. This technique seems to be the best-adapted technique for our needs. Therefore we are going to use it in our experiment.

Then, we focus on the fabrication and characteristics of the chip that to be used to obtain the measurements. Later, the main part of the report is based on the experiments and measurements. We explain the different systems and devices that form our measurement environment and the steps and precautions to follow to obtain a suitable ASE measurement set. These measurements are performed with two kind of currents (pulse and continue) under different conditions of temperature and current density. The goal is to obtain comparable optical modal gains. Then, we are going to use a mathematic software tool to obtain the differences optical modal gains from the ASE measurement set by fitting. Finally, we are going to carry out a comparative study between the optical modal gains to extract some conclusions about the optical modal gain behavior concerning the temperature.

## 1.1 Current Tunable Laser

A tunable laser is a laser whose wavelength of operation can be changed in a controlled manner. There are many types and categories of tunable lasers. There are tunable laser based on gas, liquid, and solid state. Among the types of tunable lasers are excimer lasers, CO<sub>2</sub> lasers, dye lasers (liquid and solid state), transition metal solid-state lasers, semiconductor diode lasers, and free electron lasers. Based on the tunability of the central wavelength, we can classify the tunable lasers in three different groups:

- Multi line tuning (switching between different wavelengths) [1].
  - Argon-ion lasers.
  - CO:He, CO:N<sub>2</sub>, and CO:O<sub>2</sub> lasers.
- Narrowband continuous tunable lasers (<10nm range) [2].
  - Distributed Feedback (DFB).
  - Distributed Bragg reflector (DBR).
  - MEMS based external cavity lasers.
- Widely continuous tunable lasers (>10nm range) [3].
  - SG-DBR lasers.
  - DFB laser arrays.
  - DBRs on steroids.
  - Complete integrated continuous tunable lasers.

At the Eindhoven University of Technology several works are taking place on an integrated continuously widely tunable laser for optical coherence tomography (OCT).

Typically widely tunable laser systems are bulk solid-state laser systems that are scanned optomechanically or opto-acoustically. These systems are however limited in scanning speed due to their size. Besides that they are bulky and costly to operate. The advantage of a complete integrated tunable laser is the fast electro-optical response, which makes the tuning faster. Furthermore, due to the short cavity length the building up time of the laser is reduced.

The laser fabricated at the Eindhoven University of Technology uses InAs/InGaAsP/InP(100) quantum dot optical amplifiers and must be tunable over at least 100nm in the 1600nm to 1800nm region. These optical amplifiers should be suitable for use in InP based photonic integrated circuits (PICs) with active/passive integration.

## **1.2 InP-based QD Optical Amplifier**

During the last decade, great progress has been made in nanotechnology, including the development in the field of quantum dots (QDs). This new material and its possible application have had a positive effect over many different fields, especially in photonics application, where the use of InP-based material to develop QD device have been/is generalized.

### **1.2.1 Characteristic**

Their composition and small size (a few thousand atoms) gives them extraordinary optical properties, which can be customized by changing the size or composition of the dots. As a result of this QD lasers have a very low transparency current density per dot layer, a wide gain bandwidth due to the variation in dot size and can have a much lower threshold current density [4] compared to bulk or quantum well lasers. Moreover, QD material has the advantage over other active materials with respect to the spreading and sidewall recombination [5] of injected carriers. These interesting properties are brought about from the quantum confinement of the electrons. This means for example that we can have deeply etched mono-mode ridge QD waveguide amplifiers which allow for significantly more compact devices.

Now, if we focus on the advantages that the use of materials based on InP to develop chips provide us, we must comment that the InP-based materials system easily covers the full range of optical-networking wavelengths dominant for photonic devices in the 1.55  $\mu$ m wavelength region employing bulk, QW and QD

active regions. Moreover, it is ideally suited for monolithic photonic integration, supporting all key optical functions, including lasers, SOAs, phase modulators, detectors, and passive waveguides on a single chip.

### 1.2.2 Advantage and problems

In fact, there are these proprieties of the QD that added to advance of the InP-based materials that turn the InP-based materials with QDs based active region into a perfect candidate for the development of a compact and fast widely tunable laser system.

A problem when we are using QDs is the fact that it is a relative new material system, so the theory about QDs is not completely clear. There are effects and behaviors related with the QDs that we are not able to completely understand.

## 1.3 InP-based QD Tunable Laser

The complete study of the optical behavior of the quantum dots in an InP-based material is out of the aims of this work. But, we intend to explain how, the general diagram of a fully optical monolithic tunable laser works, as illustrated in figure 1.1.

The main propriety that considered here is that the output wavelength of a laser system is always around to the top of the total optical gain  $G_{Total}$

$$G_{Total} = G_{Amplifier} + L_{System} \quad (1.1)$$

Where, the total gain  $G_{Total}$  is the optical modal gain of the amplifier  $G_{Amplifier}$  adds the total losses of the system. Often, we suppose that the losses are constant over the wavelength range ( $L_S(\lambda) = C$ ), so we can expect that the output wavelength of the laser is always around the top of the optical modal gain  $G$ . This process is show in the figures 1.2.A, 1.2.B and 1.2.C.

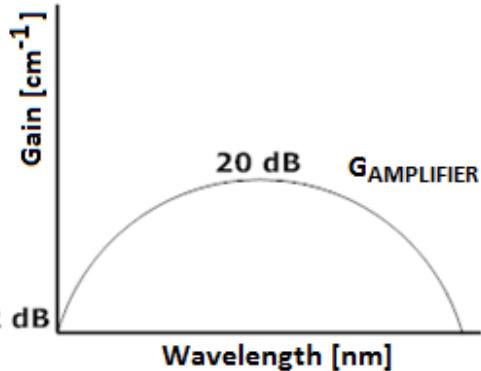


FIGURE 1.2.A GAIN OF THE AMPLIFIER

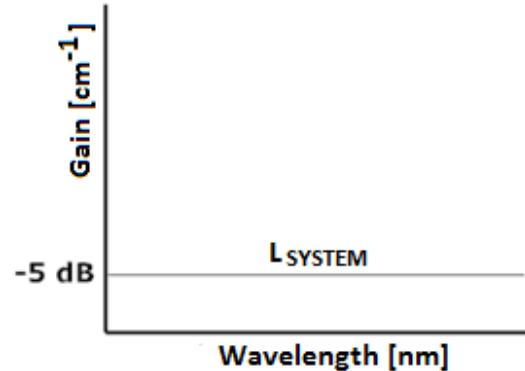


FIGURE 1.2.B LOSSES OF THE SYSTEM

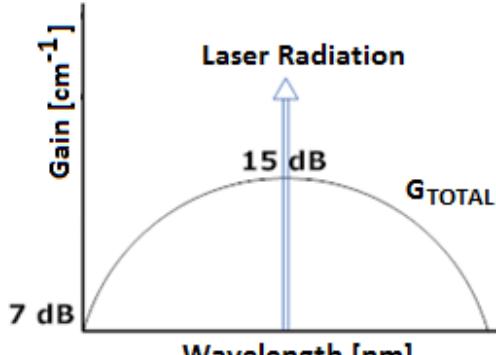


FIGURE 1.2.C OUTPUT OF THE LASER SYSTEM

**Figure 1.2: Laser System Spectrum Response. Figures: 1.2.A Optical Modal Gain Spectrum Response of the Amplifier, 1.2.B Loss Spectrum Response of the System, and 1.3.C Total Optical Modal Gain Spectrum Response of the System**

Using this property, the optic-electronic devices group from the Eindhoven University of technology develops an electro-optical integrated tunable laser. This theoretical device consists of a QD amplifier with a typical optical modal gain, and a tunable band-pass filter. Both devices are integrated in a ring feed back circuit, inside of a laser cavity, as shown in figure 1.1.

As a result, the total optical modal gain of the system ( $G_{Total}$ ) is the optical modal gain of the amplifier ( $G_{Amplifier}$ ) adding the losses of system and the losses of the filter. So, if we can control the losses of the band-pass filter, we will control the total optical modal gain of the system ( $G_T$ ). So now, the output wavelength of the laser system matches with the band-pass of the filter.

$$G_T = G_{Amplifier} + L_{Filter} + L_{System} \quad (1.2)$$

This process is shown in the figures 1.3.A, 1.3.B, 1.3.C and 1.3.D.

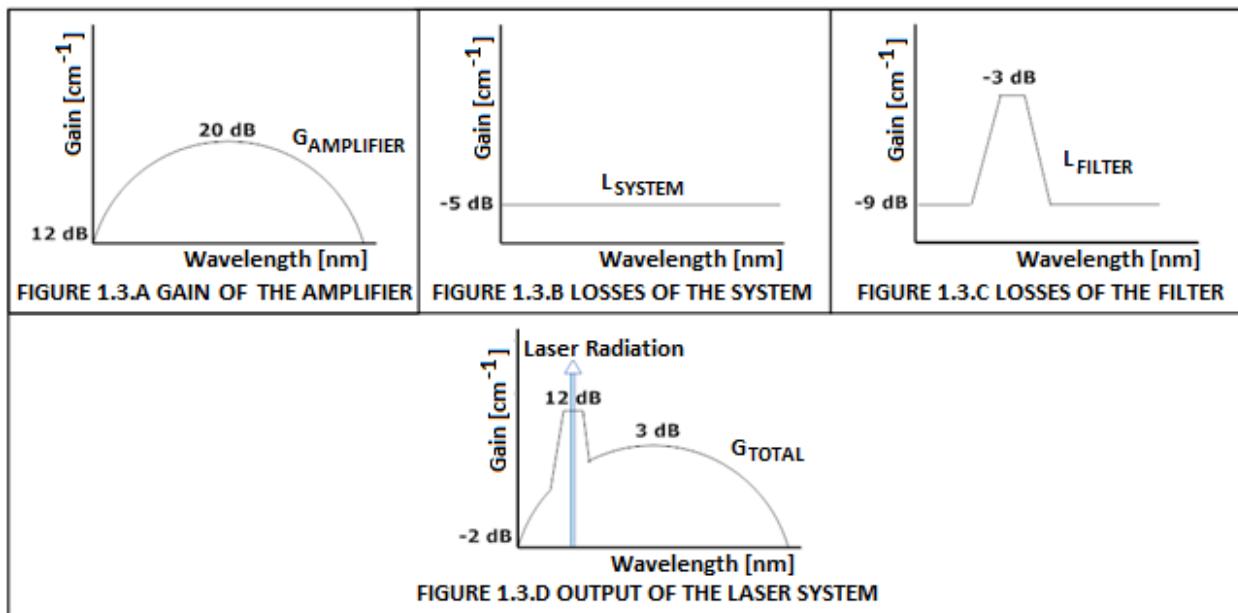


Figure 1.3: Laser System Spectrum Response. Figures: 1.3.A Optical Modal Gain Spectrum Response of the Amplifier, 1.3.B Loss Spectrum Response of the System, 1.3.C Loss Spectrum Response of the Filter, and 1.3.D Total Optical Modal Gain Spectrum Response of the System

### 1.3.1 Synopsis of the motivation

The development of this theory device will provide us a small, cheap and faster optoelectronic tool useful in different areas of the science.

### 1.3.2 About this report

- **Objective**

As I mentioned, for the design of a PIC with amplifier sections, detailed knowledge of the characteristics of the gain material is essential. Knowledge and control of the optical modal gain  $G$  as a function of wavelength, temperature and injection current is necessary for the design of a tunable laser. However, the temperature control system that we normally use in lab, to control and fix the temperature in the chip, during the taking of measurements cannot control the real temperature in the chip. The figure 1.4 shows the general diagram of a temperature control system.

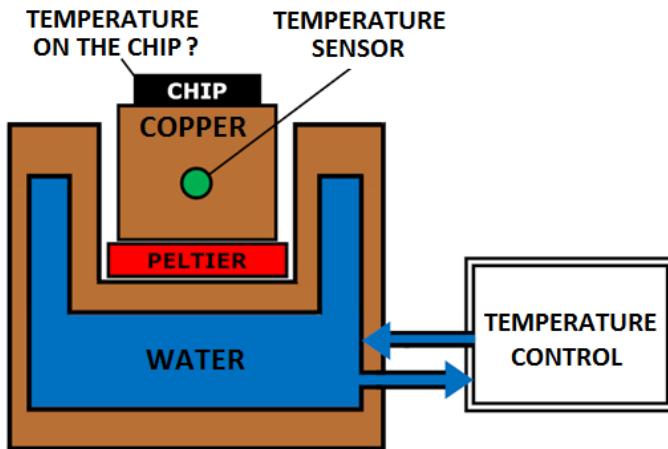


Figure 1.3: Temperature Control System

When we feed the chip, we apply energy and almost of this energy is transformed in heat by Joule's effect. The heat is transferred through the copper structure and removed by the water cooler but this is not an instantaneous process. As we can see in the last figure the temperature sensor, that we use to control and fix the temperature of the system, is put in the middle of the copper structure so, there is a temperature difference between the temperature that we can control and fix and the real temperature in the chip. It does not matter, as we can see in the figure 1.5.A and 15.B, if we are cooling or heating, because we first fix the temperature of the system and after this we apply energy.

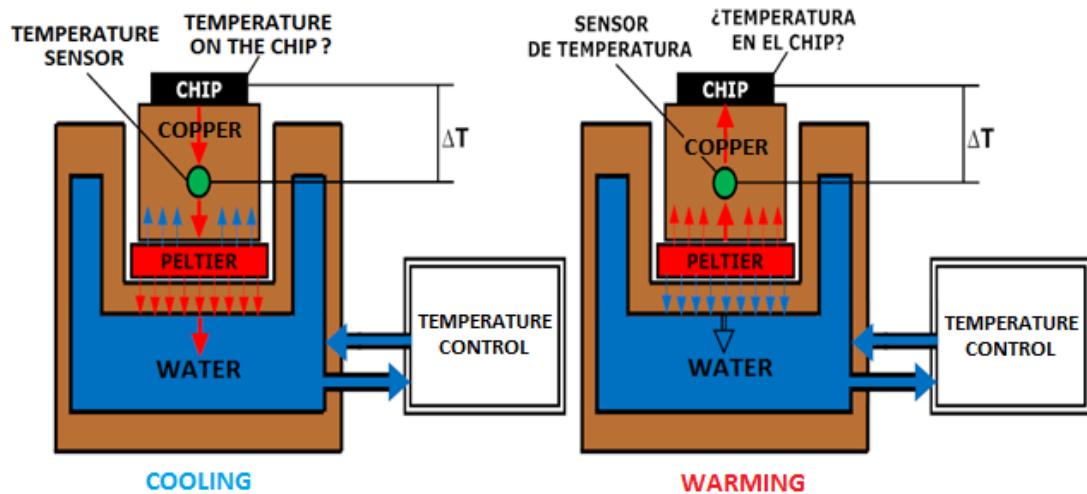


Figure 1.4: Heat Transference

In this report we describe how this temperature difference affects to the optical modal gain measurements, or in other words Temperature dependency within optical gain measurements. To do this we need to know the real temperature in the chip ( $T_x$ ?).

- Tasks

The main reason that prevent to remove the heat is that we normally work with continuous injection currents, this means that we are always apply energy and this energy is always transform in heat, in other words we are keeping the temperature difference. However if we work with a pulse injection currents, using for example a duty cycle of 1%, we have the 99% of the time to remove the heat. Moreover, we are applying 20dB less of power, which means 20dB less of heat.

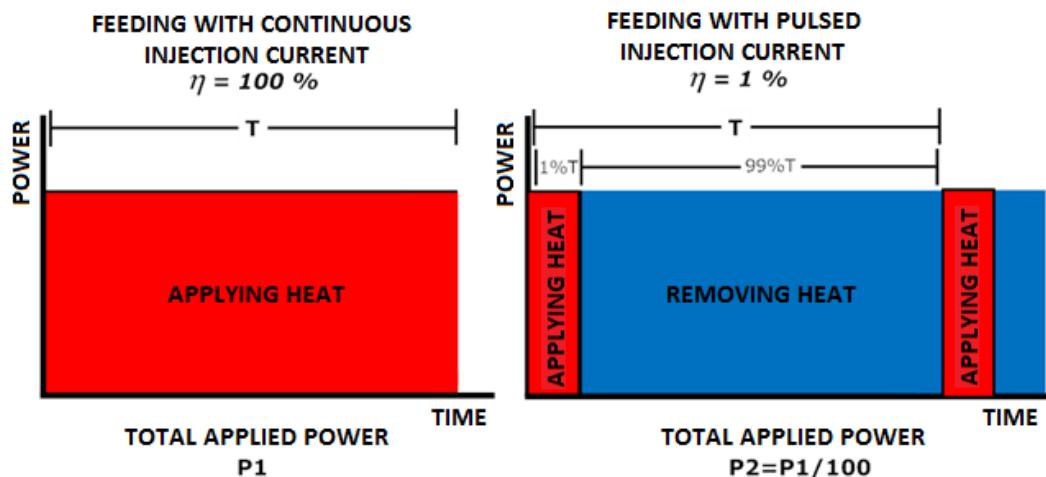


Figure 1.5: Pulsed vs Continuous Injection Current

For this we can assume that the temperature difference when we work with pulse injection current is near zero, so if we work with pulse we can control and fix the real temperature in the chip. If this is true, we can compare pulsed and continuous optical modal gain measurements to know the  $\Delta T$  as function of the injection current density.

Let us suppose, as we can see in the figure 1.6, that we have two equal setups and chips that are working with the same density current but under different temperatures  $T_1$  and  $T_2$ , using different kinds of currents, one using pulsed injection current and the other using continuous. As we commented before, when we are working with a pulsed injection current the temperature different is near zero ( $\Delta T_2 \approx 0$ ).

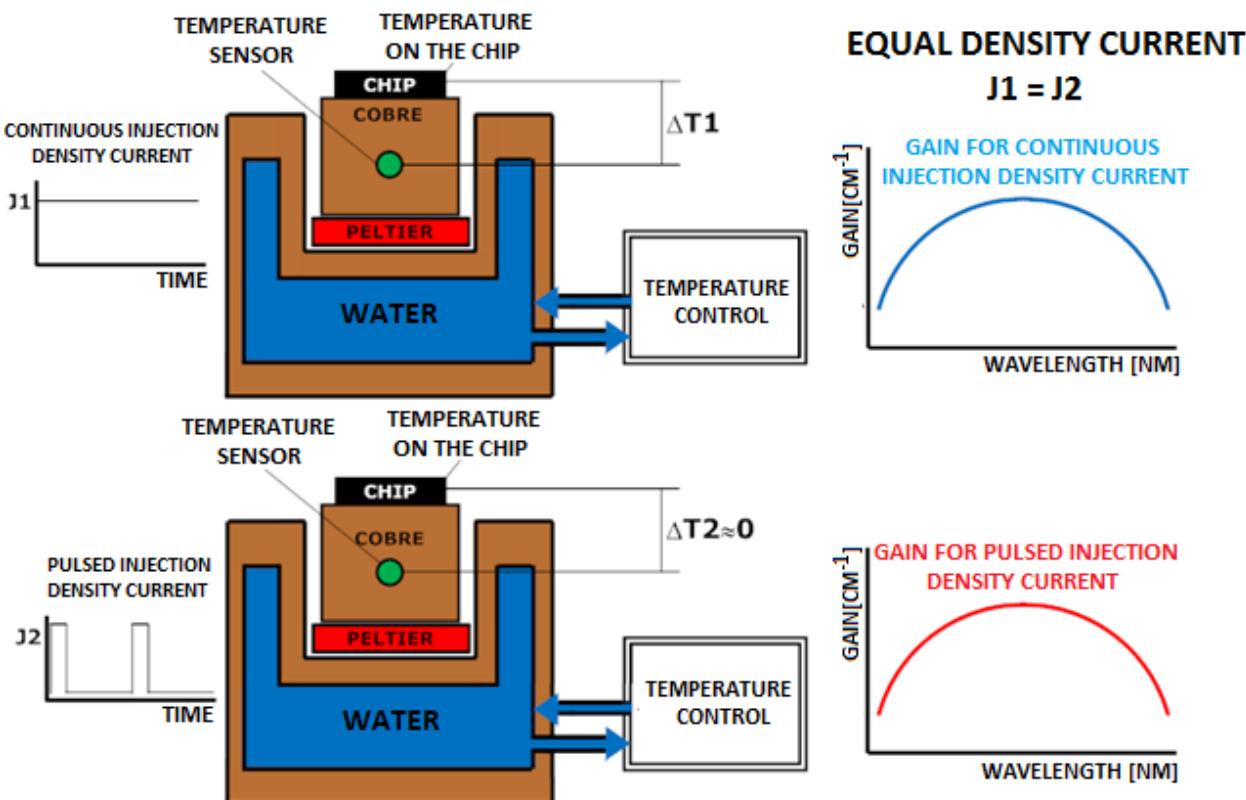


Figure 1.6: Pulsed and Continuous Optical Modal Gains

If using these two setups and chips, that are working under the same current density, we obtain the same optical modal gains, this means that the temperature in both chips must be the same  $T_2 = T_x$ . Then,  $\Delta T_1 = T_2 - T_1$ .

As we can see, we can compare pulsed and continuous optical modal gains to obtain the temperature difference as a function of the current density, describing by this way the influence of the temperature difference in the optical modal gains measurements.

## 2. Theory and design

In order to achieve the main objective that have been explained in the chapter one, it is necessary to do a comparative study of the different optical (modal) gain  $G$  at different temperatures for different injection current densities and using two different kind of current density (pulse and continues). First of all, we need to explain and compare the common measurement techniques used to obtain the optical modal gain, their advantages and problems, in order to justify why a modification of the Thomson technique is the best way for us to obtain de optical modal gain.

The most common methods to determine the optical modal gain are either by analyzing the longitudinal modes in the stimulated emission (Hakki–Paoli technique), by deducing from analysis of the measured spontaneous emission spectrum supplemented by measurement of the laser line energy and the differential quantum efficiency of the laser (Henry technique) or by analyzing the amplified spontaneous emission as a function of length (Thomson technique). There are modifications of this techniques that try to improve their characteristics. In this chapter we are going to do an analysis of the different optical gain measure techniques and their modification, showing the advantage and limitations of each one. With this information we are then able to know why a modification of the Thomson measurement technique is the better-adapted technique for our needs and which kind of amplifier device we are going to need for our experiment.

Finally, we discuss the tasks to be done and the parameters to fix and control to obtain a suitable measure set and perform our comparative study.

### 2.1 Hakki-Paoli

#### 2.1.1 Description

The optical gain is often determined with the well known Hakki-Paoli (HP) technique [6]. In the Hakki-Paoli method the optical gain is derived from the contrast ratio or shape of the modulations in the spectrum of the ASE caused by the resonances of the laser cavity operating below threshold. In other words, the optical modal gain spectra are obtained by measuring the depth of modulation, caused by the laser cavity resonance, in the emission spectrum. Scanning the whole spectra it is possible to find the maxima and minima of the laser cavity resonance, as we can see in the next figure 2.1. This figure came from the main paper of Hakki and Paoli about this measure technique [6].

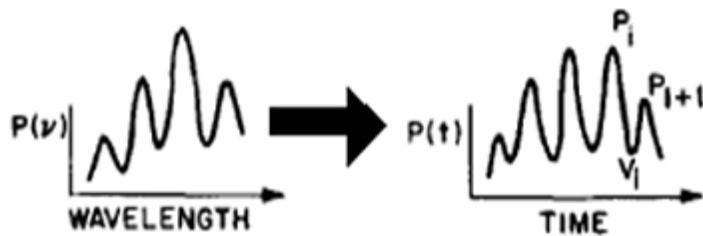


Figure 2.1: Hakki-Paoli Spectrum

Then, computing the gain at any wavelength by first averaging each two consecutive peaks  $\frac{1}{2}(P_i + P_{i+1})$  and dividing by the intermediate valley  $V_i$ , thereby obtaining the depth of modulation  $r_i$ . A simple mathematical relationship exists between the single-pass (or net) optical gain and the ratios of the intensities measure at optical frequencies which satisfy the resonant and antiresonant conditions of the laser cavity. It is possible to find more information about this measurement technique in the references [6].

### 2.1.2 Advantages vs. problems

The main drawback of this technique is that the spectral measurements have to be done with a high resolution spectrometer in order to resolve the spectral modes and not to distort the observed contrast ratio and/or linewidth of the modes [7]. In order to solve this problem, a modification of this technique that puts less stringent requirements on wavelength resolution was presented by Cassidy [8]. The modification suggested renders the gain measurements much less sensitive to the instrument response function and thus allows the researcher to make accurate measurements of the gain for above-threshold operation of the laser. Most of the remaining effects of the instruments response function on the gain measurements made using the modified method can be reduced significantly, in a straight-forward and simple fashion, by a deconvolution. The deconvolution requires only a knowledge of the moments of the instruments response function. It is possible to find more information about this measure method in the references [8].

As a rule of thumb, having in mind that the mode spacing scales with the inverse of the cavity length, it can be said that Hakki-Paoli's and Cassidy's methods work well when the laser cavity length is in the submillimeter range. This is particularly an issue for amplifier sections of several millimeters, which are often, required in case of a quantum dot amplifiers due to the relatively low modal gain of the quantum dot gain material

As conclusion the Hakki-Paoli and Cassidy methods are therefore not suitable anymore due to the small mode spacing.

## 2.2 Henry

### 2.2.1 Description

Henry proposed a method whereby the gain spectrum is deduced from analysis of the measured spontaneous emission spectrum supplemented by measurement of the laser line energy and the differential quantum efficiency of the laser. While this determination is indirect, the deduction of the gain spectrum is based on general relations between the rates of spontaneous emission, stimulated emission, and optical absorption that hold regardless of the nature of the laser optical transition. The key to determining the optical modal gain from the spontaneous emission spectrum is the knowledge of the quasi-Fermi level separation  $\Delta E_F$  and the scaling constant which allows the passage from the spectrum in arbitrary units to modal gain. This date often is extracted by fitting the measured curve to a theoretical model [9],[10].

To order to reduce the distortion of this technique is common to use a buried heterostructure lasers, because in this kind of structure the carrier density in the active layer is uniform and the spectrum is distorted by reabsorption only in active layers stripe. As a result the distortion is negligible in the vicinity of the laser line. It is possible to find more information about this measurement technique in the references [9].

### 2.2.2 Advantages vs. problems

The main drawback of this technique is that uses an indirect method to calculate the Fermi-level energy separation and does not directly give gain in absolute units but can be calibrated.

## 2.3 Thomson

### 2.3.1 Description

Another well-known class of techniques is to extract the optical modal gain from the ASE from multisession device [11, 12]. This kind of measurement technique was described by Thomson et al [11]. This technique is based on the previous techniques that enable to obtain the spectrum gain using segmented devices [12]. The main idea of this technique is to analyze the ASE using a variable stripe method, where different contact stripe lengths were deposited onto the sample and the ASE of each stripe measured. By this way we can relate the ASE output power with the length of the device.

In order to use this kind of measure techniques, the first thing that we need to have is a multisession device. The figure 2.2 (figure from [12]), shows us the king of multisession device used by Thomson. In this schematic we can see that there are five equal sections which have separate contacts for electrical excitation. Moreover, the front five sections are for electrical injection and the absorbing region and angled facet is to ensure the single-pass nature of the measurement. It is necessary to use the absorbing region or section in order to make sure that no optical feedback takes place. The current spreading in each section is assumed to be the same, which does not seem unreasonable. To obtain gain, we measured the ASE when pumping section one; sections one and two; sections one, two, and three; and so on, thus increasing the length of the active cavity. By this way, every ASE output power measurement is related on the length of the cavity used in order to generate the mentioned measurement.

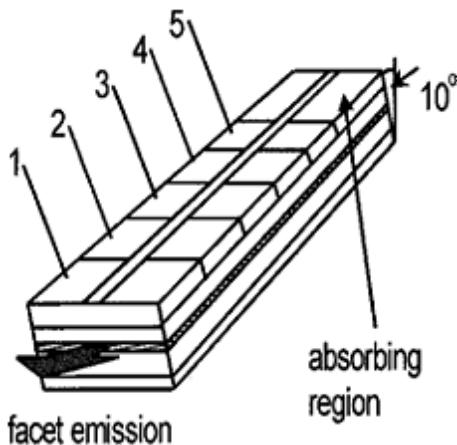


Figure 2.2: Schematic of the multisession device for gain and loss measurements

The ASE intensity is measured through a polarizer allowing both transverse electric (TE) and transverse magnetic (TM) polarized gain to be calculated. By integration the expression for the amplification of light from a point source, a distance  $L$  from the facet, over the length of the device, when no optical feedback take place and no gain saturation, the net modal gain  $G$  can be related to the ASE intensity  $I$  or power  $P$  by the equation 2.1. A schematic representation of a laser system is showed in the figure 2.3.

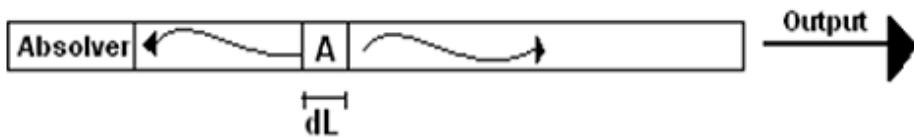


Figure 2.3: Multisection Laser System

$$\int_0^{L_T} A e^{GL} dL = \frac{A}{G} [e^{GL_T} - 1] \quad (2.1)$$

As we can see in the figure 2.3, in a small segment of the amplifier section with length  $dL$  the quantity  $A$  of light power is generated. We are going to assume that in the entire amplifier, the quantity of generated light power  $A$  per  $dL$  is constant. This light power is amplify or attenuate during the travel through the cavity, for a factor of  $e^{GL}$ . If the optical modal gain  $G$  is bigger that 1 ( $G \geq 1$ ), more length means more ASE output power, allowing us to relate the output power with the length of the cavity. However, if the optical modal gain  $G$  is lower than 1 ( $G \leq 1$ ), more length means less power doing that will be only possible to measure the ASE contribution that they be near to the output. As result of this the ASE output power is not related with the length of the cavity, making useless this kind of measure. We will come back on this matter more carefully in section 2.2.3.

As we said before, when no optical feedback take place and no gain saturation, the net modal gain  $G$  can be related to the ASE power  $P$ :

$$P = \frac{P_{sp}}{G} (e^{GL} - 1) \quad (2.2)$$

Where  $P_{sp}$  is the power of the spontaneous emission.

The last equation does not give a direct method to obtain the gain; however we can compare the ASE intensity spectra for different lengths to obtain an analytical expression for the gain  $G$ . The intensity from device lengths of  $2L$  ( $P_{2L}$ ) and  $L$  ( $P_L$ ) were compared to obtain the following expression for the gain  $G$ :

$$G = \frac{1}{L} \left[ \ln \left( \frac{P_{2L}}{P_L} - 1 \right) \right] \quad (2.3)$$

This allows us simply to obtain the gain spectra in absolute units directly from the recorded ASE spectra.

### 2.3.2 Advantages vs. problems

The key benefits of the method are that it does not require high spectral resolution as it is based upon measurement of the amplification of spontaneous emission and that it provides, directly, the optical modal gain in absolute units. Solving by this way, the main drawbacks of the other measure techniques, that we have showed in this chapter. For this reason, the measurement technique on which we are using here is based on this technique.

The main problems of this technique are that the measure method requires careful implementation. Moreover, due to a small error in one of the measurements, which can be caused by misalignment or another reason, the resulting gain parameters can change easily. This means that the precision of the measure technique is so poor.

## 2.4 Multi-section Optical Gain Measure Techniques

### 2.4.1 Description

As mentioned before, the measurement technique used here is based on one of the techniques described by Thomson et al [12]. This technique uses a single multisection device. When no optical feedback takes place and no gain saturation, the net modal gain  $G$  of a semiconductor optical amplifier (SOA) can be related to its ASE output power  $P$  according to the equation 2.2. Using this equation, when two SOAs of length  $L$  and  $2L$  are compared the analytical expression for  $G$ , described in the equation 2.3, can be found.

In order to improve the precision of the Thomson technique, which is its main drawback; we extract the gain by comparing the ASE spectra from a series of amplifiers of different lengths and fit equation 2.2 on the data at each wavelength to extract the parameters  $G$  and  $I_{sp}$  [13]. This fitting has several advantages over using equation 2.3 to extract the gain. First of all, the different ASE spectra always contain noise or small deviations in comparison to the ideal situation described by equation 2.2. These deviations will be averaged out by the fitting over multiple devices. Secondly, large deviations in measurement results due to misalignment or fabrication errors can easily be detected and neglected or the measurement can be redone. This measure technique uses an especial two-section multi-amplifier chip that will be described in the chapter 3.

### 2.4.2 Influence of the kind of current in the temperature dependency within optical gain measurements

As we commented before, the main objective of this work is to describe the temperature dependency within optical gain measurements. To do that, we are going to obtain different optical modal gain using the modification of the Thomson technique, which have been explained in the last paragraph. So, we need to obtain a set of measurements ASE using different amplifier length under different temperatures and different continue density currents in a huge range. Thus, we can obtain a set of optical modal gain that provides us to a general description of the temperature dependency within optical gain measurements. Nevertheless we first need to get further information about the influence of the temperature behavior inside the chip on the optical modal gain since we can control and fix the temperature near the chip, but not inside of the chip. When we apply a density current over an amplifier section, part of this energy is transformed in light by stimulated emission, but almost all of the energy is transformed in heat by Joule's effect, heating the chip up.

This is a well-known problem for people that work with lasers and SOAs at high continue injection currents, especially when the metal-semiconductor contacts are not optimal. Generally, the people solve this

problem by applying the injection current for only a short time (typically 300ns-500ns pulses) and at a low duty cycle (e.g. 1%), because by this way the carrier heating is prevented and the heat dissipation is minimized. A duty cycle of 1% is equivalent to apply 20dB less of power.

In our case, we can obtain more information about the temperature dependency within optical gain measurements, if we do two different set of optical modal gains; one using continue current density and other using pulse current density. By this way, we can do a comparative study between the information of the two set of measurements obtained concerning the Joule's effect influence on the optical modal gain through the temperature.

### 2.4.3 Limitation (working Area)

As commented before, the equation 1.0 is only valid when no optical feedback takes place and no gain saturation. So we can talk about two limitations.

The first of this limitation appears when the current density is so high and the amplifier begins to laser. Then, this formula is not respected anymore since the saturation is taking place in the amplifier section meaning that an upper limit for the current exists and depends on the length of the amplifier, the kind of current (continue or pulse) and the temperature. The control of this limit is really easy because we can check the shape of the ASE in the screen of the spectrum analyzer, during the taking of measurements. In the chapter four, in the precaution sub-paraphrase 4.4.1, we are going to do a deep analysis about the different possible shapes of the ASE spectrum, specifying which are useful or useless for us. .

The second limitation is related with the value of the optical modal gain  $G$ . Theoretically, the equation one is valid independently of the value of  $G$ . So, if  $G \geq 0$ , the ASE is amplified with the length, and more length means more ASE, so the output power is function of the length of the device. There are no problems in this case, as we can see in the figure 2.4.

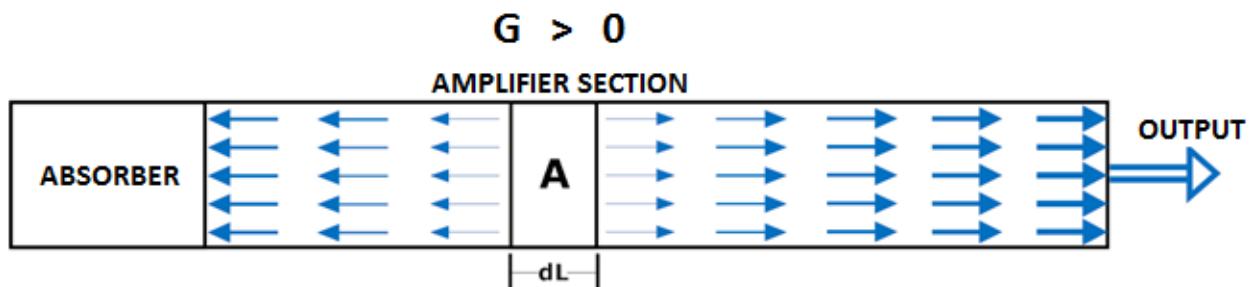


Figure 2.4: Operation of a Multisection Laser System when  $G > 0$

But, if  $G \leq 0$  then the ASE is attenuated with the length, as show the equation (2.4).

$$P = \frac{1}{G} P_{SP} [e^{GL_T} - 1] = - \frac{P_{SP}}{G} \left[ \frac{1}{e^{abs(G)L_T}} - 1 \right] \cong - \frac{P_{SP}}{G} (2.4)$$

This means that part of the photons generated by spontaneous emission is never added to the output power, because these photons are reabsorbed in the amplifier section. Then, only is possible to detect the photons that are generated near to the output ( $L \cong 0$ ). So, the power output is independent of the length of the device and useless for us. The figure 2.5 shows us this process.

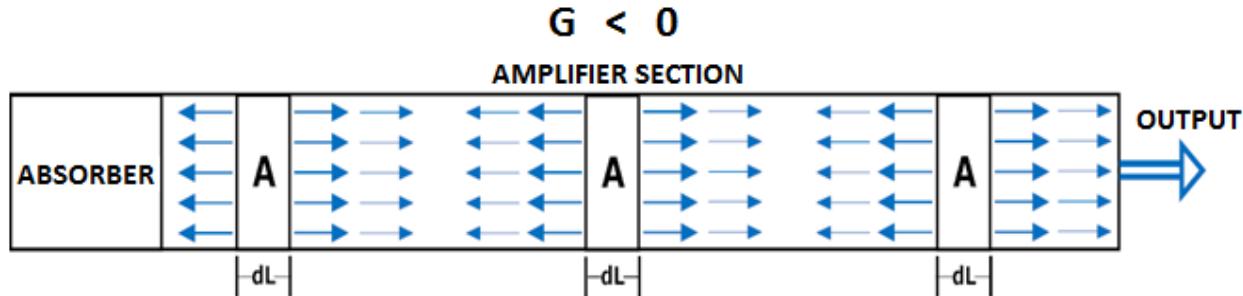


Figure 2.5: Operation of a Multisection Laser System when  $G < 0$

As result of this, if the current density is so low and  $G \leq 0$ , we cannot use these result. This means that exist downer limit for the current density in function of the length of the amplifier, the kind of current (continue o pulse) and the temperature. The control of this limit is really difficult because the only way to do it is by checking the resulted optical modal gain from the fitting algorithm. This means that first we have to take the ASE measurements and after this, we have to check if these measurements are useful to provide us a suitable optical modal gain. In the chapter five, in the fitting algorithm sub-paraphrase, we are going to show the shape of the optical modal gain when  $G \leq 0$ .

Both, the upper limit and the lower limit describe above are dependent on the temperature, the kind of density current and the length of the amplifier. Then, we need to define a working area by an empiric process in other to work suitability. To make the working area easier to understand we are going to remove the influence of the amplifier length. Then, this working area shows us the relation between density current and the temperature, for a specific kind of density current, which we have to keep in other to obtain suitable measurement. The figure 2.6 shows us a theoretical representation of these limitations.

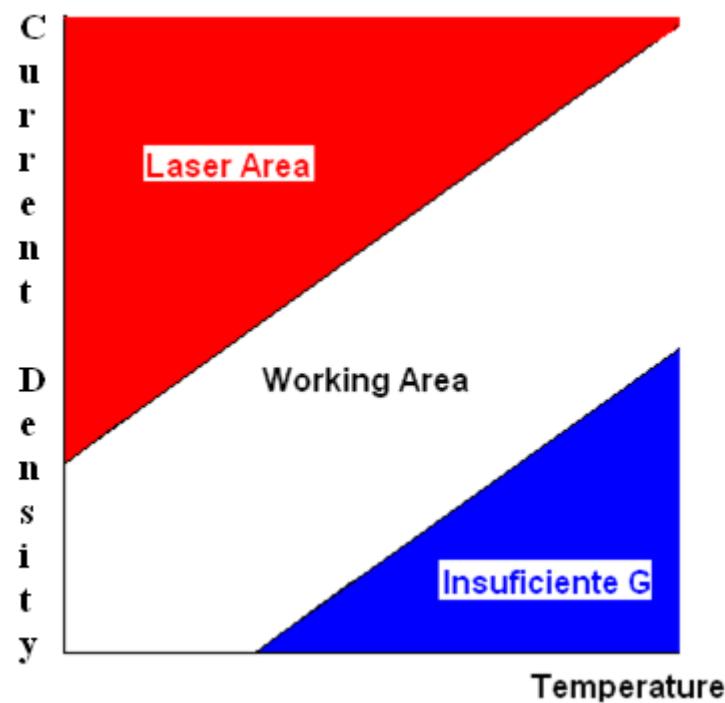


Figure 2.6: Working Area

### 3. Fabrication

#### 3.1 Chip Fabrication

##### 3.1.1 Descriptions

In order to fabricate a series of optical amplifiers from which we can measure the ASE signals without any optical feedback, a series of ridge waveguide amplifiers with two electrical sections were realized on a single chip. The ridges are oriented perpendicular to the cleaving planes. The two-section devices are operated by forward biasing the longer gain section which thus operates as an amplifier and generates the ASE. The shorter gain section is reversely biased which makes the section absorbing the ASE from one side of the amplifier and prevents any feedback from one facet. The reflection from the facet at the amplifier end does not create a problem if the ASE power is well below the saturation power of the amplifier. This condition is easily satisfied in the experiments. The figure 3.1 shows us the layout of the chip and the figure 3.2 show as a picture of the developed chip.

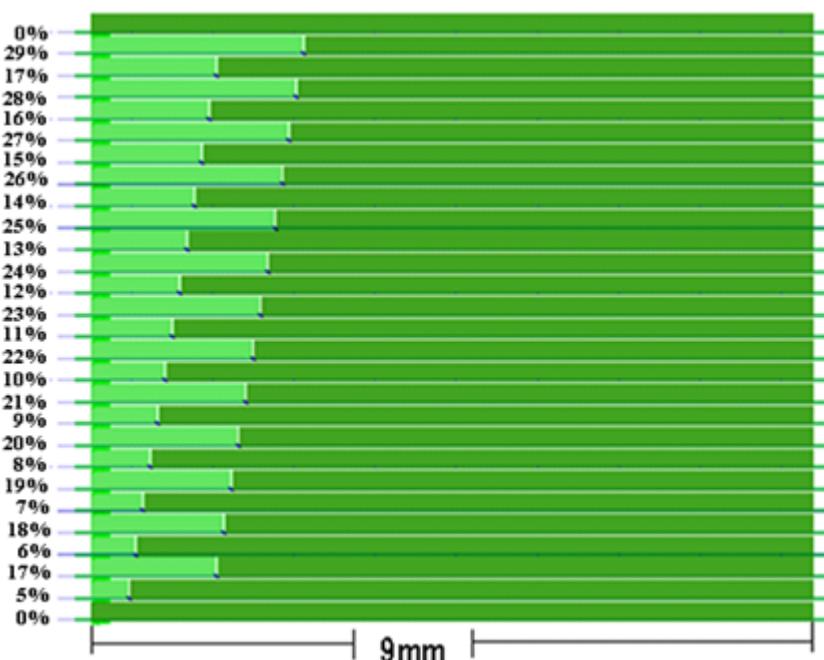


Figure 3.1: Chip Layout

The QD laser structure which we have characterized is grown on n-type InP (100) substrates by metal-organic vaporphase epitaxy (MOVPE), as presented in [14]. In the active region five InAs QD layers are stacked. These are placed in the center of a 500 nm InGaAsP optical waveguiding core layer. The QD layers are designed to have a gain spectrum in the 1600nm to 1800nm wavelength region. The bottom

cladding of this laser structure is a 500-nm thick n-InP buffer and the top cladding is a 1.5- $\mu$ m p-InP with a compositionally graded 300-nm p-InGaAs(P) top contact layer. This layerstack is compatible with a butt-joint active-passive integration process for possible further integration. The ridge waveguides of the two-section FP-type laser devices have a width of 2  $\mu$ m and are etched 100 nm into the InGaAsP waveguiding layer. To create electrical isolation between the two sections, the most highly doped part of the p-cladding layer is etched away. The waveguide and isolation sections are etched using an optimized CH<sub>4</sub> / H<sub>2</sub> two-step reactive-ion dry etch process. The structures are planarized using polyimide. Two evaporated and plated metal pads contact the two sections to create two contacts. The backside of the n-InP substrate is metalized to create a common ground contact for the two sections. The structures are cleaved and no coating was applied. The devices are mounted on a copper chuck, p-side up.

In this work we present the results from devices with a total length of 9 mm and with 26 variable amplifier lengths between 6.39mm (the absorber take the 29% of the length up) and 8.55mm (the absorber take the 5% of the length up). The figure 3.2 shows us a real picture of the chip.

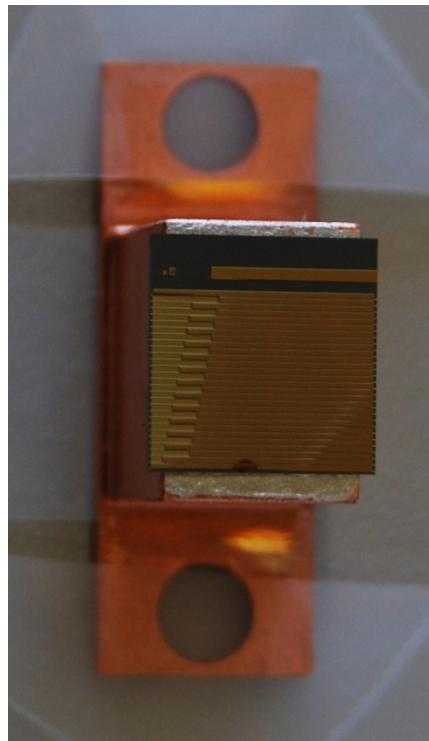


Figure 3.2: Chip

## 4. Measurement Setup

As we have explained in previous chapters, we want to do a comparative study of the different optical (modal) gain  $G$  at different temperatures for different injection current densities and using pulse and continues current, to achieve the main objective of this report that is describe the temperature dependency within optical gain measurements. In order to do that, we are going to obtain the optical modal gain from the ASE, doing a fitting of the equation 2.2, using a measurement techniques based on a modification on the Thomson technique.

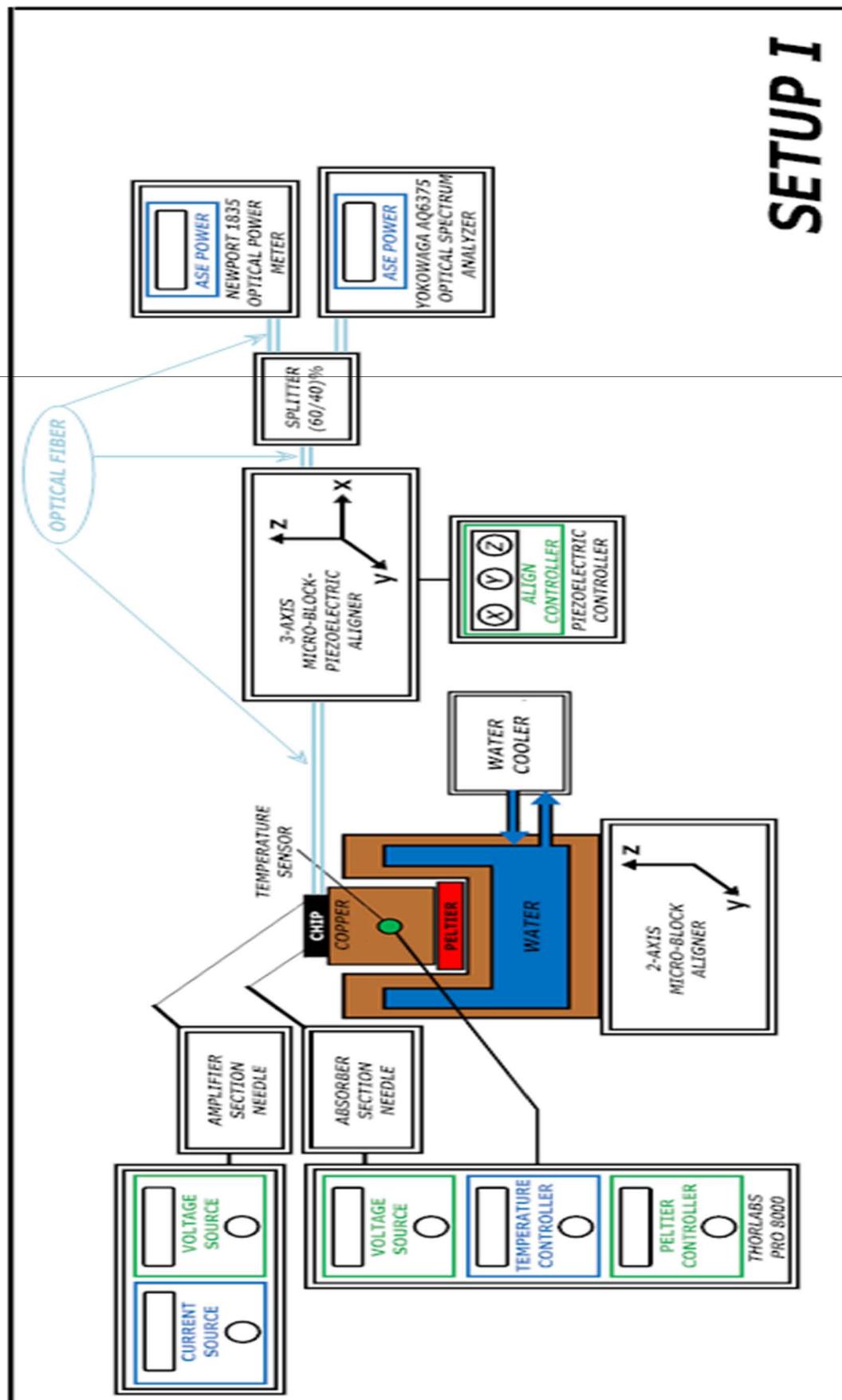
In order to obtain suitable ASE from our chip (that was described in the chapter 3) we have to interconnect different devices so that be capable to control the measurement process. Them, we have to be capable to channel the ASE output to a Spectrum Analyzer. Moreover, we have to control the temperature, amplifier-section current density, absorber-section tension and when we are working with pulse current density the frequency and duty cycle, under which we are going to obtain the different ASE measurements. The collection of interconnected devices is commonly called Setup and in our case we have to assemble to different setups; one for continues-injection current density ASE measurement (Setup I) and other for pulsed injection current density ASE measurement (Setup II).

On the other hand, in order to explain how the setup works, we can divide our setups in different system as function of the task that they do. Both setups have the same systems with some different. The setups have made up of four systems; a temperature control system, a feeding system, a align system and a measure system. So, in this chapter we explain detailed and extensively how the setups and their different systems work. Moreover, we tell about the precautions and problems that can take place during the measurement process.

### 4.1 Continue Injection Current (Setup I)

#### 4.1.1 Description

The figure 4.1 shows a schematic diagram of the Setup I (continues-injection current density) detailing their main systems and the devices which make them up.



**Figure 4.1: Setup 1.** The blue boxes represent the blocks that measure and show external signal, and the green boxes represent the block that generate signal to apply

## **4.1.2 Systems**

### **4.1.2.1 Temperature control**

As show the figures 4.2 our thermal control system consists of two parts and its main objective is to provide us of an effective temperature control. The first part has made up with a small solid copper structure, the chip, a temperature sensor and a peltier. A peltier is a thermoelectric device that is made from alternating p-type and n-type semiconductor elements connected by metallic interconnects as pictured in the figures below. This device is based in the Peltier's effect, and we can use it to remove or inject heat by a electrical control. The peltier is controlled by temperature controller in order to fix the chip to the copper structure and to improve the electrical connection between the bottom of the chip and the copper, an especial kind of paste called "epotec" is spread between both. Moreover, we are going to use a temperature sensor to know the temperature of the chip, however owing to the little proportion/size and fragility of the chip is not possible to put the thermal sensor and the chip together, so we cannot know the really temperature on the chip. The only thing that we can do is put the sensor inside of the solid copper structure and assume that owing to the good thermal transfer of the copper, the temperature different between the chip and the sensor are going to be small.

In other hand, the second part of the thermal control system has done/made up a big hollow copper structure and a water cooler that inject thermal-controlled water inside of the structure. The main objective of this second part of the thermal control system is to remove the heat away from peltier. In both case, we use copper structure because it has a good thermal transference.

It is necessary that the two parts of the thermal control system stay fixed and there is a good thermal transference between both. To do this, a couple of screws are used to stick both parts together and a heat conductive paste is spread between both to make the thermal transfer easier.

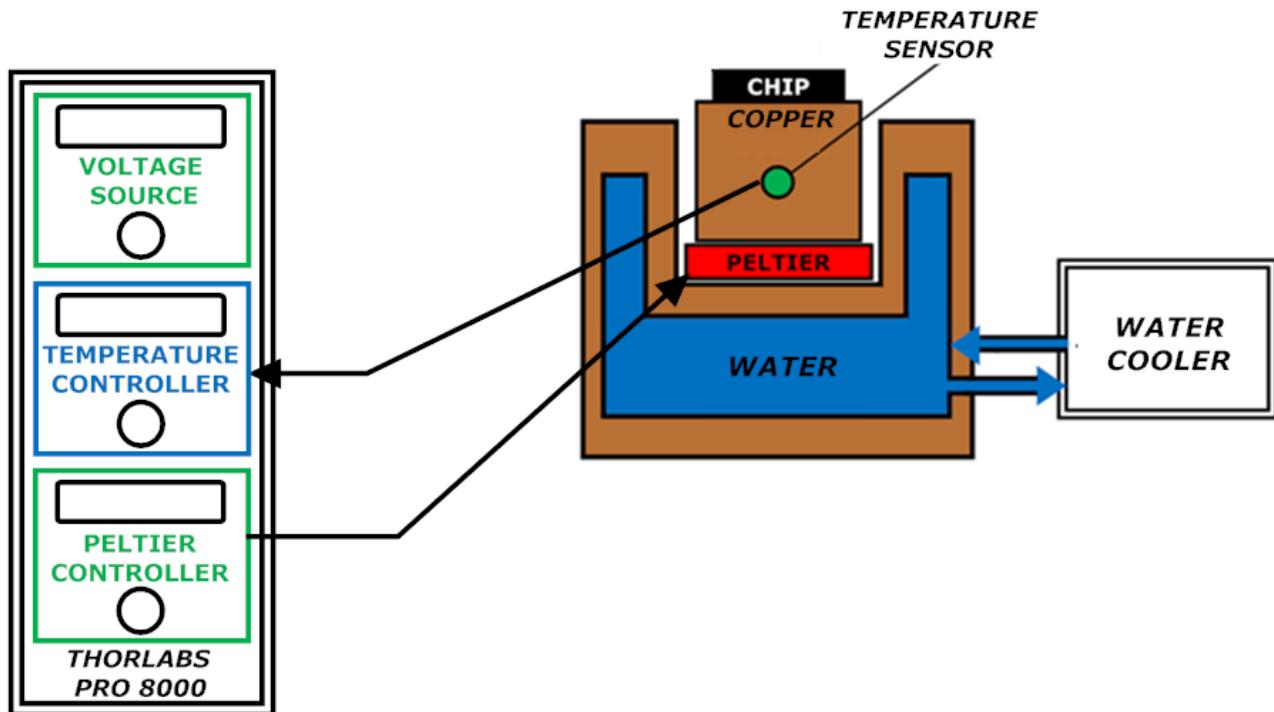


Figure 4.2: Temperature Control System. The blue boxes represent the blocks that measure and show external signal, and the green boxes represent the block that generate signal to apply

In the figures 4.3.A and 4.3.B we can see how the temperature control system works. The figure 4.3.A shows us the heat transference process from the chip to the peltier and the figure 4.3.B shows us the opposite way.

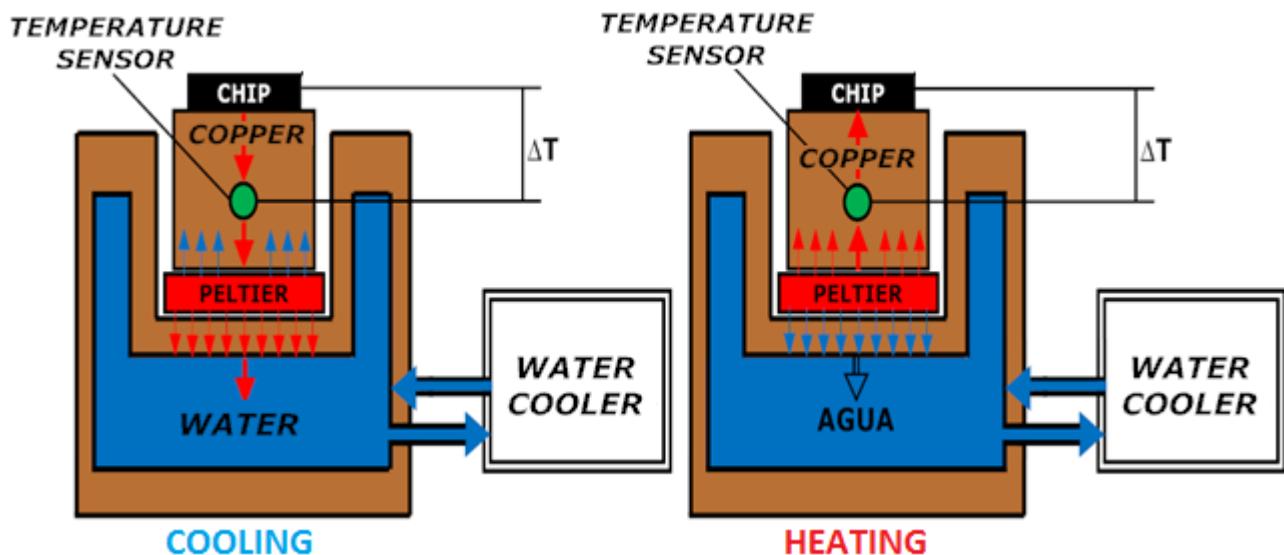


Figure 4.3: Operation of the Temperature Control System

The general adjustment of the temperature has done by the water cooler. This device fixes the temperature by water with a setup point of  $\pm 0.1$  and it is the main way to extract or inject the excess of heat of the system/pertier. The water cooler injects temperature-controlled water in to a cooper hollow structure

that supports the rest of the temperature control device. However, to control the temperature by water is a slowly and imprecise process. Due these limitations, the temperature of the water is not fixed, is jumping around the fixed value with a standard deviation of  $\pm 0.1$ , that mean that the temperature in the chip is jumping too, so the amplifier-section output is moving and a precision alignment is more difficult.

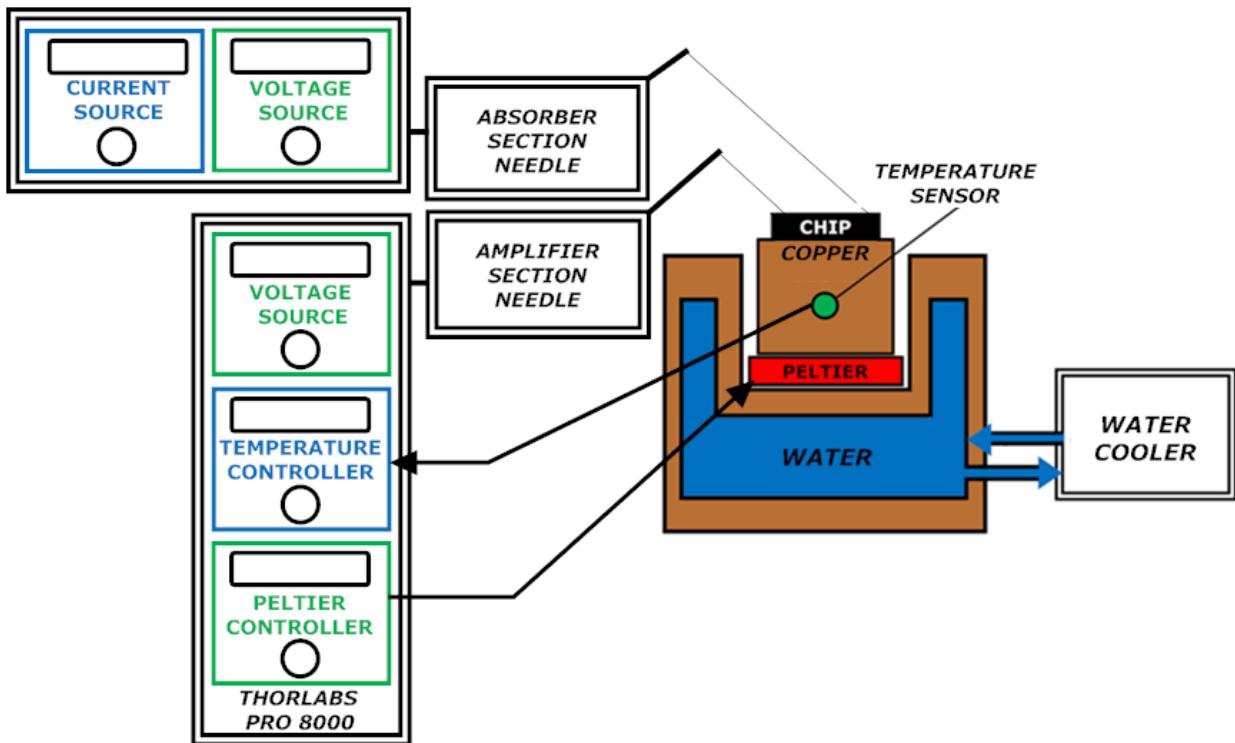
To improve the quality, precision and stability of the thermal control system, we use a peltier controlled by a temperature controller. This device fixes quickly the temperature by peltier effect with a setup point of  $\pm 0.001$ , fixing the temperature with more precision and also preventing the temperature jumps in the chip witch making the alignment easier.

#### **4.1.2.2 Feeding**

As we have explained in before chapter, our chip has made up for 26 two-section device with different amplifier lengths. Both sections of each amplifier, the amplification (long part) and absorption (sort part) have to feed correctly in order to meet the conditions to obtain a suitable ASE measurement which can use to fit the equation 2.2.

The short gain section or absorber is reversely biased, with a constant tension value, by the tension source of the source meter, which makes that the absorber section absorbs the ASE from one side of the amplifier and prevents any feedback from one facet, that is a necessary condition to put into practical the equation 2.2.

The long gain section or amplifier is forward biased, with different continue injection current densities by the current source of the temperature controller, which makes that the amplifier section generate the SE that is amplified thought this section as a function of the length, being able to be collected with a fiber from the output of the amplifier. The figure 4.4 shows us the devices that make the feeding system up.



**Figure 4.4: Feeding System.** The blue boxes represent the blocks that measure and show external signal, and the green boxes represent the block that generate signal to apply

Due to the size of the amplifiers it is necessary to use two special needles in order to transport the currents and tensions from the sources to the amplifier sections. Moreover it is necessary put the top of the needles over the surface of the amplifier sections so carefully. This process has to be done manually by visual control with a microscope using manual gear wheels. All the amplifiers have their grounding connections interconnected to the bottom of the chip....so it is not necessary to add more needles in order to close the circuit, we will use a normal wire connected to the copper underneath the chip.

#### 4.1.2.3 Alignment

The ASE output power from the devices has to be collected with a lensed fiber. In order to do this, we need a precise alignment between amplifier output and the input point of the optical fiber. Like the thermal control system, our align system is executed in two steps. The figure 4.5 shows us the devices that make the alignment system up.

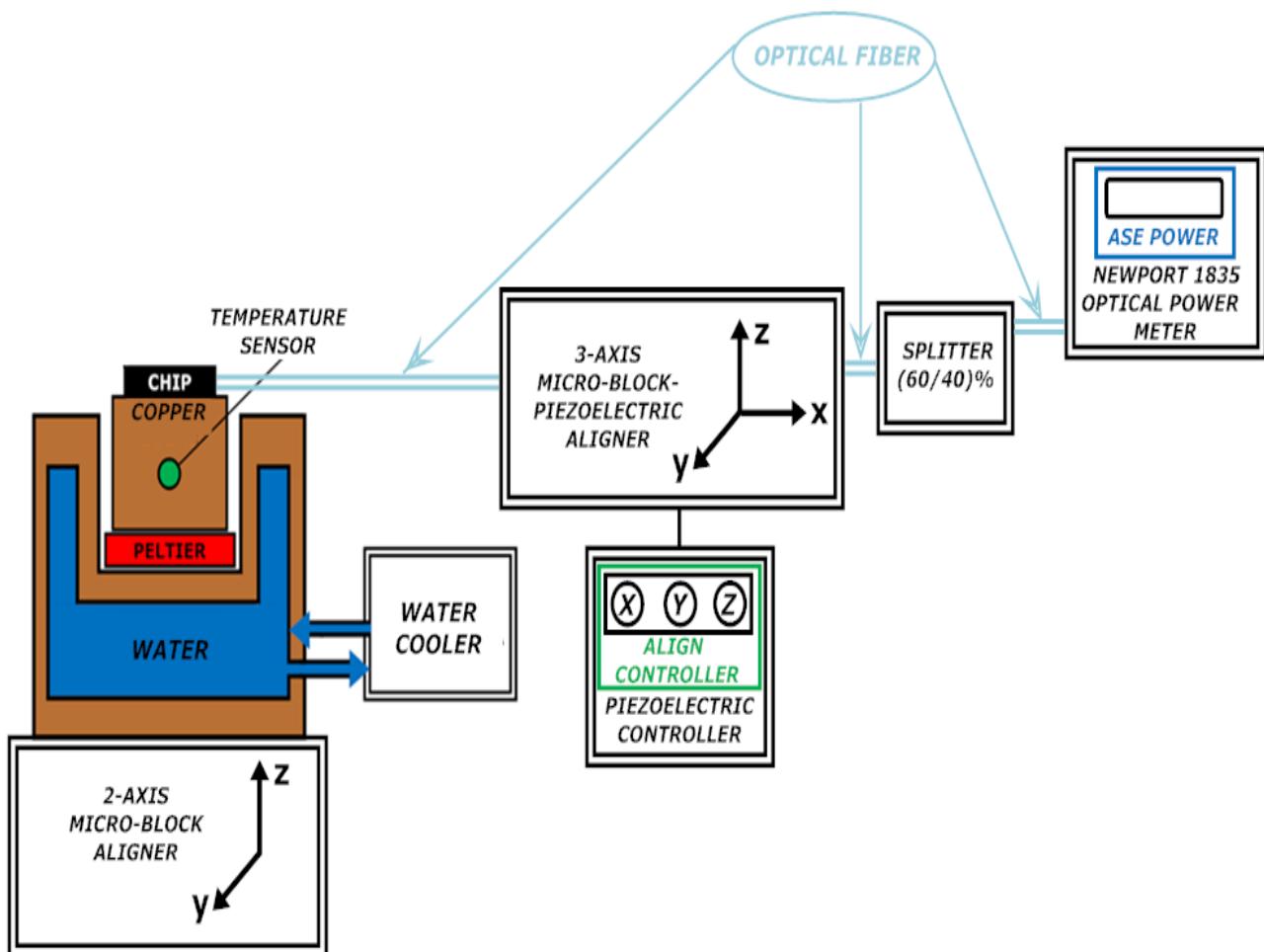


Figure 4.5: Alignment System. The blue boxes represent the blocks that measure and show external signal, and the green boxes represent the block that generate signal to apply

The first step is the general alignment and is done by manual gear wheels, which bring face to face the amplifier output and the fiber input. This process is visual controlled by a microscope and an optical power meter. The idea is to optimize the in coupling power from the chip to the fiber which is connected to the power meter. To work suitable we have to fix the optical power meter's input wavelength at the central value of the emission spectrum.

In the second step we are going to improve the quality of the alignment using a Piezoelectric Controller. This second process only can be controlled by the optical power meter and has a high precision. However, we must redo this second alignment every time that we change the temperature of the chip or the current density which we pump in the amplifier section, because these changes expand or contract the amplifier device doing the alignment not useful anymore.

#### 4.1.2.4 Measurement

When the alignment has been done, we can remove the optical power meter and using a spectrum analyzer to obtain and save the ASE. For the first setup, the spectrum analyzer measurements with a 0.5nm resolution spectrometer over 300nm (SPAN) at 1700nm central wavelength, in 3001 data points. The measurement has saved in CVC file format in order to be use in matlab easy. With this configuration our spectrum analyzer can take a measurement every 3 minutes, more and less. The figure 4.6 shows us the device that makes the measurement system up.

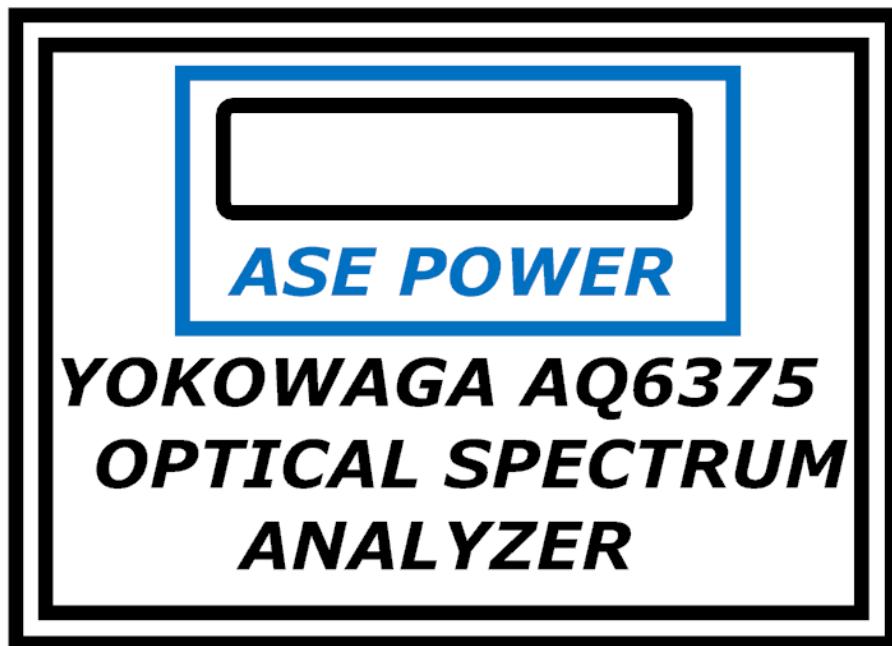


Figure 4.6: Measurement System. The blue boxes represent the blocks that measure and show external signal, and the green boxes represent the block that generate signal to apply

## 4.2 Pulse Injection Current Setup (Setup II)

### 4.2.1 Description

The figure 4.4 shows a schematic diagram of the Setup II detailing their main systems and the devices which make them up.

We can see that the temperature control and the align system are the same that for the first setup, so it is no necessary to say nothing else about this systems. We focus on the feeding and measure systems.

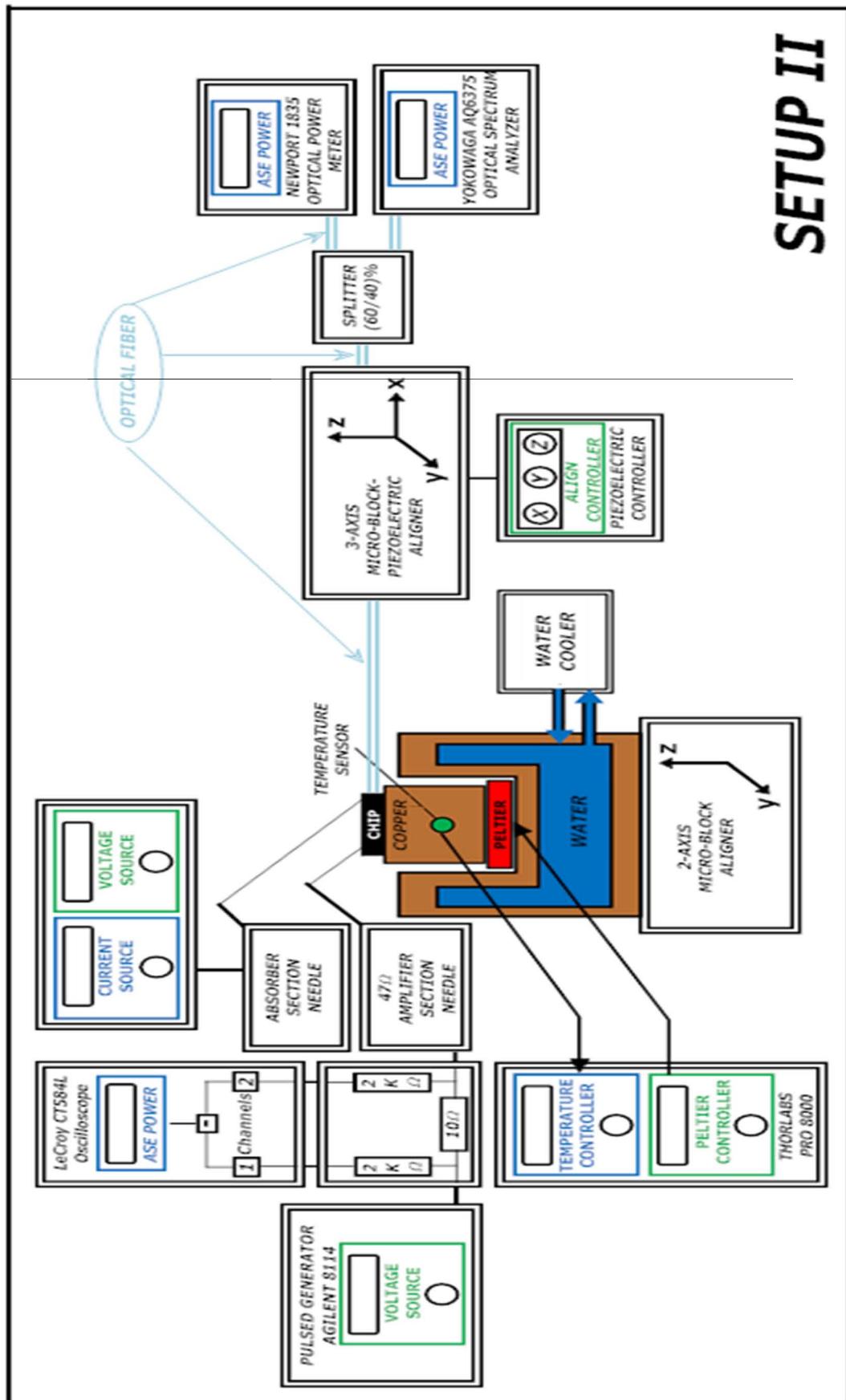
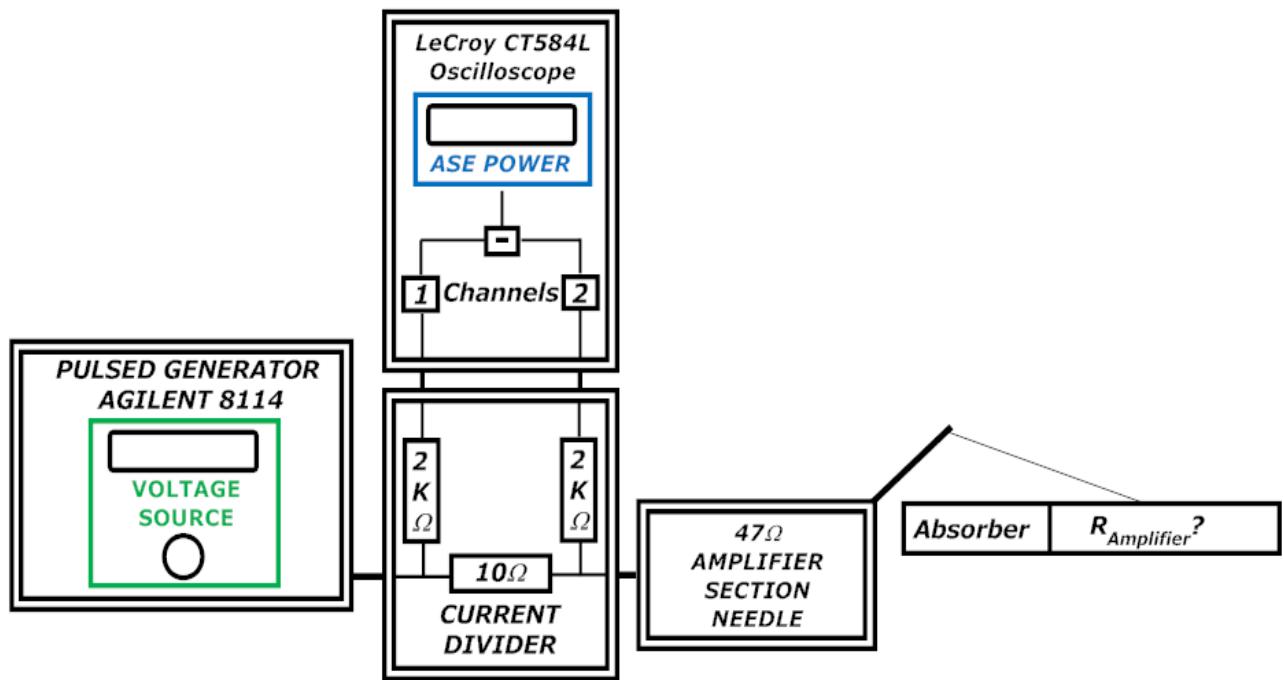


Figure 4.7: Setup II. The blue boxes represent the blocks that measure and show external signal, and the green boxes represent the block that generate signal to apply

## 4.2.2 Systems

### 4.2.2.1 Feeding

In order to generate the pulse density current suitability it is necessary to replace the current source of the temperature controller, for a pulse generator “Agilent 8114”, an oscilloscope and a current divider as we can see in the figure 4.8.



**Figure 4.8: Pulse Generator System. The blue boxes represent the blocks that measure and show external signal, and the green boxes represent the block that generate signal to apply**

With the pulse generator we can control the frequency and duty cycle of the generated signal. However this device only can fix the tension of the signal, not the current density and we need to control the current density in order to obtain a set of ASE measurement from this second setup under the same conditions that the set of ASE measurement from the first setup, to compare each other.

To solve this we are going to use the current divider showed in the figure 4.8, when we can see that almost of the input power from the pulse generate is distributed in the two resistances of 2KOhms and the rest of the power, a little part of the total power, is distributed in the resistance of 10 ohms. Using an oscilloscope we can measure the tension level in both arms of the divider and represent the tension different between them. This tension different is due to the  $10\Omega$  resistance and applying the Kirchhoff's law we can know and control the current density that crosses the  $10\Omega$  resistance.

As we can see in the figure 4.8, the general needle that feed the amplifier section has been replace for a needle with resistance value is fixed and knew ( $47\Omega$ ), because we need that the total output resistance value (needle resistance + amplifier section resistance) will be similar to  $50\Omega$ , in order that almost of the current density that cross the  $10\Omega$  s resistance (maximum power transference) and we can control and fix goes to amplifier section.

Moreover, it is very interesting for us to know if the variation of the amplifier section resistance, which value depends of the length of the amplifier section, affects to the output current density. The only way to know this it is by comparing the two-channels-different signal, for a fixed value of frequency, tension and duty cycle in the pulse generator, between the longest and shortest amplifier section. In order to zoom in the current density difference between the two amplifier sections resistances we used the highest current density  $5000\text{A}/\text{cm}^2$ , but were impossible to find any difference. This fact is really useful for us because means that we can feed the amplifier sections independently of their length, because the resistant of the needle ( $47\Omega$ ) are too big in comparison with the resistant of the amplifier (around  $6\Omega$ ) section independently of its length.

For the second setup, the pulse generator works with a frequency of 2 KHz and a duty cycle of 1%, does that mean that with the pulse generator, we are only applying the one per cent of the power, so we are losing 20dB of power with respect to the first setup. In other words, the total power that we are going to apply, when we use a pulse current density, is the power ( $I^*V$ ) multiplied by the duty cycle ( $\tau$ ).

#### **4.2.2.2 Measurements**

As we said before, with the pulse generation, we are only applying the one per cent of the power, so we are losing 20dB of power with respect to the first setup. That means that the ASE measured output power is 20dB lower and close to the noise level. As result of this, the ASE that we take from the second setup look like noisier than the first one, and is necessary to do some change in the configuration of the spectrum analyzer in order to obtain suitable results.

So, we need to improve the resolution, but that mean that we have to spend more time per measurement, extending the time that we have to stay in the laboratory too much. The solution that we choose was to reduce the span, because we realized by empirical analysis that the optical modal gain, obtained by fitting using the ASE, is minus that cero in the ends of the band, so it is not useful for us this part of the bands.

For the second setup, the spectrum analyzer measures with a 1nm resolution spectrometer over 200nm (SPAN) at 1700nm central wavelength, in 3001 data points. With this configuration our spectrum analyzer can take a measurement every 5 minutes.

### 4.3 Set of ASE Measurement

Now, we have to determinate by an empirical process the number of ASE measurement that we are going to use to extract a optical modal gain. To do this empirical process we have taken 26 ASE measurements from the first setup and another 26 from the second setup, one per amplifier, under the same temperature and density current. After this, we have to start to extract the optical modal gain using a variable number of ASE measurements, in order to find the suitable number. We start using tree ASE measurement to extract the optical modal gain, and continue raising this number, one by one, checking the quality improvement of the optical modal gain. By this way we discovered that for the first setup it is enough to use 7 different-length amplifiers to obtain a suitable optical modal gain, and 14 for the second setup, because add more ASE measurements don't improve the optical modal gain. We have to use more amplifiers to obtain the optical modal gain from the second setup, because as we are using less power in the second setup we need to improve the quality of the optical modal gain. The amplifier selection has done trying to cover the complete range and maximizing the distance between them. However, was not possible to use always the same amplifiers because during the process some of the amplifier had damaged. The reasons of these damages are going to be explained in the next section of this chapter. It is possible to find more information about the algorithm in the appendix.

Moreover for/in the taking of ASE measurements we are going to use a range of density current from 500 to 5000 A/cm<sup>2</sup> with a step of 500A/cm<sup>2</sup>, a range of temperature from 10 to 40 degrees with a step of 3 degrees or 2 degrees for the first setup that use continue density current (10,13,15,17,20,...,40) and a step of 5 degrees (10,15,20,25,...40) for the second setup that use pulse density current. As a result, we are going to obtain two big groups of measurements (one from continue density current or setup one and other from pulse or setup two) with  $13*10*7$  ASE measurements in the first group and  $7*10*14$  in the second group. However, we have to take in account the limitation of to use the ASE measurement to obtain a suitable optical modal gain by fitting of the equation 2.2 (2.2.3 Limitation). This means, there are some combination of temperature, density current and length of the amplifier section that are not valid to generate a suitable ASE measurement, because for this combination the saturation is taking place in the absorber section or the optical modal gain is too low.

We can reduce the number of ASE measurements taking in account the first of these two limitations.

In other words, if for a relation of temperature, density current and length of the amplifier section the saturation is taking place in the absorber section, in the rest of the ASE measurement that involve an improvement of the density current or a reduction of the length of the amplifier section or the temperature, the saturating is taking place too.

As a result, we have done, useful or not, around 1800 ASE measurements.

## 4.4 Problems Found

In this chapter we are going to tell about the practical precaution that we have to take in account in order to prevent possible damage over the chip.

### 4.4.1 Precaution

#### 4.4.1.1 Suitable Measurement and Current Limitation

It is necessary to us to be sure that every measurement has done/taken suitable in order to satisfy the conditions to apply the equation 2.2. As we said, we can control the correct work of the absorber section over the scream of the spectrum analyzer checking by this way that the saturation is not taking place in the absorber section. The figures 4.6.A and 4.6.B and show the three possible shapes of the ASE spectra. In the figure 4.6.A the saturation is not taking place in the absorber section, so this kind of shape is useful for us. In the figure 4.6.B the saturation starts to take/ing place in the absorber section and we can see that some small pitch start to appear around to the top of the ASE spectrum. In other words, we have a feedback signal from the absorber section which causes a fabry perot behavior in the amplifier. This causes a ripple in the output spectrum.

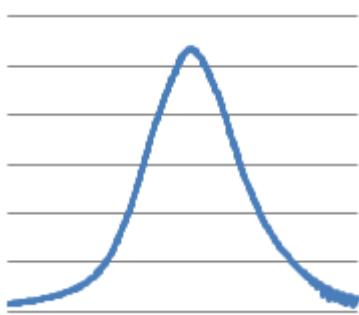


Figure 4.9. Suitable ASE Measurements

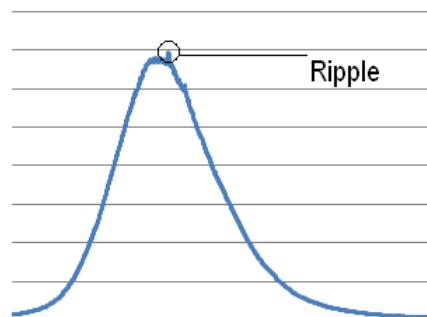


Figure 4.9. Ripple ASE Measurements

In other hand, to control the correct work of the absorber section we must check that the current is flowing out from the absorber section, this mean that the photons are transforming in electron removing optical feedback. The device that feed the absorber section also provides us with the value of this density current. However, we have to limit the current density at around 100mA in case of shortcut, preventing by this way possible damage in the chip.

#### **4.4.1.2 Precision (in the) Measurement**

We have to take in account that there is an error related to the precisions of the measure system, that mean that two measurements, which have done under the same conditions (current density, temperature, alignment, etc) but in two different days, have different conditions. The reason of this is that there are a lot of thighs that can influence in the ASE output power, as for example a slightly different alignment. This error can affect to the fitting algorithm.

In order to reduce this precision problem all the measurement over/from the different amplifiers, with the same current density and at the same temperature, have to be taken consecutively (to keep/keeping) by this way similar conditions in all the ASE measurement related with the same optical modal gain

#### **4.4.1.3 Suitable Power Distribution**

In order to obtain suitable ASE measurement, we have to try to have a homogeneous power distribution inside the amplifier and absorber section. The way to do that is putting the top of the nails in the middle of the section making the homogeneous distribution of the current easier. Moreover, it is necessary to be careful with the wavelength guide and don't put the top of the needles over it, because we run the risk to damage it.

#### **4.4.1.4 Temperature Limitation**

We have to take in account that our chip has a physical limitation with respect to the temperature, so we have to delimitate the temperature work range in order to prevent possible damage over/in the chip.

If we try to work under a low temperature, there is a possibility that the water contained in the air is condense on the surface of the chip damaging it. In other hand, if we try to work under a high temperature, there is possibility to make damage inside of the chip.

#### **4.4.1.5 Vibrations**

The needles that feed the amplifier and absorber section are put/placed over the fragile surface of those section. We have to try to land the top of the needle over this surface without stick it to prevent possible damage to the chip. Moreover, the vibrations can slide the needle over the chip destroying everything in their path. To reduce this possible damage, our setup is build up on an optical table, which removes the vibration preventing the possible damage that the needle can do over the surface of the chip.

#### **4.4.1.6 Contact Area**

Due to the small size of the top of the needles and the high density of currents that we want to use, we have to prevent that there will be a discharge from the needle to the chip via the air, because could cause a large voltage on the chip damaging the chip. For this reason, we always must to remove the power of the needles, before to separate the needle to the surface of a section.

## 5. Fitting of the ASE measurement

In this chapter talk about how can extract/ the optical modal gain from the ASE measurements, which we obtained them by the setups that have been explained in the chapter 4. The first thing that we have to do is organize the ASE measurement in files to make the access to them easier and faster. Then we are going to explain, how we can fit equation 2.2 over the ASE measure files, in order to obtain the optical modal gain. Furthermore, we are going to talk about the characteristic of the optical modal gain, too. After this, we are going to gather all the optical modal gains with the same kind and value of density current but with different temperatures in order to describe the temperature dependency within optical gain measurements. After this, we need to do a study of the different mathematic tools/way that we can use in order to do a comparative between the optical modal gains, because a visual analyze is not enough. To do all these things, we are going to use a mathematic tool called Matlab and its toolbox.

### 5.1 ASE Measure Files

First of all, we have to organize the ASE measurement in such a way that the description of all the ASE measurement necessary to extract an optical modal gain, are together in one file. Moreover, in order to can do sequential fitting and to reduce the number of files, we are going to use the same file to put all the ASE measurement that have taken with/under same temperature and the same kind of current together.

The figure 5.1 shows us a Microsoft Excel file (from 5000 to 500  $A/cm^2$ ), where we can see a description of all the ASE measurement necessary to extract an optical modal gain pile up in columns and each column is match with a different value of density current. So as we are using ten different values of density current we have ten columns per file. In the figure 5.1 only four of these columns are showed. The ASE measurement result that are showing in this file have been taken using the first setup under 30 degrees of temperature. In order to relate each ASE measure with its specific characteristic (length of the absolver, value of current density, total ASE spectrum power, ...) we have to add more information to the file. This information is useful to check error too.

% of the absortion section	Current Density	Name of the ASE Spectrum Power File	Current Density	Name of the ASE Spectrum Power File	Current Density	Name of the ASE Spectrum Power File
0	0	5000 -7.63 W_fk1_30	4500 -8.84 W_fk1_30 ....	....	500 -34.12 W_fk1_30	
0	0	5000 -26.9 W_fk2_30	4500 -27.46 W_fk2_30 ....	....	500 -33.76 W_fk2_30	
29	6390	5000 0 WD006_30	4500 -18.85 WD007_30 ....	....	500 -33.51 WD009_30	
27	6570	5000 0 XXXXXXXX	4500 -18.25 WH010_30 ....	....	500 -33.26 WH012_30	
24	6840	5000 0 WC007_30	4500 -18.12 WC008_30 ....	....	500 -33.15 WC010_30	
21	7110	5000 0 XXXXXXXX	4500 -17.6 WG009_30 ....	....	500 -32.76 WG011_30	
18	7380	5000 0 XXXXXXXX	4500 0 XXXXXXXX ....	....	500 -32.61 WB048_30	
15	7650	5000 0 XXXXXXXX	4500 0 XXXXXXXX ....	....	500 -32.28 WF009_30	
12	7920	5000 0 XXXXXXXX	4500 0 XXXXXXXX ....	....	500 -31.98 WA007_30	
8	8280	5000 0 XXXXXXXX	4500 0 XXXXXXXX ....	....	500 -31.76 WE008_30	
5	8850	5000 0 XXXXXXXX	4500 0 XXXXXXXX ....	....	500 -31.46 W0009_30	
Length of the amplifier Section		Total ASE Spectrum Power	Total ASE Spectrum Power	Total ASE Spectrum Power		

Figure 5.1: Microsoft Excel File “file\_name.csv”

Note: We use “XXXXXXXXX” as name of an ASE measurement when for this combination of temperature and kind and valor of density current, the saturation is taking place in the amplifier section.

As we are using thirteen different temperature values and two different kind of current (pulse and continue) we have 26 of this files. It is possible to find more information about the method of files organization in the appendix

## 5.2 Fitting Algorithm

The main function that we are going to use in order to fit the equation 2.2 to obtain the optical modal gain is called “fit” which it is part of the toolbox in Matlab. We have to configure the “fit” function to work suitable. This means that we have to provide the function with suitable dates (a column of one of the ASE measurement files), the equation of fitting (the equation 2.2) and the suitable options of fit configuration (Start point, Maxim Number of Iterations, Fitting Method ...). With all this dates, the fit function calculates the fitting curve. However, we have to know that the fitting algorithm give a Gaussian standard deviation to each ASE measurement which use to generate an optical modal gain, so this mean that the fitting curve and the optical modal gain have a Gaussian standard deviation, too. These standard deviations are function/proportional of the total power of the ASE measurement. So, the ASE measurements with more power have a bigger standard deviation.

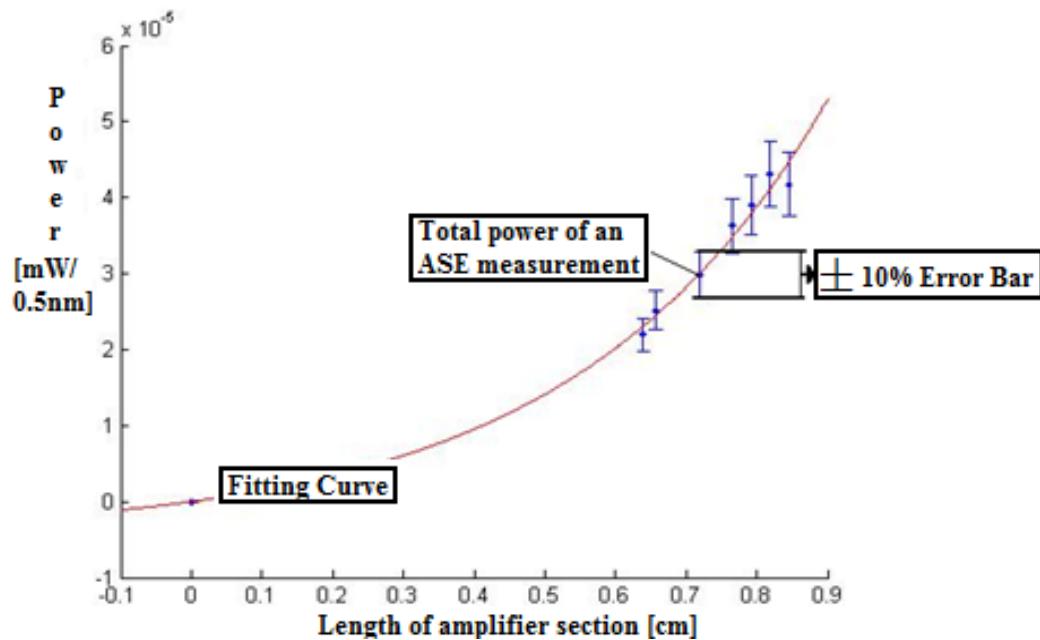


Figure 5.1: Fitting Curve.

The figure 5.2 show us the fitting curve of the equation 2.2 (red curve), using ASE measurements of 7 different amplifier sections from the first setup, with a  $2500 \text{ A/cm}^2$  density current and 17 degree of temperature. The total power of each ASE measurement is present as a blue point, and there standard deviations are present as a vertical blue line.

Now, we have to extract the optical modal gain from the fitting curve, and to do that there are other parameters which was empirically fixed to obtain better result, as for example the optical modal gain range. This parameter was fixed to  $-2 \text{ cm}^{-1}$ . It is possible to find more information about the algorithm in the appendix. The figure 5.3 shows us an optical modal gain and its two Gaussian standard deviation curves, generate using the last fitting curve till  $-2 \text{ cm}^{-1}$ .

Figure 00

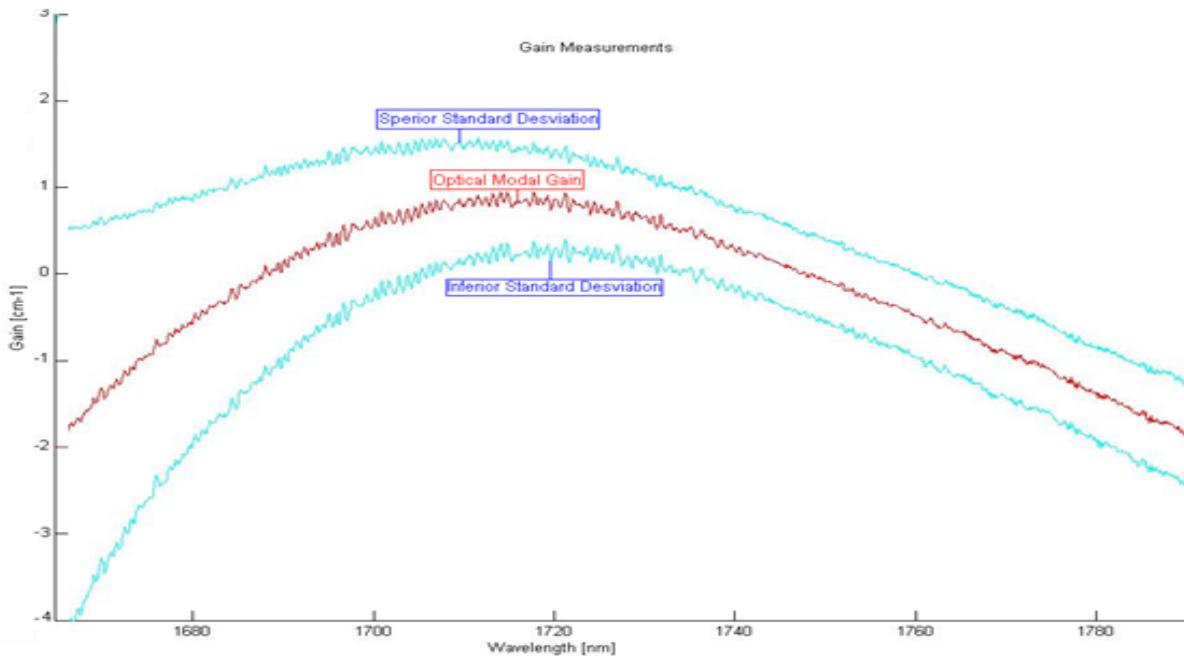


Figure 5.2: Optical Modal Gain

## 5.3 Optical Modal Gain Results

After this, we are going to gather all the optical modal gains with the same kind and value of density current but with different temperatures in order to describe the temperature dependency within optical gain measurements. As we are using ten different values of density current and two different kind of current (pulse and continue) we have two big groups; one with the results from the first setup and the other with the results from the second. Theoretical, each group has made thirteen optical modal gains with different temperatures up. But really, we have to take in account the limitation of to use the ASE measurement to obtain a suitable optical modal gain by fitting of the equation 2.2 (2.2.3 Limitation). This means that, there are some combination of temperature and density current that are not valid to provide a suitable optical modal gain. For example, all the optical modal gain extracts from ASE measurements under a density current of  $1000 \text{ A/cm}^2$  or lower, are no useful for us because the optical modal gain is negative, independently of the temperature or the kind of current that we are using, so the density current range is reduce from 2000 to  $5000 \text{ A/cm}^2$ .

### 5.3.1 Continue Injection Current (Setup I)

Now, we are going to show the optical modal gain result from the first setup (continue density current). The next figure shows us the optical modal gains for the ( $2500 \text{ A/cm}^2$ ) current density using the

complete range of temperatures. A descriptive table with the information of the density current, the temperature, the representation color and the lengths of the absorber sections used to extract the optical modal gain is attach to each picture. The rest of the optical modal gains with their descriptive tables are presented in the appendix.

**Table 5.1 ASE Measurements for Setup I**

Temperature [°]	%Absorption	Current[A/cm <sup>2</sup> ]	Color
10	29-27-20-15-12-9	2500	Blue
13	29-27-20-15-12-9	2500	Green
15	29-27-20-15-12-9	2500	Black
17	29-27-20-15-12-9	2500	Pink
20	29-27-20-15-12-9	2500	Yellow
23	29-27-24-21-18-15-12-8	2500	Cyan
25	29-27-24-21-18-15-12-8	2500	Green
27	29-27-21-18-15-12-8	2500	Pink
30	29-27-24-21-18-15-12-8	2500	Black
33	29-27-24-18-15-12-8	2500	Pink
35	29-27-24-17-15-12-8	2500	Yellow
37	29-27-24-17-15-12-8	2500	Cyan
40	29-27-24-21-15-12-8	2500	Red

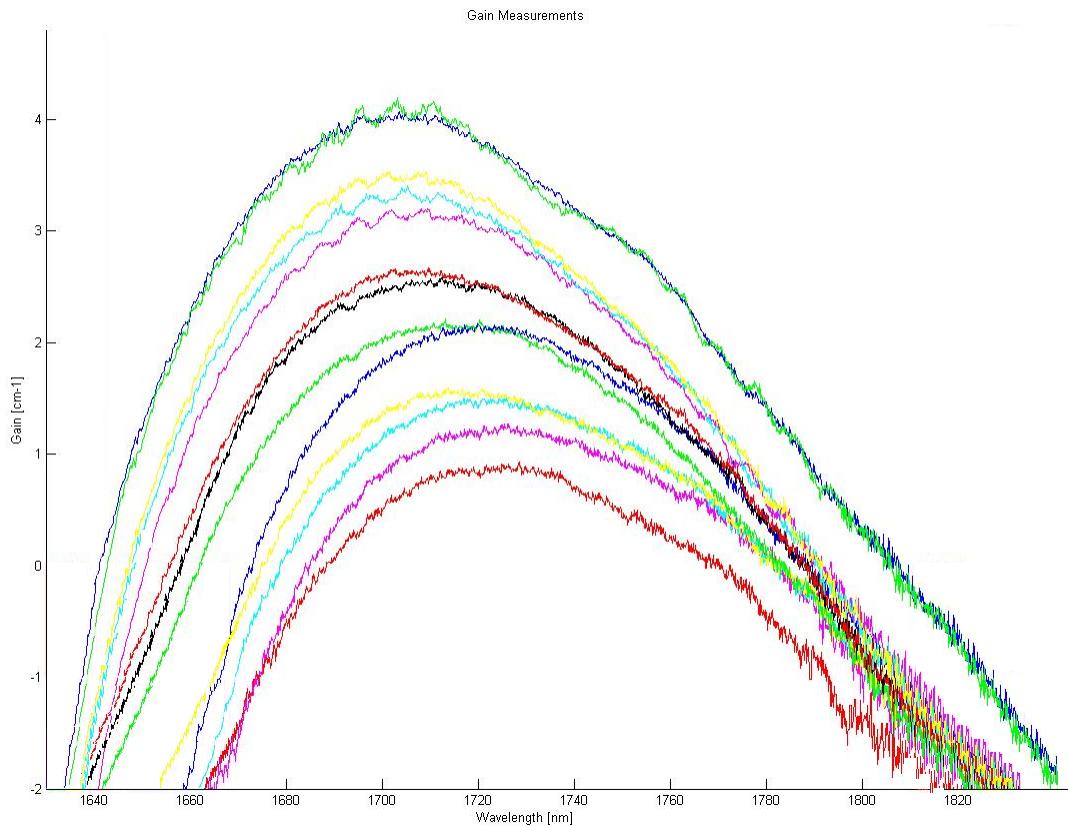


Figure 5.3: Valid Optical Modal Gains from the Setup I at  $2500 \text{ A/cm}^2$

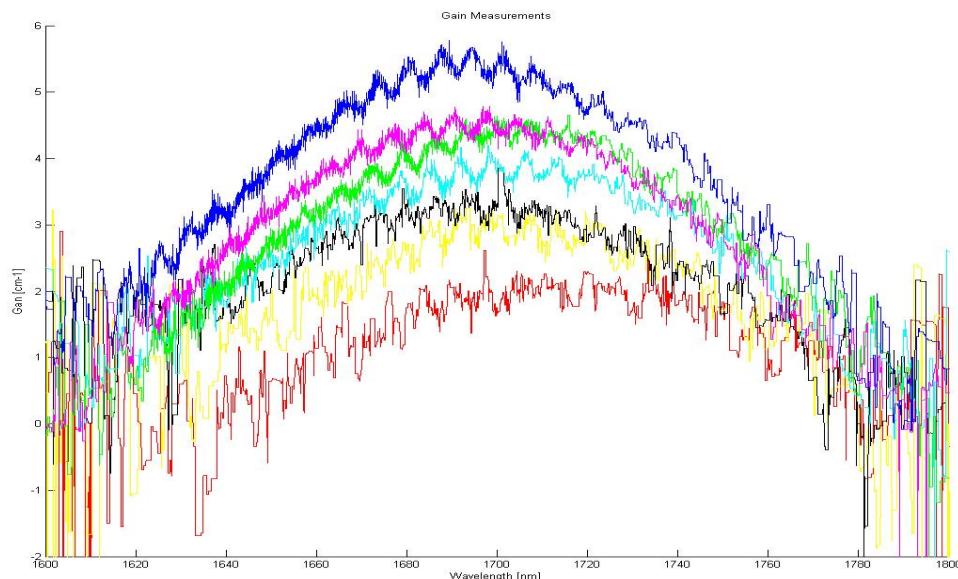
### 5.3.2 Pulse Injection Current (Setup II)

Now, we are going to show the optical modal gain result from the second setup (pulse density current with a duty cycle of one percent and a frequency of 2Khz). The next figures show us the optical modal gains for ( $2500 \text{ A/cm}^2$ ) current density using the complete range of temperatures. A descriptive table with the information of the density current, the temperature, the representation color and the lengths of the absorber sections used to extract the optical modal gain is attach to each picture. The rest of the optical modal gains with their descriptive tables are presented in the appendix.

Table 5.2 ASE Measurements for Setup II

Temperature [°]	%Absorption	Current [ $\text{A/cm}^2$ ]	Color
10	29-28-27-26-23-22-20-16-15-13-12-11-10-7	2500	Blue
15	29-28-27-26-23-22-20-16-15-13-12-11-10-7	2500	Pink
20	29-28-27-26-23-22-20-16-15-13-12-11-10-7	2500	Green

25	29-28-27-26-23-22-20-16-15-13-12-11-10-7	2500	Cyan
30	29-28-27-26-23-22-20-16-15-13-12-11-10-7	2500	Black
35	29-28-27-26-23-22-20-16-15-13-12-11-10-7	2500	Yellow
40	29-28-27-26-23-22-20-16-15-13-12-11-10-7	2500	Red



**Figure 5.4: Valid Optical Modal Gains from the Setup II at 2500 A/cm<sup>2</sup>**

### 5.3.3 General description of the temperature dependency within optical gain measurements.

As we can see in the optical modal gain showed and in agreement with the theory, the can extract four general conclusions;

The optical modal gain is proportional to the injection current density, so more current density means more optical modal gain.

The optical modal gain is inverse proportional to the temperature, so more so more temperature means less optical modal gain.

For the same temperature and the same density current the optical modal gain extract from ASE measurement that have been done with pulse current density is bigger that if we use continue density current.

The central wavelength of an optical modal gain is depended of the temperature. The rising of the temperature increase the central wavelength of an optical modal gain.

## 5.4 Working Area

### 5.4.1 Continue Injection Current (Setup I)

**Table 5.3 Working Area Valor for Setup I**

<b>Current [A/cm<sup>2</sup>]</b>	<b>Valid Temperature Range [°]</b>
2000	10-25
2500	10-40
3000	20-40
3500	25-40
4000	30-40
4500	35-40
5000	35-40

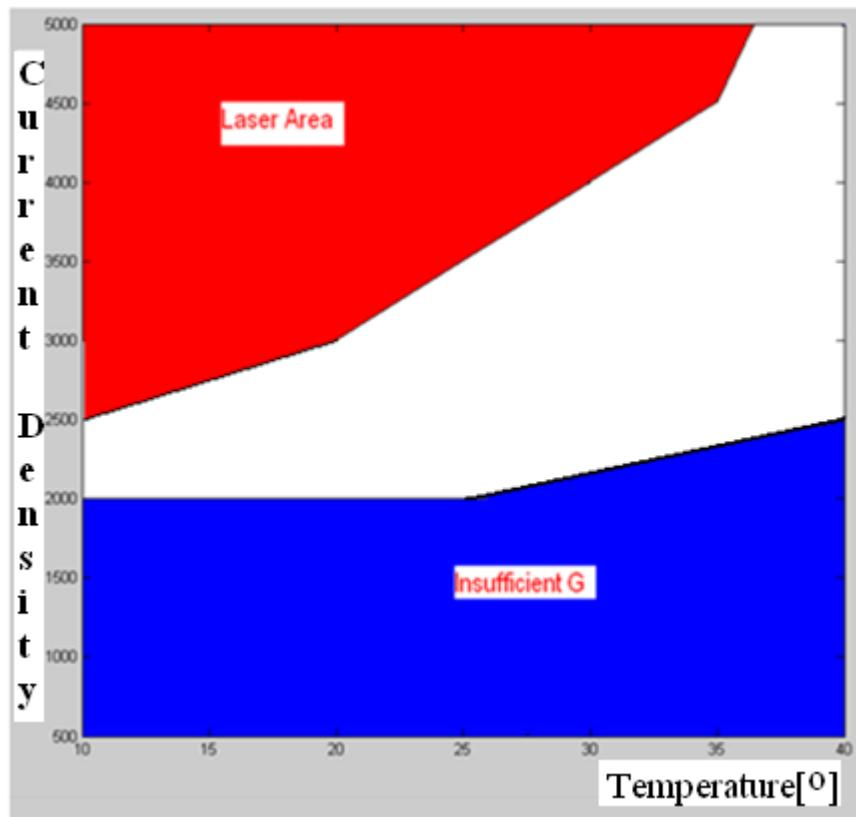


Figure 5.5: Working Area from the Setup I

#### 5.4.2 Pulse Injection Current (Setup II)

Table 5.4 Working Area Valor for Setup II

Current [A/cm <sup>2</sup> ]	Valid Temperature Range [°]
1500	10-15
2000	10-35
2500	10-40
3000	20-40
3500	25-40
4000	35-40
4500	35-40
5000	40

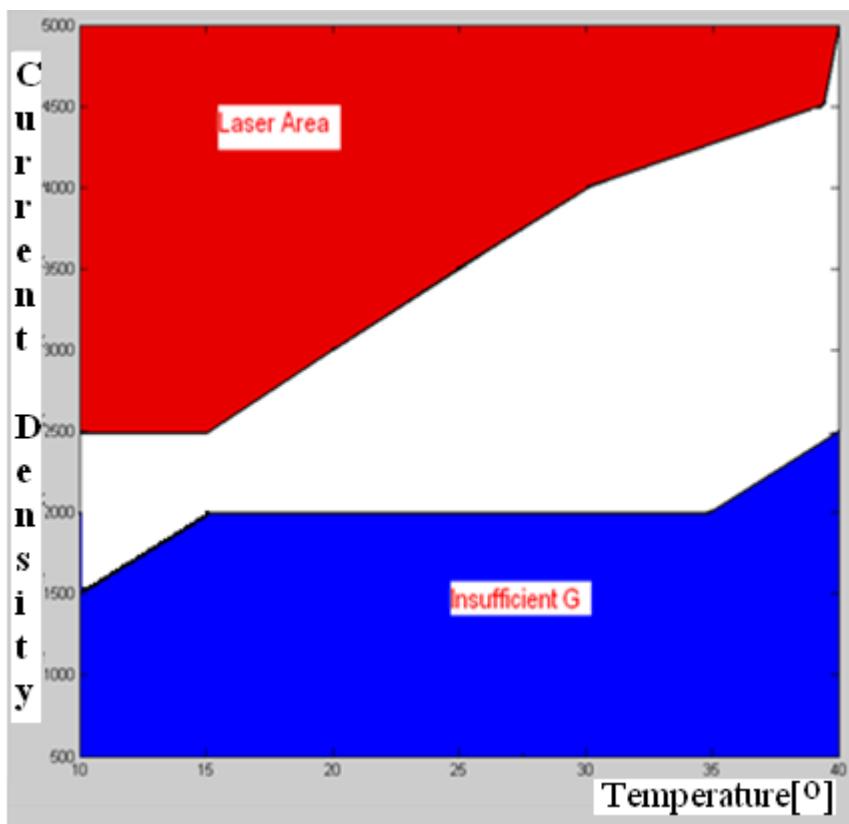


Figure 5.6: Working Area from the Setup II

## 5.5 Distance

In this part of the report we are going to talk about the different mathematic tools/way that we can use in order to do a comparative between the optical modal gains, because a visual analysis don't provide us enough information. Moreover, our optical modal gain curves are not fixed, every one of this curves have a standard deviation that have to take in account.

The thing that we want to do it is compare the optical modal gains from the first setup with the optical modal gains of the second setup, to know temperature dependency within optical gain measurements. In other words, if we can match two optical modal gains from different setup, whose ASE measurements have taken under the same current density but using different temperature, we can extract information about how the Joule's effect affect to the optical modal gain, using the thermal distance.

### 5.5.1 Cross Correlation

At first, we tried to use the cross correlation to do the optical modal gain comparative study but this technique is focused on the shape of the signal and not in the amplitude. For this reason the cross correlation

are no useful for us. Moreover, this technique not takes in account the standard deviation of the optical modal gain curve, only the optical modal gain curve.

For discrete functions, for example  $f$  and  $g$ , the cross-correlation is defined as:

$$(f * g)[n] = \sum_{m=-\infty}^{\infty} f^*[m] * g[n+m] \quad (5.1)$$

### 5.5.2 Euclidean Distance

After this, we tried to use the Euclidean distance to do the optical modal gain comparative study but this technique is equivalent to the visual analysis, and this kind of analysis don't provide us of a good result, especially when we have to compare a optical modal gain with other optical modal gains, which are so similar each other. Moreover, this technique not takes in account the standard deviation of the optical modal gain curve too, only the optical modal gain curve.

For discrete functions, for example  $f$  and  $g$ , the Euclidean Distance is defined as:

$$d(f, g) = \sqrt{(f_1 - g_1)^2 + (f_2 - g_2)^2 + \dots + (f_n - g_n)^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (f_i - g_i)^2} \quad (5.2)$$

### 5.5.3 Mahalanobis Distance

Finally, we tried to use the Mahalanobis distance to do the optical modal gain comparative study. This technique is based on correlations between variables by which different patterns can be identified and analyzed. The main advantage of this Mahalanobis distance is that this technique takes in account the standard deviation of the optical modal gain curve, providing us of a suitable mathematic tool to do the modal gain comparative study.

For discrete functions, for example  $f$  and  $g$ , the Mahalanobis Distance is defined as:

$$d(f, g) = \sqrt{\left( \left( \frac{f_{11} - g_{12}}{\sigma_1} \right)^2 + \left( \frac{f_{21} - g_{22}}{\sigma_2} \right)^2 \right) + \dots + \left( \left( \frac{f_{i1} - g_{i2}}{\sigma_i} \right)^2 + \left( \frac{f_{i+1,1} - g_{i+1,2}}{\sigma_{i+1}} \right)^2 \right)} \quad (5.3)$$

$$d(f, g) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \left( \frac{f_i - g_i}{\sigma_{fi}} \right)^2 + \left( \frac{f_i - g_i}{\sigma_{gi}} \right)^2 \right)} \quad (5.4)$$

As a conclusion, we are going to use the Mahalanobis distance to compare two different optical modal gains curve, because this mathematic tool take in account the standard deviation of the curve.

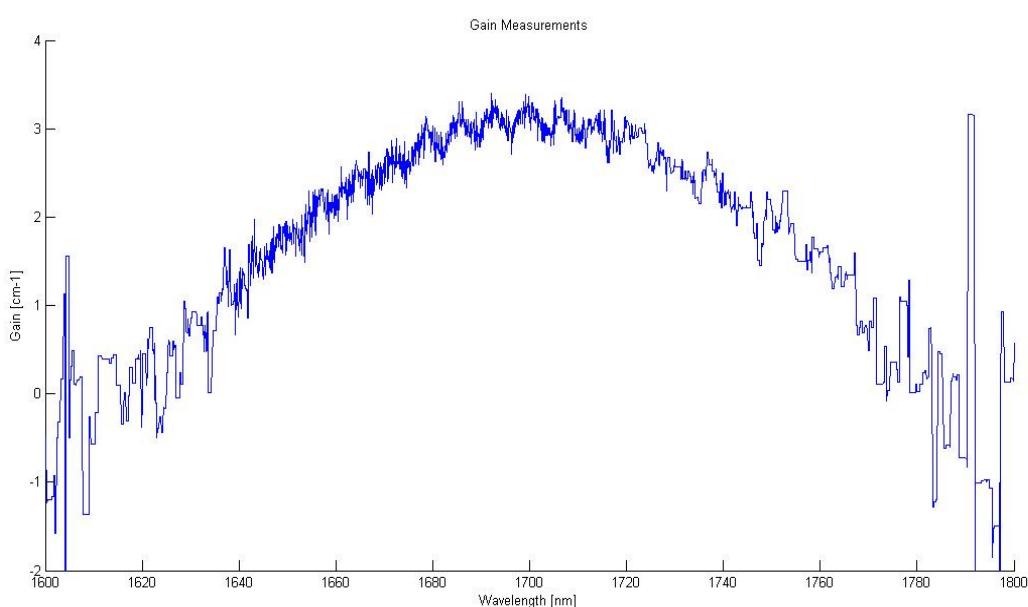
## 5.6 Temperature Dependency

So now, using the Mahalanobis distance we can choose every optical modal gain from the second setup (generated using ASE measurements with a specific pulse density current and temperature), and compare it with all of the optical modal gains from the first setup (continue current) that have the same value of current density, finding by this way temperature dependency within optical gain measurements.

The figure 5.7 shows us an optical modal gain generate using fourteen ASE measurements with 3000 A/cm<sup>2</sup> of pulse density current and with a temperature of 35 degrees.

**Table 5.5 ASE measurement for Setup II with a density current of 3000 A/cm<sup>2</sup>**

Temperature [°]	%Absorption	Current[A/cm <sup>2</sup> ]	Color
35	29-28-27-26-23-22-20-16-15-13-12-11-10-7	3000	Blue



**Figure 5.7: Optical modal gain from the second setup at 3000 A/cm<sup>2</sup> of pulse density current and 35 degrees of temperature**

The figure 5.8 shows us nine optical modal gains for Setup I generate using fourteen ASE measurements with  $3000 \text{ A/cm}^2$  of pulse density current but under different temperature, from 20 to 40 Degrees.

The figure 5.9 shows us the superposition of the figures 5.7 and 5.8. As we comment before, we can observe that a visual analysis it is not enough.

**Table 5.6 ASE Measurement for Setup I with a density current of  $3000 \text{ A/cm}^2$**

Temperature [°]	%Absorption	Current[A/cm <sup>2</sup> ]	Color
20	29-27-20-15-12-9-5	3000	Cyan
23	29-27-24-21-18-15-12-8	3000	Blue
25	29-27-24-21-18-15-12-8	3000	Yellow
27	29-27-21-18-15-12-8	3000	Black
30	29-27-24-21-18-15-12-8	3000	Pink
33	29-27-24-18-15-12-8	3000	Green
35	29-27-24-17-15-12-8	3000	Yellow
37	29-27-24-17-15-12-8	3000	Cyan
40	29-27-24-21-15-12-8	3000	Red

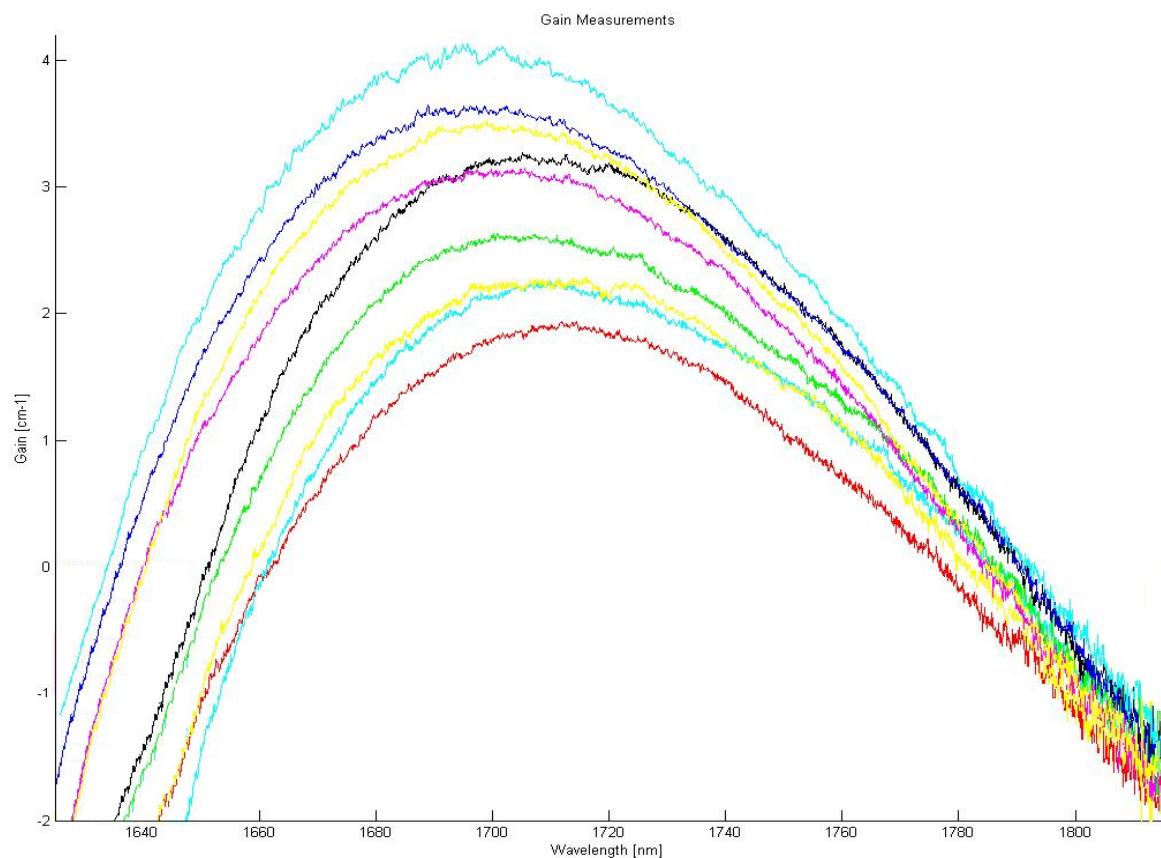


Figure 5.8: Optical modal gains from the first setup at  $3000 \text{ A/cm}^2$  of pulse density current and from 20 to 40 degrees of temperature

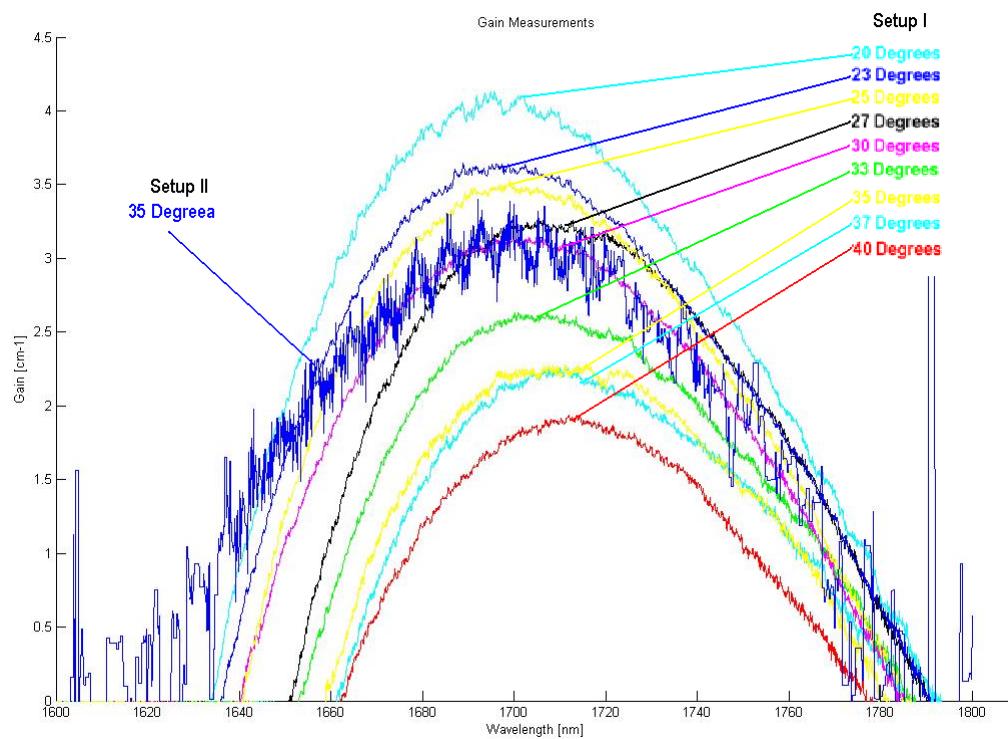
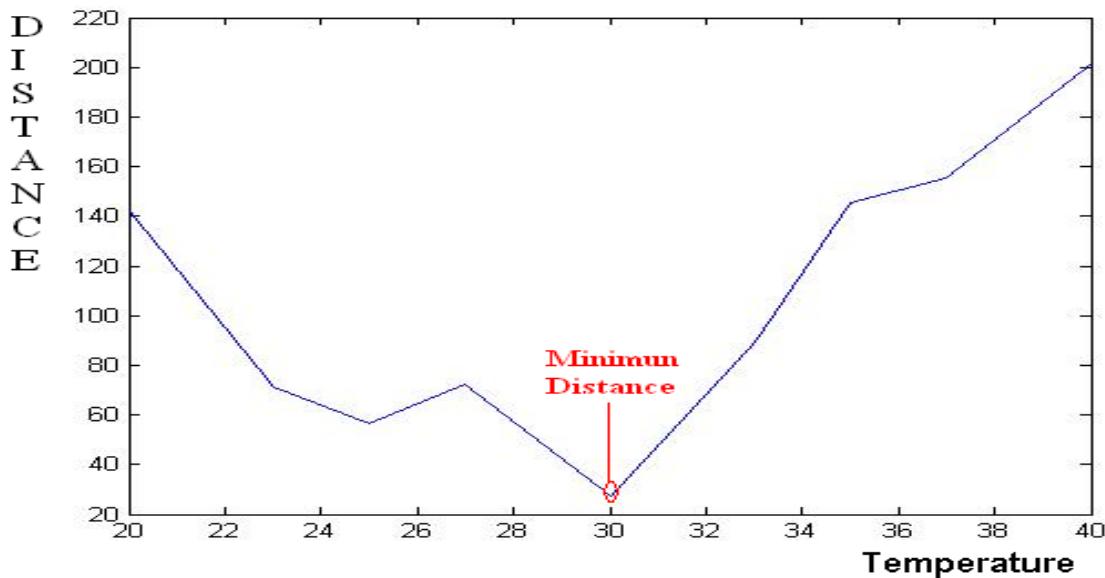


Figure 5.9: Nine Optical Modal Gains from the first setup at  $3000 \text{ A/cm}^2$  of pulse density current and from 20 to 40 degrees of temperature compare with an Optical Modal Gain from the second setup at  $3000 \text{ A/cm}^2$  of pulse density current and 35 degrees

In the tree figures the standard deviations curves aren't showed, but are take in account when we apply/calculate the Mahalanobis distance. The next table shows us the result of the Mahalanobis distance and the figure 5.10 is a visual representation of this table. We can observe that the thermal distance for this case is 5 degrees.

**Table 5.7 Mahalanobis Distance Results**

Optical Modal Gain	C_T40	C_T37	C_T35	C_T33	C_T30	C_T27	CT_25	CT_23	CT_20
Mahalanobis Distance	201.42	155.45	145.213	89.548	27.58	72.20	56.316	70.96	142.726



**Figure 5.10: Mahalanobis Distance**

Them, the 35-degrees optical modal gain from the second setup match with the 30-degrees optical modal gain from the first setup. This means that we can relate the thermal distance with the injected current density, and we also can relate this current density with the difference applied power.

Now, if we repeat this process over the completed set of measurements, doing an average of the result we obtain the figure 5.11. The next table shows us the thermal distance value and their standard deviations. We can see that for the current densities equal or lower that  $1500\text{A}/\text{cm}^2$  there are not optical modal gains to do a comparative because the value of the gain is negative for this current density values. Moreover, for current densities equal or higher that  $4500\text{A}/\text{cm}^2$  we only can extract information about the inferior limit of the thermal distance, however we don't have optical modal gain to extract more information because the saturation is taking place for this current density in almost of the temperature range.

Table 5.8: Average Mahalanobis Distance

Density Current [A/cm <sup>2</sup> ]	Thermal Distance [°]	Standard Deviation [°]
2000	3.5	±0.25
2500	4.25	±0.5
3000	4.75	±0.75
3500	5.5	±0.5
4000	6.5	±1
4500	>5	-
5000	>5	-

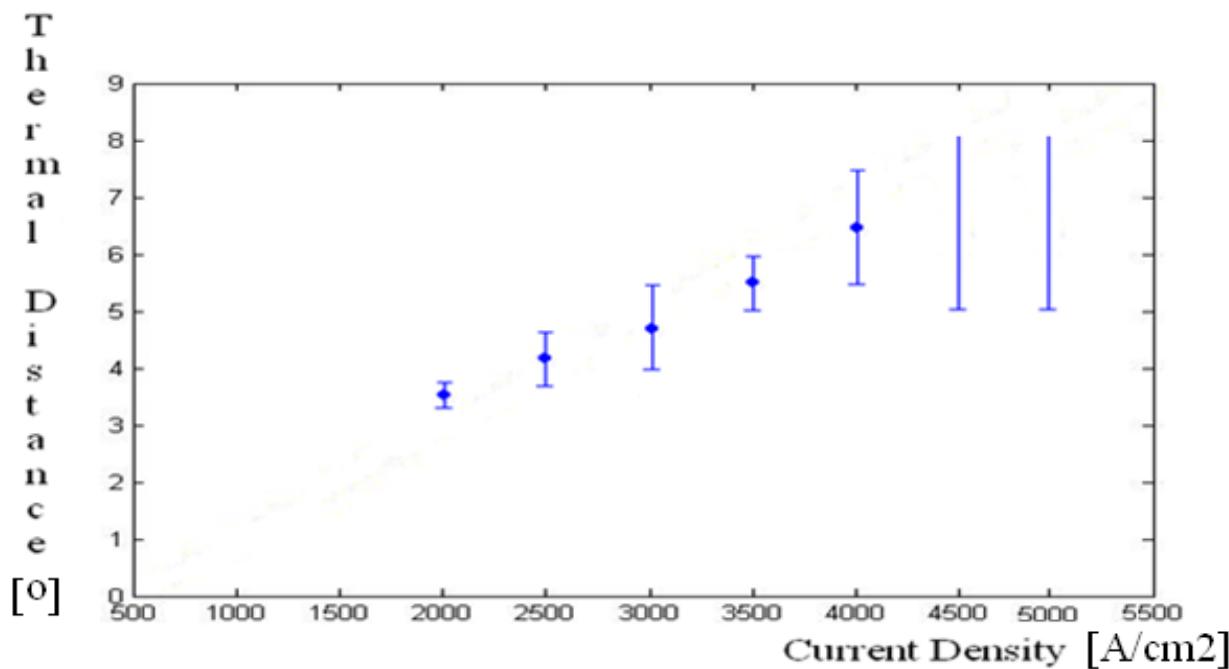


Figure 5.11: Average Mahalanobis Distance

## 6. Conclusion

### 6.1 Summary and discussion

All along this report we have discover the large number of possibilities that the electro-optical tunable laser system offers and the importance of having a detailed knowledge of the characteristics of the gain active material. In a market where tunable lasers systems are expensive, bulky and slow, the possibility of packing all the components of the system in a single chip will reduce the price and the size of the device, improving the speed also.

As a result of the tasks, we have demonstrate how we can obtain the optical modal gain from the ASE spectra of amplifier sections with different lengths by a fitting algorithm, how is possible to relate the injected power with the temperature, and how the temperature affect to the optical modal gain. To do these last two demonstrations was necessary to develop a study of the different mathematic tools that we can use in order to do a comparative between two optical modal gains. At the same time, we have studied the limitations of our measurement technique (temperature and value and kind of density current) that we must to fulfil in order to obtain suitable optical modal gain, defining by this way the working area of our chip. Moreover, we have taken advantage of this limitation to reduce the number of ASE measurement.

As a result of all the process showed, in the figure 5.11 we can see the thermal distance in function of the density current that help us to describe the temperature dependency within optical gain measurements. However, we pretended by the showed experiment, to know the shape of the curve that relate the thermal distance whit the current density, and we can see that the number of points that we have obtained is not enough to extract a conclusion about the shape. For the distribution of the points we suppose that the more probable shape of the curve is lineal or exponential, but we cannot demonstrate it.

### 6.2 Future work

To improve the result of the shoed experiment two this would be done. First, improvements in the measurements can be made by increasing the relative amplifier length differences of the measured devices to obtain a larger data range to fit the equation (2.2). Second, it is necessary to increase the number of point that relates the thermal distance with the current density in order to know the real shape of the curve. To do this second improvement we need to raise the temperature and density current range, however this action can damage the chip. To prevent these damage the gain measurements can be done with higher injection current densities by decreasing the amplifier length and increasing the absorber length to prevent lasing.