

E.T.S. de Ingeniería Industrial,
Informática y de Telecomunicación

Diseño e implementación de nuevos sistemas láser de fibra óptica con comportamiento como sensores de temperatura



Máster Universitario en Comunicaciones

Trabajo Fin de Máster

Nombre y apellidos del autor: Ioseba Monasterio Embeita

Nombre y apellidos del director/es: Silvia Díaz Lucas

Pamplona, fecha de defensa: 28 de Junio de 2016



AGRADECIMIENTOS

Me gustaría mostrar mis agradecimientos a Silvia Díaz Lucas por darme la oportunidad de realizar este TFM, así como por su apoyo y tiempo. Estuvo en todo momento para guiarme y aconsejarme en la realización del trabajo.

También me gustaría dar las gracias a todo el grupo docente con los que he mantenido una buena relación en estos dos años.

Por último agradecer a toda mi familia por el apoyo que me han brindado durante este largo trayecto, especialmente a mi madre Edurne y a mi padre Txema.

RESUMEN

Este trabajo fin de máster ha sido realizado por Ioseba Monasterio Embeita, estudiante de Máster en Comunicaciones. Elegí realizar este proyecto porque las comunicaciones ópticas eran una de las especialidades que más me interesaba dentro de las tecnologías de comunicación.

Los objetivos alcanzados en dicho trabajo han sido la realización de un estudio de los diferentes tipos de fibras dopadas de erbio y la medición de potencia en tiempo para distintas estructuras de sistemas láser de fibra óptica para su posterior uso como sensores de temperatura. Para todo ello se han realizado varios montajes en el laboratorio.

Para conseguir dichos objetivos se han tomado una gran cantidad de mediciones con los equipos del laboratorio que posteriormente se han analizado para poder concentrar los datos y presentarlos en el presente trabajo.

LISTA DE PALABRAS CLAVE

- OSA → Analizador Óptico de Espectros
- WDM → Multiplexación por División en Longitud de Onda
- TFM → Trabajo Final de Máster
- EDF → Fibra Dopada con Erblio
- EDFA → Amplificación con Fibra Dopada con Erblio
- EDFL → Laser con Fibra Dopada con Erblio
- VOA → Atenuador Óptico Variable
- FBG → Redes de Difracción de Bragg
- OSNR → Relación Señal-Ruido Óptica
- ASE → Emisión de Amplificación Espontánea
- SMF → Fibra Monomodo Estándar

CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS.....	II
RESUMEN	III
LISTA DE PALABRAS CLAVE.....	IV
1 INTRODUCCIÓN	8
2 CONCEPTOS BÁSICOS	9
2.1 Fibra Óptica	9
2.1.1 Tipos de Fibra óptica	9
2.1.1.1 Fibra Multimodo.....	9
2.1.1.2 Fibra Monomodo.....	10
2.2 Amplificación óptica	11
2.2.1 Efecto Laser	11
2.2.2 Amplificadores con núcleo dopado de tierras raras	13
2.2.2.1 Amplificador de fibra dopada con erbio	14
2.2.3 Ganancia EDFA	15
2.2.4 Ruido en los EDFA.....	16
2.2.5 Competencia por la ganancia	17
2.3 Láseres de fibra óptica.....	17
2.3.1 Láseres de fibra dopada con erbio en configuración de anillo	18
2.4 Dispositivos ópticos.....	20
2.4.1 Multiplexor en longitud de onda (WDM).....	20
2.4.2 Atenuador Óptico	21
2.4.3 Circulador óptico	22
2.4.4 Acopladores.....	23
2.4.5 Redes de difracción	25
2.4.5.1 Principio de medida.....	26
2.4.6 Aislador óptico.....	27
3 ESTADO DEL ARTE.....	28
3.1 introducción	28
3.2 Principio de funcionamiento	28
3.3 Aplicaciones láseres de fibra	30
3.4 Situación del mercado	32

3.5 Tipos de láseres según el método de generación de la longitud de onda	34
3.5.1 Generación mediante FBG	34
3.5.2 Generación mediante WDM.....	35
3.6 Limitación de los láseres.....	36
3.6.1 Forma de ganancia	36
3.6.2 Spatial hole burning.....	37
3.6.3 Láseres multilínea.....	38
3.6.3.1 Ecuación	39
3.6.3.2 Estabilidad	39
3.6.4 Modos y estabilidad	40
3.6.4.1 Absorbente saturable	41
3.6.4.2 Efecto de la supresión inducida de modos longitudinales	41
3.6.4.3 Doble cavidad	41
4 ESTUDIO EDF	43
4.1 comportamiento del EDFA	43
4.1.1 Láser de Bombeo	43
4.1.2 Emisión espontánea amplificada.....	44
4.1.3 Funcionamiento del láser de bombeo junto al EDF	45
5 PROCESO EXPERIMENTAL.....	49
5.1 Láser de doble canal de fibra dopada con erbio mediante FBGs en serie	50
5.1.1 Análisis de los resultados	52
5.1.2 Bucle estabilizador	58
5.1.3 Sensores de temperatura	61
5.2 Láser de triple canal de fibra dopada con erbio mediante FBGs en serie.....	63
5.2.1 Análisis de los resultados	65
5.2.2 Bucle estabilizador	67
5.2.3 Sensores de temperatura	67
5.3 Láser de cuádruple canal de fibra dopada con erbio mediante FBGs en serie	70
5.3.1 Análisis de los resultados	71
5.3.2 Sensores de temperatura	73
5.4 Láser de fibra dopada con erbio de doble anillo con 4FBGs	76
5.4.1 Análisis de los resultados	77
5.5 Láser de fibra dopada con erbio de doble anillo con 3FBGs	79
5.5.1 Análisis de los resultados	79

5.6 Láser multilínea de fibra dopada con erbio mediante estructuras de FBG mixtas	81
5.6.1 Análisis de los resultados	82
6 CONCLUSIONES	83
7 LINEAS FUTURAS.....	84
8 BIBLIOGRAFIA	85
ANEXO	87

1 INTRODUCCIÓN

Uno de los principales campos de investigación dentro del mundo de la fibra óptica, es la generación de nuevas estructuras de fibra óptica que sean capaces de generar láseres multilínea. Este tipo de láseres multilínea suelen tener gran interés en diversos campos de las comunicaciones ópticas como es el sensado de la temperatura, por ello nos interesa obtener láseres con el mayor número de longitudes de onda. En este TFM diseñaremos e implementaremos nuevos sistemas de laser de fibra óptica para poder utilizarlos como sensores de temperatura.

Para poder desarrollar los láseres diseñaremos estructuras en anillo de fibra óptica, donde utilizaremos fibras dopadas con erbio (EDF) junto con un bombeo externo a 980nm de una onda continua y así poder conseguir un amplificador de fibra dopada con erbio (EDFA). Este tipo de diseños está en auge gracias a su simplicidad y reducido coste de los materiales ya que no son necesarios muchos metros de EDF.

Dentro de la cavidad necesitaremos utilizar redes de difracción de Bragg (FBG). Los FBGs son redes que gracias a su naturaleza selectiva son capaces de filtrar longitudes de onda con un ancho de banda estrecho. Con estos dispositivos podremos generar láseres multilínea de la longitud de onda deseada y también podremos generar sensores de temperatura donde su longitud de onda variara en función de la temperatura ambiente.

El objetivo principal de este TFM será generar láseres multilinea con el mayor número de longitudes de onda para su posterior sensado de temperatura, utilizando técnicas de multiplexación en longitud de onda (WDM). Se estudiarán diferentes soluciones con el fin de obtener la más apropiada para este tipo de redes.

Este proyecto tiene como objetivos principales:

- Familiarizarse con el manejo del instrumental que se va a utilizar en el desarrollo del proyecto.
- Realizar sencillos montajes para obtener curvas de respuesta de los EDFA y así poder analizar las ventajas de cada una para el consiguiente desarrollo de las estructuras que se implementarán.
- Diseño y montaje de los sistemas láser que van a ser objeto de estudio. En esta fase se procederá a la toma de resultados y obtención de conclusiones.
- Optimización de dichas redes con el objetivo de obtener el máximo rendimiento posible.

2 CONCEPTOS BÁSICOS

2.1 Fibra Óptica

La fibra óptica es una guía onda cilíndrica dieléctrica fabricada de sílice, plástico u otros materiales con baja atenuación a frecuencias ópticas. Principalmente es utilizada en redes de datos. Las fibras ópticas están formadas normalmente por una zona central (núcleo) de mayor índice de refracción que la que le rodea (cubierta) y que guían uno o varios modos, dependiendo de las dimensiones del núcleo. La fuente de luz suele ser un diodo láser o un LED.

Las fibras se utilizan ampliamente en telecomunicaciones, ya que permiten enviar gran cantidad de datos a una gran distancia, con velocidades similares a las de radio y superiores a las de cable convencional. Son el medio de transmisión por excelencia al ser inmune a las interferencias electromagnéticas. También se utilizan para redes locales, en donde sea necesario aprovechar las ventajas de la fibra óptica sobre otros medios de transmisión [1].

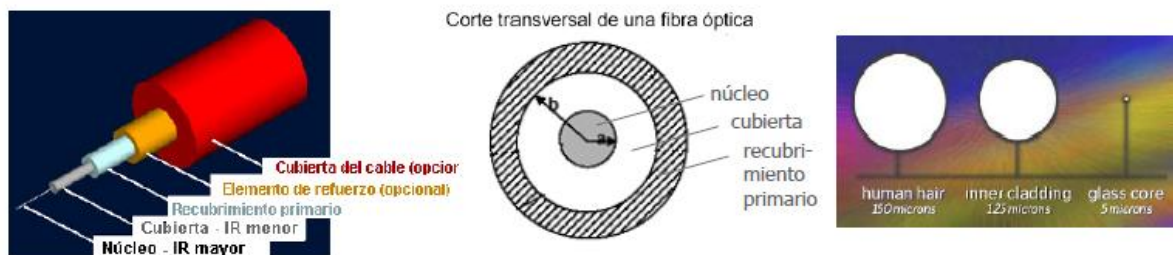


Fig. 1: Estructura de la fibra óptica

2.1.1 Tipos de Fibra óptica

La luz en el interior de una fibra se transporta sobre modos de propagación. Y según el número de modos de propagación tendremos dos tipos de fibra óptica: multimodo y monomodo.

2.1.1.1 Fibra Multimodo

Una fibra multimodo es aquella en la que la luz excita más de un modo de propagación. Esto supone que cada modo viaja a velocidades diferentes y no llegan todos a la vez. Una fibra multimodo puede tener decenas de modos de propagación. Las fibras multimodo se usan comúnmente en aplicaciones de corta distancia, menores a 2 km, son simples de fabricar y por tanto económicas.

El núcleo de una fibra multimodo tiene un índice de refracción superior, pero del mismo orden de magnitud, que el revestimiento. Debido al gran tamaño del núcleo de una fibra multimodo, es más fácil de conectar y tiene una mayor tolerancia a componentes de menor precisión.

Dependiendo del tipo de índice de refracción del núcleo, tenemos dos tipos de fibra multimodo [3]:

Salto de índice: en este tipo de fibra, el núcleo tiene un índice de refracción constante en toda la sección cilíndrica

Índice gradual: el índice de refracción del núcleo no es constante

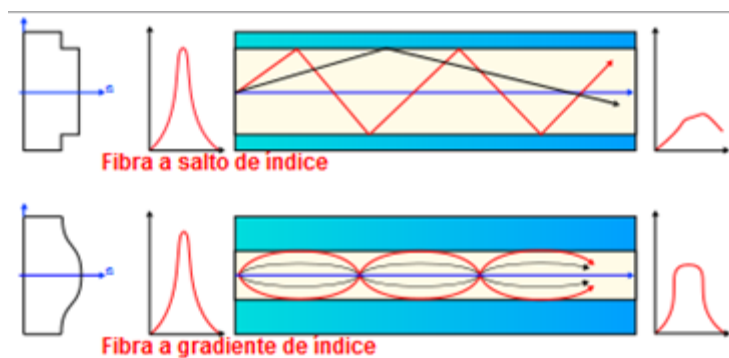


Fig. 2: Tipos de fibra multimodo [2]

2.1.1.2 Fibra Monomodo

La fibra monomodo es una fibra óptica en la que sólo se propaga un modo de luz. Se logra reduciendo el diámetro del núcleo de la fibra hasta un tamaño que sólo permite un modo de propagación (8,3 a 10 micras a 1550 nm). Su transmisión es paralela al eje de la fibra. A diferencia de las fibras multimodo, las fibras monomodo permiten alcanzar grandes distancias y transmitir a alta velocidad, ya que al propagarse sólo un modo evitamos la dispersión modal debida a la diferencia de velocidad de propagación de los diferentes modos transmitidos por la fibra.

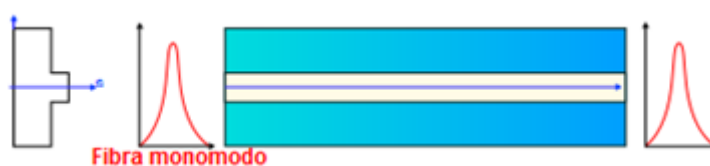


Fig. 3: Fibra monomodo [2]

Dentro de las fibras monomodo tenemos que destacar tres tipos de fibra:

SMF (Standar Single Mode Fiber): La fibra monomodo o estándar tiene como su principal característica una atenuación de 0.2dB/km y una dispersión de 16ps/km·nm para la tercera ventana (1550nm).

DSF (Dispersion Shifted Fiber): Son fibras que se fabrican para obtener una dispersión cromática nula en la tercera ventana. Por el contrario tiene una atenuación de 0.25dB/km y no se pueden utilizar en sistemas WDM por los efectos no lineales que produce como es el mezclado de cuarta onda (FWM).

NZDSF (Non Zero Dispersion Shifted Fiber): Son fibras que tienen prácticamente una dispersión nula con el que se puede contrarrestar los efectos no lineales.

2.2 Amplificación óptica

Mediante la amplificación óptica, podemos incrementar la potencia de una señal óptica manteniendo el resto de sus características sin necesidad de realizar reconversiones opto-electrónicas. Se trata de un elemento fundamental en el desarrollo de estructuras tales como los láseres de fibra.

Existen muchas ventajas básicas en los amplificadores de fibra óptica, respecto a los amplificadores convencionales. La principal es que la potencia de bombeo necesaria es mucho menor, debido a que ésta se distribuye en una zona de unas pocas micras (μm) en el interior de la fibra, por lo que se consigue más fácilmente la intensidad de bombeo necesaria para la amplificación [4].

En la actualidad podemos encontrarnos con tres tipos de amplificadores de fibra óptica: los de núcleo dopado con iones de tierras raras, los de dispersión Brillouin estimulada y los de dispersión Raman estimulada.

2.2.1 Efecto Laser

En este apartado trataremos el efecto láser (*Light Amplification through Stimulated Emission of Radiation*). Para tratar de comprender el principio de funcionamiento del amplificador óptico es necesario recordar los fundamentos de la interacción radiación-materia.

Consideremos un átomo con dos niveles de energía, E_1 y E_2 . Nos interesan las posibles formas de interacción entre el átomo y los fotones de una radiación de frecuencia ν , tal que $h\nu = E_2 - E_1$, es decir cuya energía es igual a la diferencia de energía entre los dos niveles del átomo. Las posibles formas de interacción son los procesos de emisión espontánea, absorción y emisión estimulada [5].

Emisión espontánea:

Si el átomo se encuentra inicialmente en el nivel de energía superior, puede pasar espontáneamente al nivel inferior liberando su energía en forma de fotón. Dicho fotón tendrá una energía ($h\nu$) igual a la diferencia de energía entre los dos niveles del átomo.

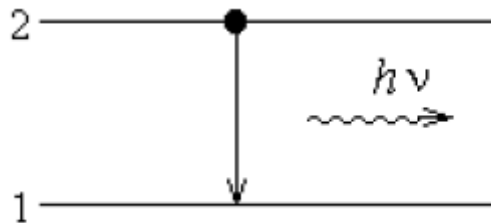


Fig. 4: Emisión espontanea

Absorción:

Si el átomo se encuentra inicialmente en el nivel de energía inferior e incide sobre él un fotón, éste puede ser absorbido por el material promocionando el átomo al nivel de energía superior. La absorción es una transición inducida por el fotón y que solamente puede producirse en presencia de éste.

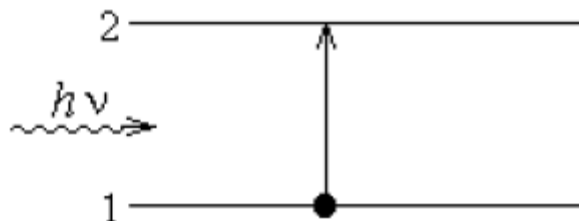


Fig. 5: Absorción

Emisión estimulada:

Si el átomo se encuentra inicialmente en el nivel de energía superior y sobre él incide un fotón, el átomo puede ser estimulado por dicho fotón y emitir otro fotón con la misma dirección y sentido que el primero. El nuevo fotón presenta la misma frecuencia y fase que el original. Este proceso es inverso al de absorción y, al igual que éste, viene inducido por la radiación incidente.

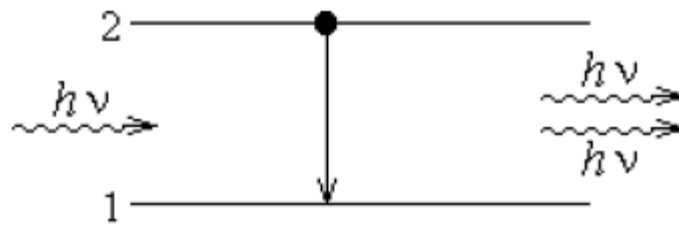


Fig. 6: Emisión estimulada

De estos tres procesos, los de absorción y emisión estimulada producen los fenómenos de atenuación y amplificación óptica. La emisión espontánea es la causante del ruido generado en los amplificadores ópticos.

En condiciones de equilibrio térmico los átomos tienden a adquirir los estados energéticos de menor energía, lo que significa que $N_2 \ll N_1$ y que predomina la absorción, traduciéndose en la atenuación de la señal óptica. Para obtener un medio amplificador es necesario que el número de átomos presentes en el estado de energía superior sea mayor que los presentes en el estado inferior. Esta condición se conoce como inversión de población y el proceso por el que se consigue se denomina bombeo.

2.2.2 Amplificadores con núcleo dopado de tierras raras

Los amplificadores de fibra dopada se obtienen al dopar el núcleo de las fibras ópticas con iones de materiales pertenecientes al grupo de las tierras raras (Er^{3+} , Tm^{3+} , Pr^{3+}). La elección del dopante dependerá de la longitud de onda sobre la que se quiera obtener la amplificación. Para el rango de 1280 a 1340 nm se utilizan iones de Praseodimio (Pr^{3+}), para la ventana de 1450 a 1520nm iones de Tulio (Tm^{3+}) y finalmente para el rango de 1500 a 1600nm se utilizan iones de Erblio (Er^{3+}). Estos últimos son los más utilizados dada la baja atenuación que proporcionan en la 3ª ventana en comunicaciones ópticas [6].

El medio activo del amplificador es el núcleo dopado de la fibra. La inversión de población se consigue mediante el bombeo óptico a longitudes de onda concretas, provocando que los iones del medio dopante pasen de un estado fundamental a otro excitado, consiguiendo así la emisión estimulada.

Dicha inversión de población que se va produciendo a lo largo de la fibra, va a su vez debilitando la intensidad de bombeo, llegando hasta un punto en que éste comienza a ser incapaz de producirla. Este fenómeno condiciona la longitud que debe tener la fibra, llamada longitud óptima, para no desaprovechar su capacidad de amplificación, si se hace más corta, y evitar que parte de la fibra sea absorbente, si se hace más larga.

Otro aspecto de importancia para conseguir un amplificador óptimo, es la influencia de la concentración del dopante. Parece más razonable (por problemas de espacio) utilizar fibras cortas altamente dopadas, que fibras largas débilmente dopadas. Pero esto no es válido, ya

que cuando se tienen altas concentraciones se provocan interacciones entre los iones dopantes, que dejan de excitarse y se destruye la inversión de población, lo que disminuye la eficiencia del amplificador. Debido a esta razón se suelen usar fibras amplificadoras largas (de varios metros de longitud normalmente) y con baja concentración de dopante.

2.2.2.1 Amplificador de fibra dopada con erbio

La longitud de onda de operación de los sistemas desarrollados en el proyecto está dentro de la 3ª ventana, por lo que se han utilizado amplificadores de fibra dopada con Erbium (Erbium doped fiber amplifiers, EDFA). Además, con este tipo de amplificadores se consiguen hasta 40 y 50 dB de ganancia (en régimen de baja señal de entrada), con potencias de bombeo moderadas (de varias decenas de mW) [3].

En la siguiente figura se muestra el diagrama de los niveles de energía del erbio y las longitudes de onda de bombeo necesarias para alcanzarlos.

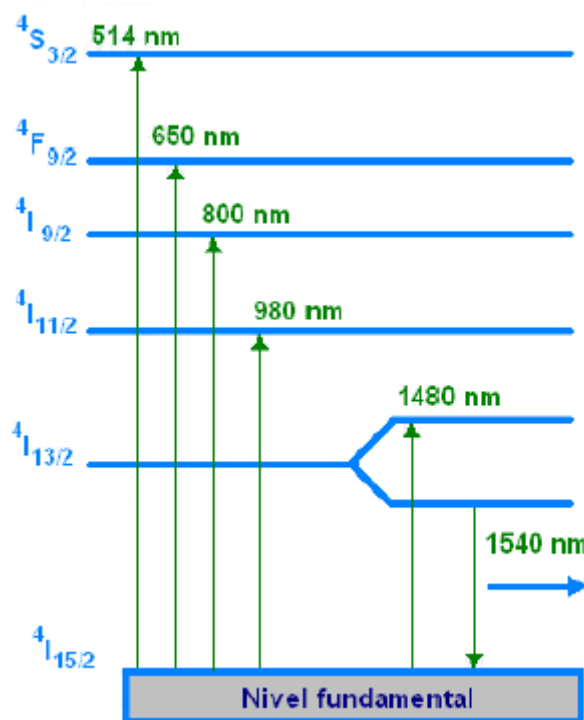


Fig. 7: Niveles de energía

Como se aprecia en la representación anterior, la amplificación se da en el salto del último estado (entro los niveles de energía $4I_{13/2}$ y $4I_{15/2}$). Hay diferentes longitudes de bombeo, pero por diversos motivos las dos más utilizadas y más eficientes son: 980 y 1480 nm. Con el fin de conseguir estabilidad en la potencia y en la longitud de onda emitidas, se requiere un control de la corriente de alimentación y de la temperatura de los láseres emisores. Esto

último se lleva a cabo mediante refrigeradores que operan por efecto Peltier y para ayudar en la estabilización de la longitud de onda, suelen usarse también redes de Bragg de fibra óptica [7].

En la siguiente figura se muestra un esquema básico para un EDFA bombeado en ambos sentidos. Los aisladores se encargan de garantizar que la señal a amplificar sólo circule en una dirección. Dicho bombeo se introduce mediante un multiplexor en longitud de onda (Wavelength Divisor Mutiplexer, WDM) permitiendo de esta forma combinar la señal a amplificar con el bombeo que excitará a los iones de Erblio. Al tratarse de un medio que permite la propagación en ambos sentidos, el bombeo puede ser bidireccional.

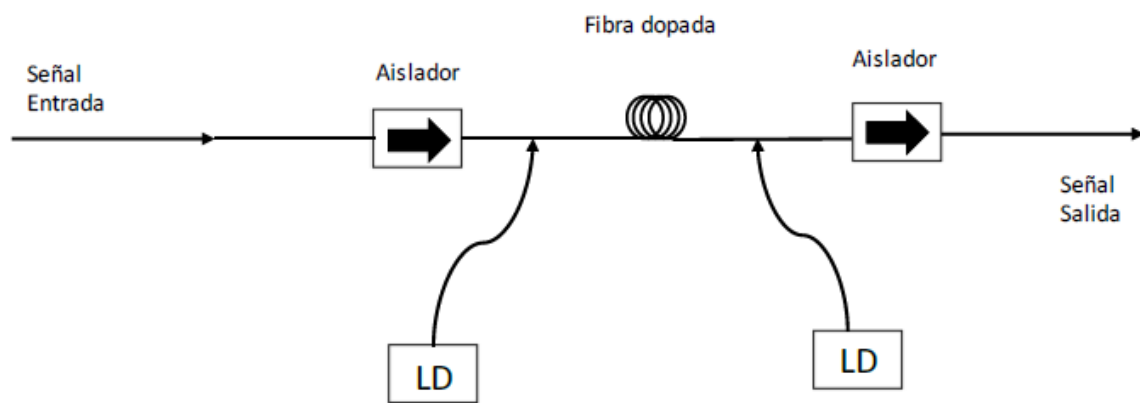


Fig. 8: EDFA con bombeo bidireccional

2.2.3 Ganancia EDFA

La ganancia se consigue con emisión estimulada. Para conseguir esta ganancia, bombearemos la fibra con luz a 980 nm, la zona de amplificación se extiende entre 1525-1565 nm. Por lo tanto, los EDFAs pueden ser utilizados en sistemas WDM (Wavelength divisor multiplexor) si las longitudes de onda utilizadas entran dentro de ese rango. Sin embargo, la ganancia no es plana en todo el ancho de banda como podemos observar en la siguiente figura.

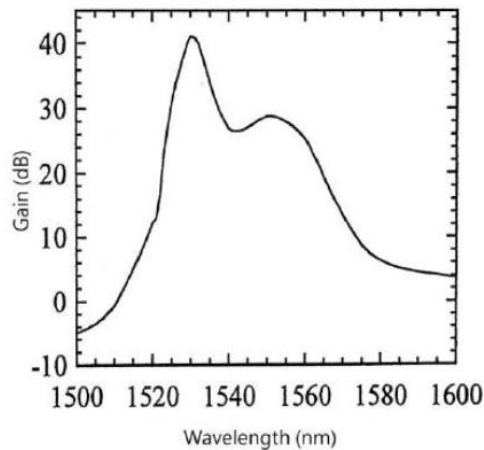


Fig. 9: Ganancia EDFA

Hay que tener en cuenta que la optimización de la ganancia depende de la longitud óptima de la fibra y de la dependencia de esta con parámetros como: la longitud de onda, la potencia del bombeo y la señal.

Al aumentar la potencia del bombeo conseguiremos invertir la población en un trozo de fibra más larga, aumentando así la longitud óptima de esta. Si estamos trabajando en longitudes de onda donde el bombeo es más eficiente y es absorbido más rápidamente a lo largo de la fibra, la longitud óptima es menor. Si aumenta la potencia de la señal, se provocan más emisiones estimuladas, lo que implica disminuir la inversión de población y, por tanto, se acorta la longitud óptima (menos ganancia, pero más potencia de salida).

Como variamos la longitud de onda varía la probabilidad de emisión estimulada y como consecuencia lo hace la ganancia, de forma que cuando éstas son mayores, la inversión de población se reduce y a su vez lo hace la longitud óptima de la fibra [4].

2.2.4 Ruido en los EDFA

El ruido de un EDFA viene producido principalmente por el proceso de emisión espontánea (Amplified Spontaneous Emission - ASE). Durante el bombeo se producen emisiones espontáneas de fotones, que al propagarse por el propio EDFA son amplificados en la banda de la tercera ventana (1550 nm).

Existen dos tipos de ASE dependiendo del sentido de propagación con respecto al de la señal de entrada. Si es en el mismo se conoce como ASE+ o FASE (Forward Amplified Spontaneous Emission) y si es en sentido contrario se tendrá ASE- o BASE (Backward Amplified Spontaneous Emission) [8].

El ruido ASE aumenta linealmente con la ganancia y puede llegar el momento en que éste compita con la tasa de bombeo cuando trabajamos en régimen de alta ganancia e inversión de población completa. Esta competición se produce en zonas localizadas cerca del final o

del inicio de la fibra, donde los ruidos FASE y BASE son mayores respectivamente. En estas zonas el medio inversor se reduce y la ganancia del amplificador se satura en ausencia de señal de entrada.

A continuación se puede ver una comparación de ambos para un sistema en el que el bombeo se realiza en el mismo sentido al de la señal a amplificar. La forma del ASE se aproxima a la de la curva de la ganancia del EDFA.

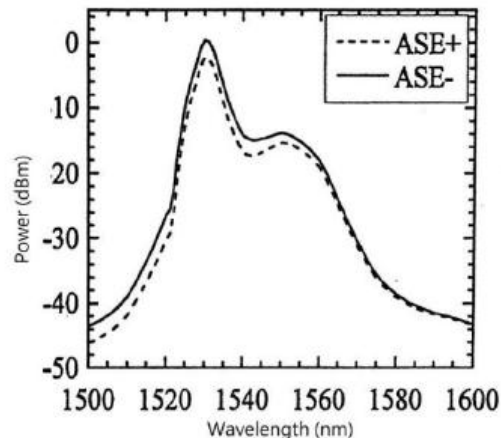


Fig. 10: Ruido ASE

2.2.5 Competencia por la ganancia

Es el fenómeno que se produce cuando la distribución de potencia en varios modos es inestable. La ganancia proporcionada por un EDFA tiene que repartirse entre las longitudes de onda presentes a su entrada. Esto se debe a que los átomos de la capa superior, conseguidos por la inversión de población mediante el bombeo, tienen que ser compartidos por todas las señales incidentes [9].

Este efecto es importante en sistemas de múltiples canales y debe considerarse a la hora de introducir nuevos canales o de eliminar algunos de los ya existentes. El añadir nuevos canales implica la disminución de la ganancia de los ya existentes, lo que puede originar problemas en el balance de potencia del sistema y en la calidad de la señal resultante tras la detección. Al eliminar canales aumentamos la potencia de los restantes, lo que puede causar problemas de saturación del sistema de detección o de no linealidad de la fibra.

2.3 Láseres de fibra óptica

Los láseres de fibra se comportan como estructuras de guía-onda que pueden tener altas densidades de potencia en el núcleo. Al estar basados en fibra óptica tienen todas las ventajas que la tecnología permite: bajas pérdidas por dispersión, bajas absorciones no deseadas, pocas imperfecciones del material. Permiten un buen solapamiento entre las

ondas guiadas del bombeo y de emisión láser cuando se utilizan fibras monomodo en ambas longitudes de onda. Las fibras ópticas presentan una relación entre superficie y volumen alta que permite una buena disipación del calor.

Los factores anteriormente citados, así como su geometría cilíndrica, hacen de los láseres de fibra dispositivos idóneos para aplicaciones médicas, así como para sistemas de transmisión con alta eficiencia de acoplo operando con bajos niveles de potencia de bombeo.

Los diferentes diseños de láseres de fibra permiten obtener anchuras de línea muy estrechas y longitudes de onda sintonizables, operando con una potencia umbral de bombeo baja. La longitud de onda de emisión láser viene determinada por el dopante y su característica espectral, por lo que variando tanto la composición como la densidad de dopaje se podrá modificar el espectro de emisión del láser [5].

La estructura básica de un láser de fibra se muestra en la siguiente figura.

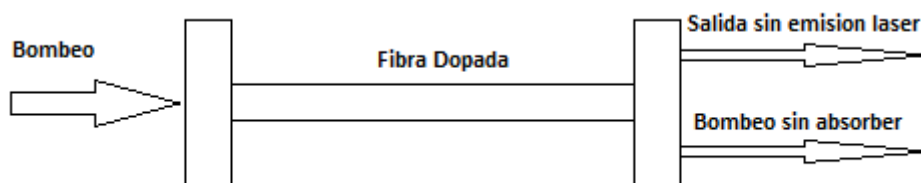


Fig. 11: Estructura básica del láser

Se sitúa una fibra óptica dopada con algún tipo de iones de tierra rara entre dos espejos cuidadosamente seleccionados. A través del espejo de la izquierda se introduce luz de un láser de bombeo, y a través del espejo de la derecha se extrae la luz de salida. El láser de fibra es un dispositivo de guía-onda resonante en el que el guiado se realiza en la fibra y la resonancia se obtiene por medio de los dos espejos, lo que equivale a una estructura Fabry Perot.

Los láseres de fibra pueden verse como un convertor de longitud de onda. Los fotones a la longitud de onda de bombeo son absorbidos, produciendo la inversión de población y la emisión estimulada necesaria para que se produzca la emisión láser en la longitud de onda característica determinada por el dopante de la fibra y las características de la cavidad resonante.

2.3.1 Láseres de fibra dopada con erbio en configuración de anillo

La generación de luz láser se consigue introduciendo un medio amplificador en una cavidad. Dicha cavidad cumple dos funciones, por un lado confina la potencia debido a la emisión estimulada de modo que la señal atravesase múltiples veces el medio amplificador y, por otro,

determina las frecuencias ópticas de emisión del láser. Hay que tener en cuenta que el origen de la emisión de luz láser se encuentra en la emisión espontánea que produce el medio activo, la cual se amplifica por emisión estimulada en los sucesivos pasos por dicho medio.

El uso de configuraciones en anillo permite la operación de un láser sin espejos. Los sucesivos pasos por el medio amplificador se consiguen por recirculación a lo largo del anillo. Si el láser en anillo es de fibra, todos sus componentes (medio activo, elementos selectores de longitud de onda, etc.) quedan integrados en la cavidad. La salida del láser se realiza a través de un acoplador.

En la fibra de sílice dopada con erbio, la amplificación se produce en una banda ancha de frecuencias ópticas dentro de la tercera ventana de comunicaciones. Por ello, puede conseguirse emisión láser en un intervalo amplio de longitudes de onda (desde 1520nm hasta 1560nm). La longitud de onda de emisión del láser puede seleccionarse mediante el uso en el interior de la cavidad de una amplia variedad de filtros ópticos: Fabry-Perot, acusto-ópticos, AWG o redes Bragg (FBG) entre otros [5].

La configuración básica del láser de fibra se presenta a continuación:

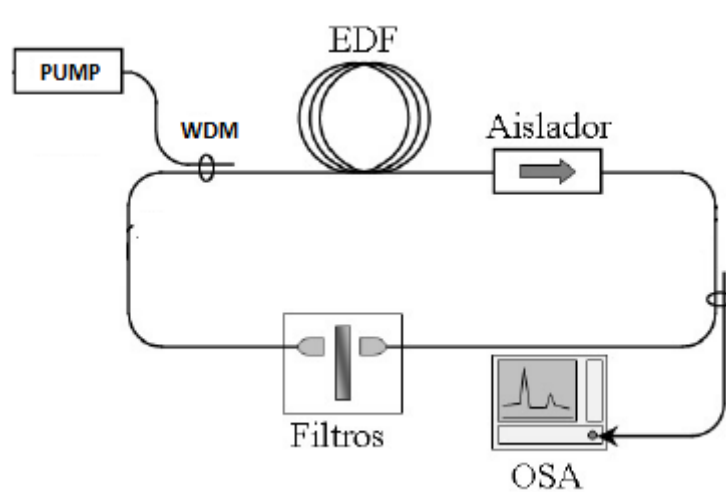


Fig. 12: Láser de fibra dopada con erbio en anillo

La potencia de bombeo a 980nm se acopla al anillo mediante un multiplexor en longitud de onda. Para la selección de la longitud de onda de trabajo del láser, se utiliza un filtro en frecuencia óptica. Por último, un acoplador sirve para obtener la salida láser.

A veces se incluye un aislador para eliminar la onda que se propaga en sentido contrario por el anillo para evitar el fenómeno conocido como *“spatial hole burning”*. Si dos señales con igual longitud de onda se propagaran por el anillo en sentidos opuestos, se producirá, al superponerse ambas, un patrón de interferencia dando lugar a la formación de una onda estacionaria. En esta situación, en un láser de fibra óptica bombeado con una potencia muy

superior a la potencia umbral se tendría que la inversión de población se “consumiría” principalmente en los antinodos teniéndose en ellos amplificación mientras que en los nodos se acumularía una fuerte inversión de población. Este fenómeno sería el causante de salto de modos en la cavidad y por tanto, el responsable de inestabilidades en la longitud de onda de funcionamiento del láser y en consecuencia, de un aumento en la anchura de línea del láser.

En el diseño del láser, deben considerarse las pérdidas de la cavidad y la relación de acoplo para optimizar el funcionamiento del sistema. Para valores altos de la relación de acoplo, se obtienen potencias de salida elevadas. En esta situación, debido a que se extrae mucha potencia de la cavidad, llega poca potencia a la fibra dopada. La ganancia proporcionada por ésta, es mayor cuanto menor es la potencia a su entrada por lo que con tasas de acoplo elevadas, se consigue una alta eficiencia. Sin embargo, la ganancia que puede proporcionar un tramo de fibra dopada no es infinita por lo que existe un valor óptimo de k por encima del cual la ganancia de la fibra dopada no es suficiente para superar las pérdidas de la cavidad.

Todas las pérdidas en la cavidad hacen que disminuya la potencia de salida del láser. Es importante la localización, dentro de la cavidad, de los componentes que introducen pérdidas. Si éstos se encuentran entre el acoplador de salida y la fibra dopada, el efecto de las pérdidas será compensado, en parte por una mayor ganancia en la fibra dopada (siempre que se trabaje con ganancias inferiores a la de saturación de la fibra). Sin embargo, si se producen entre los puntos A y B de la anterior figura, afectan directamente a la salida, reduciendo la potencia del láser. Por tanto, hay que minimizar las pérdidas totales de la cavidad, especialmente las que se producen entre la salida de la fibra dopada y el acoplador de salida, para conseguir potencias de salida elevadas con bajos valores de potencia de bombeo umbral.

2.4 Dispositivos ópticos

2.4.1 Multiplexor en longitud de onda (WDM)

Un multiplexor en longitud de onda (WDM) es un dispositivo pasivo bidireccional. En uno de sus sentidos, combina las longitudes de onda de sus entradas uniéndolas en una sola salida. En el otro, realiza el proceso inverso (de-multiplexor), separando las longitudes de onda entre sus salidas. Los WDM permiten por lo tanto la transmisión simultánea de dos o más señales ópticas independientes y con distintas longitudes de onda que viajaban por caminos distintos. Pueden verse como acopladores selectivos en longitud de onda.

En este proyecto sólo se ha utilizado un multiplexor de dos entradas donde correspondían a las longitudes del bombeo a 980nm y de la realimentación a 1550nm.



Fig. 13: Multiplexor en longitud de onda

Los parámetros más importantes de un WDM son los siguientes:

- Pérdidas de inserción: P1/P2 ó P3/P2
- Aislamiento o diafonía: cuando el WDM actúa como demultiplexor, este parámetro indica la cantidad de potencia de un canal que aparece en la salida correspondiente al otro.
- Directividad: es la medida de qué cantidad de potencia introducida por la entrada 1 sale por la 3 y viceversa.

2.4.2 Atenuador Óptico

El uso de atenuadores ópticos proporciona estabilidad y ecualización a los sistemas.

El atenuador es un elemento de suma importancia en los montajes. En esencia, es un mecanismo que introduce unas pérdidas a la cavidad (por ejemplo, mediante un tornillo micrométrico con el que controlan dichas pérdidas) y con ello se cambia la condición de ganancia del anillo, lo que cobra especial relevancia a la hora de conseguir emisión multilínea.

Existen principalmente dos categorías de atenuadores, los fijos y los variables. Cuando no se sabe el nivel de atenuación que se necesita, se utiliza el atenuador óptico variable (en nuestro caso de control manual), el cual ayuda a determinar de manera precisa el valor de atenuación que requiere el equipo [4].

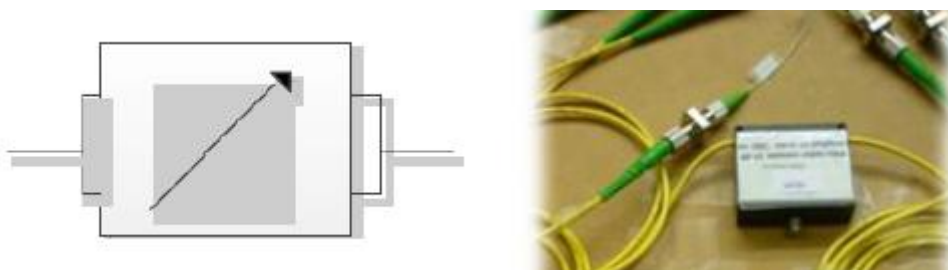


Fig. 14: Atenuador óptico variable

Generalmente este tipo de dispositivos lo que hacen es absorber la potencia extra; ya que, si la reflejase, la luz indeseada generaría ruido en nuestro sistema.

En el desarrollo de este TFM el uso de atenuadores ópticos variables ha sido clave para la consecución final del objetivo. Sin ellos los problemas de ecualización del sistema hubiesen hecho imposible la visualización correcta de los láseres de fibra óptica conseguidos.

2.4.3 Circulador óptico

Una de las opciones que se usa en la implementación de cavidades y anillos resonantes, como veremos, es utilizar un circulador con la idea de poder introducir la señal del láser y extraer la señal de respuesta de los *grating*.

Las ventajas que se obtienen de un circulador son sin duda la posibilidad de realizar la operación de Inserción/Extracción de la señal de información sin necesidad de perder tanta potencia de señal como la que se pierde utilizando un acoplador.

El concepto de funcionamiento de un circulador es muy sencillo. En el caso de un circulador de 3 puertos como los utilizados en el proyecto, el proceso es similar a tener un aislador entre cada uno de los puertos. De este modo, la señal que entra por el puerto 1 del circulador sale por el puerto 2, pero la señal que entra por el puerto 2, no puede salir por el puerto 1. De igual modo ocurre con la señal de entrada por el puerto 2 del circulador, saldrá por el puerto 3, pero la señal que entra por el puerto 3 no podrá salir por el puerto 2. Ídem con los puertos 3 y 1 [4].

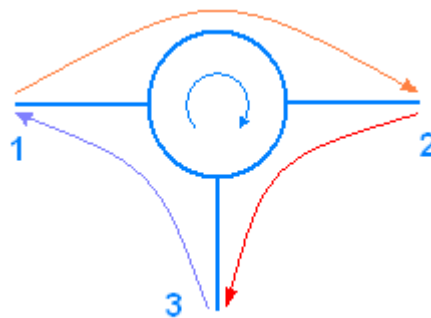


Fig. 15: Circulador óptico

A continuación analizaremos las principales características de un circulador:

·Perdidas de inserción $P.I. = 10 \log \frac{P_1}{P_2}$

·Aislamiento

$$Aislamiento = 10 \log \frac{P_2}{P_1}$$

Estas fórmulas se refieren a la conexión entre puertos 1 y 2, de forma análoga se hace para los puertos 2 y 3.

El mayor inconveniente de los circuladores, es la señal que se pasa desde el puerto 1 al puerto 3. Este valor suele ser muy pequeño, del orden de 50dB inferior al valor introducido por el puerto 1. Pero en aplicaciones de bajas potencias pueden afectar en el resultado final.

El funcionamiento de los circuladores está basado en el Rotor de Faraday. De este modo las señales que viajan en un sentido atraviesan el sistema, mientras que las señales que viajan en sentido contrario no pueden atravesar los cristales polarizados debido a que el Rotor de Faraday les ha cambiado la polarización de manera conveniente.

2.4.4 Acopladores

Un acoplador bidireccional es un dispositivo pasivo que distribuye energía procedente de M guías de entrada en N guías de salida. Los acopladores son los componentes más usados en las comunicaciones de fibra óptica, en instrumentación y en sistemas sensores. Los hay en una gran variedad de formas y de diseños, y se pueden realizar en fibras monomodo (incluyendo mantenimiento de la polarización) y multimodo o en guía-ondas integradas [10], [11].

Los acopladores tienen aplicaciones interesantes tanto en la división de potencia, como en la multiplexación/demultiplexación en longitud de onda, o en la división por polarización, etc.

En los acopladores direccionales, se usa el fenómeno óptico del campo evanescente. Este efecto de las guías puede analizarse en función del campo modal del modo guiado que se extiende más allá del núcleo. Así, cuando dos núcleos de fibra (o guía-ondas planas) se aproximan lo suficiente de tal forma que sus campos modales se solapan, entonces los modos de las dos fibras se acoplan y la potencia puede ser transferida periódicamente entre las dos fibras. Este mecanismo se puede describir por la teoría acoplo de modos.

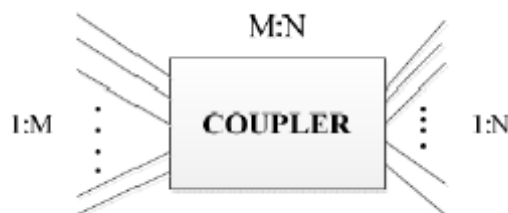


Fig. 16: Acoplador M : N

Los parámetros de un acoplador son los siguientes:

- Rango de longitudes de onda de operación.
- Relación de acoplo: nos da información acerca de la división de la potencia óptica entre los puertos de salida.

$$R(dB) = 10 \log \left(\frac{P_c + P_t}{P_c} \right)$$

- Pérdidas de exceso: da la relación entre la potencia total de entrada al dispositivo y la potencia de salida del mismo.

$$L_e(dB) = 10 \log \left(\frac{P_i}{P_t + P_c} \right)$$

- Pérdidas de inserción: Pérdidas introducidas por el acoplador al considerar la propagación de la señal de una determinada configuración de puerto de entrada y de salida.

$$L_i(dB) = R(dB) + L_e(dB) = 10 \log \left(\frac{P_i}{P_c} \right)$$

- Directividad: Fracción de potencia de entrada que el acoplador devuelve en forma de señal retropropagada en la guía 2.

$$D(dB) = 10 \log \left(\frac{P_i}{P_r} \right)$$

- Pérdidas de retorno: Cantidad de potencia reflejada hacia el puerto de entrada. Parámetro muy importante en las aplicaciones interferométricas donde se usan fuentes de luz láser.

- Uniformidad.
- Sensibilidad a la polarización.
- Estabilidad térmica.



Fig. 17: Acoplador óptico

La división de la señal no tiene por qué ser idéntica para cada una de las ramas, como veremos en las estructuras desarrolladas en la parte experimental utilizaremos acopladores con factores de acoplo 90:10 y 50:50. Los acopladores son sensibles a la dirección de propagación de la luz, aunque la mayoría son dispositivos bidireccionales [10], [11].

2.4.5 Redes de difracción

Los sensores fabricados con redes de difracción de Bragg (Fiber Bragg Gratings, FBGs) son los principales sensores de fibra óptica debido a que se consideran la tecnología líder en comparación con otros sensores de fibra óptica.

Los FBGs son sencillos y versátiles. Además, la información de la magnitud a medir está en la longitud de onda resonante de la estructura, que es un parámetro absoluto, con lo que son dispositivos que no necesitan de referenciarse y pueden ser fácilmente multiplexados, lo cual es de gran importancia en redes multipunto.

Un FBG puede definirse como una perturbación periódica del índice de refracción a lo largo de la fibra. Esto se consigue por exposición del núcleo de la fibra a un patrón de interferencia intenso. Dependiendo de la modulación del índice de refracción, se crean diferentes tipos de redes de difracción de Bragg.

La siguiente figura muestra el principio de funcionamiento de los FBGs:

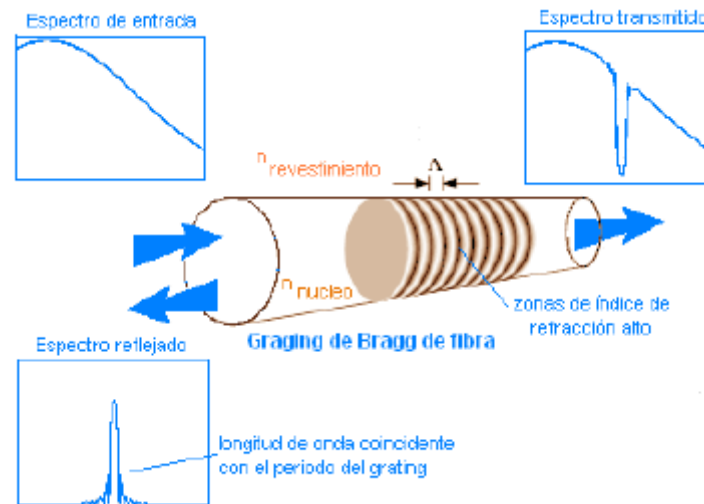


Fig. 18: Funcionamiento FBG

Cuando la luz atraviesa la estructura resonante, a una determinada longitud de onda, denominada longitud de onda Bragg, la luz se refleja por la zona de perturbación del índice de refracción. La longitud de onda reflejada satisface la denominada condición de Bragg:

$$\lambda = 2 n_{\text{eff}} \Lambda$$

Donde n es el índice de refracción efectivo del núcleo de la fibra y Λ es el periodo de la modulación del índice de refracción. El resto de las longitudes de onda se transmiten y para ellas la modulación del índice de refracción es como si no existiese [12].

La condición de Bragg muestra la característica clave de estas estructuras: cualquier perturbación que modifique el índice de refracción o el periodo de la red de difracción resulta en un aumento de la longitud de onda de Bragg. Por lo tanto, las redes de difracción de fibra se pueden considerar como un transductor óptico que modifica el espectro de la luz reflejada. La posibilidad de almacenar la información en la longitud de onda es una característica única de las redes de difracción de Bragg. Como la longitud de onda es un parámetro absoluto, este proceso es insensible al resto de parámetros de la luz a lo largo del sistema, como intensidad, polarización y fase. Estas características así como la posibilidad de multiplexarlos hacen que tengan ventaja frente a otros sensores de fibra óptica.

2.4.5.1 Principio de medida

Los sensores FBG pueden medir deformaciones, temperatura, presión, campos eléctricos y magnéticos dinámicos, vibraciones, algunos fenómenos químicos, entre otros. La longitud de onda central del FBG varía en función de cómo cambian estos parámetros en la fibra. Las deformaciones y la temperatura han sido las magnitudes de mayor interés para medir con este tipo de sensores [1].

- Deformación: La deformación afecta directamente a la respuesta del FBG, debido a que la expansión y compresión del tamaño de la red de difracción ocasionan modificaciones en el índice de refracción debido a efectos foto-elásticos.
- Temperatura: La sensibilidad a las variaciones de temperatura de los FBGs se debe principalmente al efecto que ocasiona en el índice de refracción y a la expansión térmica del coeficiente de la fibra.

2.4.6 Aislador óptico

Los aisladores ópticos son dispositivos que transmiten la luz en una única dirección. Su importancia en los sistemas de fibra óptica se debe a que detienen la reflexión y la dispersión de la luz, evitando que alcancen a elementos sensibles, particularmente láseres.



Fig. 19: Aislador óptico

Su operación depende generalmente de materiales llamados rotadores de Faraday, los cuales provocan una rotación en la polarización de la luz debido al efecto Faraday. Donde el ángulo de rotación β , es siempre el mismo y viene determinado por: $\beta = vBd$; en donde v es la constante de Verdet del material, B es el flujo de densidad magnética en la dirección de propagación y d la longitud del rotador [4].

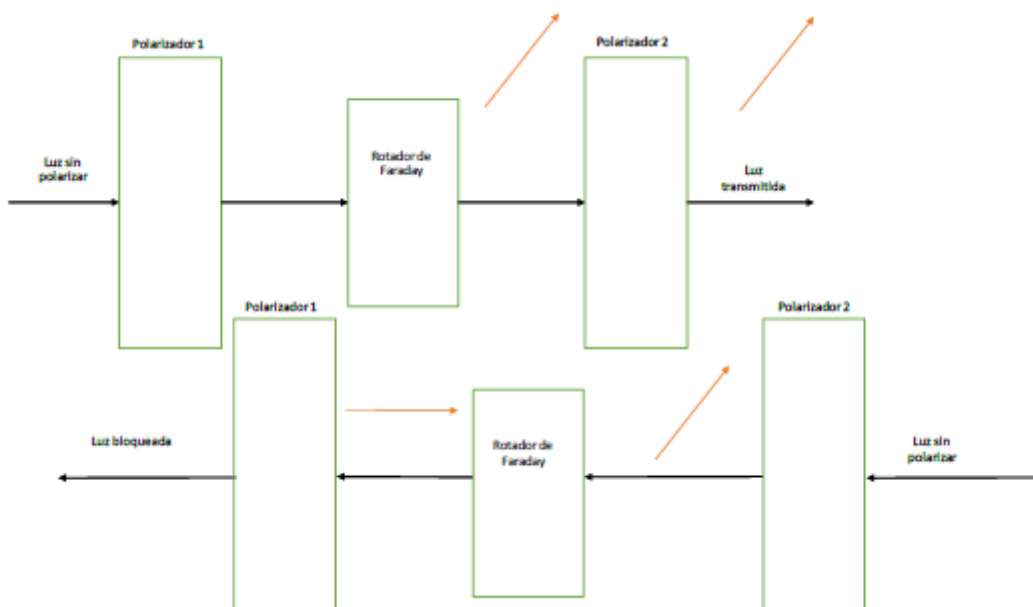


Fig. 20: Funcionamiento aislador óptico

3 ESTADO DEL ARTE

3.1 introducción

Desde su desarrollo en los años 60 hasta nuestros días, los láseres de fibra óptica han ido incrementando su importancia en diversos ámbitos de nuestra vida. Ya sea en la medicina, en la electrónica de consumo o en la industria, las mejoras introducidas por este tipo de láseres los han hecho ser considerados como una de las principales líneas de investigación en nuestros días. Los láseres de fibra óptica aportan frente a otros láseres una serie de ventajas tanto económicas como técnicas para su aplicación industrial. Las características técnicas que los hacen competitivos son su menor tamaño, su mayor eficiencia y la simplicidad de sus sistemas de enfriamiento [13].

Como ya se ha citado anteriormente, un láser de fibra óptica es un dispositivo en el que el medio activo que proporciona la ganancia es habitualmente una fibra óptica dopada con algún tipo de elemento de las denominadas tierras raras. Las más usadas son el erbio (Er^{3+}) [2], el neodimio (Nd^{3+}), el yterbio (Yb^{3+}), el tulio (Tm^{3+}), o el praseodimio (Pr^{3+}). Todos estos elementos usados como dopantes en el interior de una fibra óptica sirven para realizar amplificadores de fibra dopada, que son los elementos esenciales de un láser de fibra.

Existen igualmente una serie de efectos no lineales tales como la dispersión estimulada Raman (stimulated Raman scattering), la amplificación estimulada Brillouin (stimulated Brillouin scattering) o el mezclado de cuatro ondas (four-wave mixing) que pueden también proporcionar ganancia en una fibra óptica sin necesidad de usar dopantes y, de ese modo, servir como medio de ganancia para un láser de fibra óptica. Los láseres de fibra óptica pueden usarse bien para generar radiación de onda continua (CW) o como generadores de pulsos ópticos ultracortos.

Los láseres de fibra óptica suponen una innovación tecnológica muy importante que está pasando rápidamente de los laboratorios de investigación a distintas aplicaciones en la industria, gracias a los numerosos productos ya comercializados.

Estos dispositivos representan una nueva generación de láseres relativamente compactos, es decir, de menor peso y tamaño que los convencionales; además, puede alcanzar niveles de potencia de decenas, centenas e incluso miles de vatios. Las aplicaciones de láseres con tal potencia son muy variadas, incluyendo procesos industriales, mecanizado de piezas, soldadura, medida remota y control de contaminantes en la atmósfera (monitorización ambiental) [5].

3.2 Principio de funcionamiento

Los láseres, ya sean de gas o de estado sólido necesitan un medio que proporcione ganancia a las longitudes de onda que se pretenden emitir y una realimentación y filtrado selectivo en longitud de onda que favorezca la emisión estimulada frente a la emisión espontánea.

Para realizar esta realimentación selectiva en longitud de onda se utilizan configuraciones ópticas que van desde la pareja de espejos que forman un resonador Fabry-Perot a estructuras más sofisticadas realizadas en semiconductor o con fibras ópticas. En cualquier caso y por costumbre, todas estas estructuras reciben el nombre de cavidades, aunque sean bien sólidas.

Los láseres de fibra soportan normalmente un buen número de modos de resonancia longitudinales dentro de su cavidad debido al gran ancho de banda de la ganancia espectral de la amplificación en fibra óptica (>30 nm) y al relativamente pequeño espaciado entre estos modos (< 100 MHz). El ancho de banda espectral de salida de un láser puede superar los 10 nm funcionando en modo de onda continua.

Algunas aplicaciones de estos láseres requieren una operación de ancho de línea muy estrecha y con un único modo cuya longitud de onda pueda ser sintonizada sobre el ancho de banda.

Se han utilizado diversos métodos para realizar láseres de fibra óptica con un ancho de línea suficientemente estrecho para aplicaciones como las telecomunicaciones. De entre ellos, las redes de difracción de Bragg en fibra óptica (Fiber Bragg Grating, FBG) son los componentes preferidos para este propósito, dado que pueden fabricarse con un espectro de reflectividad de menos de 0.1 nm. Resulta también interesante destacar que el gran ancho de banda de estos láseres de fibra óptica es muy útil para sintonizarlos sobre un rango de longitudes de onda superior a los 50 nm [14], [15].

Los láseres que emiten múltiples longitudes de onda resultan de gran interés en el ámbito de las telecomunicaciones y la multiplexación de sensores. Estos láseres tienen además un gran potencial para caracterizar fibras ópticas y componentes para la multiplexación en longitud de onda (WDM). Las características deseables de estas fuentes ópticas serían las siguientes: se necesita un gran número de canales sobre un rango ancho de longitudes de onda, potencias de salida moderadas (del orden de 100 μ W por canal) con una buena relación de señal a ruido óptica (OSNR por sus siglas en inglés), una buena ecualización en potencia entre las líneas emitidos, una operación de un único modo longitudinal para cada línea de emisión láser, que sean sintonizables y que tengan una posición apropiada en la parrilla de frecuencias de la ITU.

Los láseres de fibra cubren gran parte de estos requisitos como fuentes de emisión multilínea. Su fácil fabricación ha dado lugar a muchos diseños avanzados. El principal desafío en la realización de un láser de emisión multilínea usando fibra dopada con tierras raras es el hecho de que los iones de dichos materiales se saturan prácticamente de forma homogénea a temperatura ambiente, impidiendo una operación multilínea estable.

El término “láseres de fibra óptica” normalmente hace referencia a láseres que utilizan la fibra óptica como medio de ganancia, aunque algunos láseres que emplean un amplificador óptico de semiconductor y un resonador de fibra han sido catalogados también como láseres de fibra (o láseres de fibra/ semiconductor). En la mayoría de los casos y como ya se ha

comentado con anterioridad, este medio de ganancia es una fibra dopada con iones de tierras raras y uno o varios diodos láser que se utilizan como bombeo óptico [5].

Como es bien sabido, el término *láser* significa amplificación de luz por emisión estimulada de radiación y consta de una fuente óptica con una cavidad por la que sale un haz de luz monocromático y muy directivo. La principal característica de dicho haz es la de ser altamente coherente lo que permite en ciertas aplicaciones focalizar una gran cantidad de potencia óptica por unidad de superficie.

Por otro lado, las fibras ópticas han proporcionado un notable impulso al desarrollo de las telecomunicaciones durante las últimas cuatro décadas. Para ello, se han creado una serie de dispositivos adicionales, muchos de ellos fabricados también con fibras ópticas; como acopladores, filtros y amplificadores. Estos dispositivos son intrínsecamente de bajas pérdidas y pueden interconectarse fácilmente dentro de las redes de telecomunicación [16].

La importancia de los sistemas de fibra óptica con multiplexación en longitud de onda (WDM) ha crecido exponencialmente durante la primera década de este siglo. La técnica de multiplexación en longitud de onda se utiliza tanto en telecomunicaciones como en redes de multiplexación de sensores. Para los sistemas WDM se necesita generar múltiples portadoras ópticas, que permiten el incremento de la capacidad del sistema de una forma eficiente y económica. Los láseres de fibra óptica son especialmente apropiados para este tipo de sistemas, especialmente para multiplexar sensores de fibra óptica.

3.3 Aplicaciones láseres de fibra

Desde que se empezaron a comercializar en la década pasada, este tipo de láseres se han vuelto omnipresentes. Se pueden encontrar en decenas de aplicaciones en muchos sectores de la sociedad actual. Estas incluyen campos tan dispares como la electrónica de consumo, las tecnologías de la información, caracterización de componentes y materiales en ciencia, métodos de diagnóstico en medicina, así como el mecanizado, soldadura o sistemas de corte en sectores industriales y militares.

El continuo aumento de la potencia de salida de estos láseres está abriendo una gran cantidad de nuevas aplicaciones para muchos de ellos, los cuales empezaron con unas potencias de salida de decenas de vatios y ahora pueden alcanzar varios kilovatios. En un principio, estos láseres se comercializaron para la industria de las telecomunicaciones y después fueron integrándose en el campo de aplicaciones como la soldadura y corte de materiales a medida que su potencia de salida iba incrementando [5].

En muchas de estas aplicaciones, los beneficios de los láseres se deben a sus propiedades físicas. Por ejemplo, un haz láser altamente coherente puede enfocarse por debajo de su límite de difracción que, a longitudes de onda visibles, corresponde solamente a unos pocos nanómetros. Cuando se enfoca un haz de un láser potente sobre un punto, éste recibe una enorme densidad de energía. Esta propiedad permite al láser grabar gigabytes de información al realizar cavidades microscópicas en un CD, DVD o Blu-ray. También permite a

un láser de media o baja potencia alcanzar intensidades muy altas y usarlo para cortar, quemar o incluso sublimar materiales. A continuación se enumeran algunas de las ventajas de los láseres de fibra óptica frente a otros tipos de láseres:

- La luz sale por una fibra flexible: el hecho de que la luz se genere y salga del láser por una fibra permite desarrollar fácilmente un elemento de enfoque móvil. Esto resulta interesante para láseres de corte de metales o telas, soldadura o grabado de metales y polímeros.
- Alta potencia de salida: los láseres de fibra pueden tener regiones activas de varios kilómetros de largo, y así producir y soportar unas ganancias y potencias ópticas muy altas. Los niveles de potencia de salida continua pueden ser de kilovatios dado la buena relación entre el volumen y el área superficial de la fibra, lo que permite un enfriamiento eficiente.
- Alta calidad óptica: las propiedades del guiado de la luz en las fibras reduce o elimina la distorsión térmica en el camino óptico, produciendo una difracción limitada, o un haz óptico de gran calidad.
- Tamaño compacto: aunque más voluminosos que los láseres de semiconductor, los láseres de fibra óptica son compactos comparados con los láseres de gas con unos niveles potencia comparable, dado que la fibra puede ser curvada y enrollada para así ahorrar espacio.
- Fiabilidad: los láseres de fibra muestran una alta estabilidad ante vibraciones, un largo tiempo de vida y una operación prácticamente libre de mantenimiento.

Como ya se ha señalado, estos láseres se utilizan en procesos de fabricación, para grabar o marcar metales, plásticos y vidrio. A modo de resumen se muestra un listado de otras aplicaciones de este tipo de láseres en la vida cotidiana:

- Medicina: Operaciones sin sangre, tratamientos quirúrgicos, ayudas a la cicatrización de heridas, tratamientos de piedras en el riñón, operaciones de vista, operaciones odontológicas.
- Industria: Cortado, guiado de maquinaria y robots de fabricación, mediciones de distancias precisas mediante láser.
- Defensa: Guiado misiles balísticos, alternativa al radar, cegado a las tropas enemigas.
- Ingeniería Civil: Guiado de máquinas tuneladoras en túneles, diferentes aplicaciones en la topografía como mediciones de distancias a lugares inaccesibles.
- Investigación: Espectroscopia, interferometría láser, LIDAR, telemetría.

- Desarrollos en productos comerciales: Impresoras láser, CD, lectores de código de barras, punteros láser, termómetros, hologramas, aplicaciones en iluminación de espectáculos.
- Tratamientos cosméticos y cirugía estética: Tratamientos de acné, celulitis, tratamiento de las estrías, depilación.

Los láseres de fibra óptica prometen alcanzar aún mayores niveles de potencia óptica, ya que la tecnología no está limitada por el diseño de las fibras ópticas, sino por la potencia disponible de bombeo con las agrupaciones de diodos láser de semiconductor. Por otro lado, es posible configurar los láseres de fibra óptica de forma Oscilador Maestro–Amplificador de Potencia (MOPA, por sus siglas en inglés), lo que permite obtener láseres de alta potencia y pulsados, con una duración de pulso de picosegundos (billonésima parte de un segundo) y femtosegundos (milbillonésima parte de un segundo). Se estima que con este tipo de configuración se pueden lograr potencias de hasta cien kilovatios [5].

3.4 Situación del mercado

Resumiendo, los mayores beneficios de la tecnología de los láseres de fibra óptica son los siguientes: una eficiencia mayor del 27%, una larga vida de los diodos de bombeo, un mantenimiento prácticamente gratuito, una misma unidad puede cortar, soldar o incluso taladrar, baja divergencia del rayo, y un relativo bajo coste. Estos láseres son compactos y transportables y ofrecen un óptimo funcionamiento ya que no requieren calentamiento, el tamaño del haz de salida con varía con la potencia y tiene un gran rango dinámico.

En la actualidad, cerca de 100 empresas de todo el mundo comercializan este tipo de láseres de fibra óptica. Las siguientes tablas muestran algunas de las principales características y posibles aplicaciones tanto para los láseres pulsados como para los de onda continua así como algunas de las empresas que los distribuyen.

LASERES DE FIBRA OPTICA PULSADOS

Material	Longitud de onda (nm)	Potencia máxima	Aplicaciones	Empresas
Erbio (fibra dopada)	1055-1090	18W	Aviación/Automoción Medicina/Biomedicina Investigación de materiales	Rofin-Baasel Inc
	1525-1565	1-10nJ	Comunicaciones Medicina/Biomedicina	Calmar Optcom Inc
	1530-1565	1W	Control de calidad Procesado e investigación de materiales	Calmar Optcom Inc
	1550-1580		Sensado remoto Comunicaciones	PolarOnyx Inc
Yterbio (fibra dopada)	1030-1040	300W	Procesado de silicio Taladrado de materiales Grabado de materiales	EOLITE Systems
	1030-1070	10W	Micro-mecanizado Corte de polímeros y silicio	IPG Photonics Corp
	1030-1080		Sensado remoto Comunicaciones	PolarOnyx Inc
	1050-1090	5W	Comunicaciones Procesado de semiconductores	Nufem
	1060-1090	10W	Comunicaciones Procesado de semiconductores	Nufem
Yterbio (glass)	1020-1080	1-10nJ	Control de calidad Sensado remoto	Calmar Optcom Inc

Fig. 21: Oferta láseres de fibra óptica pulsados

LASERES DE FIBRA OPTICA DE ONDA CONTINUA

Material	Longitud de onda (nm)	Potencia máxima	Aplicaciones	Empresas
Erbio (fibra dopada)	980-1550	10W	Soldadura de materiales Robótica	Lasea SA
	1085-1095		Control de calidad Sensado remoto	Japan Laser Corp
	1530-1620	2KW	Soldadura Manipulación de metales	IPG Photonics Corp
	1535-1565		Procesado de materiales Sensado remoto	PolarOnyx Inc
Ti	1800-2100	2KW	Corte, soldadura y mecanizado de diversos materiales	IPG Photonics Corp
Yterbio (fibra dopada)	1030-1080		Procesado de materiales Biotecnología	PolarOnyx Inc
	1060-1080	1.2W	Procesado de materiales Sensado	Lumics GmbH
	1060-1070		Procesado y corte de materiales	Laser Photonics
	1060-1070	50W	Construcción Corte y grabado de materiales	Rofin-Baasel Inc
	1080-1090	50W	Instrumental médico Procesado de materiales Soldadura	Nufem
	1030-1120	50KW	Corte y soldadura de materiales	IPG Photonics Corp

Fig. 22: Oferta de láseres de fibra óptica de onda continua

Dadas estas prestaciones, y dada su disponibilidad comercial cada vez más abundante, la aceptación de la tecnología de los láseres de fibra óptica ha ido creciendo uniformemente en todo el mundo [5].

A día de hoy, el procesado de materiales con láser de fibra óptica es una tecnología real de sustitución. Es decir, muchas compañías están comenzando a llevar a cabo su producción con la ayuda de estos láseres y están comenzando a ver como un signo de expansión y mejora la sustitución de sus viejos láseres.

Otra área donde los láseres de fibra óptica están incrementando su mercado es en el campo de las aplicaciones móviles donde, debido a su reducido tamaño, estos láseres pueden transportarse fácilmente.

Actualmente existen láseres de fibra comerciales con niveles de potencia de salida de hasta 50KW. Estos láseres han demostrado unas prestaciones nunca conseguidas hasta ahora en cuanto a velocidad y profundidad de penetración. Este hecho ha dado lugar a la expansión de los láseres de fibra en el ámbito del procesado de materiales.

3.5 Tipos de láseres según el método de generación de la longitud de onda

Los láseres de fibra basados en amplificación EDFA así como amplificación Raman, precisan de algún tipo de sistema para la generación de longitudes de onda concretas. En este apartado se describen dos de los métodos utilizados en este Trabajo Fin de Máster para conseguir esta selección así como las características y ventajas de cada uno.

3.5.1 Generación mediante FBG

El diseño de láseres mediante FBGs ha aumentado en los últimos años gracias a la evolución de las tecnologías de diseño. Actualmente se pueden conseguir FBGs con anchos de banda <0.2 nm y con reflectividades $>95\%$.

Los esquemas pueden ser diseñados mediante FBGs en reflexión combinados con circuladores o utilizando dispositivos especiales como los *add-drop filters* (ADF). En [17] se propone un diseño mediante un ADF y amplificación mediante fibra dopada con erbio, cuyo esquema es el siguiente.

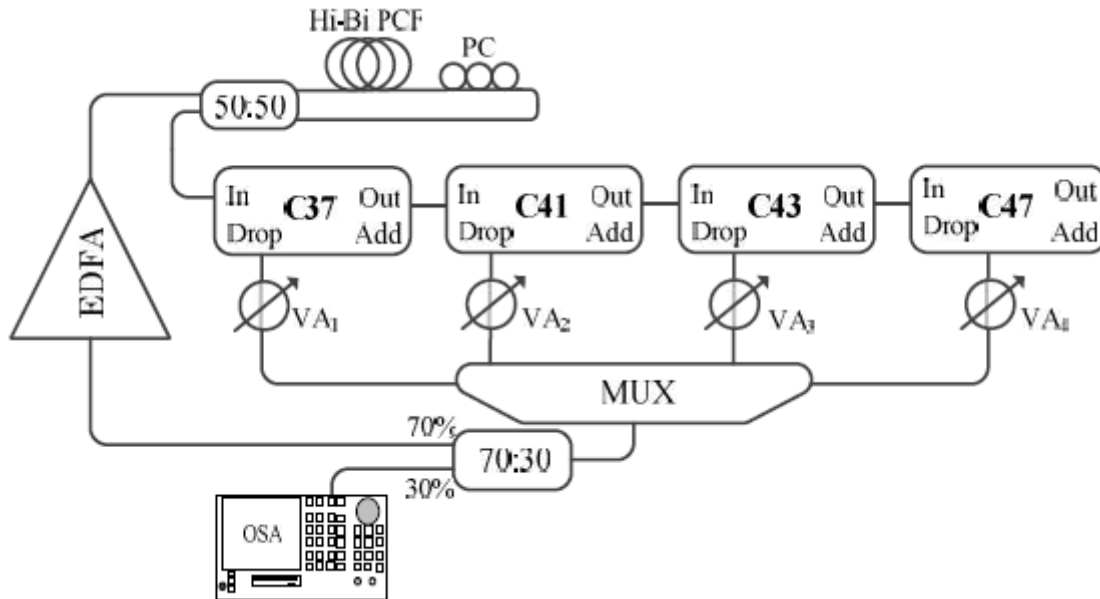


Fig. 23: Set up EDFL mediante FBGs

Los láseres diseñados en este proyecto se han basado en FBGs acompañados de amplificación EDFA. A continuación se puede ver la creciente evolución en el número de publicaciones de láseres de fibra dopada con erbio con FBGs para la generación de múltiples longitudes de onda.

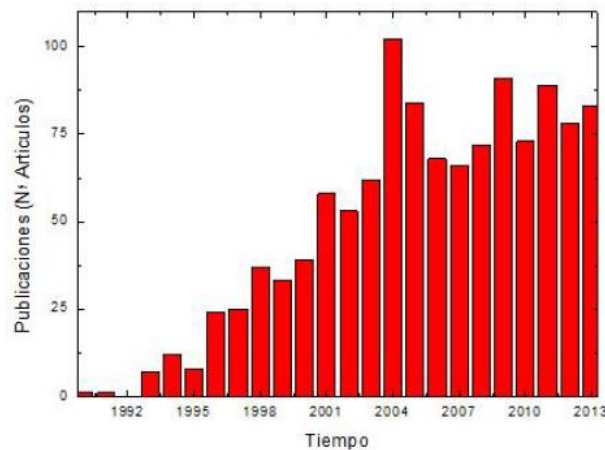


Fig. 24: Número de publicaciones de láseres mediante FBGs

3.5.2 Generación mediante WDM

Otro método parecido al anterior es la utilización de un WDM (Wavelength División Multiplexer) para la generación de las longitudes de onda. En el siguiente esquema se puede ver como mediante un WDM se separan las longitudes de onda y de cada una se extrae

parte mediante acopladores. El resto de la luz es de nuevo insertada en la cavidad mediante otro WDM y amplificada.

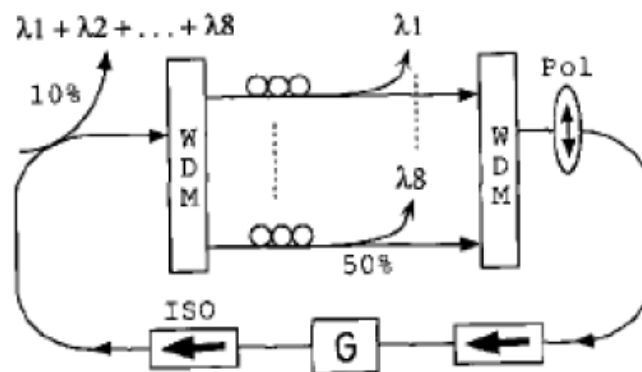


Fig. 25: Set up EDFA mediante WDM

En este caso y como se puede apreciar en los resultados, el sistema no está ecualizado, sin embargo, mediante la inclusión de atenuadores que controlaran cada longitud de onda se podría llegar a ese estado.

3.6 Limitación de los láseres

En este apartado se presentan las principales limitaciones de los láseres de fibra óptica, así como medios y configuraciones utilizadas para reducirlos. La mayor parte de las limitaciones provienen de efectos derivados del medio de amplificación utilizada.

3.6.1 Forma de ganancia

Uno de los principales problemas en la generación de láseres de fibra es el comportamiento de la ganancia del amplificador. Se puede diferenciar entre medio homogéneo e inhomogéneo, ambos ilustrados en la figura de abajo, donde las líneas delgadas corresponden a la curva de ganancia sin saturar y las líneas gruesas a la ganancia en saturación mediante la introducción de una señal a amplificar [18].

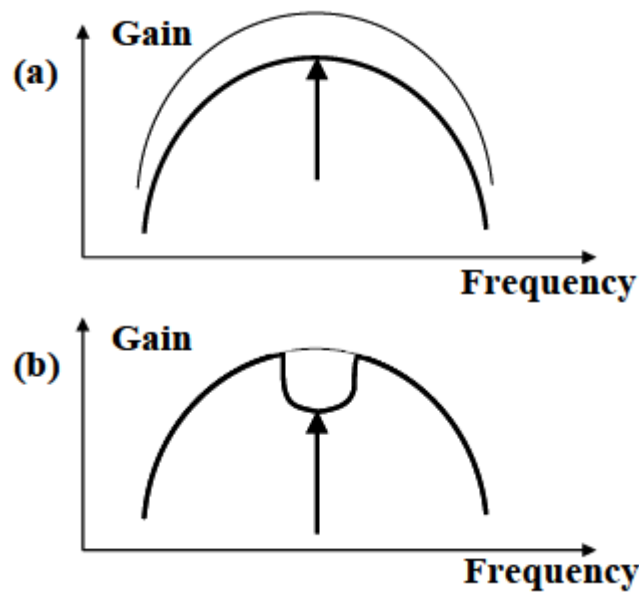


Fig. 26: Curva de ganancia sin saturar (línea delgada) y saturada (línea gruesa) para un medio homogéneo (a) y un medio inhomogéneo (b)

Como se puede ver en el caso de un medio homogéneo, la saturación de la señal amplificada provoca que la curva de ganancia varíe en todo el espectro, mientras que en el caso inhomogéneo, sólo se satura la longitud de onda introducida manteniendo sin variación el resto del espectro.

Los EDFA tienen un comportamiento homogéneo a temperatura ambiente, la principal causa de este fenómeno es el tiempo de vida del estado excitado, al saturarse a una longitud de onda la energía de los estados excitados se reduce provocando una reducción de la emisión espontánea.

Esto es un problema para la generación de EDFLs con múltiples longitudes de onda, ya que las variaciones de amplitud de una de ellas modificará la curva de ganancia del amplificador y por lo tanto estará afectando directamente a la amplitud del resto de longitudes de onda provocando inestabilidades. Sin embargo, es posible conseguir que un EDFA se comporte de forma inhomogénea enfriando la fibra dopada a temperaturas de 77°K [19].

3.6.2 Spatial hole burning

El fenómeno llamado *spatial hole burning* es un proceso que se da en los láseres de fibra dopada con erbio en anillo. Cuando una señal viaja en ambos sentidos dentro del anillo se genera un patrón de interferencia dando lugar a una onda estacionaria. La inversión de población generada en la fibra dopada será consumida principalmente en los antinodos, obteniendo la amplificación en estos puntos, mientras que en los nodos se acumularía la inversión de población sin producir amplificación. Este proceso es causante de inestabilidades del sistema [12].

La solución que se presenta es la introducción de aisladores a la salida de la EDF de forma que se asegure que la señal sólo circula en un único sentido. En determinados esquemas realizados con circuladores no son necesarios los aisladores ya que los circuladores garantizan el funcionamiento unidireccional del láser [18].

3.6.3 Láseres multilínea

Los láseres de emisión multilínea tienen gran interés en diversos campos, como en sistemas de comunicación con mecanismos multiplexores (WDM), sensores de fibra, procesado de señales, calibrado de instrumentos ópticos o espectroscopia. Por ello, es deseable conseguir un alto número de longitudes de onda, y que además sean sintonizables. También es importante que el láser opere en un gran espacio de longitudes de onda. Por el contrario, es imposible modular independientemente cada línea de emisión. Se ha conseguido emisión multilínea con láseres de semiconductor y también con láseres de fibra, normalmente en configuración de anillo.

Los requisitos para este tipo de fuentes ópticas son: elevado número de canales, moderada potencia de salida con buena señal relación ruido y espectro plano, funcionamiento SLM (Single Longitudinal Mode), capacidad de ajuste y colocación exacta de la frecuencia.

Los láseres de fibra ofrecen grandes posibilidades como fuentes de múltiples longitudes de onda. El principal reto en la producción de una salida multilínea con un láser de fibra dopado con erbio (EDFL) es el hecho de que el ion de erbio se satura homogéneamente a temperatura ambiente, evitando el funcionamiento estable de múltiples longitudes de onda.

Existen dos limitaciones principales, la ecualización de las amplitudes de cada longitud de onda y la estabilidad del sistema. Ambas limitaciones están asociadas a la amplificación, en el primer caso dependerá de cómo se reparta la ganancia disponible en el momento de ajustar el láser, mientras que en el segundo caso dependerá del comportamiento del sistema ante fluctuaciones de amplitud.

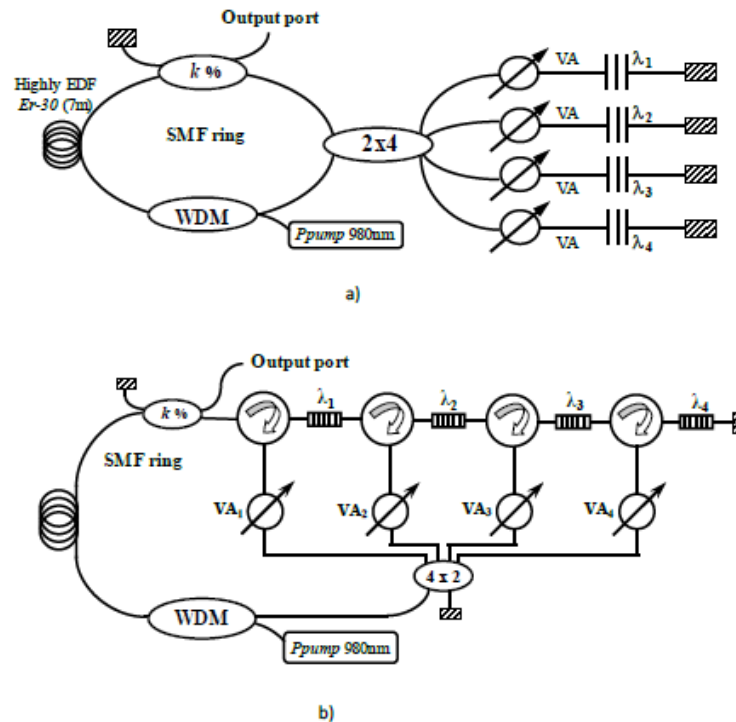


Fig. 27: Típica topología EDFA con FBGs en paralelo (a) y en serie (b)

3.6.3.1 Ecuación

La ecualización de láseres de fibra óptica multilínea que se han realizado en este TFM, se ha llevado a cabo mediante el uso de atenuadores ópticos variables para cada longitud de onda. Mediante esta configuración logramos controlar la ganancia para cada canal. Pero a cambio desperdiciamos parte de la potencia de las señales, con lo que se reduce la eficiencia de la estructura.

En el desarrollo experimental de este TFM, el control de la ecualización mediante atenuadores ópticos variables es clave para la consecución de los resultados esperados.

3.6.3.2 Estabilidad

Definimos la estabilidad del sistema como la diferencia entre el valor máximo y el mínimo de la amplitud para una longitud de onda durante un intervalo de tiempo concreto. Los EDFAs se comportan como un medio homogéneo a temperatura ambiente, lo que provoca variaciones importantes de estabilidad en los sistemas multilínea.

Uno de los métodos más utilizado en investigación es sumergir la fibra dopada con erbio en nitrógeno líquido consiguiendo así enfriarla a 77°K. A esta temperatura el medio se comporta de forma inhomogénea consiguiendo así una mayor estabilidad.

Mediante este método se obtienen muy buenos resultados, sin embargo, fuera del campo de la investigación no es factible su utilización en redes de comunicaciones estándar, dado el elevado coste de mantenimiento que precisan los equipos refrigerados con nitrógeno líquido.

3.6.4 Modos y estabilidad

Los láseres de fibra óptica con configuración en anillo tienen una función de transferencia propia, por lo que se generan resonancia a determinadas longitudes de onda o modos longitudinales. Este es un factor importante en el diseño de láseres de fibra, ya que la presencia de varios modos provoca inestabilidades al existir competencia entre ellos. Lo ideal es conseguir que el sistema sea monomodo, consiguiendo así las mejores condiciones de estabilidad [12].

El número de modos longitudinales del láser estará limitado por el ancho de banda de la ganancia, como se puede ver en la siguiente figura.

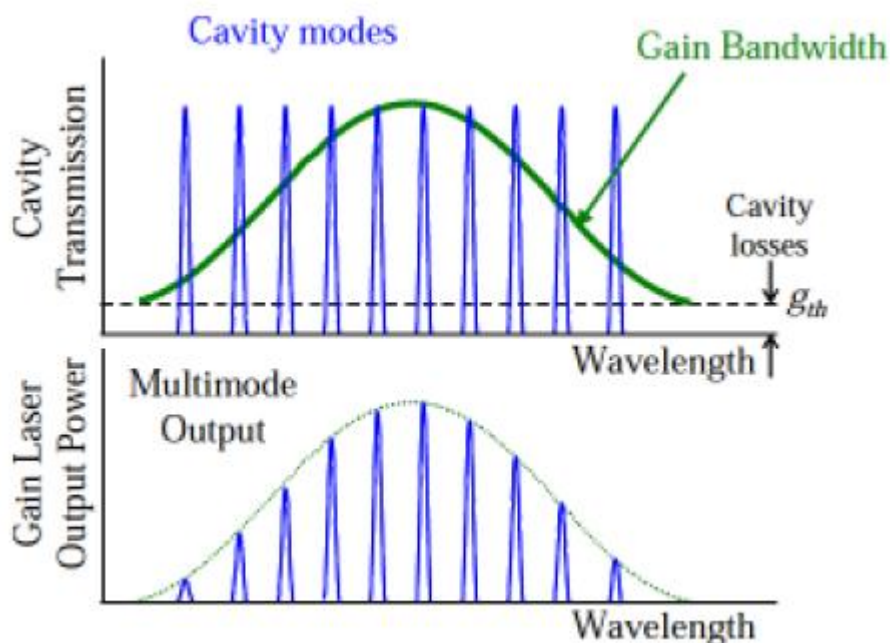


Fig. 28: Espectro de modos y ganancia

En sistemas en los que se utilizan FBGs para seleccionar las longitudes de onda de emisión del láser, el número de modos vendrá dado por el BW-3dB del FBG. Como se ha comentado el objetivo es diseñar láseres multilínea que operen en un sólo modo longitudinal o en su defecto con el menor número de ellos. Esta característica es importante a la hora del diseño de láseres de fibra, debido a que la presencia de varios modos provoca inestabilidades al existir competencia entre ellos. Buscamos que el sistema sea monomodo, para obtener así mejores condiciones de estabilidad.

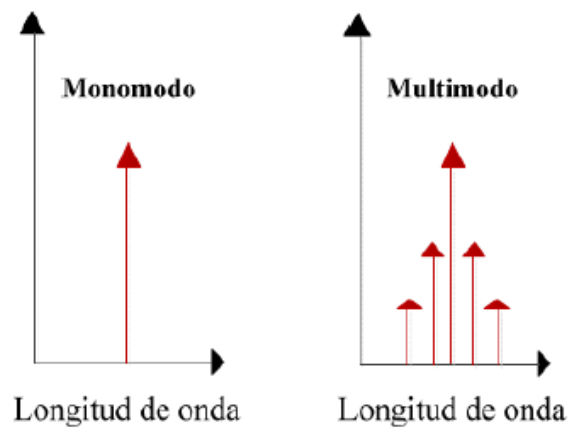


Fig. 29: Láseres monomodo y multimodo

A continuación, se presentan diferentes soluciones utilizadas para este propósito.

3.6.4.1 Absorbente saturable

Este método está basado en la fibra dopada con erbio. En este caso se introduce un tramo de determinada longitud de EDF sin que ésta sea bombeada, consiguiéndose así que se comporte como un medio absorbente provocando que muchos de los modos naturales de la cavidad no alcancen la condición de emisión láser y favoreciendo así también la estabilidad del sistema.

A mayor concentración de dopante, mayor será el efecto de absorción del medio, evitando con esto que algunos modos naturales de la cavidad de nuestro sistema no alcancen la condición de láser, favoreciendo así la estabilidad del mismo [20].

3.6.4.2 Efecto de la supresión inducida de modos longitudinales

Este efecto se consigue mediante la eculización del sistema a través de los atenuadores ópticos variables (VOA) en cada rama del mismo, de manera que ambas longitudes de onda tengan el mismo nivel de potencia óptica de salida. El objetivo es conseguir que la respuesta del láser sea monomodo y para ello utilizamos los atenuadores hasta ajustar las potencias de las diferentes longitudes de onda utilizadas en el sistema.

3.6.4.3 Doble cavidad

Uno de los métodos para la reducción del número de modos de un láser de fibra es la configuración con doble anillo mediante acopladores. De esta forma el número de modos así como su separación será diferente para cada caso.

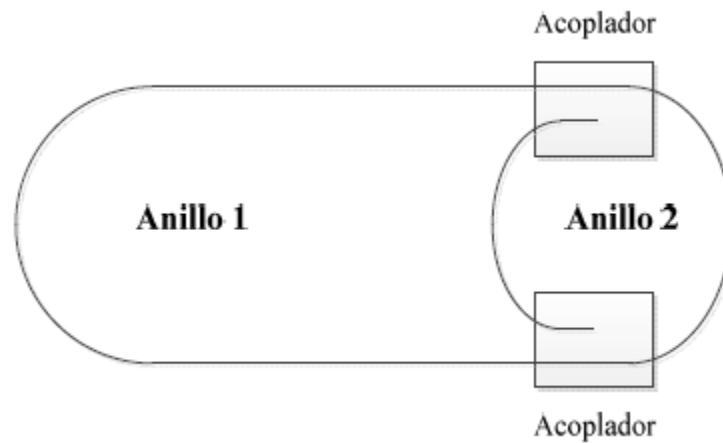


Fig. 30: Esquema básico de doble cavidad

Con esta configuración, la función de transferencia total de la cavidad será la multiplicación de las funciones de transferencia de cada uno de los anillos. De esta manera, si se configura de forma que solo pueda existir un único modo de resonancia, tendremos un láser monomodo.

4 ESTUDIO EDF

El primer objetivo de nuestro proyecto será la familiarización del material, para ello realizaremos un previo estudio del comportamiento de los diferentes EDF con los que implementaremos nuestras estructuras. Antes de ver el comportamiento de dichas fibras estudiaremos el funcionamiento de la amplificación.

4.1 comportamiento del EDFA

4.1.1 Laser de Bombeo

Se ha demostrado que la banda de bombeo de 980nm es bastante adecuada para bombear amplificadores ópticos. Nuestro laser para bombear emite a 975nm con una anchura espectral entre 0.5nm y 1nm para potencias menores de 0.3mW. Por ello, hemos decidido alimentar con el controlador de láser a intensidades máximas de 450mA para mantener un bombeo con una anchura óptima (a partir de mayores intensidades la anchura espectral puede llegar hasta los 2nm) y un margen de seguridad.

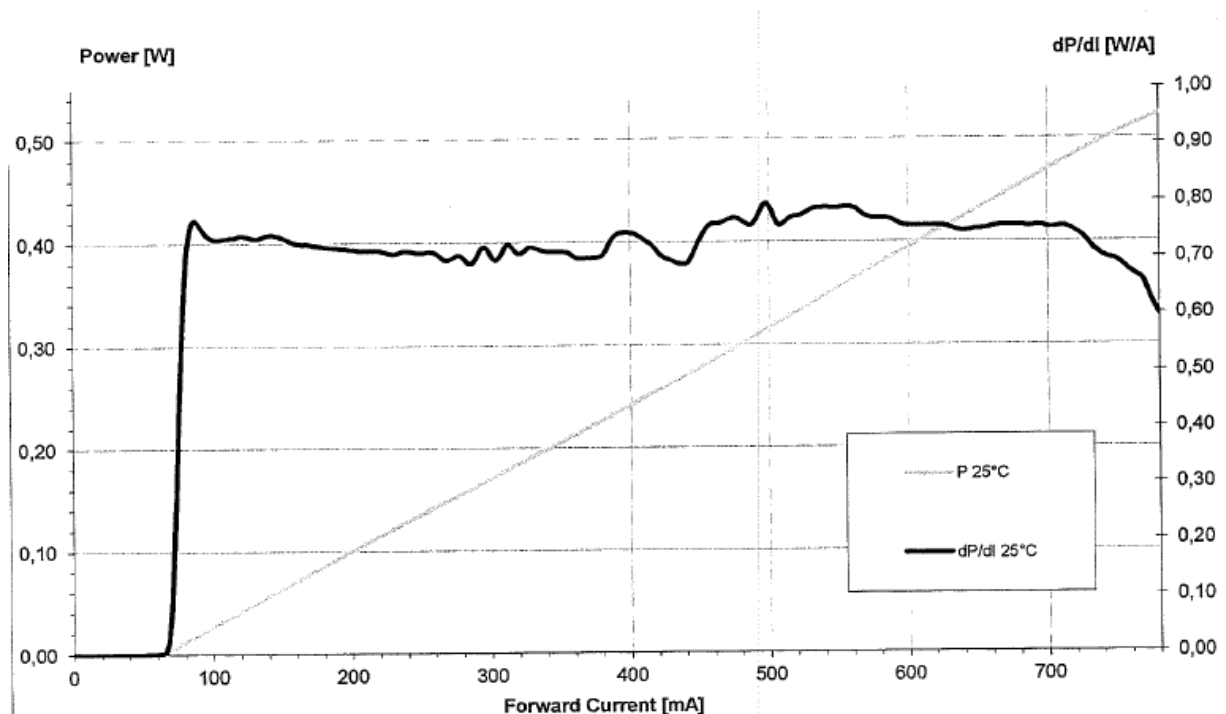


Fig. 31: Relación intensidad/potencia del láser de bombeo

4.1.2 Emisión espontánea amplificada

Una vez que sabemos la potencia con el que emitirá el láser, vamos a analizar cómo se comportara el amplificador que utilizará diferentes EDF. Una de las principales características de la amplificación como hemos mencionado en apartados anteriores, es que además de la emisión estimulada que nos otorga ganancia, también se tiende a amplificar la emisión espontánea (ASE). Gran parte de los fotones emitidos espontáneamente poseen frecuencias del mismo rango que los generados por la emisión estimulada, pero sus fase son aleatorias y la dirección de radiación isotrópica. Por ello una pequeña proporción de estos fotones se emitirán dentro del ángulo solido correspondiente a la amplificación para acoplarse en él. Desde el punto de vista de la amplificación, estos fotones serán indistinguibles de los correspondientes a la señal y se amplificarán en la misma medida.

Podemos tener dos tipos de ASE, la contrapropagante (ASE^-) y la copropagante (ASE^+), como su nombre lo indica es debido al sentido en el que viaja. Por lo tanto la potencia del bombeo no sólo se utiliza para la amplificación de la señal, sino que parte de esta energía se invertirá en generar y amplificar el ASE.

Si escogemos un perfil típico de una fibra dopada con erbio para usarlo dentro de un EDFA se puede observar como la máxima potencia se obtiene sobre los 1530nm con una potencia de bombeo adecuada.

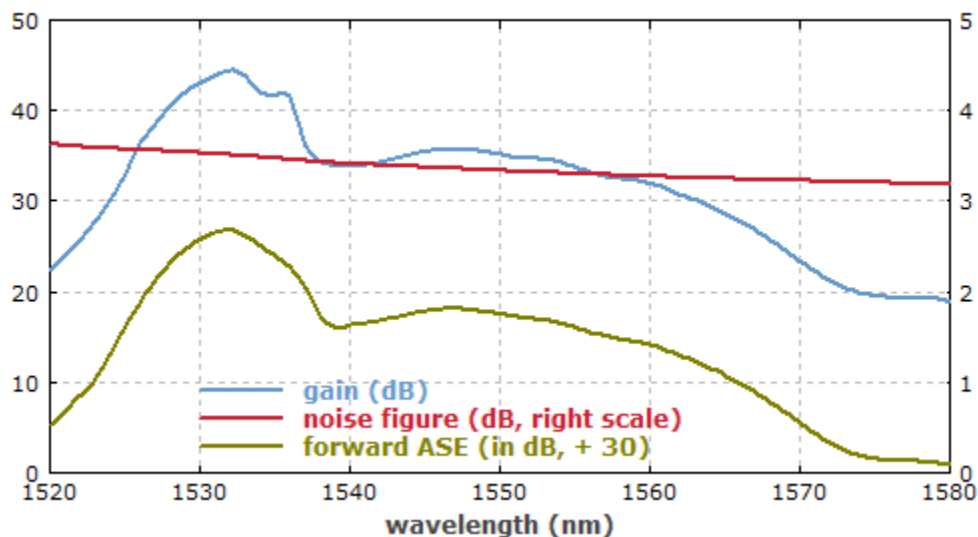


Fig. 32: Curva de respuesta

Como se puede ver en la figura la curva de la ganancia y la curva del ASE están directamente relacionados. Si la ganancia del amplificador es G , la potencia con que bombeamos es P_{bombeo} y la potencia del ASE es P_{ase} , podemos medir la potencia que sale del EDFA como:

$$P = P_{bombeo} \cdot G + P_{ase}$$

Por lo tanto la ganancia del erbio será:

$$G = \frac{P - P_{ase}}{P_{bombeo}}$$

4.1.3 Funcionamiento del láser de bombeo junto al EDF

Para empezar vamos a comprobar el funcionamiento del láser del bombeo junto al erbio para poder ver la curva de la ganancia. Para poder medir la curva de la ganancia sólo necesitamos conectar el bombeo a la fibra dopada con erbio y ésta a su vez al analizador de espectros ópticos. Para futuros montajes es necesario conectar el bombeo al WDM para crear la cavidad, por ello como este dispositivo no afecta nada en la medición de la curva de la ganancia, lo hemos soldado desde un principio. En la siguiente figura se puede apreciar el montaje.

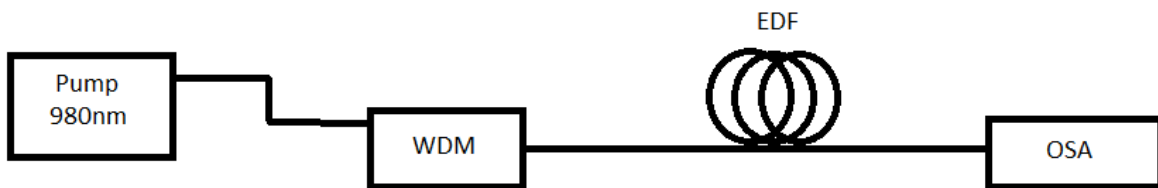


Fig. 33: Montaje potencia de salida del EDFA

En nuestro caso tenemos a nuestra disposición 3 tipos de fibra dopada con erbio, donde dentro de uno de ellos tenemos dos de diferentes longitudes. En la siguiente tabla se puede ver las 4 EDF con los que mediremos la curva de la ganancia.

TIPO DE FIBRA	LONGITUD (M)
I-25	2.5
I-25	5
ER-80	1
ER-30	5

Tabla 1: Tipos de fibra

I-25 longitud 2.5 metros

Si observamos la figura, hemos realizado 3 mediciones de diferentes intensidades para poder ver cómo evoluciona la curva de la ganancia. Para los 200mA la respuesta de ésta no es la típica de un EDF, ya que su máxima ganancia se encuentra entre 1555-1560nm, esto se debe a la baja potencia con la que estamos atacando el erbio. En los casos de 300mA y 400mA se asemeja la ganancia de los valores típicos del erbio donde se encuentran los máximos entorno a los 1531nm.

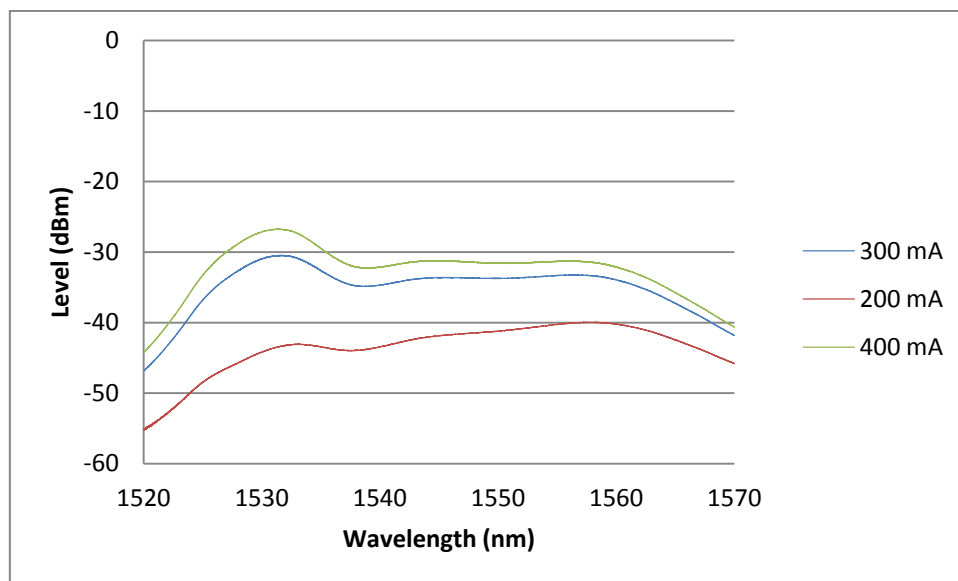


Fig. 34: Curva ganancia I-25 2.5 metros

Para diseñar algún tipo de sistema láser de fibra óptica, esta fibra en principio tiene una buena respuesta. La utilización de la sección entre 1540nm y 1560nm sería muy interesante para una cavidad donde los FBGs se colocasen en paralelo, ya que la ganancia de los diferentes modos sería aproximada y la eualización sería mucho más eficiente. En el caso de utilizar una cavidad donde los FBGs se colocasen en serie, optaríamos por la sección entre 1530nm y 1540nm para poder eualizar todos los FBGs.

I-25 longitud 5 metros

Con la fibra de 5 metros tenemos un resultado parecido al de 2.5 metros a bajas potencias. En este caso la longitud del erbio es demasiado larga para las potencias que manejamos. La ganancia máxima de nuestro erbio se encuentra sobre los 1560nm. Por ello este perfil no es muy óptimo para diseños de FBGs en paralelo por su respuesta poco plana. En cuanto a los diseños para FBGs en serie, se puede aprovechar la pendiente para poder eualizar los FBGs.

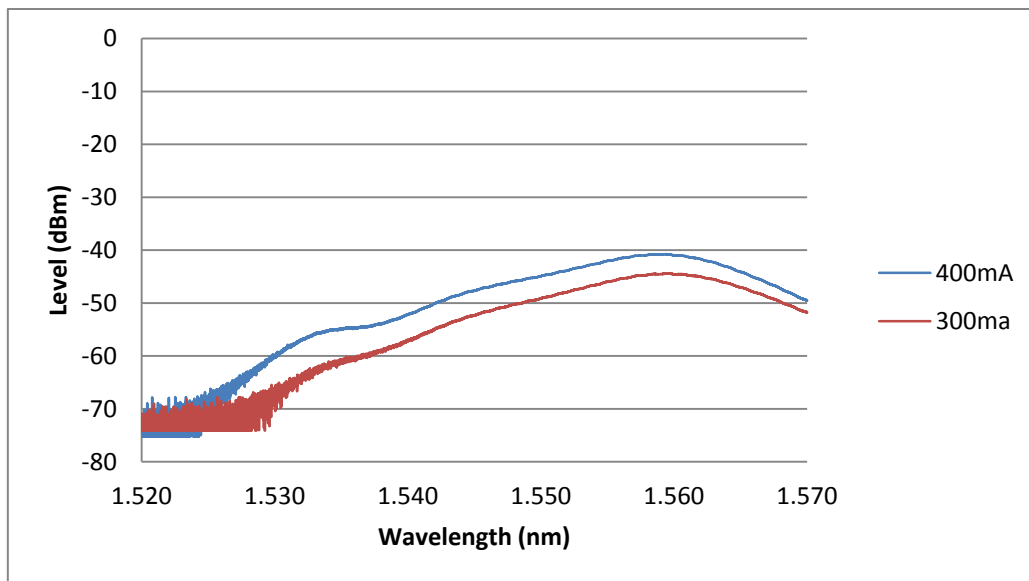


Fig. 35: Curva ganancia I-25 5 metros

ER-80

En este caso nos encontramos con un erbio de 1 metro, por lo tanto la falta de potencia no será un problema, ya que con 200mA obtenemos una respuesta bastante típica. El principal problema de la corta longitud del erbio es que la ganancia será menor que en el primer caso. Con este EDF podemos conseguir tanto estructuras de FBGs en paralelo como en serie.

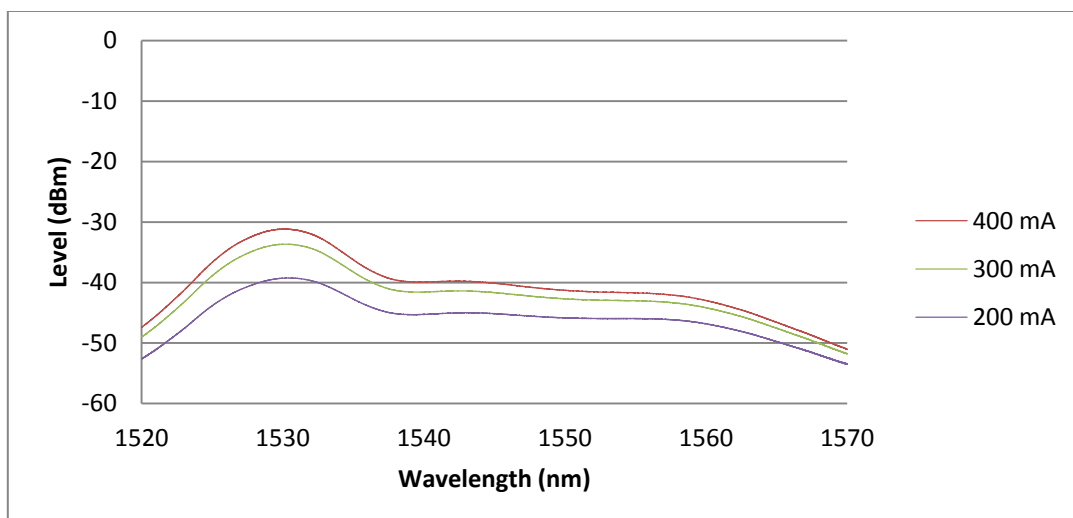


Fig. 36: Curva ganancia ER-80 1 metro

ER-30

El ER-30 de 5 metros nos da unos resultados buenos. A partir de los 200mA la pendiente entorno a los 1530nm es muy pronunciada que es de un gran interés para el diseño de FBGs en serie. Al tener una caída tan abrupta en un ancho de banda pequeño nos ayudara a equalizar un láser con más longitudes de onda y a su vez más cercanos entre sí.

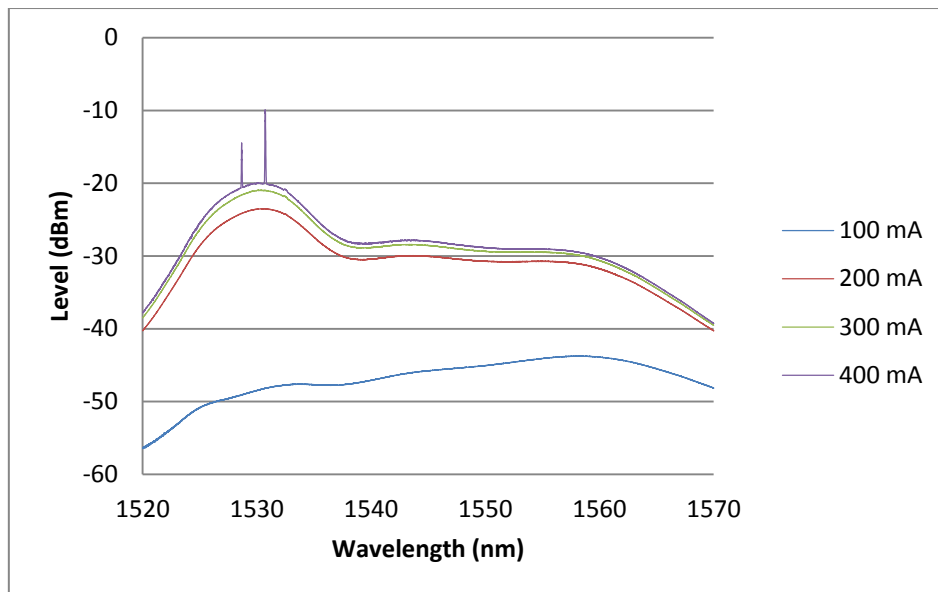


Fig. 37: Curva ganancia ER-30 5 metros

5 PROCESO EXPERIMENTAL

En este apartado se implementa un nuevo laser multilínea con configuración en anillo para aplicaciones de sensado de temperatura. La multiplexación de FBGs puede realizarse en serie o paralelo.

Serie: La multiplexación de sensores en serie tiene la ventaja de ser más eficiente en términos de potencia, en un principio la potencia reflejada no afecta a la que viaja a través de los FBGs. Por lo tanto a cada FBG que colocamos en serie le llega toda la potencia de la red menos la que se ha reflejado en las etapas anteriores.

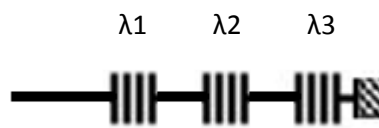


Fig. 38: Multiplexación FBGs en serie

El gran inconveniente de estas estructuras es que son muy difíciles de ecualizar. Cada FBG suele introducir diferentes pérdidas y esto limita mucho a la hora de igualar las potencias de pico.

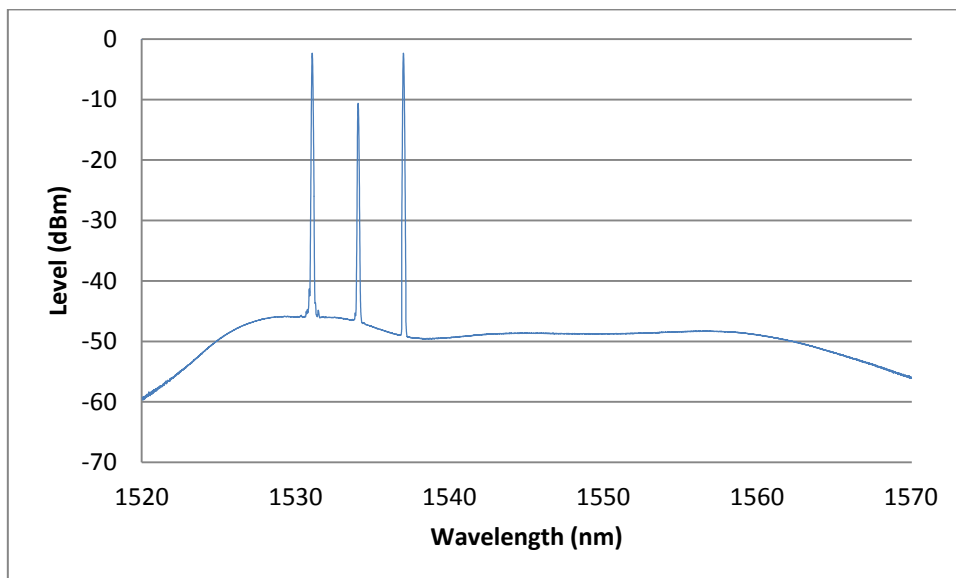


Fig. 39: FBGs en serie sin ecualizar

Paralelo: Esta configuración tiene la gran ventaja de que nos permite ecualizar sin grandes problemas para poder igualar la potencia de los picos de los diferentes FBGs. Para ello se suele integrar a cada rama un atenuador variable con el que podamos controlar las potencias de pico. La desventaja de este tipo de estructuras es que necesitamos repartir la potencia en diferentes ramales, con lo que la potencia se reducirá proporcionalmente al número de sensores. Por ejemplo, en un sistema de ocho sensores la potencia se disminuiría en 9dB.

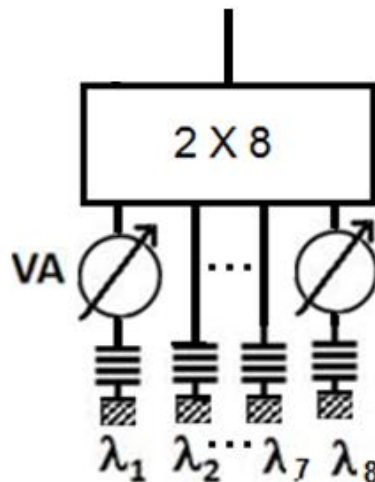


Fig. 40: Multiplexación FBGs en paralelo

En nuestro proyecto hemos decidido implementar estructuras con FBGs en serie. En este estudio se presentara el proceso y las medidas realizadas para diferentes tipos y números de FBGs para poder sacar conclusiones del comportamiento de los diferentes modos dentro de la cavidad. Para ello empezaremos con una estructura con dos FBGs en serie e iremos aumentándolos hasta llegar al límite de nuestra estructura, una vez que terminemos intentaremos optimizarlo y recurrir a otro tipo de estructuras con los que podamos mejorar los resultados.

5.1 Láser de doble canal de fibra dopada con erbio mediante FBGs en serie

La primera estructura en analizar e implementar en el laboratorio fue un láser de doble longitud de onda. En la siguiente figura se puede ver el esquema experimental del láser propuesto.

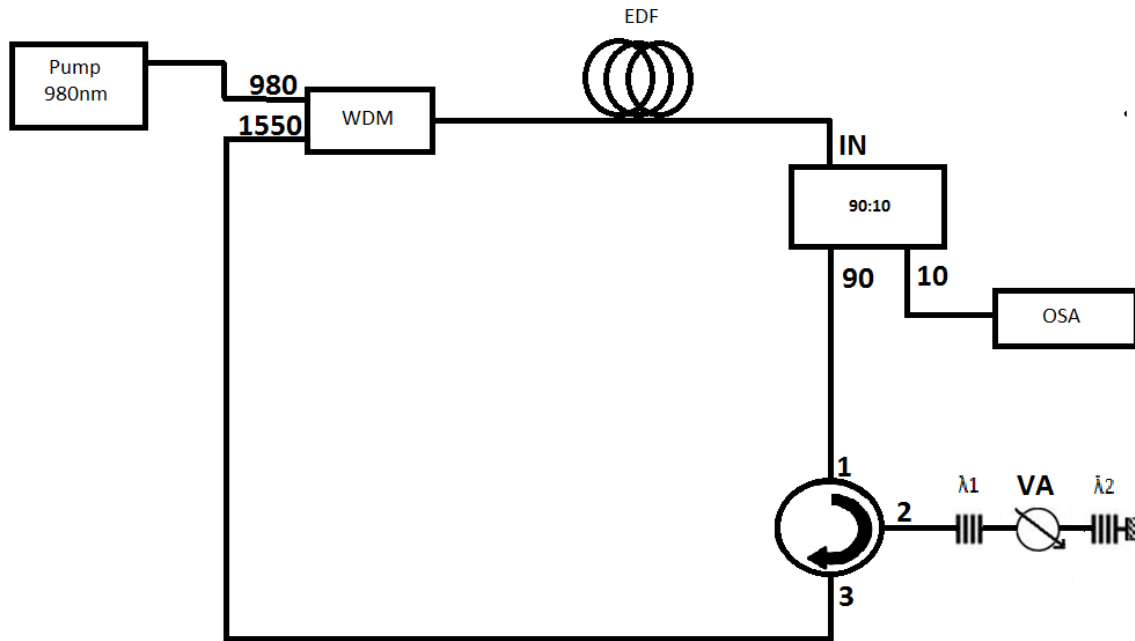


Fig. 41: Láser de fibra monomodo de dos canales para aplicaciones de sensado

Este láser consiste en un anillo de realimentación con el que se amplifica con una sección de fibra de erbio fuertemente dopado. El funcionamiento del sistema se pretende que sea el siguiente:

- Este anillo está compuesto por un controlador de bombeo con el que manejaremos la intensidad y la temperatura de nuestra mariposa. Para ello emitiremos con potencias sobre los 0.25mW (400mA) y una temperatura de 25°C a 980nm
- El multiplexor de longitud de onda (WDM) es el dispositivo que multiplexará la señal proveniente del bombeo y la señal que realimenta nuestro anillo a 1550nm para poder reintroducirlas en la cavidad.
- A continuación, el tramo de fibra fuertemente dopada con erbio (EDF) nos servirá para amplificar nuestra señal.
- A la salida del EDF, introducimos la señal en un acoplador 90:10. Este acoplador es fundamental para poder medir, ya que nos permitirá introducir un 10% de nuestra señal en un analizador de espectros óptico (OSA) y el otro 90% de la señal podrá viajar por el anillo.
- El siguiente dispositivo es un circulador de tres puertas. Este circulador nos permitirá introducir la señal en la rama de los FBGs para que después se reflejen las longitudes de onda deseadas. Las reflexiones se volverán a introducir en el anillo.
- En la rama de los FBGs, tenemos dos FBGs con un atenuador óptico variable que se encuentra en medio. La función principal de este atenuador será la de equalizar las

diferentes longitudes de onda. El principal problema de esta estructura es que sólo podemos atenuar el último de los FBGs, ya que si ponemos otro atenuador seguido del circulador éste atenuará las dos longitudes de onda.

En el apartado anterior hemos analizado el comportamiento del EDFA, donde se conseguía una curva de ganancia diferente según la longitud de onda. Aprovechando esa ganancia situaremos el FBG con la longitud de onda con mayor ganancia al final de nuestra rama, de esta manera conseguiremos mayores potencias en esta longitud de onda y con el atenuador seremos capaces de equalizar las dos longitudes de onda. Es de vital importancia seguir este proceso, en el caso de encontrarnos la mayor ganancia en la reflexión del primer FBG no se podrán equalizar los canales.

5.1.1 Análisis de los resultados

A continuación analizaremos los resultados obtenidos para los diferentes EDF que tenemos. Se ha intentado generar un láser con las longitudes de ondas más cercanas posible respetando la equalización y la estabilidad en todo momento. Para equalizar los picos hemos tenido que utilizar el atenuador óptico, pero en todos los casos la atenuación ha sido inferior a 0.4dB.

I-25 longitud 2.5 metros

Con esta fibra hemos conseguido equalizar y estabilizar dos longitudes de onda con una diferencia de 4.5nm entre sí. Las longitudes con las que hemos trabajado son 1532.5nm y 1537nm, hemos medido unas potencias máximas de pico de -9.8dBm y un nivel señal a ruido (OSNR) superior a los 35dB como se puede ver en la figura siguiente.

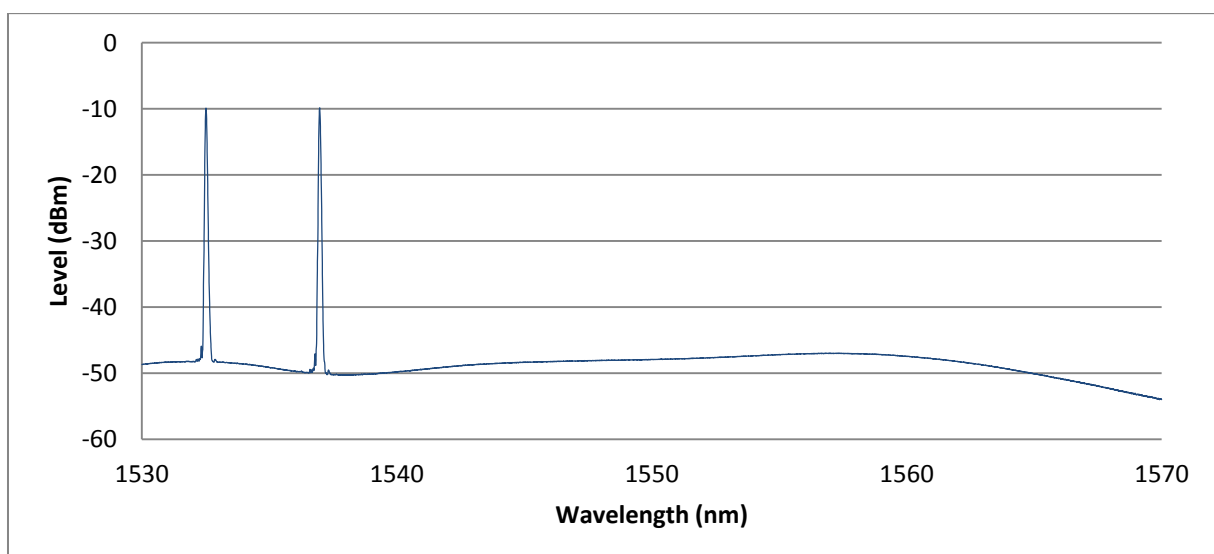


Fig. 42: Laser I-25 2.5 metros

En cuanto a la estabilidad, hemos conseguido que apenas fluctúen las potencias de pico. Para ello hemos realizado medidas periódicas durante una hora cogiendo resultados cada 2.5 minutos. El resultado se puede observar en la siguiente figura.

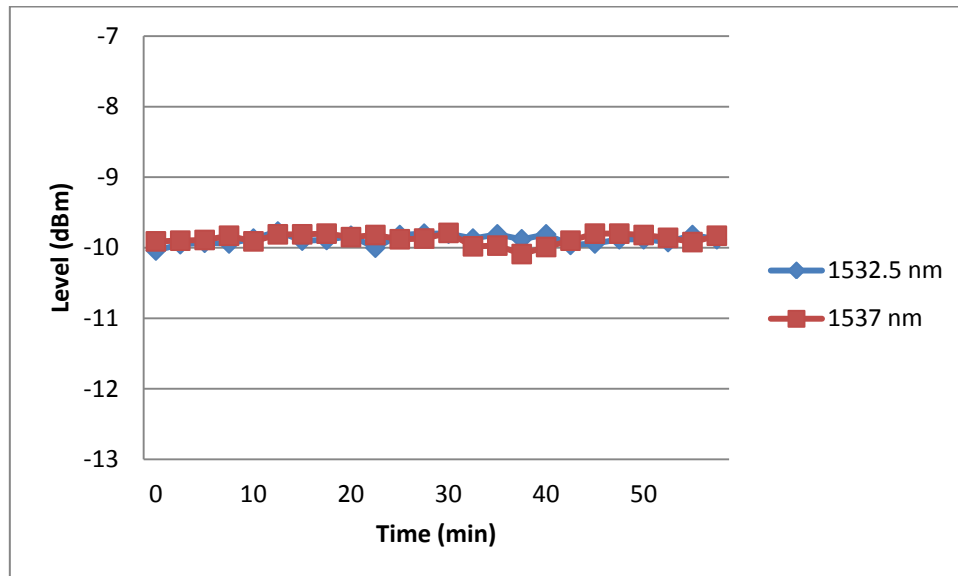


Fig. 43: Estabilidad laser I-25 2.5 metros

Para la longitud de 1532.5nm tenemos un valor medio de -9.883dBm y una desviación estándar de 0.067dB. Para la longitud de 1537nm tenemos un valor medio de -9.876dBm y una desviación estándar de 0.073dB. Por lo tanto podemos decir que son unos resultados magníficos a pesar de la distancia entre las dos longitudes de onda.

I-25 longitud 5 metros

En este caso no hemos podido acercar tanto los FBGs. La respuesta de la ganancia a la salida del EDFA es más plana en este caso y esto nos conlleva a utilizar FBGs que estén más distanciados. Las longitudes con las que hemos trabajado son 1535.5nm y 1545nm, hemos medido unas potencias máximas de pico de -24.3dBm y un nivel señal a ruido (OSNR) superior a los 30dB como se puede ver en la figura siguiente.

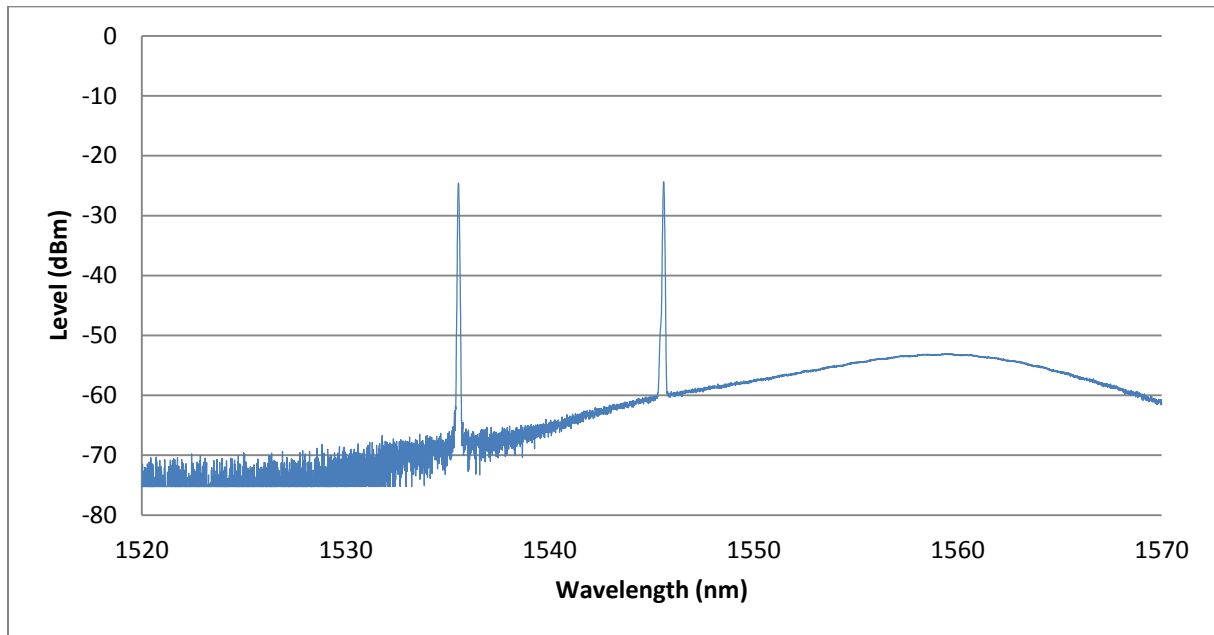


Fig. 44: Laser I-25 5 metros

En cuanto a la estabilidad, hemos obtenido peores resultados que con la de menos longitud. Para ello hemos realizado medidas periódicas durante una hora recogiendo resultados cada 2.5 minutos. El resultado se puede observar en la siguiente figura.

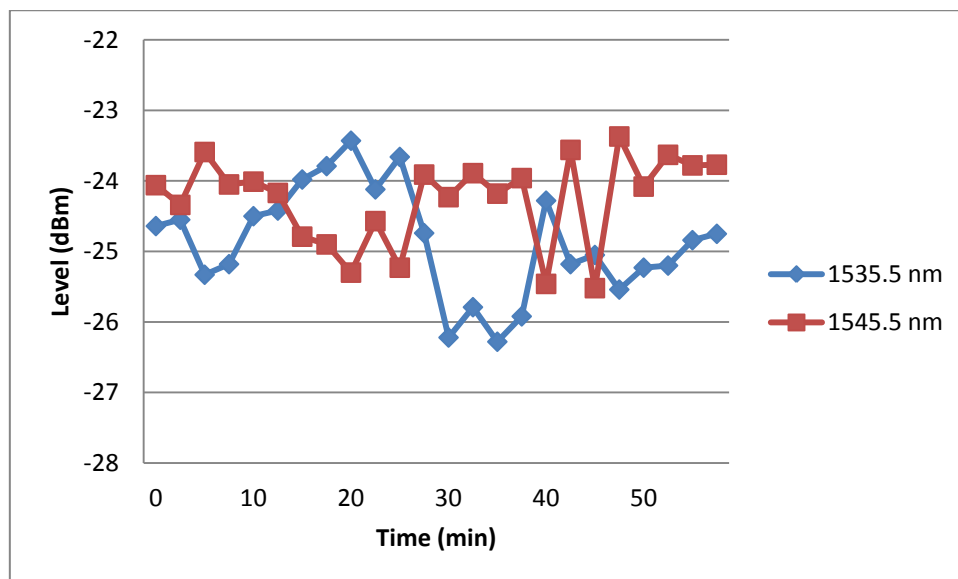


Fig. 45: Estabilidad laser I-25 5 metros

Para la longitud de 1535.5nm tenemos un valor medio de -24.859dBm y una desviación estándar de 0.756dB. Para la longitud de 1545nm tenemos un valor medio de -24.265dBm y una desviación estándar de 0.612dB. Por lo tanto podemos deducir que se necesita una potencia de bombeo adecuada para cada longitud de fibra dopada con erbio, en este caso al

no tener la suficiente potencia se nos desestabiliza el láser y las potencias logradas son muy inferiores que en el caso anterior.

ER-80 longitud 1 metro

Con esta fibra hemos obtenido unos resultados excelentes. Debido a su caída abrupta entorno a los 1530nm hemos podido aproximar los FBGs hasta 3nm, las longitudes de onda que hemos utilizado son 1532.5nm y 1535.5nm. Las potencias máximas que hemos manejado en los picos también han sido un poco superiores que a las de la primera fibra con -8.33dBm y un nivel OSNR extraordinario, llegando a superar los 40dB.

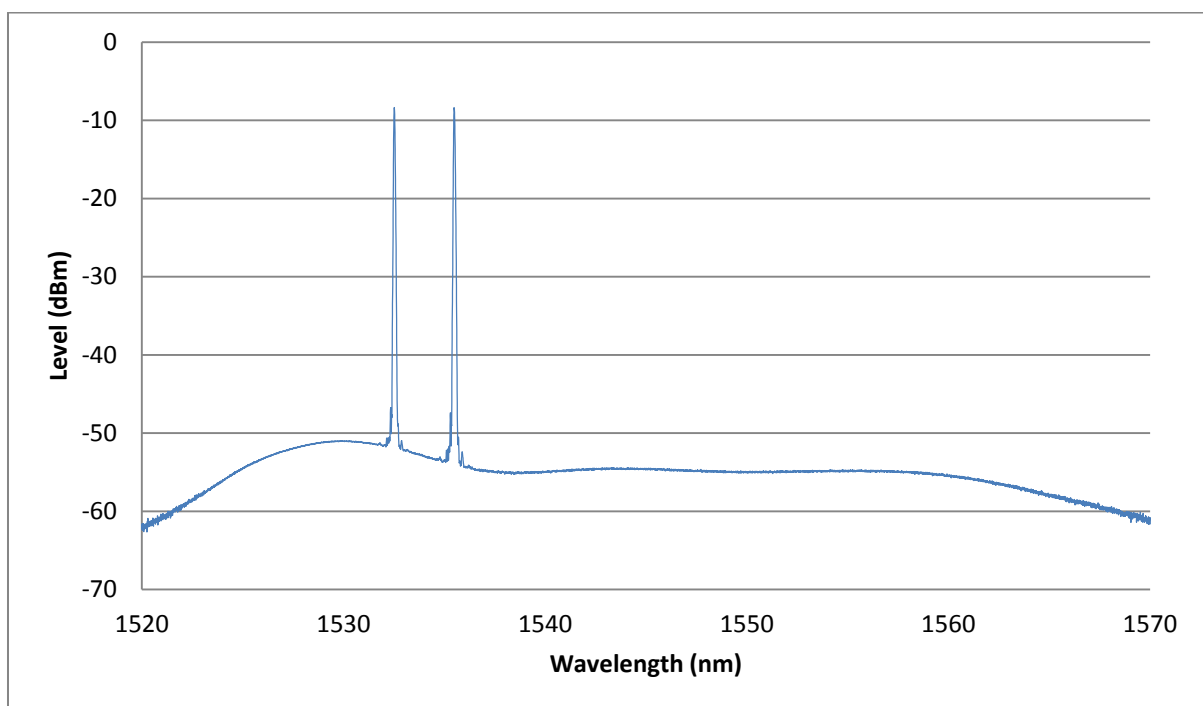


Fig. 46: Laser ER-80 1 metro

En cuanto a la estabilidad, los resultados han sido muy buenos después de realizar medidas periódicas durante una hora recogiendo resultados cada 2.5 minutos. El resultado se puede observar en la siguiente figura.

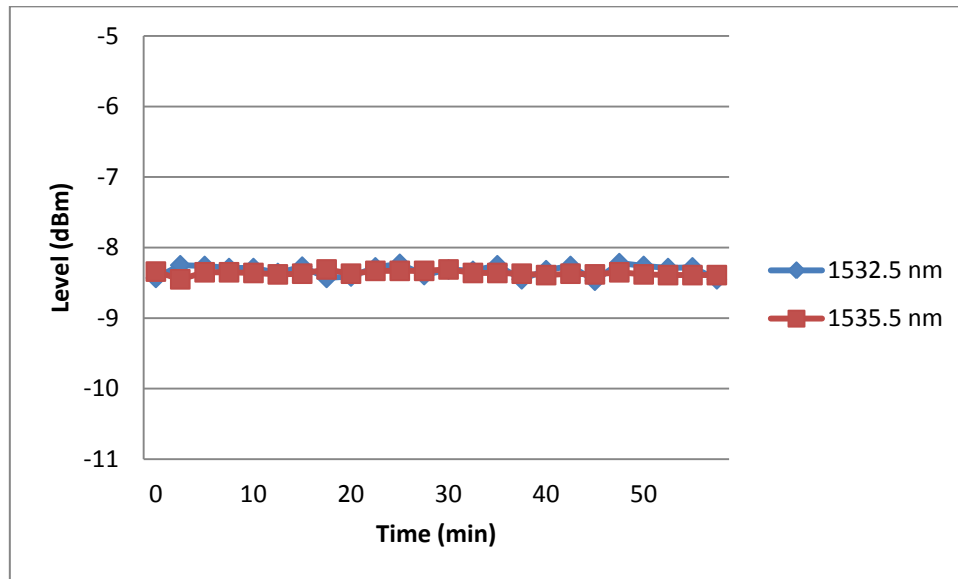


Fig. 47: Estabilidad laser ER-80 1 metro

Para la longitud de 1532.5nm tenemos un valor medio de -8.324 dBm y una desviación estándar de 0.077dB. Para la longitud de 1535.5nm tenemos un valor medio de -8.362dBm y una desviación estándar de 0.03dB.

ER-30 longitud 5 metros

Nuestro último EDF nos ha permitido ecualizar igual que las anteriores FBGs de 1532.5nm y 1535.5nm, incluso con mayores potencias de pico que llegan hasta los -2.6 dBm. En cuanto a los niveles de OSNR, superan los 45dB. Por lo tanto podemos decir que bajo el punto de vista de potencias es la mejor candidata.

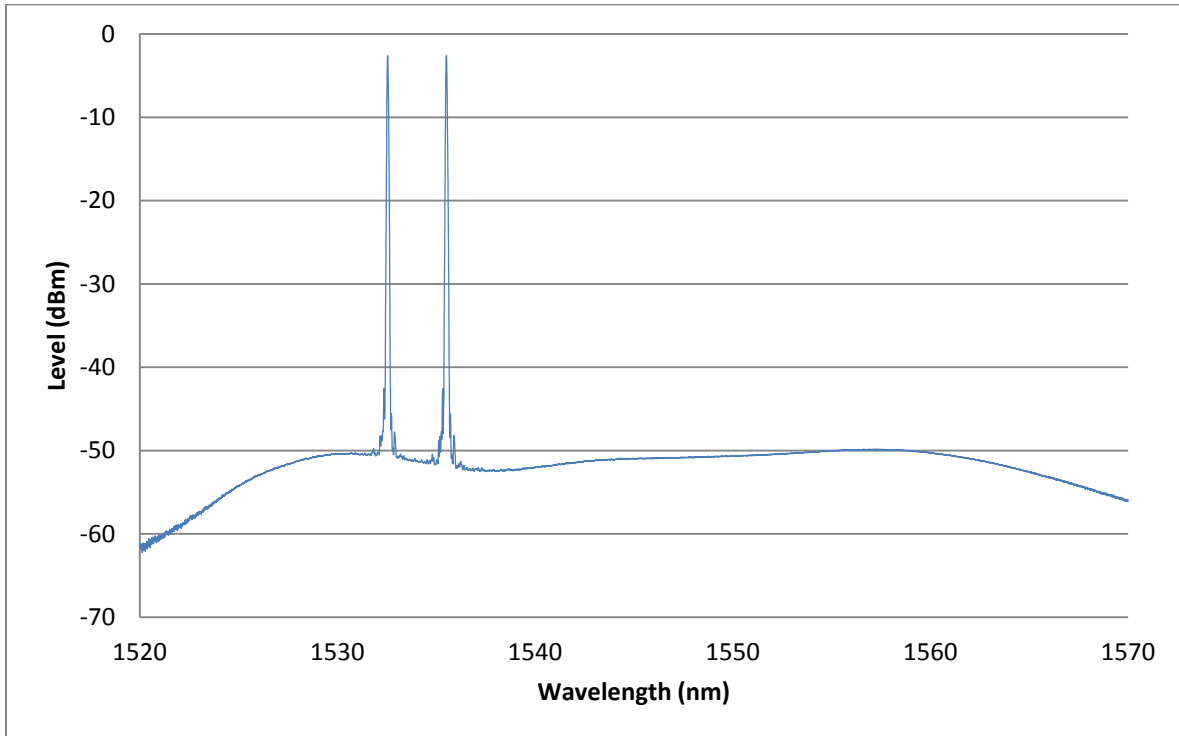


Fig. 48: Laser ER-30 5 metros

Si analizamos la estabilidad de nuestro láser, vemos que los resultados han sido muy buenos después de realizar medidas periódicas durante una hora recogiendo resultados cada 2.5 minutos. El resultado se puede observar en la siguiente figura.

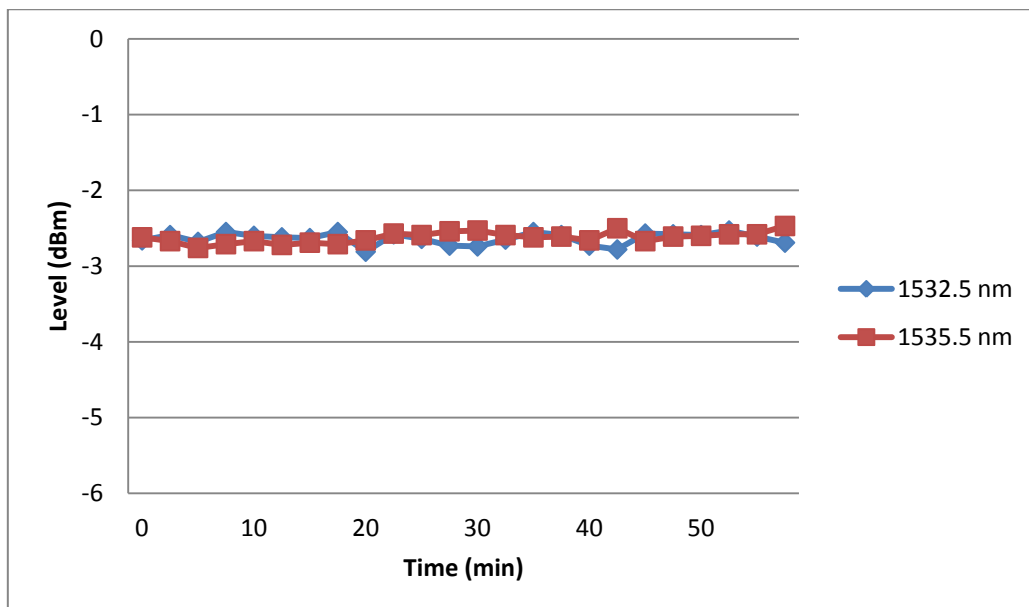


Fig. 49: Estabilidad laser ER-30 5 metros

Para la longitud de 1532.5nm tenemos un valor medio de -2.635 dBm y una desviación estándar de 0.075dB. Para la longitud de 1535.5nm tenemos un valor medio de -2.622dBm y una desviación estándar de 0.07dB.

5.1.2 Bucle estabilizador

Hasta ahora hemos obtenido unos láseres sin problemas de estabilidad en tres de las cuatro estructuras. Existe una opción de añadir un bucle estabilizador al sistema para que éste pueda ayudar a estabilizar los picos. Esta opción consiste en añadir un acoplador 70:30 después de la fibra fuertemente dopada con erbio. La rama del 70% se conectará al circulador y la rama del 30% se volverá a conectar a la entrada del acoplador después de viajar sobre una longitud determinada de SMF. El nuevo esquema de nuestro láser experimental sería el siguiente.

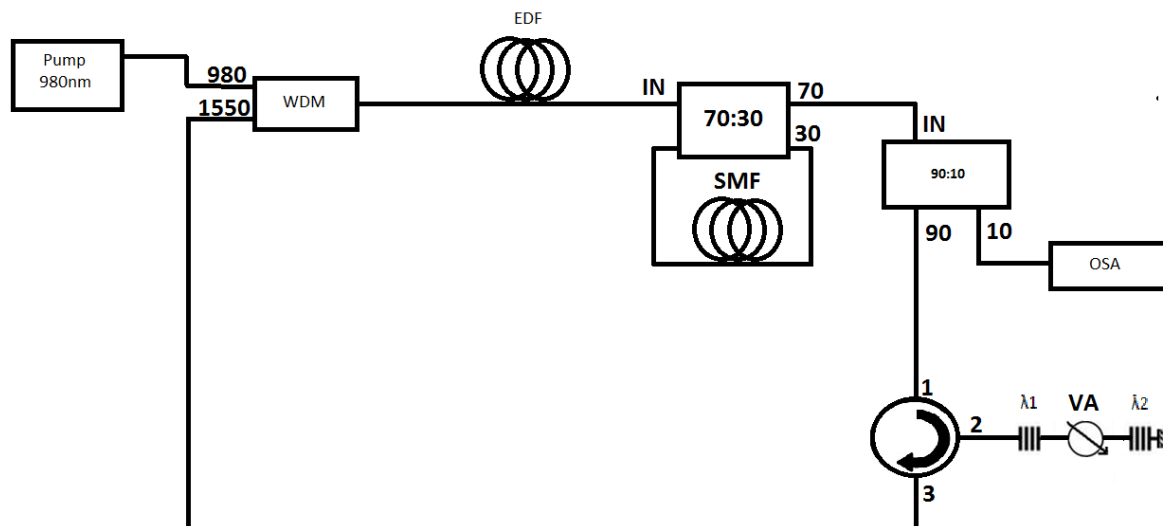


Fig. 50: Láser de fibra monomodo de dos longitudes de onda con bucle de realimentación

Según algunas publicaciones [23], el mero hecho de enviar la señal dentro de un bucle de fibra SMF de 1km de longitud, tiende a estabilizar los diferentes picos que se producen por consecuencia de la competencia de los FBGs por la ganancia. Por lo tanto, vamos a intentar ver lo que ocurre cuando metemos carretes de 1km y 2km de SMF. En principio no creo que se pueda estabilizar más la I-25 de 2.5 metros, la ER-80 de 1 metro y la ER-30 de 5 metros pero con la I-25 de 5 metros puede que los resultados mejoren, aun así analizaremos con las cuatro EDF.

I-25 longitud 2.5 metros

Como deducíamos para este caso el bucle no ayuda a estabilizar, al contrario lo desestabiliza. Otro inconveniente que tiene este bucle es la pérdida de potencia que se produce a consecuencia de conectar un nuevo acoplador. En la siguiente figura se muestra los resultados obtenidos en las mediciones.

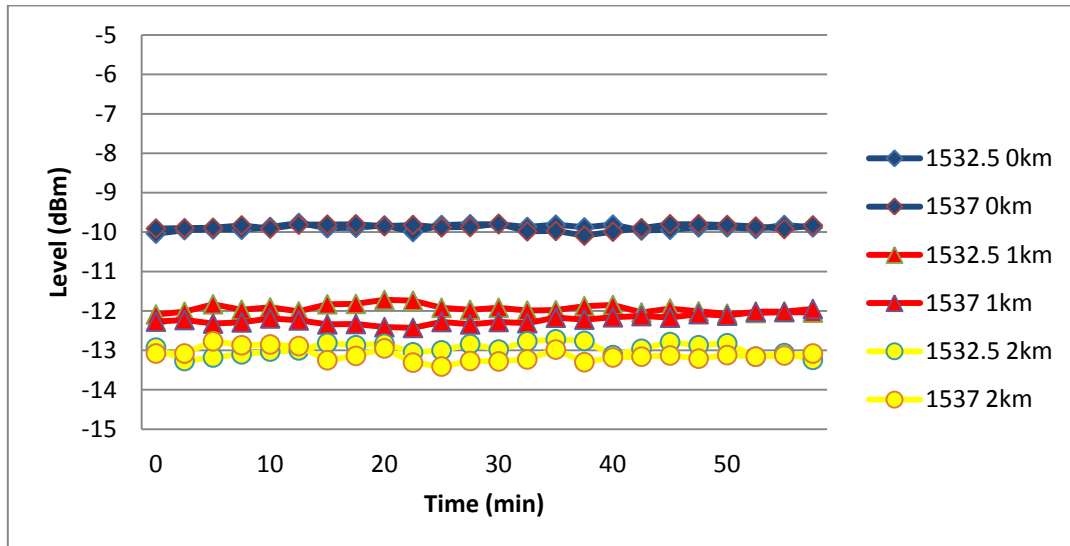


Fig. 51: Comparaciones medidas con bucle I-25 longitud 2.5 metros

I-25 longitud 5 metros

Para el caso de nuestra estructura con peores resultados de estabilidad, sí que aumenta la estabilidad del sistema en el caso de añadir un carrito de 2km. Para la longitud de 1535.5nm tenemos un valor medio de -25.389 dBm (0.5dB menor) y una desviación estándar de 0.244dB (0.5dB menor). Para la longitud de 1545nm tenemos un valor medio de -26dBm (1.7dB menor) y una desviación estándar de 0.329dB (0.3 dB menor).

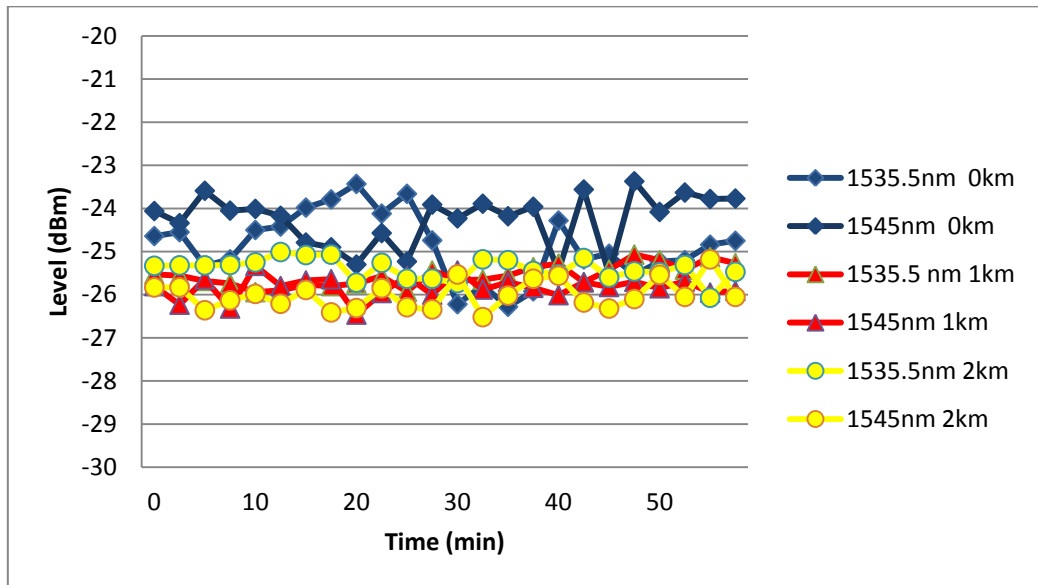


Fig. 52: Comparaciones medidas con bucle I-25 longitud 5 metros

ER-80 longitud 1 metro

Para el ER-80 el bucle no ayuda a estabilizar, al contrario lo desestabiliza. En la siguiente figura se muestran los resultados obtenidos en las mediciones.

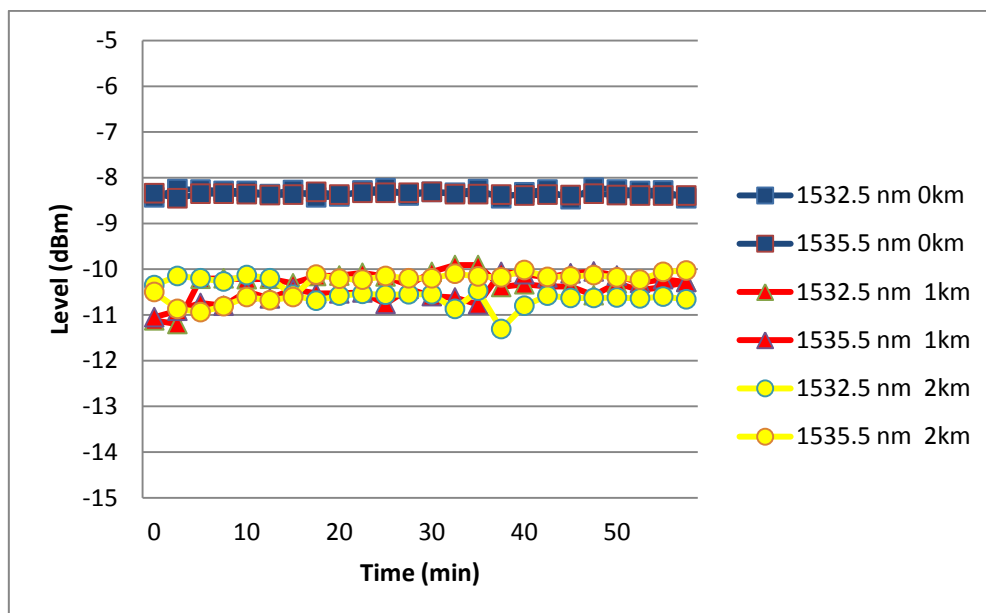


Fig. 53: Comparaciones medidas con bucle ER-80 longitud 1 metro

ER-30 longitud 5 metros

Para el ER-30 el bucle tampoco ayuda a estabilizar, al contrario lo desestabiliza. En la siguiente figura se muestra los resultados obtenidos en las mediciones.

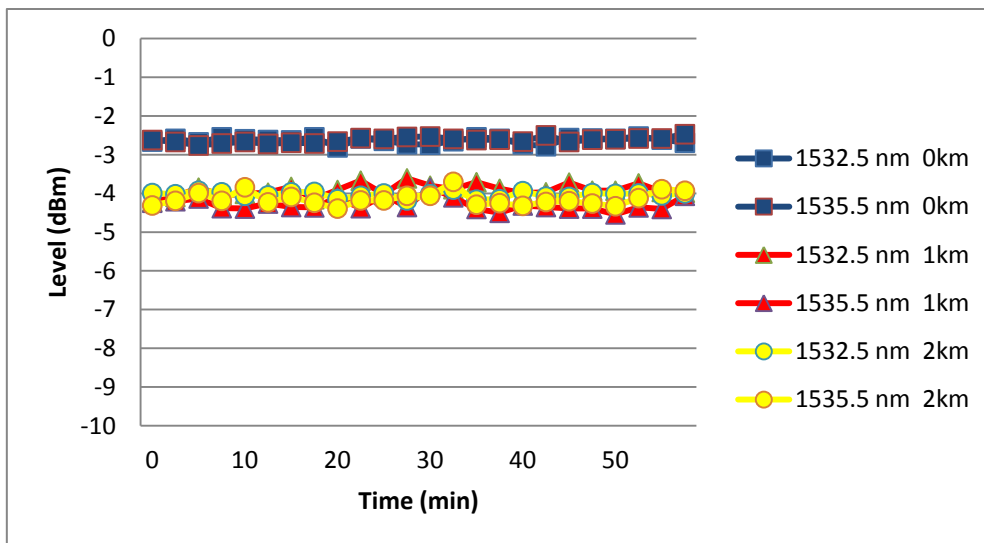


Fig. 54: Comparaciones medidas con bucle ER-30 longitud 5 metros

5.1.3 Sensores de temperatura

Para finalizar el análisis de esta estructura utilizaremos los FBGs como sensores de temperatura, para este proceso tenemos en nuestro laboratorio una cámara climática. Para poder medir la variación en longitud de onda, insertaremos los dos FBGs dentro de la cámara climática y mediremos su respuesta al cambio de temperatura.

Debemos de tener mucho cuidado al meter los FBGs, es de vital importancia que sólo se introduzcan los FBGs sin ningún tipo de conector que pueda variar los resultados. De la misma manera, tendremos que dejar fuera el atenuador que se encuentra entre los dos FBGs como podemos observar en la siguiente figura.

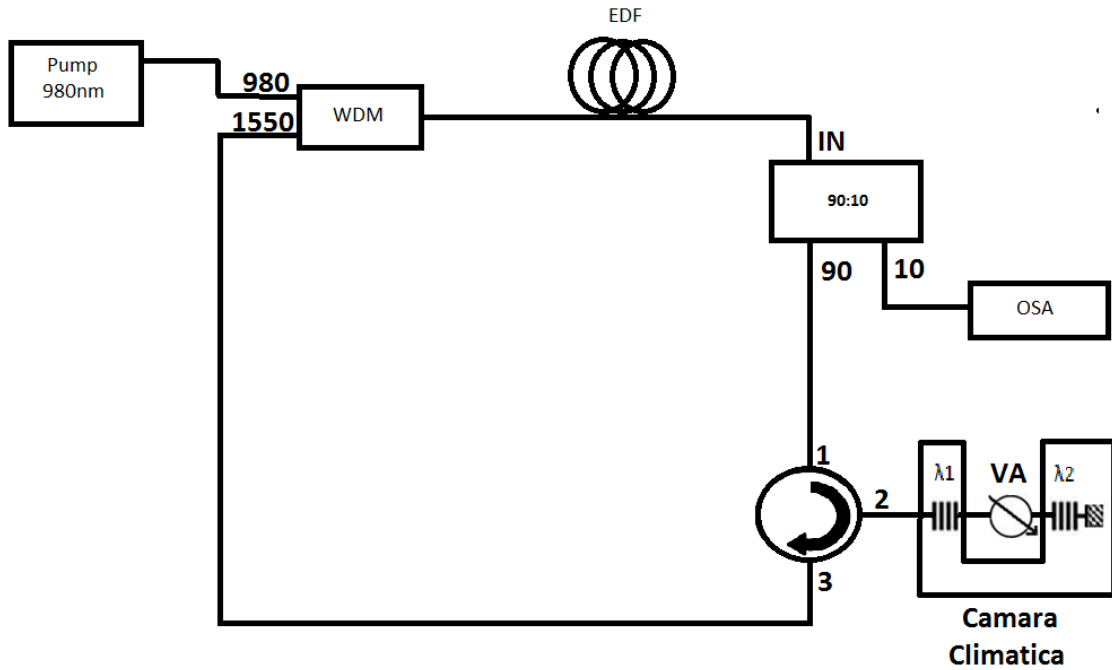


Fig. 55: Láser 2FBGs sensor de temperatura

Las medidas realizadas han ido desde los 25°C hasta los 60°C, midiendo el desplazamiento en longitud de onda cada 5°C. No hemos visto la necesidad de medir con las cuatro EDF, por lo tanto los siguientes datos son de la fibra ER-30, con el que hemos tenido los mejores resultados.

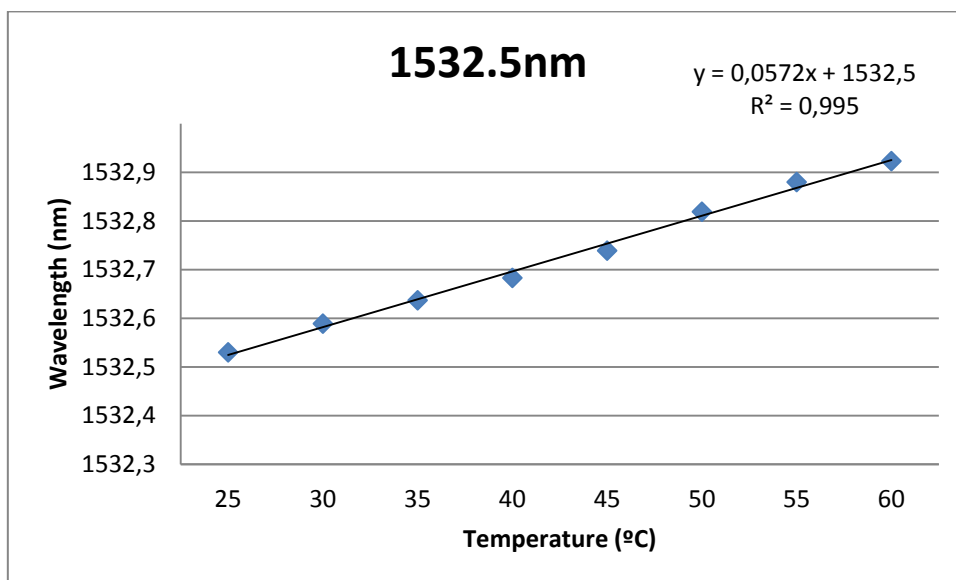


Fig. 56: Medidas temperatura 2FBGs 1532.5nm

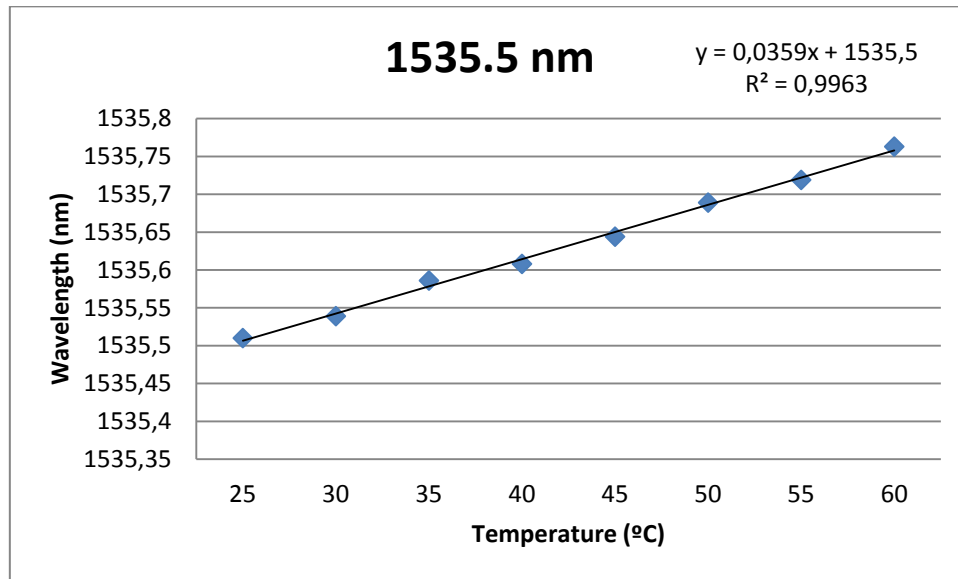


Fig. 57: Medidas temperatura 2FBGs 1535.5nm

La respuesta del aumento de temperatura respecto a la longitud de onda presenta un comportamiento bastante lineal como se puede ver en las figuras. Con el FBG de 1532.5nm hemos medido un desplazamiento total de 0.393nm y con el FBG de 1535.5nm hemos medido un desplazamiento total menor, exactamente de 0.253nm. En la siguiente tabla que adjuntamos tenemos datos estadísticos sobre las medidas realizadas.

FBG	Desplazamiento Total	Desplazamiento medio sobre 5°C	Desplazamiento medio sobre 1°C	Pendiente	Ajuste línea/datos
1532.5nm	0.393nm	56.14pm	11.12pm	0.0572	99.5%
1535.5nm	0.253nm	36.14pm	7.22pm	0.0359	99.63%

Tabla 2: Datos estadísticos sensor de temperatura de 2 FBGs

5.2 Láser de triple canal de fibra dopada con erbio mediante FBGs en serie

El siguiente paso es añadir otro FBG en la rama para implementar un láser de tres canales. En la siguiente figura se puede observar el esquema de nuestro láser experimental propuesto.

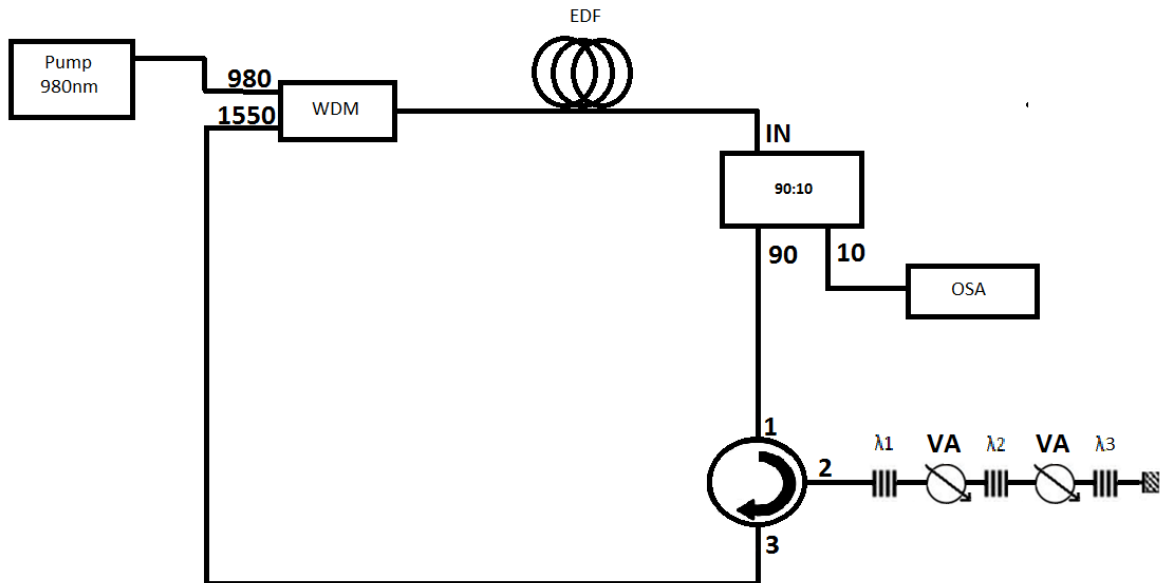


Fig. 58: Láser de fibra monomodo de tres canales para aplicaciones de sensado

La única diferencia de esta estructura ante el de doble canal se encuentra en la rama de los FBGs. Dentro de esta rama necesitamos añadir un FBG y un atenuador óptico variable para la ecualización de nuestros tres picos. Es de vital importancia colocar los FBGs en orden ascendente de ganancia, de tal manera que el primer FBG de la rama se corresponda con la menor ganancia y el ultimo se corresponda con la mayor ganancia como podemos observar en la siguiente imagen.

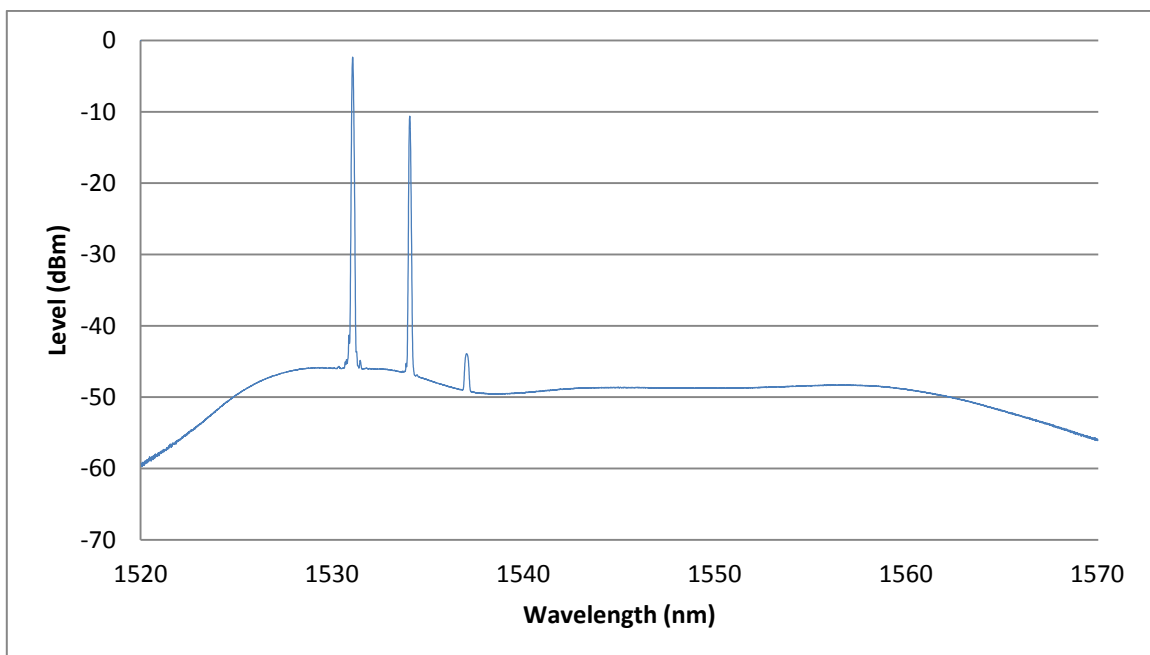


Fig. 59: Láser tres canales sin atenuadores.

FBG	
λ_1	1537nm
λ_2	1534nm
λ_3	1531nm

Tabla 3: Longitudes de onda 3 FBGs

Ahora que la competencia entre modos es mayor que con dos canales, la dificultad para ecualizarlos aumenta, por lo tanto necesitamos que el primer FBG tenga menor ganancia que los dos siguientes y que el segundo también tenga menor ganancia que el tercero. En teoría si la curva de la ganancia fuese plana, esta debería de ser igual o muy parecida para todos los canales, ya que en cada FBG se refleja sólo una longitud de onda y el resto de señal no se modifica. Pero en realidad, podíamos decir que la primera longitud de onda que se refleja tiende a ganar más potencia ya que nos encontramos con pérdidas de inserción en los FBGs y los atenuadores, estas pérdidas suelen ser muy bajas pero aun así afectan mucho en la competencia de los modos.

5.2.1 Análisis de los resultados

A continuación analizaremos los resultados obtenidos con el erbio que mejores resultados nos ha dado en el apartado anterior (ER-30 de 5 metros). Se ha intentado generar un láser con las longitudes de ondas más cercanas posible respetando la ecualización y la estabilidad en todo momento. Para ecualizar los picos hemos tenido que utilizar dos atenuadores ópticos variables, el primero de la rama hemos tenido que atenuar 1.4dB y el ultimo de la rama hemos tenido que atenuar 1.2dB.

ER-30 longitud 5 metros

Nuestro EDF nos ha permitido ecualizar 3 canales de 1531nm, 1534nm y 1537nm con potencias de pico que llegan hasta los -6.7 dBm. En cuanto a los niveles de OSNR superan los 35dB. Si comparamos con los resultados del apartado anterior se puede apreciar una pérdida de potencia de pico de unos 4.5dB y un OSNR 10dB menor. Aun así podemos concluir que son unos buenos resultados desde el punto de vista de potencia.

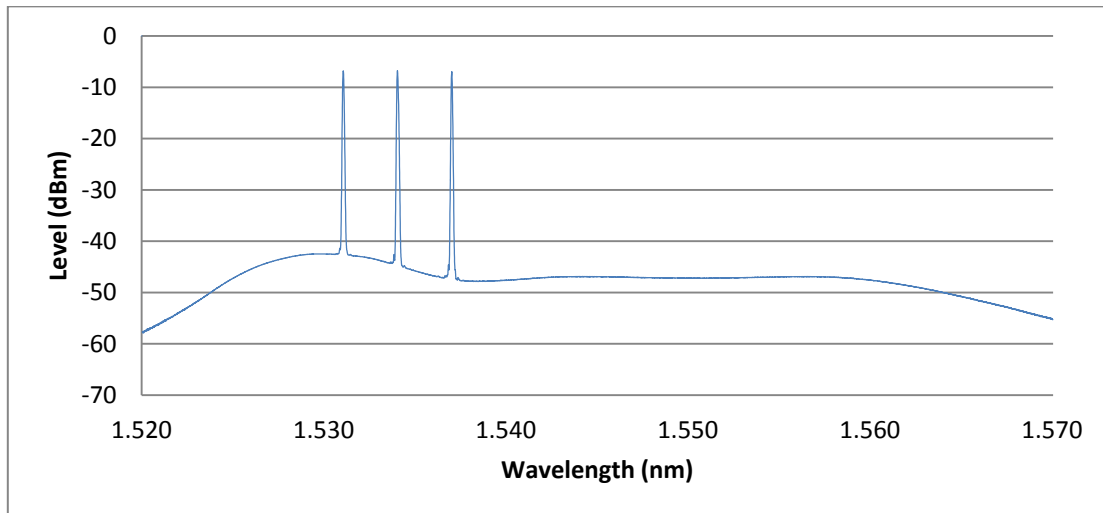


Fig. 60: Laser ER-30 5 metros 3 canales

Para medir la estabilidad de nuestro láser, hemos decidido al igual que en el apartado anterior, realizar medidas cada 2.5 minutos durante un total de 60 minutos. En la siguiente figura se muestran los datos conseguidos.

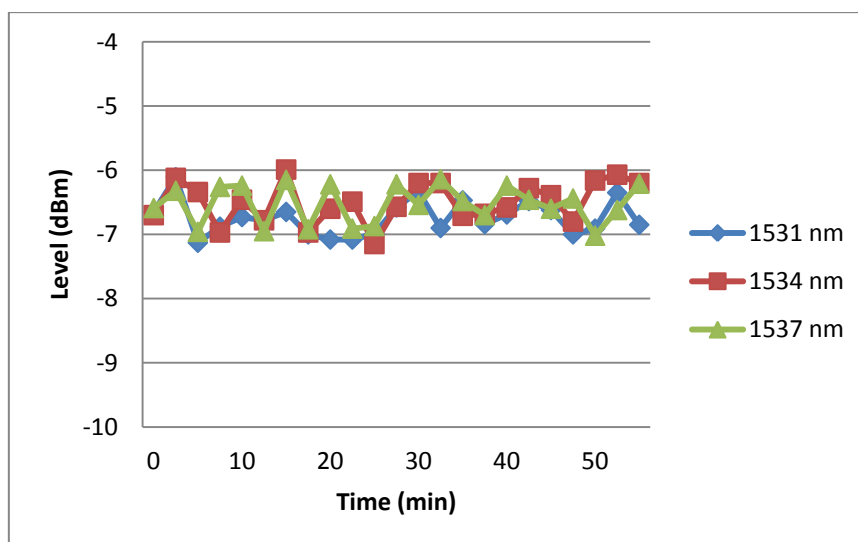


Fig. 61: Estabilidad láser ER-30 5 metros 3 canales

Para la longitud de 1531nm tenemos un valor medio de -6.72dBm y una desviación estándar de 0.393dB. Para la longitud de 1534nm tenemos un valor medio de -6.48dBm y una desviación estándar de 0.439dB. Para la longitud de 1537nm tenemos un valor medio de -6.54dBm y una desviación estándar de 0.413dB. Son unos valores muy buenos al tener una desviación menor de 0.5dB para los 3 casos.

5.2.2 Bucle estabilizador

Aunque los resultados sean bastante estables, vamos a intentar estabilizarlos más con el bucle estabilizador. En cuanto a los resultados de este bucle, en la mayoría de casos del apartado anterior sólo hemos conseguido mejorar la estabilidad en una de las cuatro fibras dopadas de erbio, en concreto la fibra que nos daba los peores resultados de estabilidad. En la siguiente figura vemos los resultados conseguidos sin bucle, con bucle de 1km de SMF y con bucle de 2km de SMF.

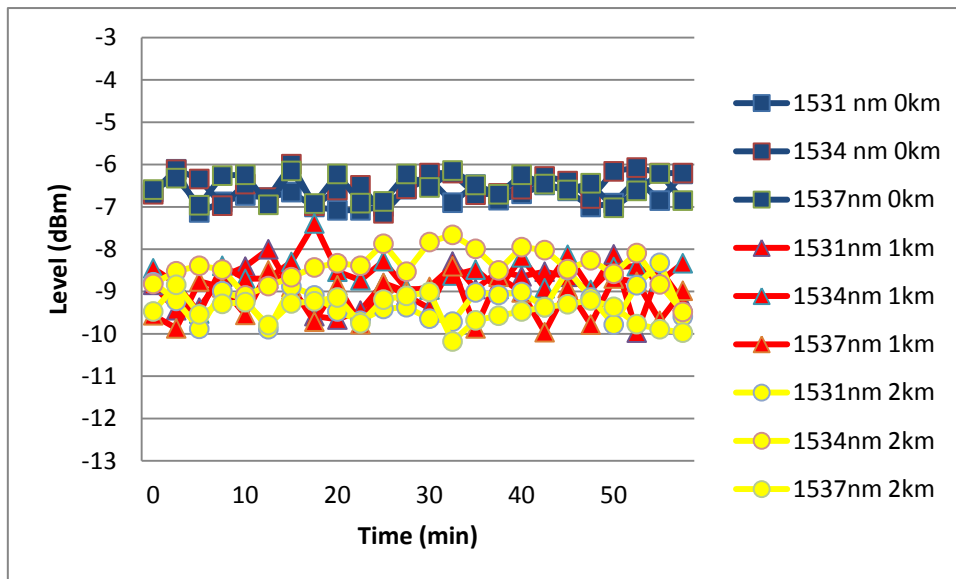


Fig. 62: Comparaciones medidas con bucle ER-30 longitud 5 metros con 3FBG

Al igual que en el apartado anterior el bucle no ayuda a estabilizarlo sino que lo desestabiliza más en orden de a unos 2dB. Aparte de desestabilizarlo perdemos 2dB extra de potencia.

5.2.3 Sensores de temperatura

Para finalizar el análisis de esta estructura utilizaremos los FBGs como sensores de temperatura. Para poder medir la variación en longitud de onda, insertaremos los tres FBGs dentro de la cámara climática y mediremos su respuesta al cambio de temperatura.

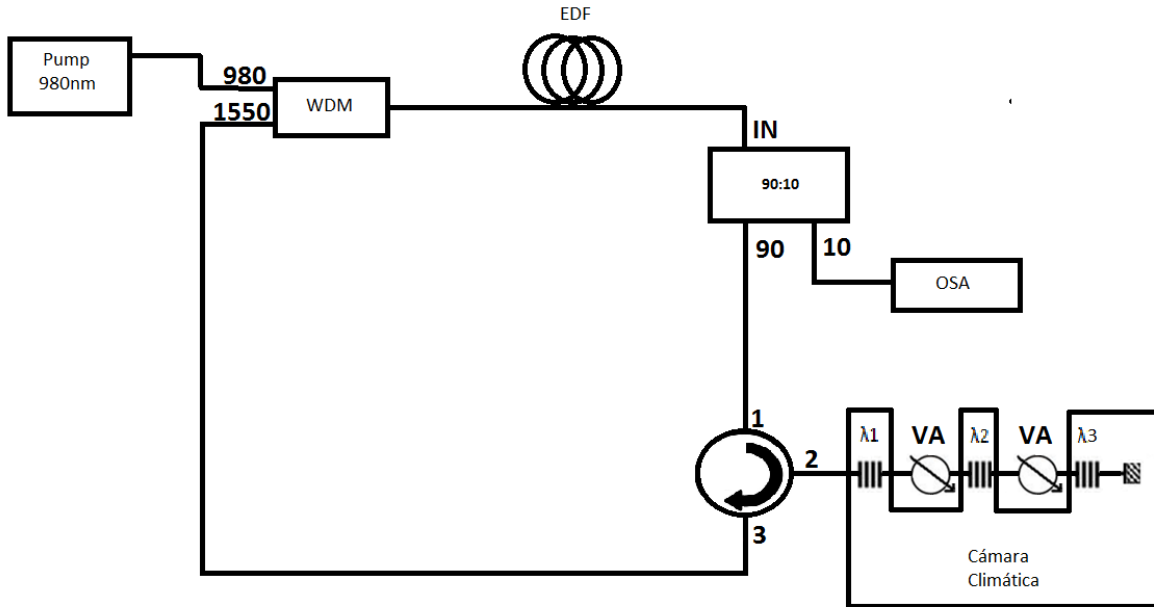


Fig. 63: Laser 3FBGs sensor de temperatura

Las medidas realizadas han ido desde los 25°C hasta los 60°C, midiendo el desplazamiento en longitud de onda cada 5°C.

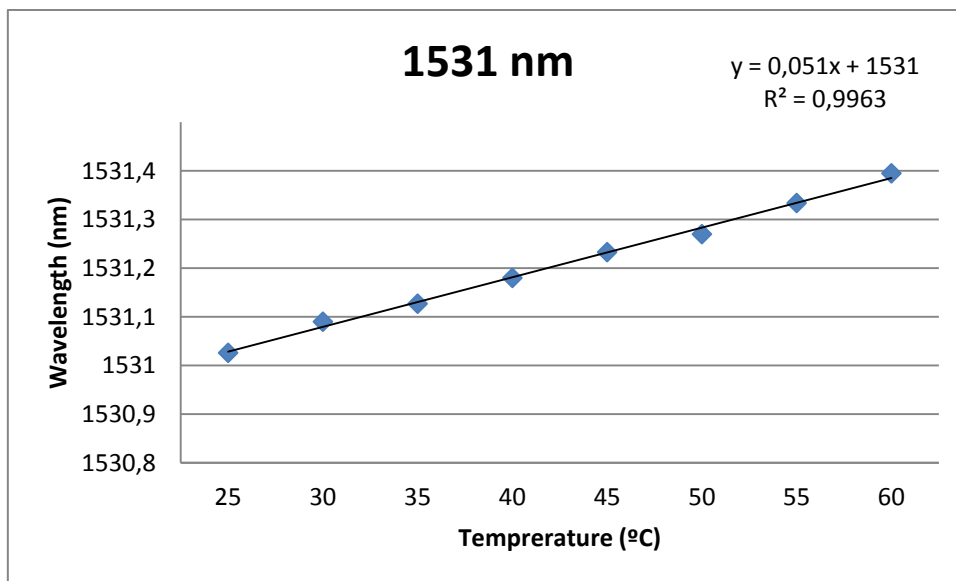


Fig. 64: Medidas temperatura 3FBGs 1531nm

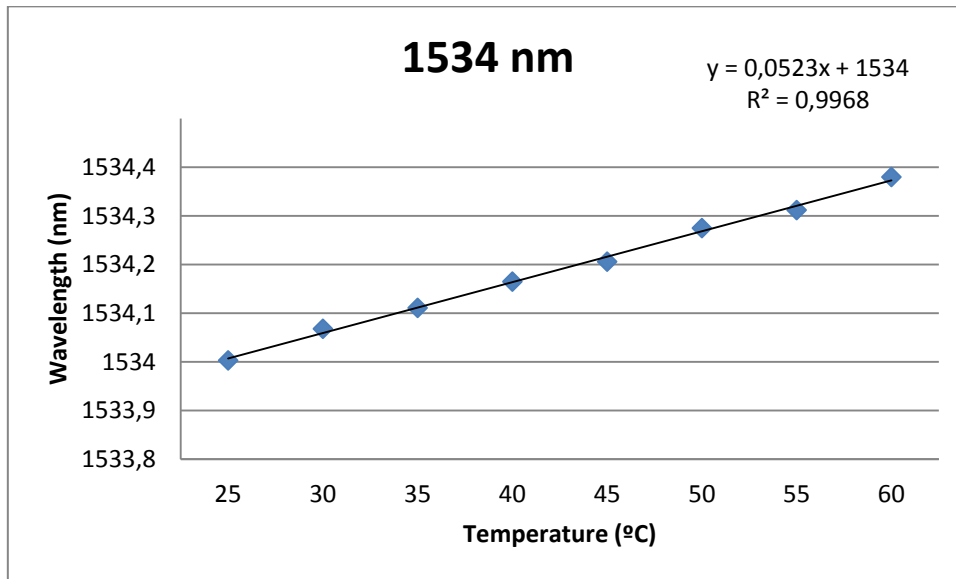


Fig. 65: Medidas temperatura 3FBGs 1534nm

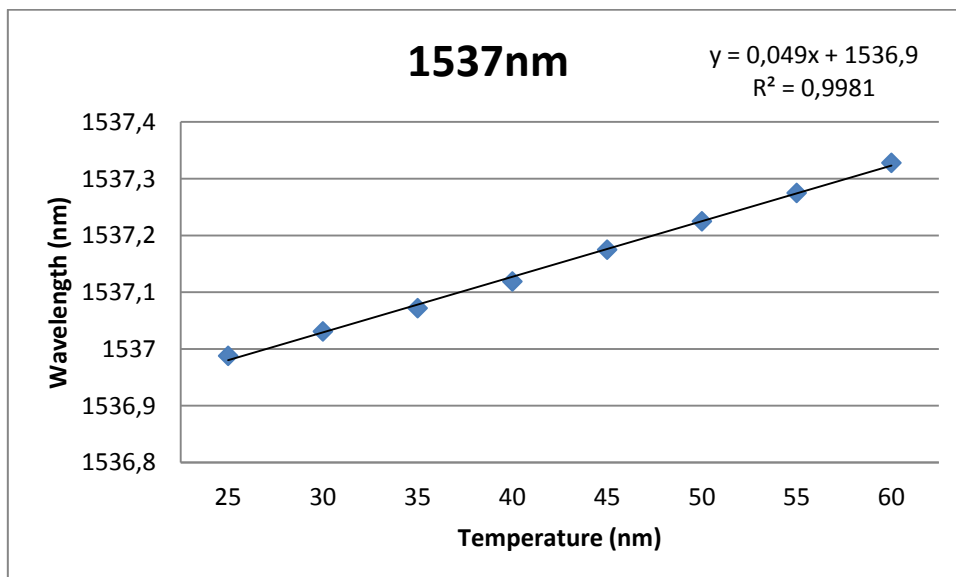


Fig. 66: Medidas temperatura 3FBGs 1537nm

La respuesta del aumento de temperatura respecto a la longitud de onda presenta un comportamiento bastante lineal como se puede ver en las figuras. Con el FBG de 1531nm hemos medido un desplazamiento total de 0.369nm, con el FBG de 1534nm hemos medido un desplazamiento total de 0.377nm y con el FBG de 1537nm hemos medido un desplazamiento total de 0.34nm. En la siguiente tabla que adjuntamos tenemos datos estadísticos sobre las medidas realizadas.

FBG	Desplazamiento Total	Desplazamiento medio sobre 5°C	Desplazamiento medio sobre 1°C	Pendiente	Ajuste línea/datos
1531nm	0.369nm	46.12pm	9.22pm	0.051	99.63%
1534nm	0.377nm	47.12pm	9.42pm	0.0523	99.68%
1537nm	0.34nm	42.5pm	8.5pm	0.049	99.81%

Tabla 4: Datos estadísticos sensor de temperatura de 3 FBGs

5.3 Láser de cuádruple canal de fibra dopada con erbio mediante FBGs en serie

Para finalizar con este estudio, llegaremos al límite que nos ofrece nuestra estructura. Para ello añadiremos un cuarto FBG como se puede observar en la siguiente figura.

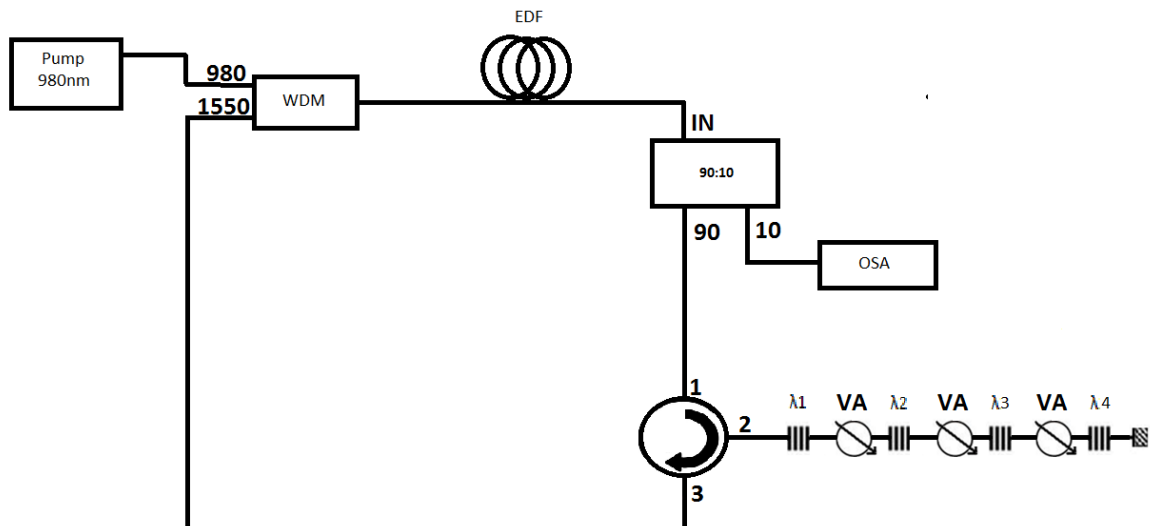


Fig. 67: Láser de fibra monomodo de cuatro canales para aplicaciones de sensado

En esta ocasión disponemos de cuatro FBGs y tres atenuadores ópticos variables con los que intentaremos ecualizar los picos. Las longitudes de onda de los FBGs son las siguientes.

FBG	
λ1	1537nm
λ2	1535.5nm
λ3	1534nm
λ4	1532.5nm

Tabla 5: Longitudes de onda 4 FBGs

Al tratarse de cuatro FBGs, la competencia entre ellos es muy grande y esto conlleva a mayores inestabilidades en la estructura. El proceso que se ha llevado a cabo para la ecualización trata en estabilizar los canales progresivamente. El primer paso para ello ha sido la ecualización de los dos últimos FBGs de la rama (λ_4 y λ_3), una vez ecualizados los dos últimos FBGs hemos intentado ecualizar estos dos FBGs con el anterior (λ_2) y para finalizar hemos ecualizado los cuatro FBGs mediante el uso del primer atenuador óptico variable. Es un proceso muy sensible, donde el mínimo cambio en los atenuadores como el desplazamiento de algún dispositivo conlleva poder perder la estabilidad del sistema.

5.3.1 Análisis de los resultados

A continuación analizaremos los resultados obtenidos con el erbio que mejores resultados nos ha dado hasta ahora (ER-30 de 5 metros). Se ha intentado generar un láser con las longitudes de ondas más cercanas posibles sin la necesidad de respetar la estabilidad como en los casos anteriores. En este caso, nuestro principal objetivo es llegar al límite de la estructura como lo hemos mencionado antes. Para ecualizar los picos hemos tenido que utilizar tres atenuadores ópticos variables, en el primero de la rama hemos tenido que atenuar 0.5dB, en el segundo 1.8dB y en el último de la rama hemos tenido que atenuar 1.1dB.

ER-30 longitud 5 metros

Hemos intentado ecualizar 4 canales de 1532.5nm, 1534nm, 1535.5nm y 1537nm con potencias de pico que llegan hasta los -15 dBm. En cuanto los niveles de OSNR, superamos los 20dB en los cuatro casos. El intentar generar un láser de cuatro canales nos conlleva una gran pérdida en potencia como en OSNR, si lo comparamos con los resultados del láser de tres canales se puede apreciar una disminución en potencia de pico de unos 8dB y un OSNR 15dB menor. Aun así podemos concluir que son unos buenos resultados desde el punto de vista de potencia dado que la distancia entre los picos es la mitad, de tan solo 1.5nm.

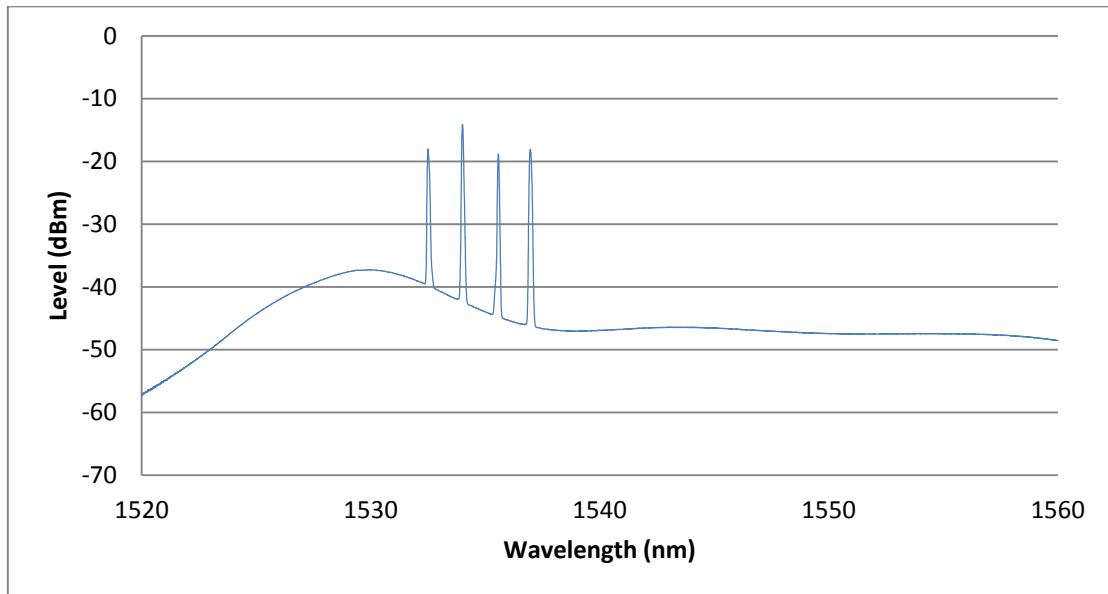


Fig. 68: Laser ER-30 5 metros 4 canales

Para medir la estabilidad de nuestro láser, hemos decidido realizar medidas cada 5 minutos durante un total de 60 minutos. En la siguiente figura se muestran los datos conseguidos.

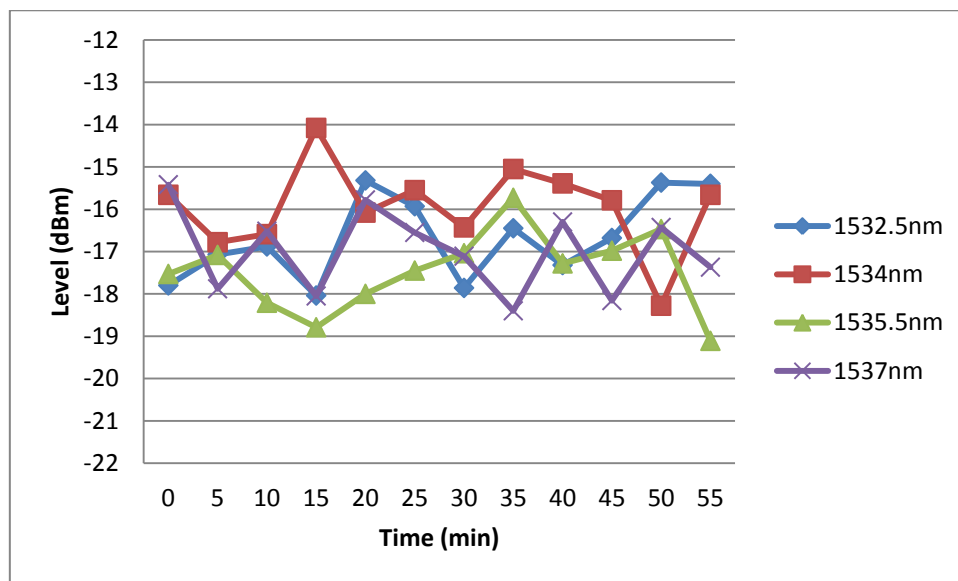


Fig. 69: Estabilidad láser ER-30 5 metros 4 canales

Como se puede apreciar en la figura, son unos valores muy inestables ya que las medidas fluctúan 5dB entre los -14dBm y -19dBm. Para la longitud de 1532.5nm tenemos un valor medio de -16.67dBm y una desviación estándar de 0.953dB. Para la longitud de 1534nm tenemos un valor medio de -15.94dBm y una desviación estándar de 0.989dB. Para la longitud de 1535.5nm tenemos un valor medio de -17.47dBm y una desviación estándar de 0.908dB. Para la longitud de 1537nm tenemos un valor medio de -16.99dBm y una

desviación estándar de 0.938dB. Estadísticamente también son unos resultados malos ya que los cuatro canales tienden a una desviación entorno a 1dB.

5.3.2 Sensores de temperatura

Para finalizar intentaremos medir la variación de la longitud de onda. Para poder medir la variación en longitud de onda, insertaremos los cuatro FBGs dentro de la cámara climática y mediremos su respuesta al cambio de temperatura.

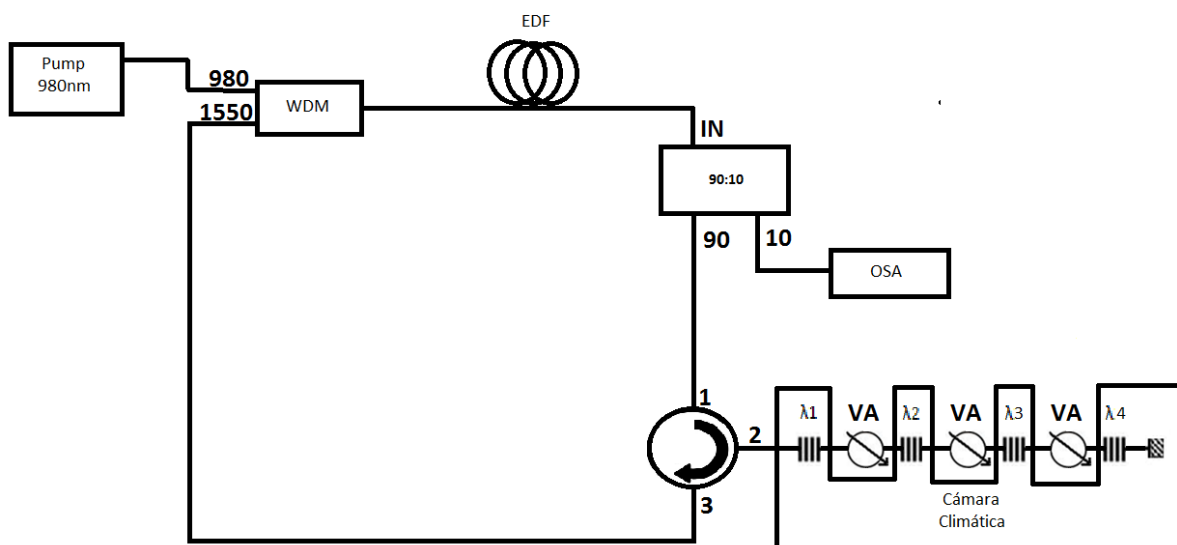


Fig. 70: Laser 4 FBGs sensor de temperatura

Las medidas realizadas han ido desde los 25°C hasta los 60°C, midiendo el desplazamiento en longitud de onda cada 5°C.

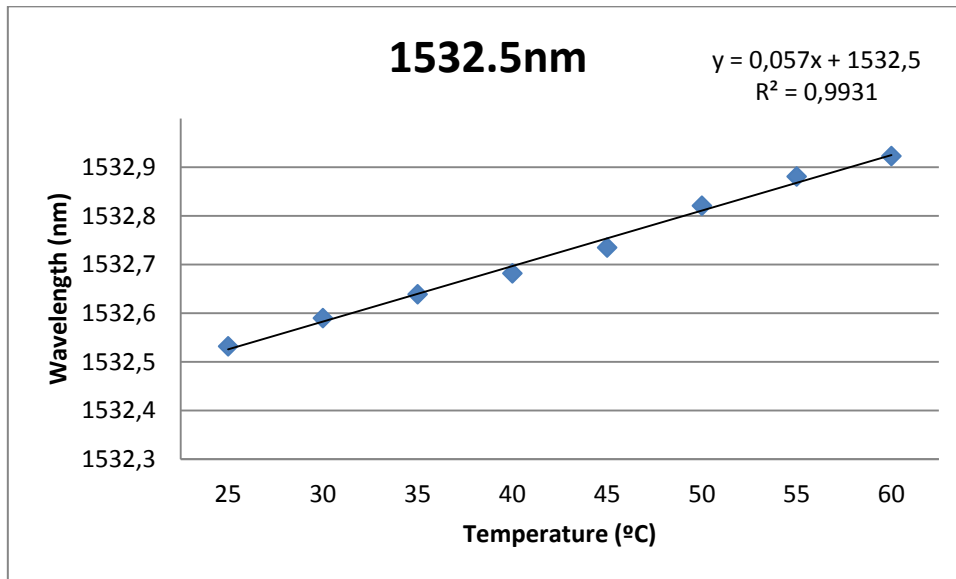


Fig. 71: Medidas temperatura 4 FBGs 1532.5nm

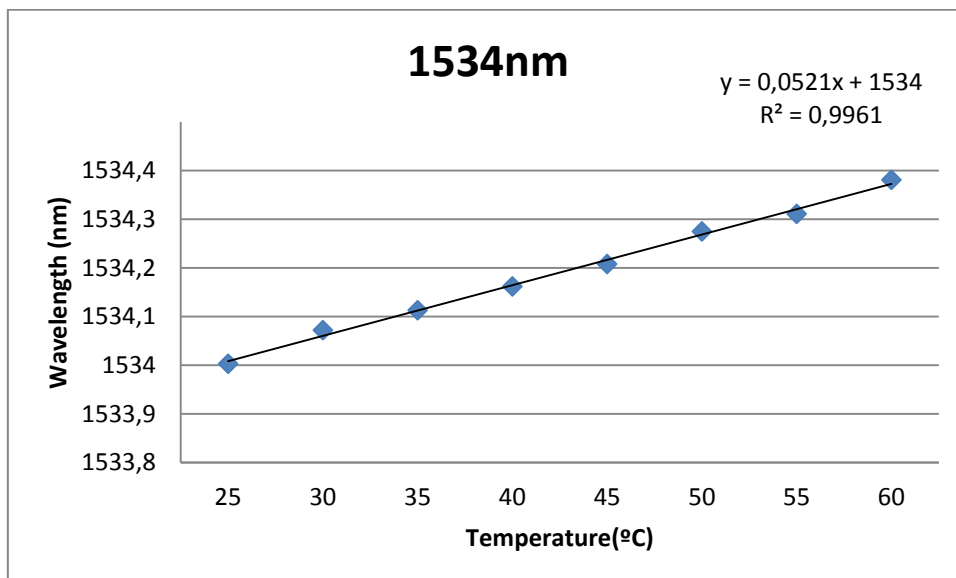


Fig. 72: Medidas temperatura 4 FBGs 1534nm

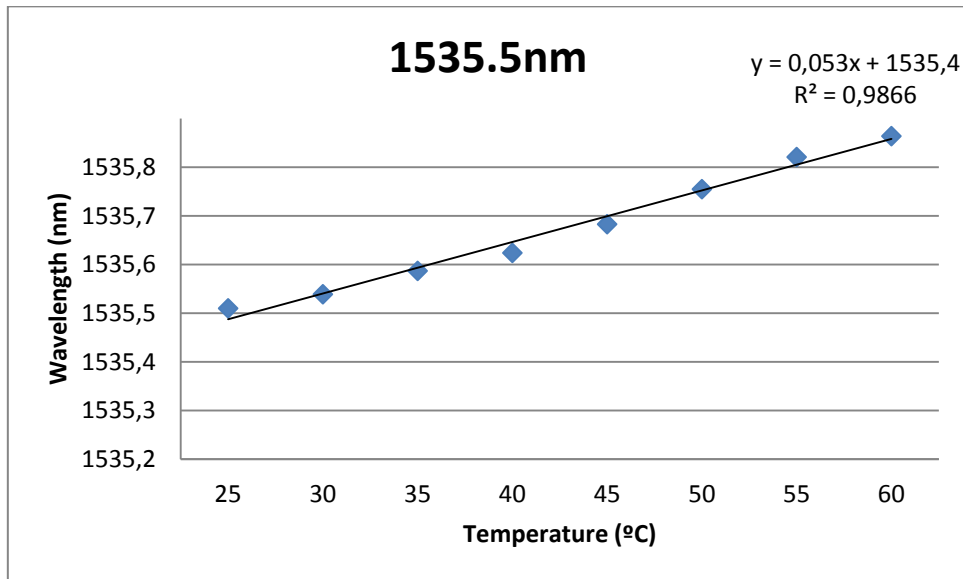


Fig. 73: Medidas temperatura 4 FBGs 1535.5nm

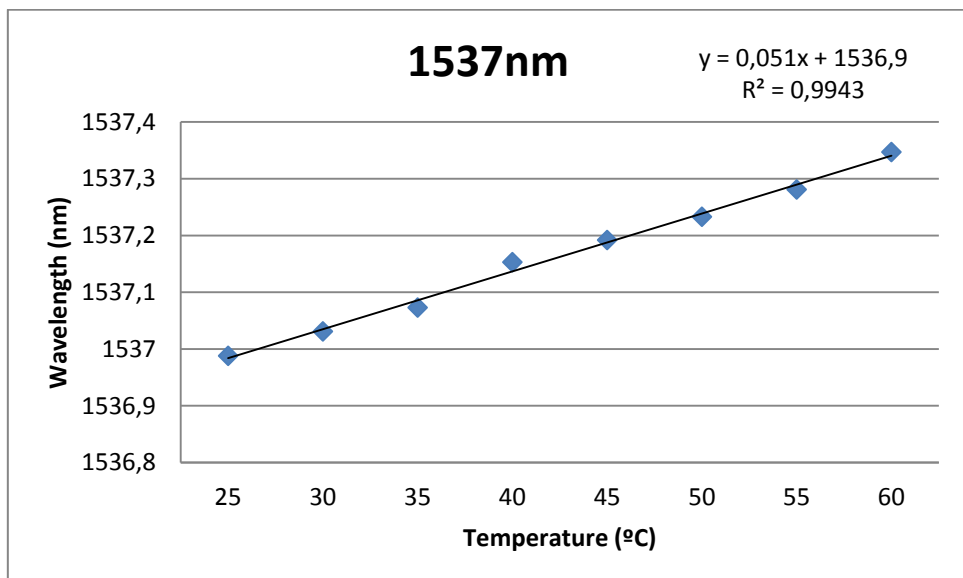


Fig. 74: Medidas temperatura 4 FBGs 1537nm

La respuesta del aumento de temperatura respecto a la longitud de onda presenta un comportamiento bastante lineal como se puede ver en las figuras. Con el FBG de 1532.5nm hemos medido un desplazamiento total de 0.391nm, con el FBG de 1534nm hemos medido un desplazamiento total de 0.378nm, con el FBG de 1535.5nm hemos medido un desplazamiento total de 0.354nm y con el FBG de 1537nm hemos medido un desplazamiento total de 0.359nm. En la siguiente tabla que adjuntamos tenemos datos estadísticos sobre las medidas realizadas.

FBG	Desplazamiento Total	Desplazamiento medio sobre 5°C	Desplazamiento medio sobre 1°C	Pendiente	Ajuste línea/datos
1532.5nm	0.391nm	48.87pm	9.77pm	0.057	99.31%
1534nm	0.378nm	47.25pm	9.45pm	0.0521	99.61%
1535.5nm	0.354nm	44.25pm	8.85pm	0.053	98.66%
1537nm	0.359nm	44.87pm	8.97pm	0.051	99.43%

Tabla 6: Datos estadísticos sensor de temperatura de 4 FBGs

5.4 Láser de fibra dopada con erbio de doble anillo con 4FBGs

Una vez implementada nuestra estructura, lo intentábamos estabilizar mediante el bucle de realimentación. Dado el poco éxito de esta estructura hemos implementado otro sistema con el que podamos ganar estabilidad. La estructura en analizar e implementar en el laboratorio fue un láser de cuatro canales, pero esta vez añadimos otra cavidad. De esta forma el número de modos así como su separación será diferente para cada caso. En la siguiente figura se puede ver el esquema experimental del láser propuesto.

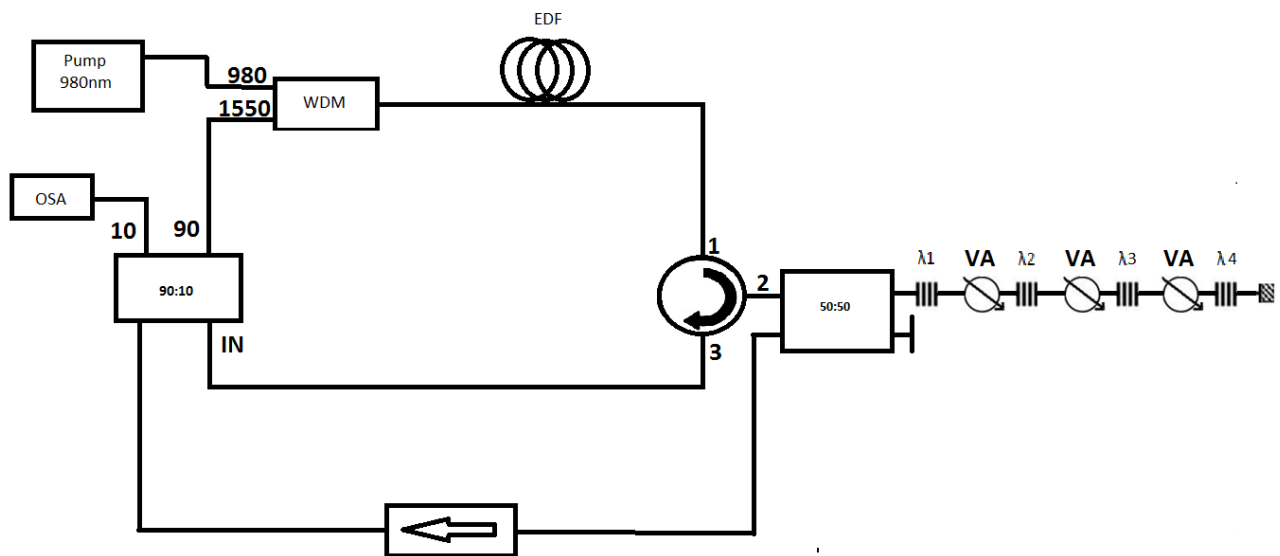


Fig. 75: Láser de fibra monomodo de cuatro canales con doble cavidad

Este láser tiene doble cavidad de realimentación con el que se consigue una mayor estabilidad en el sistema. El funcionamiento del sistema se pretende que sea el siguiente:

- El funcionamiento del EDFA es el mismo que en la anterior estructura, pero en este caso después del erbio colocamos un circulador que redirige la señal a un acoplador 50:50 por la segunda salida y a un acoplador 90:10 por la tercera salida.

·El acoplador 50:50 es de vital importancia para distribuir las reflexiones de los FBGs a las dos cavidades. La señal que proviene del circulador se dirigirá a la rama de los FBGs, una vez que los FBGs reflejen las longitudes de ondas deseadas se dividirá la señal donde una volverá al circulador y alimentará la primera cavidad y la otra viajará por la segunda cavidad.

· El acoplador 90:10 tiene doble funcionalidad. La primera es la de reincorporar las dos señales que provienen de distintas cavidades y la segunda trata en distribuir la señal, pudiendo enviar un 10% al OSA para su posterior captura de medidas y un 90% al WDM para alimentar el anillo.

· La función del aislador que se encuentra en la segunda cavidad es la de eliminar la onda que se propaga en sentido contrario por el anillo para evitar el fenómeno conocido como *“spatial hole burning”*. Con ello se eliminará la curva característica que obteníamos a la salida del EDFA consiguiendo mejorar el nivel del OSNR

5.4.1 Análisis de los resultados

Para poder determinar que la doble cavidad estabiliza el sistema, hemos realizado las medidas con los mismos dispositivos que en el apartado anterior. En este caso, nuestro principal objetivo será estabilizar todo lo posible el sistema.

ER-30 longitud 5 metros

Hemos intentado ecualizar 4 canales de 1532.5nm, 1534nm, 1535.5nm y 1537nm con potencias de pico que llegan hasta los -26 dBm. En cuanto a los niveles de OSNR, superamos los 40dB en los cuatro casos. El intentar estabilizar un láser de cuatro canales conlleva una gran pérdida en potencia. Si lo comparamos con los resultados del láser de cuatro canales con una cavidad, se puede apreciar una disminución en potencia de pico de unos 10dB, pero gracias al aislador hemos podido aumentar el OSNR en 20dB. Podemos concluir que son unas potencias aceptables aunque hayan disminuido.

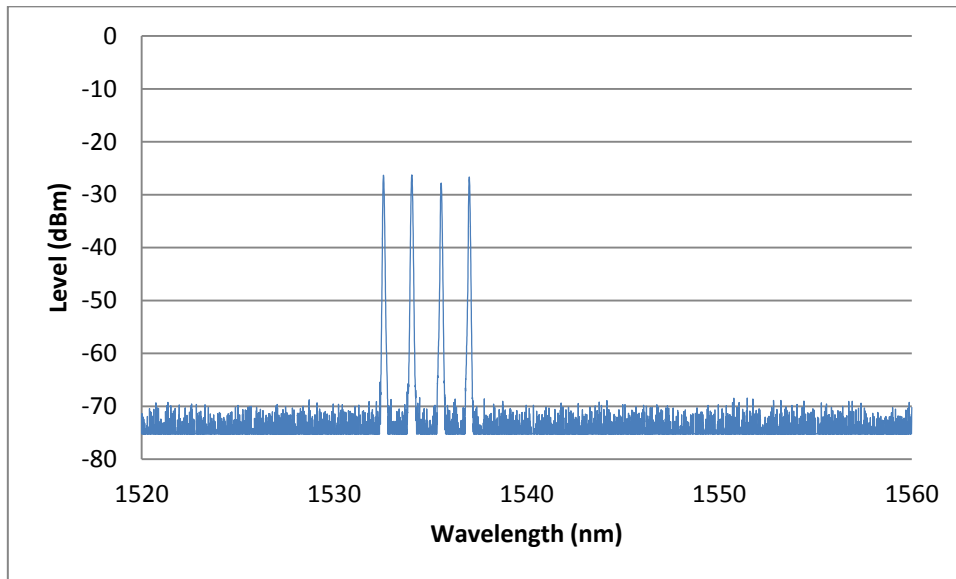


Fig. 76: Láser ER-30 5 metros 4 canales con doble cavidad

Para medir la estabilidad de nuestro láser, hemos decidido realizar medidas cada 5 minutos durante un total de 60 minutos. En la siguiente figura se muestra los datos conseguidos.

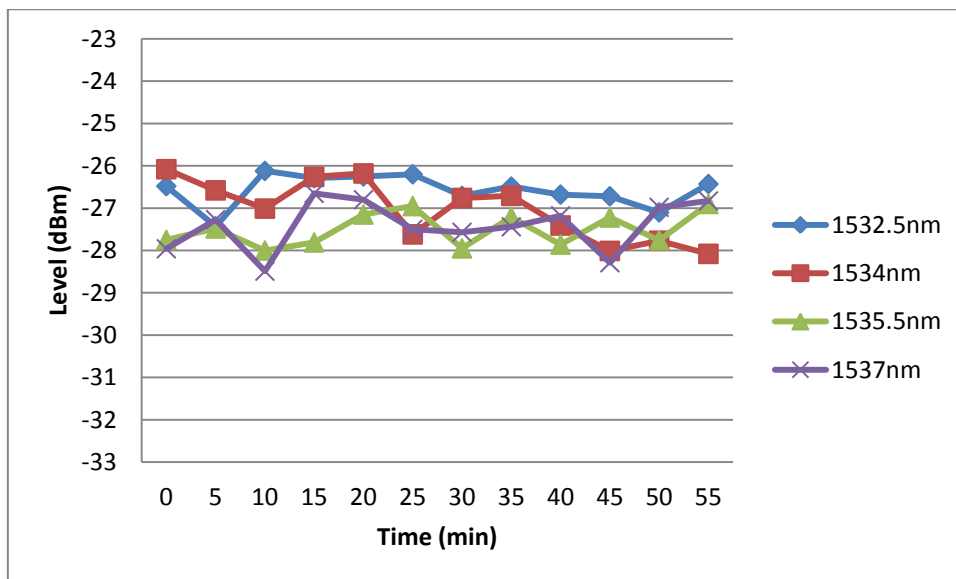


Fig. 77: Estabilidad láser ER-30 5 metros 4 canales con doble cavidad

Nos encontramos con unos valores más estables ya que las medidas fluctúan entorno a los 2dB entre los -26dBm y -28dBm. Para la longitud de 1532.5nm tenemos un valor medio de -26.57dBm y una desviación estándar de 0.368dB. Para la longitud de 1534nm tenemos un valor medio de -27.03dBm y una desviación estándar de 0.689dB. Para la longitud de 1535.5nm tenemos un valor medio de -27.5 dBm y una desviación estándar de 0.382dB. Para la longitud de 1537nm tenemos un valor medio de -27.41dBm y una desviación estándar de 0.564dB. En dos de los cuatro casos la desviación está por debajo de los 0.5dB, en otro caso

está sobre los 0.5dB y en sólo uno de ellos está por encima de los 0.5dB. Por lo tanto, son unos datos muy buenos en tres de los cuatro canales y unos datos aceptables en el peor de los casos, desde el punto de vista de la estabilidad.

5.5 Láser de fibra dopada con erbio de doble anillo con 3FBGs

Para finalizar, hemos realizado una última prueba eliminando un FBG de la rama. En pruebas anteriores con 3FBGs, sólo se nos permitía ecualizar los picos con el erbio ER-30 de longitud de 5 metros ya que con el resto de EDF no conseguíamos estabilidad. En esta ocasión intentaremos ecualizar y estabilizar con la doble cavidad un láser de tres canales con el EDF I-25 de 2.5 metros. La propuesta del láser se puede ver en la siguiente figura.

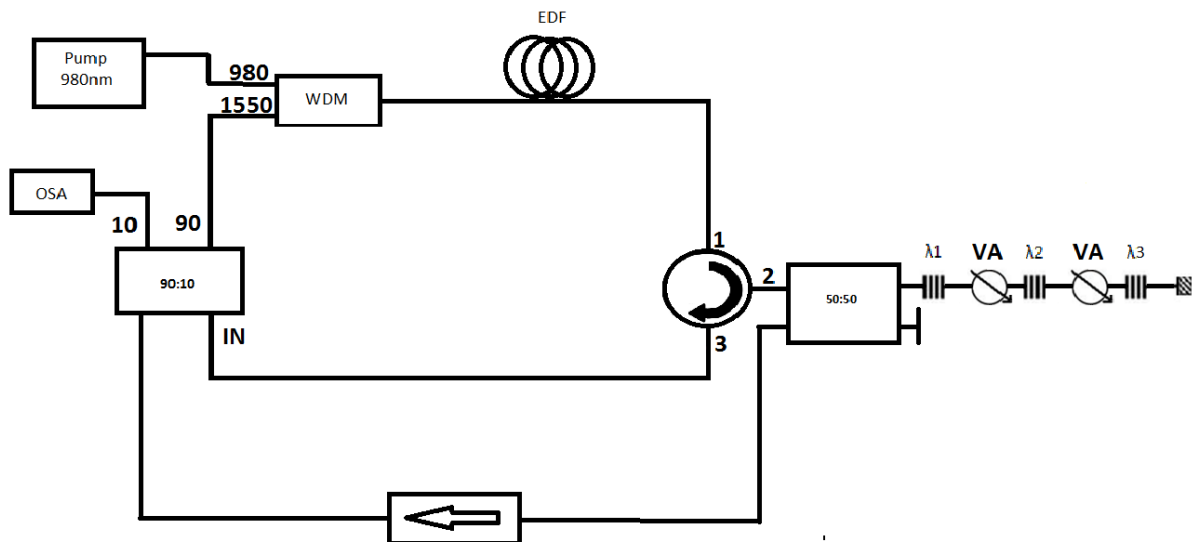


Fig. 78: Láser de fibra monomodo de tres canales con doble cavidad

5.5.1 Análisis de los resultados

En este caso, nuestro principal objetivo será estabilizar un sistema que sin la doble cavidad no era posible.

I-25 longitud 2.5 metros

Hemos intentado ecualizar 3 canales de 1531nm, 1534nm y 1537nm con potencias de pico que llegan hasta los -28 dBm. En cuanto a los niveles de OSNR, superamos los 40dB. Las potencias de pico son considerablemente bajas si las comparamos con las logradas con el

ER-30 con tres canales. Aun así, gracias a la doble cavidad hemos podido estabilizar una estructura que antes no era posible.

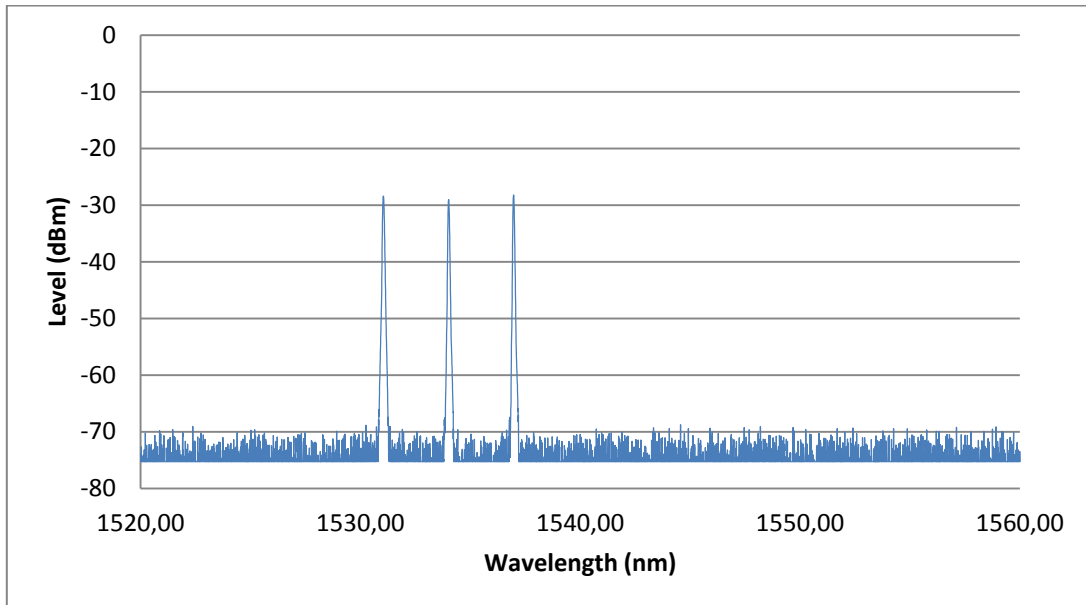


Fig. 79: Láser I-25 2.5 metros 3 canales con doble cavidad

Para medir la estabilidad de nuestro láser, hemos decidido realizar medidas cada 5 minutos durante un total de 60 minutos. En la siguiente figura se muestran los datos conseguidos.

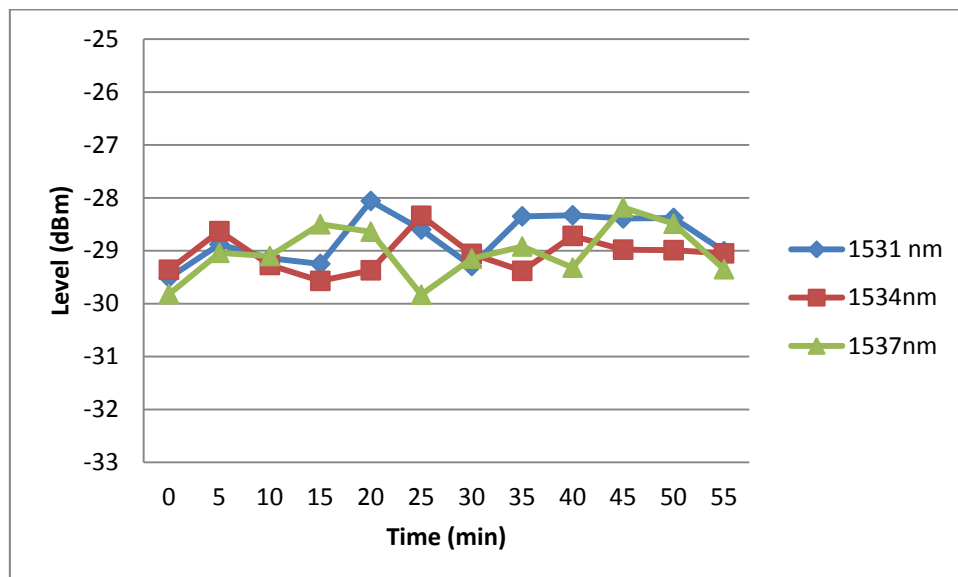


Fig. 80: Estabilidad láser I-25 2.5 metros 3 canales con doble cavidad

Nos encontramos con unos valores bastante estables ya que las medidas fluctúan entorno a los 2dB entre los -28dBm y -30dBm. Para la longitud de 1531nm tenemos un valor medio de

-29.01dBm y una desviación estándar de 0.452dB. Para la longitud de 1534nm tenemos un valor medio de -29.05dBm y una desviación estándar de 0.344dB. Para la longitud de 1537nm tenemos un valor medio de -29.35dBm y una desviación estándar de 0.494dB. En los tres casos obtenemos una desviación menor que 0.5dB, por ello podemos decir que es un sistema estable

5.6 Láser multilínea de fibra dopada con erbio mediante estructuras de FBG mixtas

El diseño del láser que se muestra a continuación tiende a tener una estructura mixta de posicionamiento de FBGs, es decir vamos a utilizar los FBGs en serie como en paralelo. Con ello deseamos conseguir un término medio con la estabilidad que otorgan las estructuras en paralelo y la eficiencia de las estructuras en serie. El diseño del láser propuesto se puede ver en la figura 5.

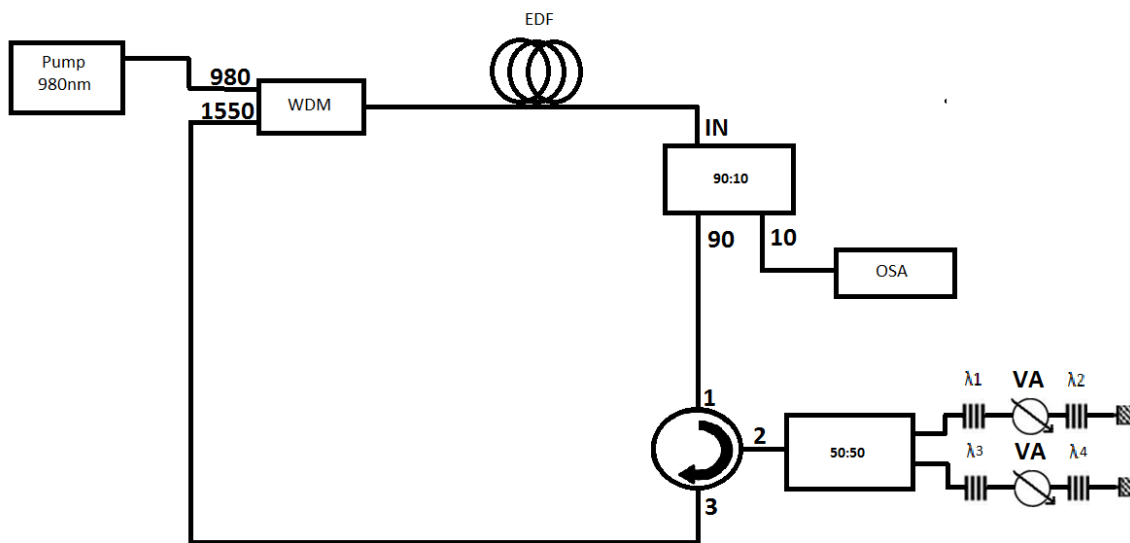


Fig. 81: Láser multi-longitud de onda de fibra dopada con erbio mediante estructuras de FBG mixtas

El funcionamiento es básicamente idéntico que en las primeras estructuras utilizadas. La única diferencia es que después del circulador tenemos un acoplador 50:50 que nos dividirá la señal en dos ramas. Dentro de cada rama tenemos 2 FBGs que intentaremos equalizar independientemente.

5.6.1 Análisis de los resultados

Se ha optado por utilizar el EDF ER-30 de longitud de 5 metros donde las longitudes de onda utilizadas han sido las siguientes:

FBG	
λ_1	1537nm
λ_2	1534nm
λ_3	1535.5nm
λ_4	1532.5nm

Tabla 7: Longitudes de onda estructura mixta

Hemos decidido usar por cada rama 2 FBGs donde la distancia entre sus longitudes de onda reflejadas es de 3nm. Como resultado final a la combinación de las dos ramas, obtenemos 4 canales con 1.5nm de distancia pero a su vez independientes a sus próximas longitudes de onda reflejadas.

El resultado que hemos obtenido no ha sido el esperado, para poder ecualizar cada rama independientemente no teníamos ningún problema pero al ecualizar las dos ramas toda la ganancia se lo llevaba la segunda rama. En la segunda rama se encontraban las longitudes de onda que tenían mayor ganancia según la curva del EDFA, por ello la primera rama no era capaz de competir por la ganancia y se generaban picos de muy baja potencia.

Para solucionar este problema decidimos introducir otro atenuador óptico variable a la entrada de la segunda rama para poder atenuar toda la rama. El atenuador tenía unas pérdidas de inserción entorno a los 0.3 dB, con el que generaba toda la ganancia en la primera rama y dejaba la segunda rama con potencias de pico muy bajas.

6 CONCLUSIONES

En este trabajo final de máster se ha realizado la implementación y estudio de nuevas estructuras láser para su posterior medición de la estabilidad y potencia. Para ello hemos implementado diferentes estructuras con las que hemos obtenido diferentes comportamientos en estabilidad y potencia. Además se ha analizado el comportamiento de estas estructuras respecto a la temperatura con el objetivo de utilizarlos como sensores de temperatura.

A lo largo de los montajes hemos ido aumentando el número de FBGs. Podemos concluir que el aumento de los canales en dichas estructuras conlleva una pérdida de potencia y estabilidad, considerables según el caso.

En cuanto a las estructuras analizadas, decir que el láser de 3 canales mediante el EDF ER-30 ha tenido un comportamiento muy estable y con unas potencias muy buenas. Podríamos decir que es la mejor candidata desde el punto de vista de la eficiencia y cantidad de canales.

Me gustaría recalcar el uso de estructuras estabilizadoras, donde en el primer caso no se han obtenido resultados satisfactorios con el bucle de realimentación pero en el segundo caso hemos visto como el comportamiento del láser se estabilizaba gracias a la inserción de una nueva cavidad.

7 LINEAS FUTURAS

Hoy en día, se han implementado diferentes topologías de láser. Este trabajo final de máster ha querido abordar las estructuras con FBG en serie, pero vistas las limitaciones de las estructuras en serie como las estructuras en paralelo deberíamos dar un paso adelante con las estructuras mixtas.

En este TFM no hemos profundizado mucho en estas estructuras por falta de tiempo, y lo poco que hemos investigado no nos ha dejado buen sabor de boca. A pesar de todo creo que la combinación de FBGs en serie y paralelo puede traer mejoras en la estabilidad, potencia y el número de canales.

8 BIBLIOGRAFIA

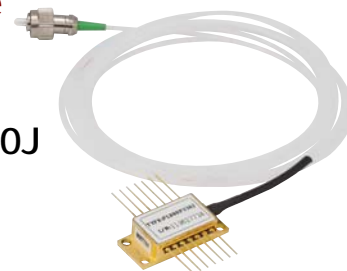
- [1] De Miguel, Verónica “Desarrollo de láser Random de fibra óptica de multi-longitud de onda conmutable y reconfigurable en tiempo real para interrogación remota de sensores” Proyecto Final de Carrera. Universidad Pública de Navarra Septiembre 2014
- [2] <http://cactuspinchudo.tumblr.com/post/25958320332/fibra-%C3%B3ptica-multimodo-vs-monomodo>
- [3] Bellemare Antoine, “Continuous wave silica based erbium doped fiber laser”, Progress in Quantum Electronics, 27: 211–266, 2003.
- [4] Isidoro Ibañez Labiano, “Desarrollo de estructuras avanzadas para láseres multilínea de fibra óptica “. Proyecto de fin de carrera, 2012.
- [5] Iturri Gil Ion “Diseño y caracterización de nuevas topologías de redes de sensores multiplexados en longitud de onda mediante láseres de fibra con emisión multilínea” Trabajo final de máster. Universidad Pública de Navarra Junio 2014
- [6] C. Jiang and L. Jin, “Optimization of multiple active ion doped fiber amplifiers for three communication windows,” Research Letters in Optics, vol. 2009, 2009.
- [7] Jose Miguel Lopez-Higuera, “Handbook of optical fiber sensing technology”. 2002, John Willey and Sons.
- [8] Sergio Rota Rodrigo, “Desarrollo de estructuras avanzadas de fibra óptica para sensores y láseres”. Proyecto fin de máster.
- [9] Daniel Leandro, “Multiplexación de sensores remotos mediante estructuras de fibra óptica”. Proyecto de fin de carrera, 2010.
- [10] José Capmany, “Dispositivos de Comunicaciones Ópticas”. Editorial Síntesis 1999.
- [11] José Capmany, F. J. Fraile-Peláez, J. Martí. “Fundamentos de comunicaciones Ópticas”. Editorial Síntesis 1998.
- [12] Daniel Ventura, “Estudio experimental de un conversor en longitud de onda usando láseres de fibra óptica”. Proyecto fin de grado, 2016.
- [13] Rosa Ana Pérez-Herrera y Manuel López-Amo, “Láseres de fibra óptica”, Mundo Electrónico, No. 426, pp. 36-42, Marzo 2011.
- [14] P. R. Morkel, “Rare Earth Doped Fiber Lasers and Amplifiers”, CRC Press, 2001.

- [15] D. Leandro, “Nuevas configuraciones para estructuras laser y multiplexación de sensores”, Trabajo Fin de Máster, UPNA 2012.
- [16] H. H. Cerecedo Nuñez. y M. D. Iturbe Castillo. “Rejillas de Bragg en Nucleo de Fibra Optica de Vidrio”, Revista Mexicana de Física, Vol. 44, No. 2, pp. 198, 1998.
- [17] Sergio Rota-Rodrigo, Rosa A. Perez-Herrera, Isidoro Ibañez, Ana M. R. Pinto, Montserrat Fernandez-Vallejo and Manuel Lopez-Amo, “Multiwavelength Fiber Ring Laser based on Optical Add-Drop Multiplexers and a Photonic Crystal Fiber Sagnac interferometer,” Optics & Laser Technology, Vol. 48, pp. 72–74, June 2013.
- [18] Rosa Ana Pérez Herrera, “Design and characterization of wavelength division multiplexed sensor systems using optical amplification”. Tesis Doctoral, UPNA 2010.
- [19] M. A. Quintela, R. A. Perez-Herrera, I. Canales, M. Fernández-Vallejo, M. Lopez-Amo and J. M. López-Higuera, "Stabilization of dual-wavelength erbium-doped fiber ring lasers by singlemode operation," IEEE Photonics Technology Letters, vol. 22, pp. 368-370, 2010.
- [20] Maicol Armando Galdámez González, “Criterios de selección para los amplificadores EDFA y RAMAN tipo Óptico-Óptico en DWDM”. Trabajo de Graduación.
- [21] Rodolfo Martinez Manuel “Wavelength and Power Stabilization of a three wavelength Erbium doped fiber laser using a Nonlinear Optical Loop Mirror”

ANEXO

975 nm Pigtailed Laser Diode, Butterfly Package

PL980P330J



Description

The PL980P330J consists of a field-proven, 975 nm quantum-well laser chip in a 14-pin butterfly package. The compact design includes an integrated thermoelectric cooler, a monitor photodiode, and a wavelength-stabilizing fiber Bragg grating (FBG), which ensures very little drift in the output wavelength as the temperature and current are varied. The laser is coupled into a single mode fiber pigtail (SMF: HI1060 fiber) with a Ø1.5 mm Teflon loose tube jacket and an FC/APC connector. This laser diode's patented device structure (F000038US01) is Telecordia GR-468-CORE qualified.

Specifications

Absolute Maximum Ratings			
	Symbol	Min	Max
Storage Temperature	T_S	-40 °C	85 °C
Operating Temperature	T_{CASE}	-20 °C	75 °C
Soldering Temperature*	-	-	250 °C
LD Forward Current	I_F	-	800 mA
LD Reverse Current	V_R	-	2 V
TEC Current	I_{TEC}	-	2.5 A
TEC Voltage	V_{TEC}	-	3.2 V
Monitor Reverse Voltage	V_{PD}	-	10 V
ESD Damage	V_{ESD}	-	500 V
Fiber Pigtail Bend Radius	-	25 mm	-

*Max 10 Seconds

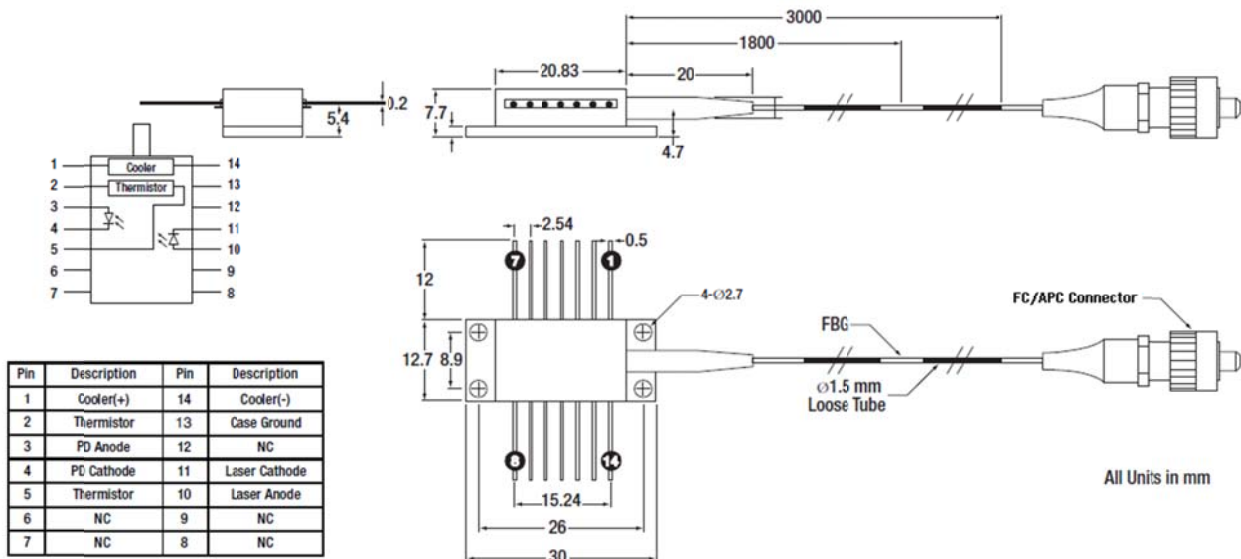
Characteristics ($T_C = 25^\circ\text{C}$, $P = 330\text{ mW}$)				
	Symbol	Min	Typical	Max
Center Wavelength	λ_C	974 nm	975 nm	976 nm
Operating Current	I_{OP}	-	600 mA	720 mA
Output Power	P_{OUT}	330 mW	-	-
Spectral Bandwidth (FWHM)	$\Delta\lambda$	-	0.5 nm	1.0 nm
Spectral Bandwidth (at 95% Power)	$\Delta\lambda$	-	-	2.0 nm
Threshold Current	I_{TH}	-	75 mA	90 mA
Forward Voltage at I_{OP}	V_F	-	1.7 V	1.9 V
Kink-Free Power	P_{Kink}	363 mW	-	-
Spectral Shift with Temperature	$\Delta\lambda / \Delta T$	-	-	0.02 nm/°C
Side Mode Suppression	-	-13 dB	-	-
Monitor Responsivity	R_{PD}	1 $\mu\text{A/mW}$	-	10 $\mu\text{A/mW}$



Specifications (Cont.)

Characteristics ($T_C = 25^\circ\text{C}$, $P = 330\text{ mW}$), TEC Operation				
	Symbol	Min	Typical	Max
TEC Current	I_{TEC}	-	1.2 A	1.8 A
TEC Voltage	V_{TEC}	-	2.0 V	3.0 V
Thermistor Resistance	R_{TH}	9.5 k Ω	10 k Ω	10.5 k Ω
Thermistor Constant	B	3600 K	3920 K	4200 K

Drawings



Test Data Sheet



Model	LU0975M500-1016F10A
Serial No	700552
Module ID	704680
Date	17-Jun-14

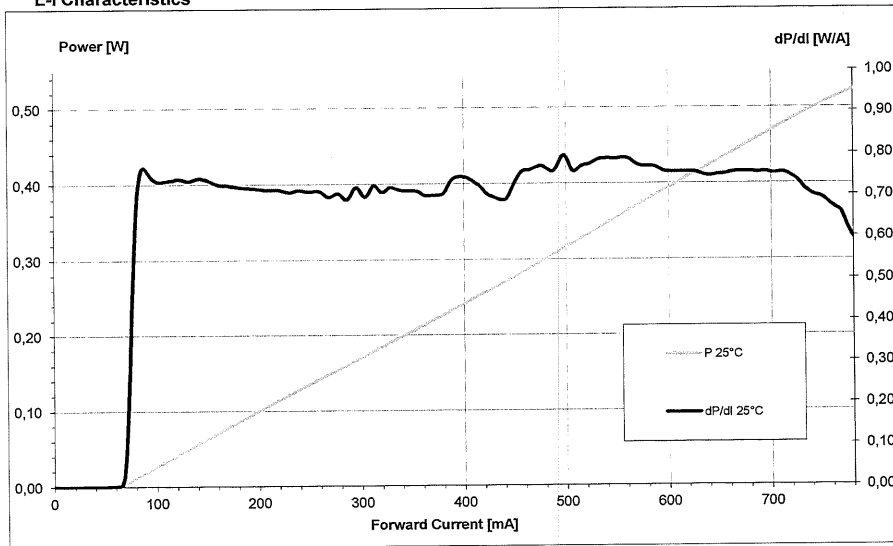
Characteristics @ 25°C (T_{chip} and T_{case})

Parameter at c.w.	Sym.	Value	Unit
Operating Power (1)	P _{op_nom}	500	mW
Peak Wavelength	λ _{max}	975,3	nm
FWHM	λ _{FWHM}	0,34	nm
Laser Operating Current	I _{op}	742	mA
Threshold Current	I _{th}	63,9	mA
Forward Voltage at I _{op_nom}	U _{op_nom}	1,74	V
Monitor Current at P _{op_nom}	I _{pd_nom}	2312	μA
Thermistor Resistance	R _{th}	10,000	kOhm
Monitor Responsivity	R _{mon}	4,6	μA/mW

Important Notes:

- (1) The maximum operating power P_{op} will be achieved at a device-specific current, the Laser Operating Current_{op}. The pump laser shall never be operated at a power higher than the maximum operating Power P_{op} throughout its lifetime. At Begin of Life (BOL), the operating current shall never be higher than the device-specific maximum operating current. At End of Life (EOL), the operating current shall never be higher than the device-specific laser operating current.
- (2) Peak wavelength shifts with current for non FBG stabilised modules (typ. 5nm/A at c.w. operation / pulsed condition lower depending on puls width an duty cycle)
- (3) Back reflection of light into the laser module must be strictly avoided. It can cause fatal laser diode facet damage. It is highly recommended to use double stage isolators especially for applications in fiber lasers or amplifiers.

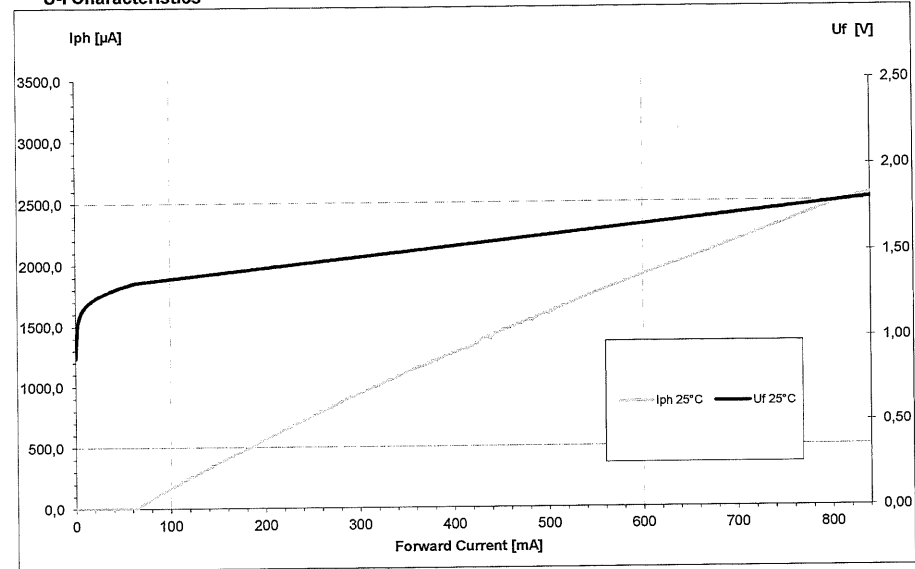
L-I Characteristics



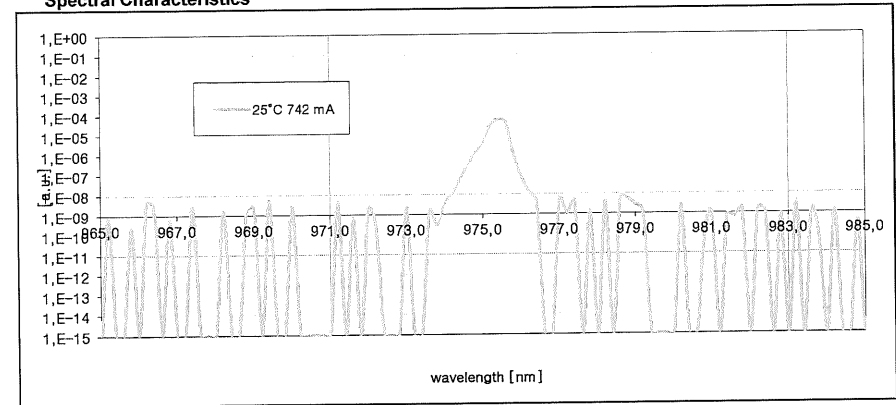
Test Data Sheet

Model	LU0975M500-1016F10A
Serial No	700552
Module ID	704680
Date	17. Jun. 14

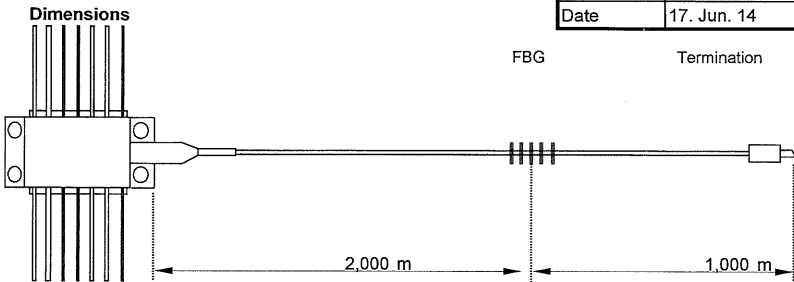
U-I Characteristics



Spectral Characteristics



Model	LU0975M500-1016F10A
Serial No	700552
Module ID	704680
Date	17. Jun. 14

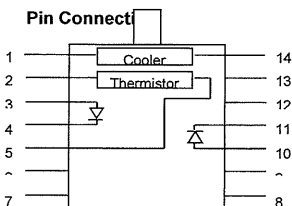


Variation of responsivity at begin of life (BOL)	$0.8 \cdot I_{BOL} \leq I_{LD} \leq 1.2 \cdot I_{BOL}$	
	min 0,95	max 1,03
$\frac{I_{pd(ops)}}{P_{op}}, \frac{P_{LD,BOL}}{I_{pd,BOL}}$	$(I_{TH,BOL} + 50mA) \leq I_{LD} \leq 0.8 \cdot I_{BOL}$	
	min 0,74	max 0,94

Termination	
Termination Type	FC/APC

TEC Characteristics @ I_{op} with Laser @ 25°C and Case @ 70°C		
Cooler Current	1,14	A
Cooler Voltage	2,01	V

Fiber Characteristics	
Fiber Type	HI1060
Fiber Spliced	n



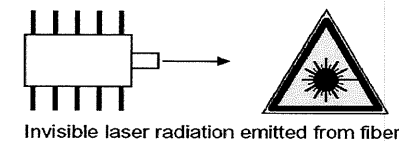
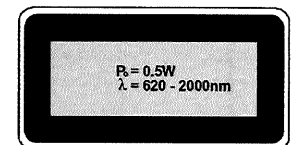
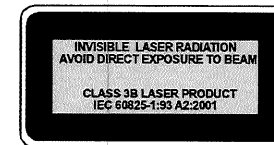
1	Cooler(+)	14	Cooler(-)
2	Thermistor	13	Case ground
3	PD Anode	12	nc
4	PD Cathode	11	Laser Cathode
5	Thermistor	10	Laser Anode
6	nc	9	nc
7	nc	8	nc

Precautions

1. The **laser light** emitted from this device is **invisible** and may be **harmful** to the human eye and skin. Avoid looking directly into the fiber when the device is in operation. Use of protective gear is recommended when the device is in operation.
2. To maximize thermal transfer to the **heatsink**, the heatsink mounting surface must be flat to within 0.025mm and the mounting screws must be torqued down to 0.17Nm
3. The **TEC current** should never exceed the **Maximum TEC Current Rating** specified in the data sheet. Any over current may heat the laser and the internal optical bench such that the optical power drops irreversible by a significantly value.
4. **Power supply: Transient electric spike** (above maximum rated current) may cause a damage to the laser. A surge-free power supply and a slow starter circuit should be used. To avoid causing an electrical surge, pins should not be connected or disconnected on the fixture before turning the power off.
5. Electrostatic discharge is the primary cause of unexpected laser diode failure. Take extreme precaution to prevent ESD. Use wrist straps, grounded work surfaces and rigorous antistatic techniques when handling this device.
6. In order to minimize light reflection, the ferrule flange end of the fiber pigtail may be 8degree angle polished. Keep **ferrule flange** end surface clean to **prevent contaminated dirt or scratch**.
7. Extremely **careful attention** is required when this pump laser module is in operation. This device should be operated and handled by experienced personnel. Any doubted matters during or before operation should be discussed with Lumics.
8. This product contains GaAs based semiconductor materials. Follow the instructions for **GaAs**

material safety

9. **Disposal considerations:** Contact a licensed professional waste disposal service to dispose this GaAs containing material. Observe all federal state and local environmental regulations.
10. **Do not open the module**



Glass fiber subject to breakage if mishandled. Permanent damage to device may result. Handle fiber with extreme care.



Cámara climática

MARCA: BINDER

MODELO: FD-23

ESPECIFICACIONES

Rango de temperatura:	300°C	
Variación de temperatura:	a 70°C	0.8°C
	a 150°C	2.2°C
	a 300°C	4.3°C

Fluctuación de la temperatura: $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$

Tiempo de calentamiento:	hasta 70°C	7min
	hasta 150°C	22min
	hasta 300°C	45min



Multiplexor en longitud de onda 980/1550 (WDM)

MARCA: OPNETI

MODELO: FWDM-95-2-1-FA

ESPECIFICACIONES

Longitud de onda (canal 1550):	1520-1600 nm
Longitud de onda (canal 980):	965-1000 nm
Pérdidas de inserción (canal 1550):	0.45 dB
Pérdidas de inserción (canal 980):	0.6 dB
PDL:	<0.02 dB
Pérdidas de retorno:	> 60dB



WDM

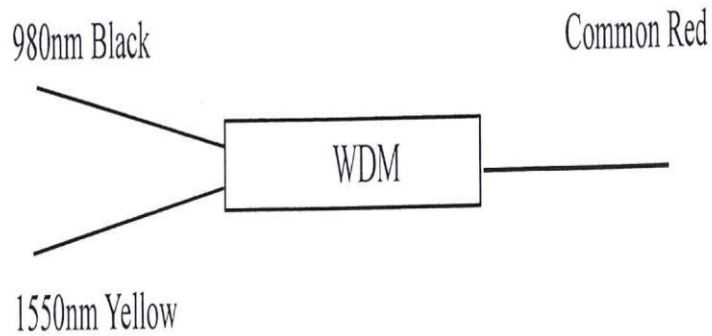
WDM Coupler 980/1550nm oeMarket.com

PN: WDMC-915-P-1-FA

SN: A130065821

Date: 7 May 2013

Parameters	Test Data
Operating Wavelength (nm)	980/1550
Insertion Loss (dB) at 980nm	0.40
Isolation (dB) at 980nm	24.6
Insertion Loss (dB) at 1550nm	0.34
Isolation (dB) at 1550nm	27.8
Directivity (dB)	>55
PDL (dB)	0.03
Fiber Type / Length (m)	OFS 980 Fiber / 1.0
Connector Type	None
Operating Temperature (°C)	-20~+70



Fusionadora de fibra

Fitel

óptica MARCA

MODELO

s175 v2000

ESPECIFICACIONES

Fibras aceptadas

SM/MM/DSF/EDF

Diámetro de cubierta y núcleo

0.25-0.9mm/0.1-0.15mm

Longitud de agarre

16mm

Pérdidas medias

0.02dB(SM) 0.01dB(MM) 0.04dB(DS)

Reflexión

-60dB

Estimación de precisión

+/- 0.05dB

Tiempo de operación típico

20s(Fusión) 90s(Calentar)

Test de tensión

299g

Aislador

Parameter	Grade U	Grade P	Grade A
Center wavelength (nm) λ_c	1310, 1550, 1590		
Peak Isolation (dB, min.)	65	58	55
Isolation (dB, min.) $\pm 30\text{nm}$ 23°C all SOP	50	46	45
Isolation (dB, min.) $\pm 15\text{nm}$ 0~70°C all SOP	42	38	34
Insertion Loss (dB, typ.) λ_c 23°C all SOP	0.4	0.5	0.6
Insertion Loss (dB, max.) $\pm 20\text{nm}$ 0~70°C all SOP	0.6	0.7	0.8
PDL (dB, max.) λ_c 23°C all SOP	0.05	0.10	0.10
PMD (ps, max.)	0.05	0.05	0.07
Return loss (dB, min.) – Input/Output	65/60	60/55	60/55
Power handling (mW, max.)	300 (1000 optional)		
Fiber Type	Corning SMF-28 or SMF-28e		
Operating temperature (°C)	-5 ~ +70		
Storage temperature (°C)	-40 ~ +85		
Dimensions (mm)	$\phi 5.5 \times L32$		



Compact Laser Diode Controller

CLD101x Operation Manual



2014

6 Appendix

6.1 Technical Data

Specification CLD1015	Front Panel*	Remote Control*
Current Control (Constant Current Mode); AG		
Control Range	0 to 1.5 A	
Compliance Voltage	>4 V	
Resolution	100 μ A	50 μ A
Accuracy	$\pm(0.1\% + 500 \mu\text{A})$	
Noise and Ripple (10 Hz to 10 MHz, rms, typ.) w/o Filter with Filter	10 μ A 5 μ A (Load 3.3 Ω , current < 1.2 A)	
Drift, 24 hours (0-10 Hz, typ., at Constant Ambient Temperature)	<50 μ A	
Temperature Coefficient	<50 ppm/ $^{\circ}$ C	
Current Limit		
Setting Range	1 mA to 1.5 A	
Resolution	100 μ A	50 μ A
Accuracy	$\pm(0.12\% + 800 \mu\text{A})$	
Photodiode Input (CG)		
Photo Current Measurement Ranges	2 mA / 20 mA	
Photo Current Resolution	100 nA / 1 μ A	70 nA / 700 nA
Photo Current Accuracy	$\pm(0.08\% + 0.5 \mu\text{A}) / \pm(0.08\% + 5 \mu\text{A})$	
Photodiode Reverse Bias Voltage	0.1 to 6 V	
Photodiode Input Impedance	$\sim 0 \Omega$ (Virtual Ground)	
Power Control (Constant Power Mode)		
Photo Current Control Ranges	0 to 2 mA / 0 to 20 mA	
Laser Voltage Measurement		
Resolution	1 mV	200 μ V
Accuracy	$\pm(1\% + 40 \text{ mV})$	
Laser Overvoltage Protection		
Trip Voltage (typ.)	4.2 V	
Modulation Input		
Input Impedance	10 k Ω	
Small Signal 3dB Bandwidth, CC Mode w/o filter with filter	DC to 250 kHz DC to 7.5 kHz	
Modulation Coefficient, CC Mode	150 mA/V $\pm 5\%$	
Modulation Coefficient, CP Mode Photo Current Range Low Photo Current Range High	200 μ A/V $\pm 5\%$ 2 mA/V $\pm 5\%$	

*) Via front panel the resolution is limited by the display. Via Remote Control a higher resolution is offered.

**) Control range and thermal stability depend on thermistor parameters and operating point.

Specification CLD1010LP	Front Panel*	Remote Control*
Current Control (Constant Current Mode); AG		
Control Range	0 to 1.0 A	
Compliance Voltage	>7 V	
Resolution	100 μ A	50 μ A
Accuracy	$\pm(0.1\% + 500 \mu\text{A})$	
Noise and Ripple (10 Hz to 10 MHz, rms, typ.) w/o Filter with Filter	10 μ A 5 μ A (Load 4.7 Ω)	
Drift, 24 hours (0-10 Hz, typ., at Constant Ambient Temperature)	<50 μ A	
Temperature Coefficient	<50 ppm/ $^{\circ}$ C	
Current Limit		
Setting Range	1 mA to 1.0 A	
Resolution	100 μ A	50 μ A
Accuracy	$\pm(0.12\% + 800 \mu\text{A})$	
Photodiode Input (CG)		
Photo Current Measurement Ranges	2 mA / 20 mA	
Photo Current Resolution	100 nA / 1 μ A	70 nA / 700 nA
Photo Current Accuracy	$\pm(0.08\% + 0.5 \mu\text{A}) / \pm(0.08\% + 5 \mu\text{A})$	
Photodiode Reverse Bias Voltage	0.1 to 6 V	
Photodiode Input Impedance	$\sim 0 \Omega$ (Virtual Ground)	
Power Control (Constant Power Mode)		
Photo Current Control Ranges	0 to 2 mA / 0 to 20 mA	
Laser Voltage Measurement		
Resolution	1 mV	400 μ V
Accuracy	$\pm(1\% + 80 \text{ mV})$	
Laser Overvoltage Protection		
Trip Voltage (typ.)	7.3 V	
Modulation Input		
Input Impedance	10 k Ω	
Small Signal 3dB Bandwidth, CC Mode w/o filter with filter	DC to 300 kHz DC to 9.0 kHz	
Modulation Coefficient, CC Mode	150 mA/V $\pm 5\%$	
Modulation Coefficient, CP Mode Photo Current Range Low Photo Current Range High	200 μ A/V $\pm 5\%$ 2 mA/V $\pm 5\%$	
RF Input		
RF Input Impedance	50 Ω	
Small Signal 3 dB Bandwidth	200 kHz to > 1 GHz	
Maximum RF Power	500 mW	

*) Via front panel the resolution is limited by the display. Via Remote Control a higher resolution is offered.

**) Control range and thermal stability depend on thermistor parameters and operating point.

Specification CLD1011LP	Front Panel*	Remote Control*
Current Control (Constant Current Mode); CG		
Control Range	0 to 1.0 A	
Compliance Voltage	>8 V	
Resolution	100 μ A	50 μ A
Accuracy	$\pm(0.1\% + 500 \mu\text{A})$	
Noise and Ripple (10 Hz to 10 MHz, rms, typ.) w/o Filter with Filter	10 μ A 5 μ A (Load 4.7 Ω)	
Drift, 24 hours (0-10 Hz, typ., at Constant Ambient Temperature)	<50 μ A	
Temperature Coefficient	<50 ppm/ $^{\circ}$ C	
Current Limit		
Setting Range	1 mA to 1.0 A	
Resolution	100 μ A	50 μ A
Accuracy	$\pm(0.12\% + 800 \mu\text{A})$	
Photodiode Input (CG or AG, switchable)		
Photo Current Measurement Ranges	2 mA / 20 mA	
Photo Current Resolution	100 nA / 1 μ A	70 nA / 700 nA
Photo Current Accuracy	$\pm(0.08\% + 0.5 \mu\text{A}) / \pm(0.08\% + 5 \mu\text{A})$	
Photodiode Reverse Bias Voltage	0.1 to 6 V	
Photodiode Input Impedance	$\sim 0 \Omega$ (Virtual Ground)	
Power Control (Constant Power Mode)		
Photo Current Control Ranges	0 to 2 mA / 0 to 20 mA	
Laser Voltage Measurement		
Resolution	1 mV	400 μ V
Accuracy	$\pm(1\% + 80 \text{ mV})$	
Laser Overvoltage Protection		
Trip Voltage (typ.)	8.2 V	
Modulation Input		
Input Impedance	10 k Ω	
Small Signal 3dB Bandwidth, CC Mode w/o filter with filter	DC to 300 kHz DC to 9.0 kHz	
Modulation Coefficient, CC Mode	150 mA/V $\pm 5\%$	
Modulation Coefficient, CP Mode Photo Current Range Low Photo Current Range High	200 μ A/V $\pm 5\%$ 2 mA/V $\pm 5\%$	
RF Input		
RF Input Impedance	50 Ω	
Small Signal 3 dB Bandwidth	200 kHz to > 1 GHz	
Maximum RF Power	500 mW	

*) Via front panel the resolution is limited by the display. Via Remote Control a higher resolution is offered.

**) Control range and thermal stability depend on thermistor parameters and operating point.

Specification CLD1015 / CLD1010LP / CLD1011LP	Front Panel*	Remote Control*
TEC Current Output		
Control Range	-3.0 to 3.0 A	
Compliance Voltage	> 4.7 V	
Maximum Output Power	> 14.1 W	
Resolution	1 mA	100 μ A
Accuracy	\pm (0.2% + 20 mA)	
TEC Current Limit		
Setting Range	5 mA to 3.0 A	
Resolution	1 mA	100 μ A
Accuracy	\pm (0.2% + 20 mA)	
NTC Thermistor Sensors		
Resistance Measurement Range	300 Ω to 150 k Ω	
Control Range Max.**	-55 $^{\circ}$ C to +150 $^{\circ}$ C	
Temperature Resolution	0.01 $^{\circ}$ C	
Resistance Resolution	1 Ω	
Accuracy	\pm (0.1% + 1 Ω)	
Temperature Stability (24 Hours typ.)**	<0.005 $^{\circ}$ C	
Temperature Coefficient	<5 mK/ $^{\circ}$ C	
Temperature Window Protection		
Setting Range T _{win}	0.01 $^{\circ}$ C to 100.0 $^{\circ}$ C	
Protection Reset Delay	0 to 600 s	
Interface		
USB 2.0	According to USBTMC/USBTMC-USB488 Specification Rev. 1.0	
Protocol	SCPI Compliant Command Set	
Drivers	<ul style="list-style-type: none"> • VISA VXIpnTM • MS Visual StudioTM • MS Visual Studio.netTM • LabViewTM • LabWindows/CVITM 	

*) Via front panel the resolution is limited by the display. Via Remote Control a higher resolution is offered.

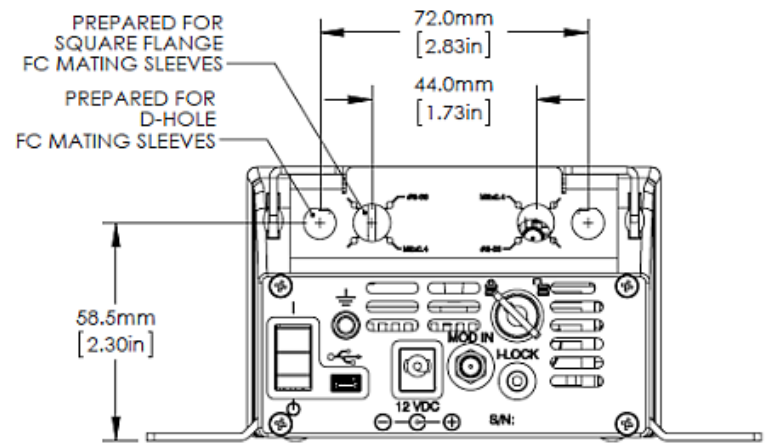
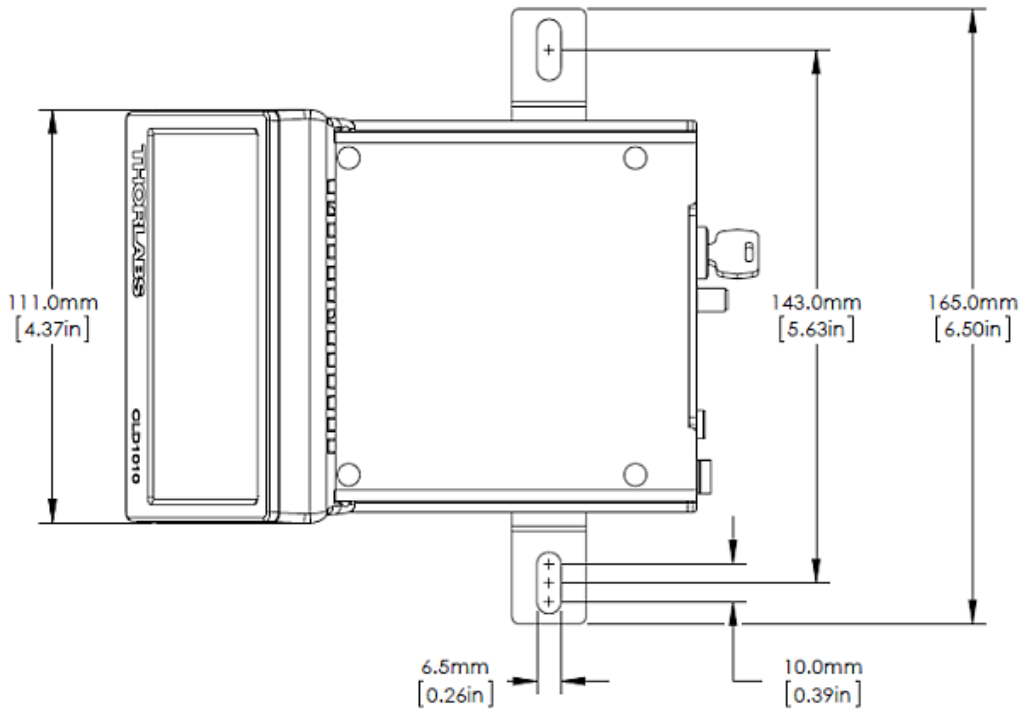
***) Control range and thermal stability depend on thermistor parameters and operating point.

General data CLD1015 / CLD1010LP / CLD1011LP	
Safety Features	<ul style="list-style-type: none"> • Interlock • Keylock Switch • Laser Current Limit • Soft Start • Short Circuit when Laser off • Laser Overvoltage Protection • Over Temperature Protection • Temperature Window Protection
Display	LCD TFT 480 x 272 Pixel
CLD1015 Socket for Laser Diode	14 pin "Butterfly" Type 1 (Pump) / Type 2 (Telecomm)
CLD1010LP Socket for Laser Diode	LP Pigtailed Laser Diodes, Pin Codes A, D, E, G
CLD1011LP Socket for Laser Diode	LP Pigtailed Laser Diodes, Pin Codes B, C, H
Connector for DC Power Input	2.0 mm center pin connected to +
Connector for Modulation Input	SMA
Connector for Interlock & Laser On Signal	2.5 mm Mono Phono Jack
Connector for USB-Interface	USB Type Mini-B
Chassis Ground Connector	4 mm Banana Jack
Desktop Power Supply	AC: 100 to 240 V \pm 10%, 47 to 63 Hz DC: 12 V \pm 5 % / 3.5 A
Maximum Power Consumption	40 VA
Operating Temperature ¹⁾	0 to +40 °C
Storage Temperature	- 40 to +70°C
Warm-up Time for Rated Accuracy	30 min
CLD1015 Weight (with power supply)	1.0 kg
CLD1010LP Weight (with power supply)	1.1 kg
CLD1011LP Weight (with power supply)	1.1 kg
Dimensions w/o Operating Elements (W x H x D)	111 x 73.5 x 153.3 mm ³ (4.37 x 2.9 x 6.04 in ³)
Dimensions with Operating Elements (W x H x D)	111 x 73.5 x 169.9 mm ³ (4.37 x 2.9 x 6.69 in ³)

¹⁾ non-condensing

All technical data are valid at 23 \pm 5°C and 45 \pm 15% rel. humidity (non condensing)

6.2 Dimensions CLD101x

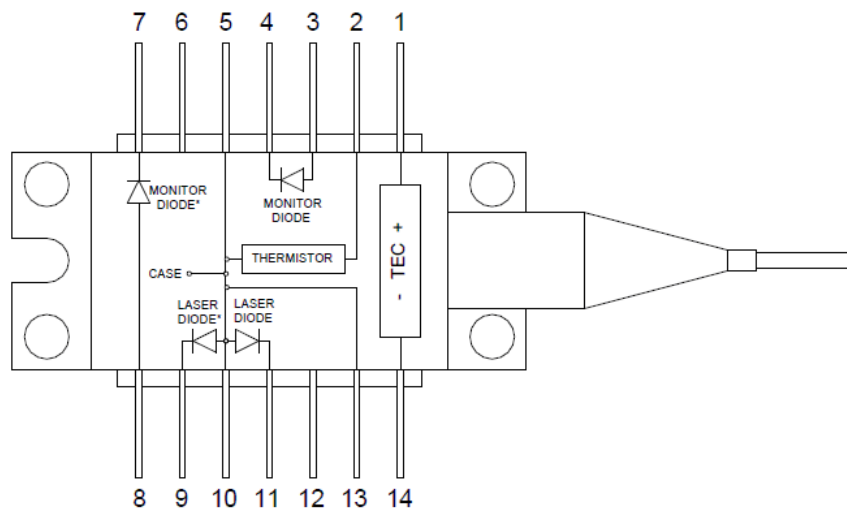


6.3 Standard Laser Diode Pinouts

BFY (Butterfly Style) Laser Diodes

There are two standard pin-outs for 14 pin "butterfly" (BFY) housing laser diodes:

Type 1 - Pump Laser Diodes

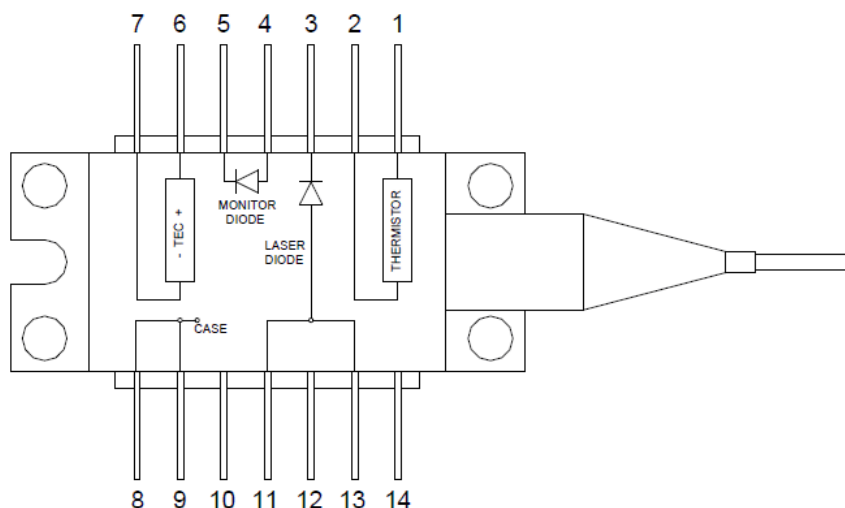


1	TEC +	14	TEC -
2	Thermistor	13	GND
3	Photo Diode Anode ¹⁾	12	N.C.
4	Photo Diode Cathode ¹⁾	11	Laser Diode Cathode ²⁾
5	Thermistor	10	Laser Diode Anode
6	N.C.	9	Laser Diode Cathode ²⁾
7	Photo Diode Cathode ¹⁾	8	Photo Diode Anode ¹⁾

¹⁾ Alternative connection for photodiode

²⁾ Alternative connection for laser cathode

Type 2 - DFB Laser Diodes

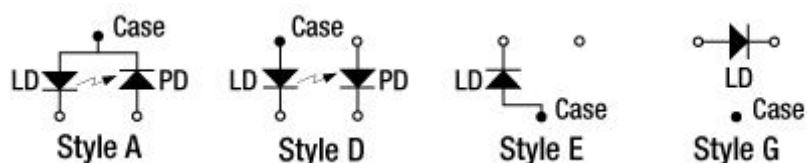


1	Thermistor	14	N.C.
2	Thermistor	13	Laser Diode Anode
3	Laser Diode Cathode	12	N.C.
4	Photo Diode Anode	11	Laser Diode Anode
5	Photo Diode Cathode	10	NC
6	TEC +	9	GND
7	TEC -	8	GND

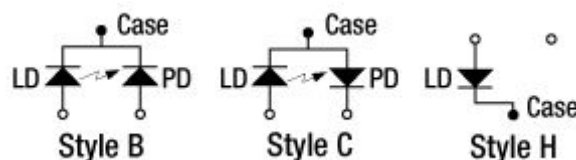
Supported TO Can Pin Styles

Thorlabs TO can laser diodes are categorized in 8 pin styles, called A to H.

The CLD1010LP supports all pin styles with laser diode anode grounded or floating, these are the pin styles A, D, E and G:



The CLD1011LP supports all pin styles with laser diode cathode grounded, these are the pin styles B, C, and H:



Note

Above presentation is the bottom view to the laser. The pin style for each individual laser diode is stated on the web site and in the individual Product Data Sheet, coming with the laser diode.



TELNET Redes Inteligentes, S.A.

Oficinas centrales y
 Fábrica de equipos
 C/ Fco. Oliván Bayle, 4
 50015 Zaragoza (España)
 Tel. +34 976 20 36 36
 Fax +34 976 20 09 96
 E-mail: telnet@telnet-ri.es
 www.telnet-ri.es

Fábrica de cable de fibra óptica
 Polígono Industrial Centrovía
 C/ Buenos Aires, 93. Nave 116
 50196 La Muela. Zaragoza (España)
 Tel. +34 976 14 47 04
 Fax +34 976 14 45 14
 E-mail: cables@telnet-ri.es
 www.telnet-ri.es

LABFOT100261

Product Name: SMF (NATURAL)

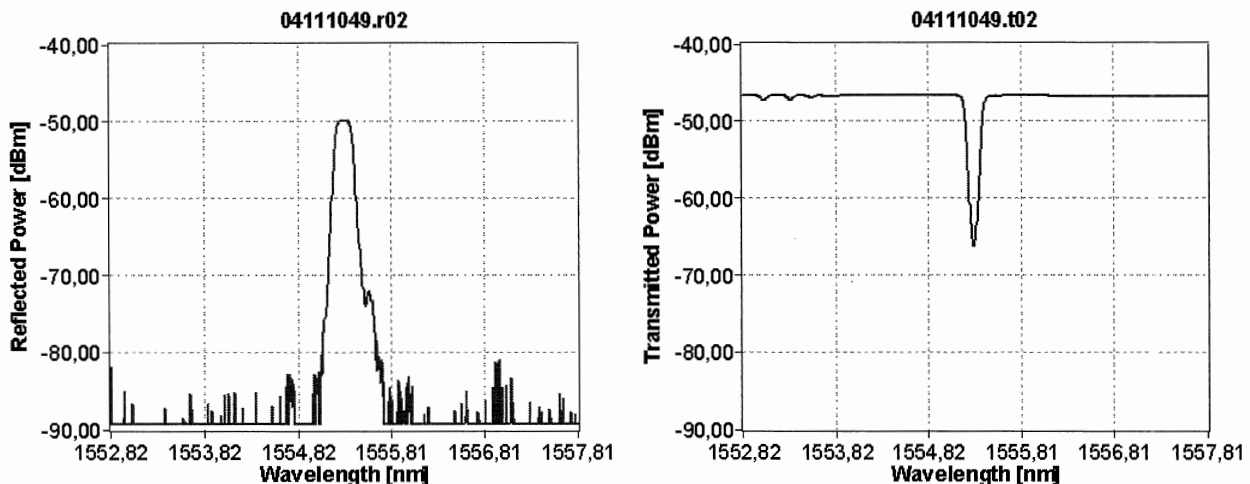
Date: 2005/08/08
 Quantity: 10.366m

Reel No.	Fiber ID	Actual Length (m)	Mode Field Diameter (µm)	Concent. Error (µm)	Cladding diameter (µm)	Cladding Non-Circ (%)	Coating Diameter (µm)	Cutoff Wavelength (nm)	Attenuation (dB/Km)		Zero Disp.Slope (ps/nm ² *km)	Zero disp Wavelength (nm)	Chromatic Dispersion (ps/nm*km) 1550nm	Proofstress level (%)
									1310 nm	1550 nm				
No. 1	04A020090	1.037	9.07	0.1	125.0	0.1	252	1263	0.331	0.217	0.085	1318	16.2	1.2
No. 2	04A020091	1.037	9.08	0.1	124.9	0.2	252	1261	0.332	0.208	0.085	1314	16.7	1.2
No. 3	04A020092	1.030	9.07	0.1	125.0	0.2	252	1261	0.328	0.198	0.086	1318	16.2	1.2
No. 4	04A020093	1.037	9.07	0.1	125.0	0.1	253	1262	0.336	0.195	0.086	1317	16.5	1.2
No. 5	04A020094	1.037	9.07	0.1	125.0	0.1	253	1262	0.334	0.193	0.085	1317	16.2	1.2
No. 6	04A020095	1.037	9.07	0.1	125.0	0.1	253	1262	0.327	0.206	0.085	1317	16.5	1.2
No. 7	04A020096	1.037	9.08	0.1	125.0	0.1	253	1262	0.334	0.199	0.085	1317	16.5	1.2
No. 8	04A020097	1.040	9.08	0.1	125.0	0.1	253	1262	0.339	0.205	0.085	1317	16.6	1.2
No. 9	04A020098	1.037	9.09	0.1	125.0	0.1	253	1262	0.334	0.193	0.086	1317	16.4	1.2
No. 10	04A020099	1.037	9.05	0.1	125.0	0.1	253	1263	0.338	0.193	0.086	1317	16.5	1.2

FBG Data Sheet

Company:	Advanced Optics Solutions (AOS) GmbH	Date:	04.11.2010
Address:	Ammonstr. 35 01067 Dresden, Germany	Time:	13:56:06
		SerNo:	04111049
Phone:	+49 (0)351 4960 193		
Fax:	+49 (0)351 4960 194	Customer:	428
E-mail:	info@aos-fiber.com	Order-No:	Uni Navara P2- /4047
Web:	www.aos-fiber.com	Operator:	Fuhr

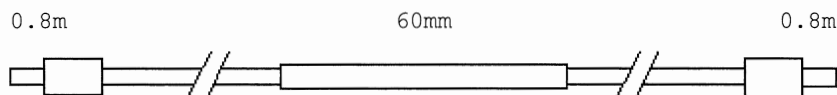
OSA traces:



Measured Parameters:

Reflection Bandwidth	[nm]	[GHz]	Center Wavelength [nm]:	1555.310
			Center Freq [THz]:	192.8
			Transmission Loss [dB]:	19.7
-1.0 dB	0.155	19.2	Reflectivity [%]:	98.9
-3.0 dB	0.195	24.1	SNR @+/-1nm [dB]:	30.9
-20 dB	0.370	45.8		

Configuration:



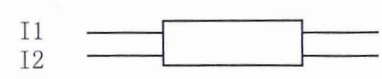
Fiber type:
Corning SMF28

Notes:

Optical Coupler Test Report - oeMarket.com

P/N:SWB-1550-2x2-P-30/70-1-FA

S/N: A130045753

Operate Wavelength:	1550±40nm		
Fiber Type:	SMF-28e fiber with 900um loose tube		
Splitting Ratio:	30:70		
Main Spec		IL(dB) @1550nm	PDL (dB) @1550nm
Port1(color red) →	Port3(color black)	1.98	0.01
Port1(color red) →	Port4(color blue)	5.53	0.02
Port2(color white) →	Port3(color black)	5.63	0.01
Port2(color white) →	Port4(color blue)	1.76	0.03
Connector Type		FC/APC	
Fiber Length		1m	
Directivity(dB)	>60	Operating Temperature	-20°C to + 70°C
		Storage Temperature	-40°C to + 85°C

*All data measured at central wavelength. RoHS compliant.

Date:2 May 2013

Inspection Sheet

Product Name: Single Mode Two Window Coupler

Connectors: 2FC/APC-2FC/APC

Coupler Type: 2x2, 10/90

Test Date: 17/11/2004

Serial Number: 04A027614

Operating Wavelength (nm): 1310±20/1350±20 nm

Insertion Loss (dB):

PORT		1310 nm.	1550 nm.
		I.L. (max.)	I.L. (max.)
1	PA(10%)	10.81	10.42
	PB(90%)	0.65	0.68
2	PA(90%)	0.61	0.71
	PB(10%)	10.82	10.63

Uniformity (dB): < 0.8

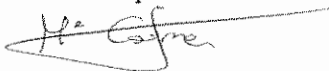
Polarization Stability (dB): < 0.2

Directivity (dB): > 55

Operation Temperature (°C): -40 ~ +70

Nota: Por cada conector se consideran 0.30 dB de pérdidas de inserción.

Medido por:



Fecha: 17 NOV. 2004

Aprobado por:



Inspection Sheet

Product Name: Single Mode Two Window Coupler

Connectors: 2FC/APC-2FC/APC

Coupler Type: 2x2, 10/90

Test Date: 11/11/2004

Serial Number: 04A003514 B

Operating Wavelength (nm): 1310±20/1350±20 nm

Insertion Loss (dB):

PORT		1310 nm.	1550 nm.
		I.L. (max.)	I.L. (max.)
A	PA(10%)	10.87	11.70
	PB(90%)	0.55	0.50
B	P1(10%)	10.92	10.35
	P2(90%)	0.52	0.53

Uniformity (dB): < 0.8

Polarization Stability (dB): < 0.2

Directivity (dB): > 55

Operation Temperature (°C): -40 ~ +70

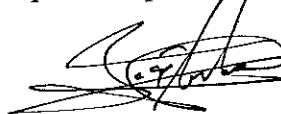
Nota: Por cada conector se consideran 0.30 dB de pérdidas de inserción.

Medido por:



Fecha: 11 NOV. 2004

Aprobado por:



Inspection Sheet

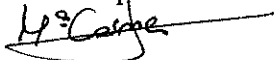
Product Name: Single Mode Two Window Coupler
 Connectors: 2FC/APC-2FC/APC
 Coupler Type: 2x2, 10/90
 Test Date: 11/11/2004
 Serial Number: 04A003516 L
 Operating Wavelength (nm): 1310±20/1350±20 nm
 Insertion Loss (dB):

PORT		1310 nm.	1550 nm.
		I.L. (max.)	I.L. (max.)
A	PA(10%)	10.65	11.05
	PB(90%)	0.54	0.60
B	P1(10%)	10.82	10.54
	P2(90%)	0.53	0.63

Uniformity (dB): < 0.8
 Polarization Stability (dB): < 0.2
 Directivity (dB): > 55
 Operation Temperature (°C): -40 ~ +70

Nota: Por cada conector se consideran 0.30 dB de pérdidas de inserción.

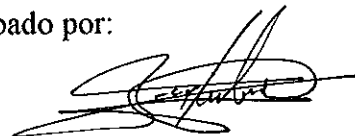
Medido por:



Fecha:

11 NOV. 2004

Aprobado por:



Inspection Sheet

Product Name: Single Mode Two Window Coupler

Connectors: 2FC/APC-2FC/APC

Coupler Type: 2x2, 10/90

Test Date: 11/11/2004

Serial Number: 04A003515 3

Operating Wavelength (nm): 1310±20/1350±20 nm

Insertion Loss (dB):

PORT		1310 nm.	1550 nm.
		I.L. (max.)	I.L. (max.)
A	PA(10%)	10.63	10.55
	PB(90%)	0.52	0.54
B	P1(10%)	10.55	10.56
	P2(90%)	0.53	0.51

Uniformity (dB): < 0.8

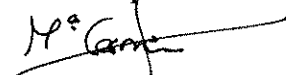
Polarization Stability (dB): < 0.2

Directivity (dB): > 55

Operation Temperature (°C): -40 ~ +70

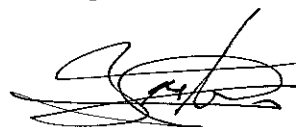
Nota: Por cada conector se consideran 0.30 dB de pérdidas de inserción.

Medido por:



Fecha: 11 NOV. 2004

Aprobado por:



Inspection Sheet

Product Name: Single Mode Two Window Coupler

Connectors: 2FC/APC-2FC/APC

Coupler Type: 2x2, 10/90

Test Date: 11/11/2004

Serial Number: \ 04A003517 2

Operating Wavelength (nm): 1310±20/1350±20 nm

Insertion Loss (dB):

PORT		1310 nm.	1550 nm.
		I.L. (max.)	I.L. (max.)
A	PA(10%)	10.35	10.40
	PB(90%)	0.51	0.53
B	P1(10%)	10.81	10.82
	P2(90%)	0.49	0.53

Uniformity (dB): < 0.8

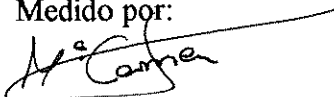
Polarization Stability (dB): < 0.2

Directivity (dB): > 55

Operation Temperature (°C): -40 ~ +70

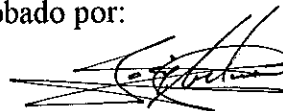
Nota: Por cada conector se consideran 0.30 dB de pérdidas de inserción.

Medido por:



Fecha: 11 NOV. 2004

Aprobado por:



Inspection Sheet

Product Name: Single Mode Two Window Coupler

Connectors: 2FC/APC-2FC/APC

Coupler Type: 2x2, 10/90

Test Date: 17/11/2004

Serial Number: 04A027617

Operating Wavelength (nm): 1310±20/1350±20 nm

Insertion Loss (dB):

PORT		1310 nm.	1550 nm.
		I.L. (max.)	I.L. (max.)
1	PA(10%)	10.65	10.72
	PB(90%)	0.63	0.65
2	PA(90%)	0.57	0.53
	PB(10%)	10.59	10.68

Uniformity (dB): < 0.8

Polarization Stability (dB): < 0.2

Directivity (dB): > 55

Operation Temperature (°C): -40 ~ +70

Nota: Por cada conector se consideran 0.30 dB de pérdidas de inserción.

Medido por:



Fecha: 17 NOV. 2004

Aprobado por:



Inspection Sheet

Product Name: Single Mode Two Window Coupler

Connectors: 2FC/APC-2FC/APC

Coupler Type: 2x2, 10/90

Test Date: 17/11/2004

Serial Number: 04A027616

Operating Wavelength (nm): 1310±20/1550±20 nm

Insertion Loss (dB):

PORT		1310 nm.	1550 nm.
		I.L. (max.)	I.L. (max.)
1	PA(10%)	10.63	10.68
	PB(90%)	0.50	0.47
2	PA(90%)	0.55	0.52
	PB(10%)	10.63	10.70

Uniformity (dB): < 0.8

Polarization Stability (dB): < 0.2

Directivity (dB): > 55

Operation Temperature (°C): -40 ~ +70

Nota: Por cada conector se consideran 0.30 dB de pérdidas de inserción.

Medido por:



Fecha:

17 NOV. 2004

Aprobado por:



Inspection Sheet

Product Name: Single Mode Two Window Coupler

Connectors: 2FC/APC-2FC/APC

Coupler Type: 2x2, 10/90

Test Date: 17/11/2004

Serial Number: 04A027615

Operating Wavelength (nm): 1310±20/1350±20 nm

Insertion Loss (dB):

PORT		1310 nm.	1550 nm.
		I.L. (max.)	I.L. (max.)
1	PA(10%)	10.45	10.42
	PB(90%)	0.58	0.63
2	PA(90%)	0.66	0.62
	PB(10%)	10.37	10.31

Uniformity (dB): < 0.8


Polarization Stability (dB): < 0.2

Directivity (dB): > 55

Operation Temperature (°C): -40 ~ +70

Nota: Por cada conector se consideran 0.30 dB de pérdidas de inserción.

Medido por:



Fecha: 17 NOV. 2004

Aprobado por:





Doped Fiber

VERSION: MD16/1
RELEASE DATE: 8 NOVEMBER 2013

Datasheet

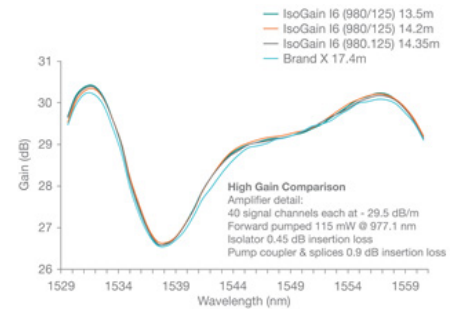
Erbium Doped Fiber IsoGain™

Fibercore's IsoGain™ range of Erbium Doped Fibers (EDFs) offer a wide selection of absorption and cut-off wavelengths to allow the best choice of fiber for each type of Erbium Doped Fiber Amplifier (EDFA) design.

Fibercore's low absorption fibers offer best-in-class efficiency for C-band amplifiers whilst higher absorption fibers are optimized for L-band EDFAs.

High cut-off wavelength (HC) fibers have larger core diameters, reducing non-linear effects and increasing efficiency at higher pump powers.

The core composition of Fibercore's IsoGain™ has been engineered to generate a substantially flattened wavelength response that closely matches that of other leading fiber types.



Supported by Fibercore's **GainMaster™** simulation software

Advantages:

- High efficiency core composition
- 'HC' variants optimized for high pump power EDFAs
- High absorption fibers for L-band amplifiers and mini/micro C-band EDFAs
- Wide range of absorption values for EDFA design optimization

Typical applications:

- EDFAs / Telecoms
- ASE Light Sources
 - Gyros
 - Current Sensors
 - Distributed Sensor Systems
- Fiber Lasers
- Biomedical Illumination
- Optical Coherence Tomography (OCT)

Related Products:

- Erbium Doped Fiber MetroGain™
- Dual-Clad Erbium/Ytterbium Doped Fiber (CP1500Y)
- GainMaster™ Simulation Tool

Product Variants:

- **I-4 (980/125)** For high efficiency C-band EDFAs
- **I-4 (980/125)HC** For high efficiency, high power C-band EDFAs
- **I-6 (980/125)** Increased absorption for high efficiency C-band EDFAs
- **I-12(980/125)** Mid level absorption fiber for short length C-band and L-band EDFAs
- **I-12(980/125)HC** High cut off wavelength, mid level absorption fiber for higher power short length C-band and L-band EDFAs
- **I-15(980/125)HC** High cut off wavelength, mid/high level absorption fiber for higher power short length C-band and L-band EDFAs
- **I-25 (980/125)** Very high absorption fiber for short length L-band EDFAs
- **I-25H(1480/80)** 80µm cladding diameter, high cut off wavelength, high absorption fiber for small coil diameter mini and micro EDFAs

Specifications

High Efficiency C-Band Erbium Doped Fibers

	I-4(980/125)	I-4(980/125)HC	I-6 (980/125)
Cut-Off Wavelength (nm)	870 – 970	1000 – 1320	870 – 970
Numerical Aperture	0.22 – 0.24		
Mode Field Diameter (µm)	5.4 – 6.6 @1550nm	5.2 – 5.8 @1550nm	5.5 – 6.3 @1550nm
Absorption (dB/m)	5.0 – 6.7 @1531nm	7.7 – 9.4 @1531nm	7.2 – 8.4 @1531nm
Proof Test (%)	1 (100 kpsi)		
Attenuation (dB/km)	≤10 @1200nm		
Polarization Mode Dispersion (ps/m)	≤0.005		
Cladding Diameter (µm)	125 ± 1		
Core Concentricity (µm)	≤0.3		
Coating Diameter (µm)	245 ± 15		
Coating Type	Dual Acrylate		

L-Band and C-Band Erbium Doped Fibers

	I-12(980/125)	I-12(980/125)HC	I-15(980/125)HC	I-25(980/125)
Cut-Off Wavelength (nm)	900 – 970	1200 – 1320	1200 – 1320	900 – 970
Numerical Aperture	0.21 – 0.23	0.23 – 0.26		
Mode Field Diameter (µm)	5.7 – 6.6 @1550nm	5.0 – 5.5 @1550nm	4.8 – 5.4 @1550nm	5.2 – 6.3 @1550nm
Absorption (dB/m)	14 – 21 @1531nm	17 – 21 @1531nm	27 – 33 @1531nm	35 – 45 @1531nm
Proof Test (%)	1 (100kpsi)			
Attenuation (dB/km)	≤10 @1200nm			
Polarization Mode Dispersion (ps/m)	≤0.005			
Cladding Diameter (µm)	125 ± 1			
Core Concentricity (µm)	≤0.3			
Coating Diameter (µm)	245 ± 15			
Coating Type	Dual Acrylate			

Reduced Cladding Erbium Doped Fiber For Mini and Micro EDFAs

	I-25H(1480/80)
Cut-Off Wavelength (nm)	900 - 1025
Numerical Aperture	≥0.30
Mode Field Diameter (µm)	3.8 – 4.7 @1550nm
Absorption (dB/m)	23 – 27 @1531nm
Proof Test (%)	1 (100kpsi)
Attenuation (dB/km)	≤30 @1200nm
Polarization Mode Dispersion (ps/m)	≤0.005
Cladding Diameter (µm)	80 ± 1
Core Concentricity (µm)	≤0.5
Coating Diameter (µm)	160 ± 10
Coating Type	Dual Acrylate

Visit fibercore.com/fiberpaedia for our encyclopedia of industry terms/knowledge base.

LIEKKI™ Er80-x/125



Large Mode Area Erbium Doped Fiber

LIEKKI™ Er80-4/125 and Er80-8/125 fibers are very highly doped large mode area erbium fibers suitable for medium-power amplifiers and lasers.

Good spliceability, high doping and a large core make these fibers ideal for medium peak power pulse amplification in the eye-safe 1.5 μm wavelength region. High erbium concentration reduces required application fiber length considerably while providing strong gain and reduced non-linear effects.

LIEKKI™ Er80-8/125 fibers can be used also with 980 nm pumps.

Applications

- Short pulse amplifiers
- Medium power low non-linearity applications
- LIDAR
- Medical

Features

- Excellent batch consistency of erbium peak absorption and spectral shape
- Ideal for pulse amplification in 1550 nm range
- Very short fiber lengths (typically less than 2 m) reduce non-linear effects like FWM, SRS and SBS

- Reduces non-linear effects like FWM, SRS and SBS
- Very good temperature behavior
- Low splice loss, LIEKKI™ EasySplice software for splicing parameters
- Suitable for both 980 nm and 1480 nm pumping
- Dual layer UV-cured acrylate coating

Typical device specification

		LIEKKI™ Er80-4/125	LIEKKI™ Er80-8/125
Optical			
Mode field diameter at 1550 nm	μm	6.5 ± 0.5	9.5 ± 0.8
Peak core absorption at 1530 nm	dB/m	80 ± 8	80 ± 8
Core numerical aperture (nominal)		0.2	0.13
Cut-off wavelength	nm	800 - 980	1100 - 1400
Geometrical and mechanical			
Core concentricity error	μm	< 0.7	< 0.7
Cladding diameter	μm	125 ± 2	125 ± 2
Cladding geometry		Round	Round
Coating diameter	μm	245 ± 15	245 ± 15
Coating material		High index acrylate	High index acrylate
Proof test	%	> 1	> 1

Custom configurations also available.

Notice

nLIGHT continually improves its products to provide its customers with outstanding quality and reliability. nLIGHT may make changes to specifications and product descriptions at any time, without notice. In addition, nLIGHT offers a limited warranty to ensure customer satisfaction. For complete details, please contact your nLIGHT sales representative.

Er30-4/125

Er30-4/125HC

Erbium Doped Fiber

LIEKKI
The Nanoparticle Fiber Company

Liekki DND technology

Liekki uses its proprietary Direct Nanoparticle Deposition (DND) technology and long term experience of conventional fiber manufacturing technologies to provide customers with high-quality state-of-the-art fibers. Highly-doped Liekki fibers minimize required application fiber length, provide strong amplification, high efficiency, broad and flat gain profile, excellent beam quality, and reduced nonlinear effects.

Product description

Liekki Er30-4/125 is a highly doped erbium fiber designed for C- and L-band amplifiers and ASE sources. This fiber is available in two versions: low cut-off and high cut-off. The high cut-off version has demonstrated the highest power conversion efficiency available in L-band: better than 50% for a typical fiber length of 20m.

Applications

- C- and L-band DWDM, Metro and CATV
- ASE sources

Features and benefits

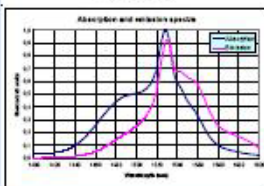
- Excellent batch consistency of erbium peak absorption and spectral shape
- Very short fiber lengths reduces non-linear effects like FWM, SRS and SBS
- Wide and flat spectrum
- Low polarization mode dispersion, typical value <25fs/m
- Low splice loss, Liekki EasySplice program for splicing parameters
- Telcordia GR-1312-CORE Generic Requirements qualified
- Dual layer UV-cured acrylate coating

Specifications

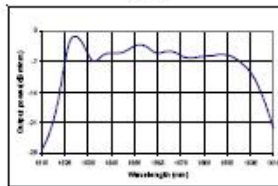
	Value	Unit
Optical		
Mode field diameter at 1550nm	6.5 ± 0.5	µm
Peak core absorption at 1530nm	30 ± 3	dB/m
Core numerical aperture (nominal)	(0.2)	
Cut-off wavelength	800-980	nm
high cut-off (-HC) option	1000-1400	nm
Geometrical and mechanical		
Core concentricity error	< 0.7	µm
Cladding diameter	125 ± 2	µm
Cladding geometry	round	
Coating diameter	245 ± 15	µm
Coating material	high index acrylate	
Proof test	> 1	%

Performance data

Absorption and emission spectra



C+L-band ASE source with Er30



ISO9001:2000 certified
06/2005/MS5

Specifications subject to change without notice.

Address Sorronrinne 9, 08500 LOHJA FINLAND Phone +358 19 357 391 Fax +358 19 357 3949 Email liekki@liekki.com Website www.liekki.com