



UNIVERSIDAD DE VALLADOLID-UNIVERSIDAD DE
SALAMANCA

FACULTAD DE FÍSICA

Universidad de Valladolid

Implementación y caracterización de un láser
de fibra óptica dopada con Erblio en régimen
continuo y pulsado.

Trabajo de Fin de Máster

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
Máster en Física y Tecnología de los Láseres

PRESENTA:
MILDRED SOCORRO CANO VELÁZQUEZ.

DIRECTORES DE TESIS:
DR. JUAN CARLOS AGUADO MANZANO.
DR. ÍÑIGO JUAN SOLA LARRAÑAGA.



VNiVERSiDAD
D SALAMANCA

2015

*Cuando creíamos que teníamos todas las respuestas,
de pronto, nos cambiaron todas las preguntas.*
Mario Benedetti

Agradecimientos

Esta memoria, como suelen decir aquí, es el claro reflejo de lo que para mí ha sido este último año: un gran reto. Estar lejos de mi país, extrañar a mi familia, conocer otra cultura, estudiar un máster de física...sí, todo ha sido un gran reto. Y, en las líneas siguientes, sólo me queda agradecer a los que han compartido conmigo esta etapa.

Gracias mamá, por ser aún más valiente que yo en todo este proceso, gracias papá por el siempre comentario oportuno y gracias hermano por ser mi ejemplo como persona. Gracias Adris y María, por darme la dicha de poder vivir la ternura.

Agradezco a mis amigos que, aún en la distancia, se han tomado un momento para hacerme llegar todo su cariño. Gracias por hacerme reír, hacerme llorar, pero sobre todo, por demostrarme que una amistad puede permanecer intacta aún sin vernos. No escribo sus nombre pues son los mismos a los que les he agradecido en mi tesis de licenciatura y, no es que no quiera escribir pero, quiero que esto sea algo que simbolice que han seguido conmigo en este lapso.

También quiero agradecer la fortuna que tuve de conocer a las personas más *chéveres* de Salamanca: mis compañeros del máster. David, Charlie, JD, Javi, Javi, gracias por hacer, dentro y fuera de aulas, que mi estancia fuera llena de risas y amistad. ¡Los espero en México!

Gracias a todos los profesores, incluyendo a mis tutores, por su entrega, su paciencia, sus consejos y por todo el conocimiento compartido conmigo. La verdad que gracias a ustedes he logrado aprender más física que en toda mi vida.

Finalmente, y no menos importante, agradezco al programa EURICA porque sin su apoyo este proyecto no hubiera sido posible. Gracias por el apoyo financiero y, en especial, por regalarme una familia nueva.

Resumen

Los láseres de fibra, debido a que están basados en un medio con gran eficiencia y son láseres con versatilidad, estabilidad, bajo peso, dimensiones pequeñas y que evitan los problemas derivados de la necesidad de dispersar el calor, han tomado gran importancia en la industria de los láseres; incursionando fuertemente, no sólo en el ámbito de las telecomunicaciones sino, en múltiples aplicaciones (procesado de materiales, aplicaciones médicas, etc.).

Considerando la importancia que tienen este tipo de láseres, el presente trabajo tiene como objetivo implementar un láser de fibra dopada con erbio (EDFL), cuya emisión coincide con la tercera banda de telecomunicaciones (1550[nm]) y, por tanto, permite el uso de equipos destinados al ámbito de telecomunicaciones para su implementación. Dentro de la implementación del EDFL se abordan los montajes experimentales para régimen continuo y para régimen pulsado por medio de mode-locking pasivo, así como la caracterización de ambos.

Contenido

Agradecimientos	III
Resumen	V
Introducción	1
Objetivos	2
1 Láseres de fibra dopada con Er^{3+}	3
1.1 Interés de las fibras dopadas con Er^{3+}	3
1.2 Esquema de tres niveles de los amplificadores de fibra dopada con Er^{3+} (EDFAs)	5
1.3 EDFL en configuración de anillo para emisión en régimen continuo	7
1.4 EDFL en <i>mode-locking</i> para emisión en régimen pulsado	9
2 Material y métodos	11
2.1 Fuentes	11
2.1.1 Láser 1550[<i>nm</i>] (HP 83403A)	11
2.2 Componentes de fibra óptica	12
2.2.1 <i>Pigtails</i>	12
2.2.2 Acopladores	14
2.2.3 Amplificador de Fibra Dopada con Erblio (JDSU OA400)	18
2.2.4 Controladores de polarización (Thorlabs FPC560)	20
2.2.5 Polarizador lineal en línea (Thorlabs ILP1550SMFC)	20
2.3 Detectores y otros equipos	21
2.3.1 Analizador de Espectros Ópticos (Agilent B6145B)	21
2.3.2 Filtro sintonizable (JDSU VCF 100 2CA NC C 1.0)	22
2.3.3 Medidor de potencia óptica (Photom 230)	22
2.3.4 Osciloscopios: Tektronik TDS3052B y Agilent Infiniium DCA 86100B	23

3	EDFL con emisión en régimen continuo	25
3.1	Implementación del montaje experimental del EDFL	25
3.2	EDFL con distintos acopladores	27
3.3	Esquema en régimen continuo seleccionado para implementar el EDFL en régimen pulsado	29
4	EDFL con emisión en régimen pulsado	33
4.1	Análisis cualitativo de la transición de régimen continuo a pulsado .	34
4.2	Caracterización de la emisión en régimen pulsado	38
4.3	Generación de nuevas tasas de repetición.	39
5	Conclusiones	43
A	EDFL en régimen continuo con filtro sintonizable	45
A.1	EDFL con emisión en un sólo pico espectral	45
A.2	EDFL a otras longitudes de onda	48
A.3	Caracterización de la configuración óptima	49
	Bibliografía	51

Introducción

Como es bien sabido, los sistemas de comunicaciones ópticas lideran actualmente la rama de las telecomunicaciones. La primera transmisión a través de fibra óptica fue a finales de los años 70 y se logró gracias al desarrollo de dos elementos que hasta la fecha son fundamentales en estos sistemas: el láser, como fuente, y la fibra óptica, como medio de propagación. A partir de ese momento las investigaciones de estos dos elementos comenzaron un avance intensificado que se mantiene hasta la fecha.

Si bien, se considera que los sistemas de comunicaciones ópticas se consumaron debido al láser y a la fibra óptica, no se debe pasar por alto que las altas pérdidas que se tenían en los primeros sistemas de este tipo dio lugar a que la amplificación óptica irrumpiera con fuerza en el campo de las telecomunicaciones. Esta irrupción se debió al desarrollo del primer amplificador de fibra dopada con erbio, el cual permitió observar la viabilidad de utilizar la fibra dopada con erbio para dos aplicaciones fundamentales: los amplificadores y los láseres.

Con las continuas investigaciones de los láseres y las fibras ópticas (con y sin dopaje) no es de extrañarse que en 1986 los tres conceptos se unieran para dar lugar al primer láser de fibra dopada con erbio; el cual indicaba gran potencial. Este potencial fue confirmado al observar que los láseres de fibra óptica dopada con erbio presentan una gran relevancia ya que son sistemas que pueden emitir potencias altas, gracias a la actual tecnología de los láseres de diodo de bombeo, y lo hacen a 1550[nm], correspondiente a la tercera ventana de transmisión en telecomunicaciones, sin descartar su capacidad de sintonización. Además están basados en un medio con gran eficiencia, versatilidad, estabilidad, bajo peso y dimensiones pequeñas y, que al ser muy largo, evita los problemas derivados de la necesidad de dispersar el calor, presentes en la mayoría de los sistemas láseres.

Debido a sus ventajas, versatilidad y fácil acoplamiento a fibra óptica, el láser de fibra ha incursionado en ámbitos fuera de las telecomunicaciones convirtiéndose en una tecnología que, además de desplazar a los láseres de CO_2 en múltiples aplicaciones [1], ha sustituido medios mecánicos de manufactura y se ha constituido como herramienta en aplicaciones médicas, como el corte, ablación y perforación de tejidos.

Motivación

La Universidad de Valladolid y la Universidad de Salamanca, coordinadoras del Máster en Física y Tecnología de los Láseres, cuentan con múltiples equipos y dispositivos, principalmente destinado a las telecomunicaciones, con los que es posible implementar un láser de fibra dopada con erbio en configuración de anillo.

Debido a esto, al creciente interés en torno a este tipo de láseres y a las posibles líneas futuras a las que daría pie, este trabajo se centra en la implementación y caracterización de un láser de fibra dopada con erbio en régimen pulsado.

Con el láser que este proyecto pretende implementar, podría observarse el funcionamiento de un láser de esta índole, así como algunos procesos no lineales generados en éste. Además, previa una caracterización adecuada, podrá utilizarse en otras aplicaciones como el caracterizado y procesado de materiales o para pruebas de telecomunicaciones, ya que sería factible modificar su configuración.

Objetivos

Primeramente se realizará una fase documental para la familiarización con los equipos disponibles para el proyecto; así como para el entendimiento del principio de operación y la implementación de los montajes experimentales.

Posterior a ello, se realizará la implementación y caracterización de los montajes experimentales. Para lo cual, primeramente se realizará la caracterización de cada uno de los componentes que formarán parte de los experimentos.

Una vez caracterizados los elementos del sistema, se implementará y caracterizará el láser de fibra dopada con erbio en régimen continuo. Esto con la intención de elegir la configuración más apta para la implementación del láser en régimen pulsado; el cual es el objetivo fundamental de este trabajo.

Finalmente, se implementará y caracterizará el láser de fibra en régimen pulsado y se analizará su comportamiento.

Capítulo 1

Láseres de fibra dopada con Er^{3+}

Este capítulo tiene como objetivo recopilar la información necesaria para el entendimiento del principio de operación del Láser de Fibra Dopada con Erblio (EDFL, por sus siglas en inglés). Para ello, primeramente se expone la importancia de las fibras dopadas como medio de ganancia de este tipo de láseres y el esquema de niveles asociado a los amplificadores ópticos basados en estas fibras (EDFA). Posteriormente, se describe de forma general el funcionamiento del EDFL en los distintos regímenes, continuo y pulsado, para con ello entender los montajes experimentales que se implementan a lo largo del presente trabajo.

1.1 Interés de las fibras dopadas con Er^{3+}

Existen diferentes iones utilizados como medios activos en los láseres de fibra óptica, en particular, para las fibras de sílice los comúnmente utilizados para su dopaje son: Neodimio (Nd^{3+}), Erblio (Er^{3+}), Iterbio (Er^{3+}), Tulio (Tm^{3+}), Holmio (Ho^{3+}) y Samario (Sm^{3+}).

Para mostrar la importancia de las fibras dopadas con tierras raras para la implementación de láseres de fibra, en la Fig. 1.1 se muestran las longitudes de onda a las que emite cada una de estas fibras. Como puede observarse, entre todas abarcan un rango amplio del espectro, haciendo de este tipo de láseres una opción versátil para su implementación en distintas zonas del espectro; sin embargo, este trabajo se limita a trabajar con fibras dopadas con erbio (Er^{3+}). Este ión en particular es uno de los iones estudiados más extensamente por las ventajas que presenta en aplicaciones en el área de las telecomunicaciones, debido a que los amplificadores implementados con este tipo de fibras tienen su banda espectral de operación en la tercera ventana de las telecomunicaciones. A continuación se presentan información relevante de las fibra dopadas con Er^{3+} .

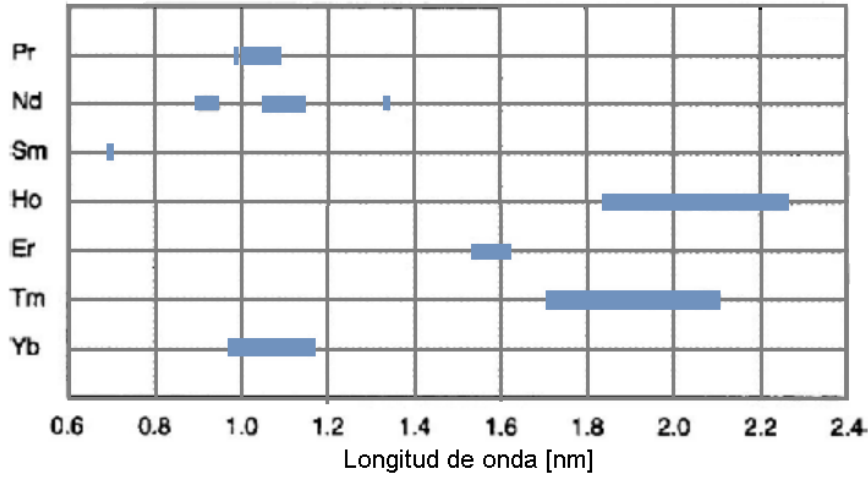


Figura 1.1: Rango de emisión de láseres en régimen continuo basados en fibra de sílice dopada con diferentes tierras raras [2].

Las fibras dopadas con erbio soporta la generación de amplios anchos espectrales, por lo que puede ser utilizado para implementar EDFLs en ambos regímenes: continuo y pulsado, con emisión en el rango de $1500 - 1620[nm]$.

Las propiedades espectroscópicas del Erblio le permiten ser bombeado a diferentes longitudes de onda, entre éstas: $532, 660, 810, 980$ y $1480[nm]$, cada una con su banda de emisión espectral correspondiente a su esquema de niveles láser. Las principales transiciones de absorción y emisión para fibras de silicatos y fluorocirconatos se muestran en la Fig. 1.2.

Para las fibras de sílice dopadas con erbio la transición de mayor interés es ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ por que es capaz de producir emisión en torno a los $1530[nm]$. La importancia de esto, además de la mencionada antes relacionada a las telecomunicaciones, radica en que ${}^4I_{13/2}$ es un nivel metaestable; por lo que ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ es una transición en la que se puede llevar a cabo amplificación o emisión láser. Siendo la presencia de este nivel metaestable la que permite la inversión de población suficiente para producir cierta ganancia y bajo ruido [4].

En cuanto a los tipos de bombeo para las fibras dopadas con Er^{3+} , considerando la transición ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$, éstos se realizan con diodos láser cuya longitud de onda de emisión coincide con alguna de las bandas de absorción de este ión. Existen varias longitudes de onda de bombeo con diferentes características, de los que destacan: $980[nm]$, $1480[nm]$ y $800[nm]$. De estos bombeos, es el de $980[nm]$ el que provee mejores resultados al proveer de mayor ganancia y eficiencia, figuras de ruido más bajas que el resto y altas potencias de señal en amplificadores y láseres [5]-[6].

1.2. ESQUEMA DE TRES NIVELES DE LOS AMPLIFICADORES DE FIBRA DOPADA CON Er^{3+} (EDFAS)

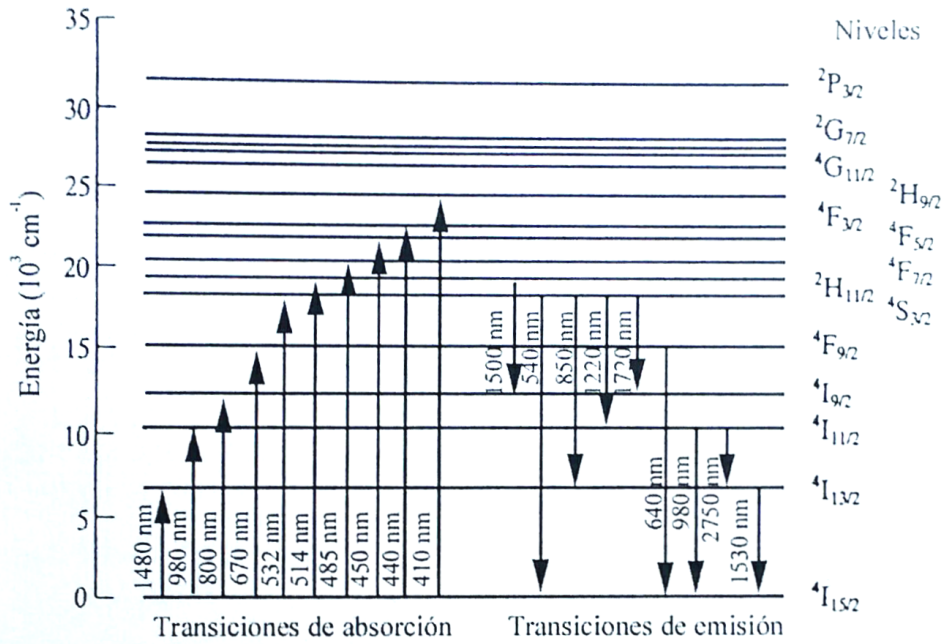


Figura 1.2: Esquema de niveles del ión Er^{3+} y sus principales transiciones, tanto en absorción como en emisión, para fibras de silicatos y fluorocirconatos [3].

1.2 Esquema de tres niveles de los amplificadores de fibra dopada con Er^{3+} (EDFAs)

Después de haber explicado de forma general la espectroscopia del ión Er^{3+} , esta sección tiene como objetivo hablar del modelo que describe el comportamiento de los Amplificadores de Fibra Dopada con Erblio (EDFAs).

Antes de abordar el modelo cabe señalar que el esquema de tres niveles a presentar es una aproximación porque en realidad no son niveles sino bandas ensanchadas debido al efecto Stark. Este efecto se debe a que el campo eléctrico local, debido a la estructura molecular sobre la que se encuentran los iones, los afecta con diferentes campos de fuerza y orientaciones, lo que conlleva a pequeñas perturbaciones en los niveles de energía [7] y da paso a bandas ensanchadas. Aunque este efecto es el que posibilita obtener ganancia para un ancho de banda y no para una única longitud de onda, se suelen considerar niveles para simplificar el modelo láser.

El esquema de tres niveles [8] para el ión Er^{3+} se muestra en la Fig. 1.3. En este se considera como estado base al nivel 1 (E_3), al estado metaestable como el nivel 2 (E_2) y al estado superior como el nivel (E_1). Cabe señalar que estos tres niveles únicamente representan la parte de la estructura niveles de energía del material que es relevante en el proceso de amplificación.

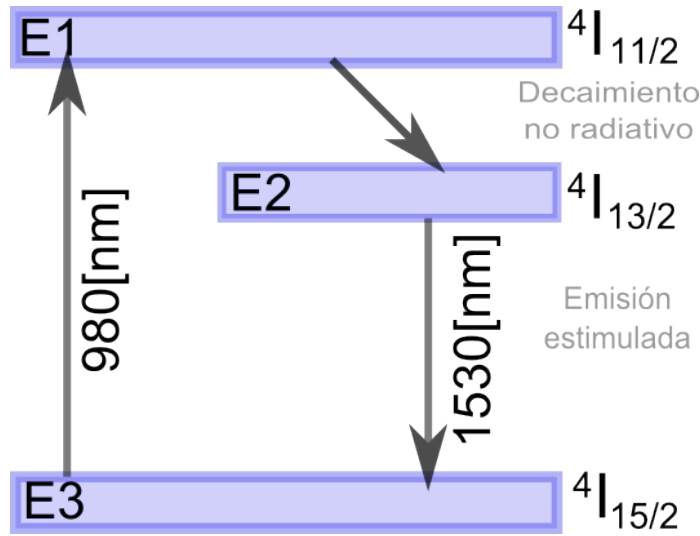


Figura 1.3: Esquema de niveles del ión Er^{3+} correspondientes al bombeo de 980[nm].

Cuando se inyecta una señal de bombeo a la fibra dopada, los fotones incidentes son absorbidos por los iones de erbio, provocando de esta forma una transición de electrones desde el nivel base (E_3) hasta el nivel de energía superior (E_1). Tomando en cuenta que la vida media en el nivel E_1 no posee una extensa duración ($> 1[\mu s]$), en comparación con la vida media del nivel metaestable (E_2) ($\simeq 1[ms]$), se tiene que los electrones decaerán del nivel de energía superior, a través de una transición no radiativa. En contraparte, dado el largo tiempo de vida media que posee el nivel metaestable, si la señal de bombeo se mantiene en el tiempo, se llegará a producir inversión de población entre el nivel de energía metaestable E_2 y el nivel de energía base E_3 , de forma que cuando ésta es lo suficientemente alta, la potencia de la señal que circula por el medio activo puede ser amplificada.

Al mismo tiempo que el proceso de emisión estimulada, también se produce el fenómeno de emisión espontánea producto de que algunos fotones decaen de forma espontánea desde el nivel metaestable al nivel base. Esta emisión espontánea es también amplificada, originando el ruido de emisión espontánea o ASE (*Amplified Spontaneous Emission*). Este efecto de emisión espontánea, además de introducir ruido a la señal que se propaga, dado que disminuye la población en el nivel E_2 , también hace disminuir la ganancia que proporciona el EDFA. La respuesta espectral del EDFA sin señal a amplificar dará como resultado un espectro amplio de emisión espontánea que puede ser utilizado para identificar las regiones más propensas a la amplificación óptica.

Como puede apreciarse en la Fig. 1.3, la transición de importancia es de $4I_{13/2}$ a $4I_{15/2}$, ya que en ésta es en donde se produce la emisión estimulada para el bombeo de 980[nm] y una emisión en torno a 1530[nm].

1.3 EDFL en configuración de anillo para emisión en régimen continuo

El funcionamiento del EDFL, como el de todos los láseres, se basa principalmente en la fuente de bombeo, el material activo y en la cavidad resonante. Debido a que ya se ha hablado del bombeo para las fibras ópticas dopadas con erbio (EDF), únicamente se hablará del medio activo y el resonador.

En cuanto al medio activo cabe mencionar que el EDFL, como todos los láseres de fibra, tiene la peculiaridad de que la longitud del medio activo es típicamente del orden de metros, muy por encima de otro tipo de láseres. Es importante destacar este factor, porque la longitud del medio activo juega un papel determinante en el comportamiento del EDFL. Para longitudes de fibra dopada altas, mayor será la absorción del bombeo y el sistema será más eficiente; sin embargo, hay que considerar que a longitudes excesivas, habrá regiones de la fibra que no reciban el suficiente bombeo y entonces el sistema experimentará una fuerte absorción en la fibra. La longitud de la fibra, como todo medio activo de un láser, también es la que determina el tiempo que tarda en dar una vuelta a la cavidad (*roundtrip*) del EDFL y, como veremos para régimen pulsado, la tasa de repetición del mismo.

En cuanto a la cavidad resonante, existen diferentes configuraciones para la implementación de láseres de fibras en régimen continuo, entre éstos la formación del resonador Fabry-Perot usando espejos dieléctricos [9], redes de Bragg [10], espejos de fibra óptica [11] o basado en un resonador Fox-Smith [12].

A pesar de las múltiples opciones que existen para la implementación de los láseres de fibra, uno de los resonadores más usados en su implementación es el resonador en anillo; esto debido a que su implementación es sencilla y puede ser realizado completamente con elementos en fibra óptica. La configuración en anillo consiste básicamente en formar una cavidad resonante en forma de bucle, de modo que la luz circule repetidas veces por el medio activo realimentándose [13]. El montaje experimental de esta configuración consiste, básicamente, en formar un lazo con el medio activo y un acoplador en fibra. En la Fig. 1.4 se muestran los esquemas de configuración de anillo para un EDFL [14].

En ambos esquemas de la Fig. 1.4 se observan como elementos en común el bombeo óptico, que suele ser un diodo láser cuya emisión está en alguna de las longitudes de onda que permiten excitar la fibra dopada con erbio, el divisor de longitud de onda (WDM, por sus siglas en inglés), que es el que permite inyectar el bombeo al sistema, y el acoplador, que es el encargado de regular la potencia que se mantiene en la cavidad y la que es extraída de ésta.

Cuando el EDFL se implementa en configuración de anillo bidireccional (Fig. 1.4(a)), existirán dos sentidos de propagación de la potencia del láser en los que la energía disponible se repartirá. Siendo la potencia de salida únicamente la que corresponde a uno de estos dos sentidos, la eficiencia del láser se ve limitada.

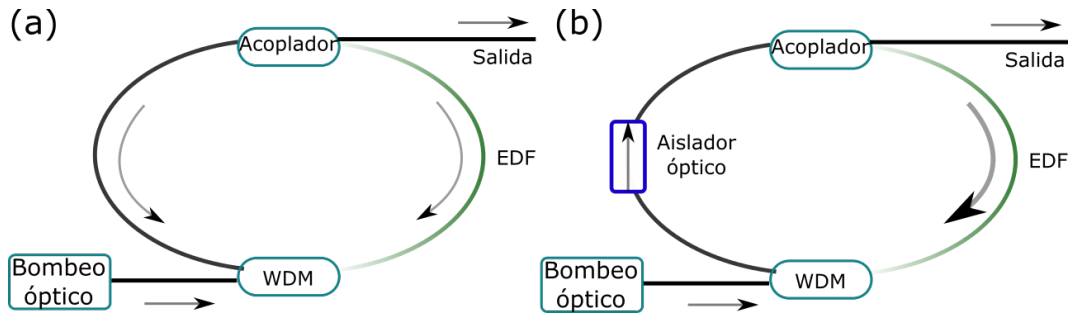


Figura 1.4: (a) Esquema del EDFL en configuración de anillo bidireccional. (b) Esquema del EDFL en configuración de anillo unidireccional. [4]

Para evitar la limitación debida a la bidireccionalidad, se puede introducir en la cavidad una aislador óptico, o un circulador que funcione como tal, que permita únicamente la propagación en un sentido, generando así una configuración de anillo unidireccional (Fig. 1.4(b)). Esta configuración unidireccional es la que permite un incremento en la potencia de salida.

En el caso particular de este trabajo el láser se implementará bajo el esquema del EDFL en configuración de anillo unidireccional bajo el esquema mostrado en la Fig. 1.5. En donde las funciones de la fibra dopada con erbio (EDF) de los esquemas anteriores, el aislador óptico y el WDM, se encuentran realizadas por el EDFA.

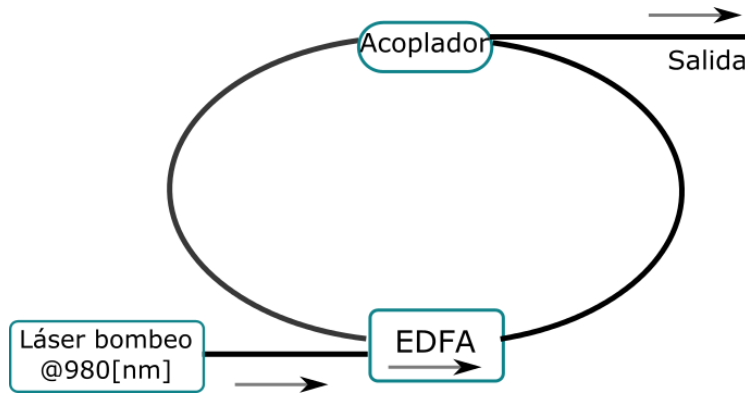


Figura 1.5: Esquema del EDFL a implementar para la emisión en régimen continuo.

En este esquema del EDFL, el amplificador de fibra dopada con erbio es bombeado por un diodo láser ($\lambda = 980[nm]$), excitando de esta forma la EDF, ocasionando la amplificación de la luz incidente y la emisión láser en ($\lambda \simeq 1550[nm]$). Esta luz viaja repetidas veces en la configuración de anillo, retroalimentándose y, gracias al acoplador, puede seleccionarse la cantidad de potencia que se extrae de la cavidad resonante.

1.4 EDFL en *mode-locking* para emisión en régimen pulsado

Para que el EDFL opere en régimen pulsado, suelen utilizarse varias técnicas de *mode-locking*, como el uso de absorbentes saturables [15], la configuración de láser en "ocho" [16] o la rotación de polarización no lineal (NLPR) [17]. Esta última técnica de *mode-locking* pasivo es la que se ha implementado en este trabajo para modificar el esquema original (Fig. 1.5) y obtener emisión en régimen pulsado.

La técnica de NLPR basa su funcionamiento en los cambios no lineales en el estado de polarización de un pulso óptico cuando éste es propagado por una fibra óptica que no está diseñada para mantener la polarización. Estos cambios de polarización tienen fundamento físico en la modulación de auto-fase, la modulación de fase cruzada y la birrefringencia de la fibra por la que el pulso es propagado. Y, la manera en que la NLPR da lugar al *mode-locking* es por medio de la interferencia de las diferentes componentes de polarización que se propagan dentro de la cavidad [18].

El esquema básico de un EDFL con *mode-locking* pasivo por medio de NLPR se muestra en la Fig. 1.6 ([19]-[20]). En este se observa que las modificaciones al esquema de régimen continuo consisten en agregar un bloque de control de polarización conformado por un polarizador lineal (PL) y dos controles de polarización (PCs). En este esquema, la luz después de pasar por el PL tendrá un estado de polarización lineal, el cual cambia a un estado elíptico al pasar por el primer control de polarización (PC1). Después de este PC el pulso experimenta los efectos no lineales y cambios de polarización dentro de la cavidad y, finalmente, en PC2 re-linealiza su polarización.

Tomando en cuenta que el polarizador lineal determina la potencia efectiva del sistema [18], los controles de polarización tienen que ser ajustados de tal forma que posibiliten la máxima transmisión en el PL. Con esto, la potencia en la cavidad aumentaría y, por ende, los efectos no lineales que interesa aprovechar también se verían incrementados. Es decir, para la implementación de la NLPR es fundamental tener el máximo de potencia posible dentro de la cavidad. Como otra manera de verlo, el modo de funcionamiento de esta técnica puede ser comparado con el de un absorbedor saturable artificial con efecto Kerr muy rápido donde su magnitud es ajustable por los PCs.

Aunque esta técnica tiene sus ventajas al ser todo en fibra y de implementación relativamente sencilla, el que las no-linealidades en la fibra sean muy susceptibles a los cambios de temperatura, tensión, torsión, y en general a parámetros que modifican la birrefringencia de ésta, implica que los cambios de polarización sean difícilmente cuantificables y reproducibles. Esto ocasiona que a menudo se tenga que ajustar la configuración de los PCs para volver a hallar el *mode-locking*.

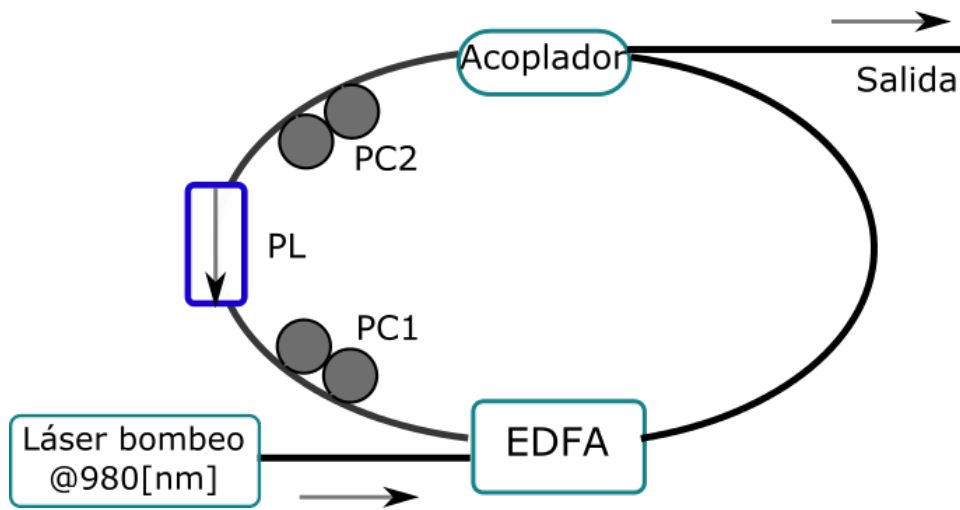


Figura 1.6: Esquema del EDFA a implementar para la emisión en régimen pulsado.

Capítulo 2

Material y métodos

Como se ha mencionado, el láser se fabricará a partir de componentes con los que ya se cuenta, por lo que es necesario caracterizarlos adecuadamente para tomar en cuenta sus ventajas y limitaciones en la realización de los montajes experimentales a realizar, y así poder encontrar los parámetros que optimicen éstos. Tomando siempre como parámetro de optimización el maximizar la potencia.

Es por eso que en este capítulo se presenta la caracterización de los principales componentes, incluyendo el método, notas importantes a considerar durante el mismo y el valor de las pérdidas de inserción así como de otros parámetros importantes que determinan el comportamiento de cada dispositivo o equipo.

2.1 Fuentes

2.1.1 Láser 1550[*nm*] (HP 83403A)

Para la caracterización de los dispositivos pasivos se utilizó un diodo láser con emisión espectral en torno a 1550[*nm*] (modelo HP 83403A), ya que es en esa longitud de onda en la que los componentes del montaje experimental operan.

Los parámetros principales de este láser se muestran en la Tabla 2.1. Al láser se le ha conectado, para permanecer de forma permanente, un *pigtail* con el objetivo de proteger su conector. Para la caracterización de esta fuente, se ha conectado el *pigtail* del láser al *pigtail* permanente del analizador de espectros ópticos (OSA) y se ha medido la respuesta espectral de emisión, con un *span* de 500[*nm*], en un rango espectral de 1200 – 1700[*nm*], una sensibilidad de -36.95 [*dBm*] y un $RBW = 5$ [*nm*]. El espectro de emisión adquirido es mostrado en la Fig. 2.1. En ésta puede observarse que la longitud de onda de operación, con esta resolución del OSA es $\lambda = 1544$ [*nm*], la cual está dentro del rango especificado por el fabricante. Así mismo, el ancho espectral se ajusta a lo especificado y, en cuanto a la potencia emitida, está dentro del rango de potencias posibles.

Parámetro	Valor
Longitud de onda	1550 ± 20 [nm]
Ancho espectral	≤ 3.5 [nm]
P_{max}	0.8 [dBm]
P_{typ}	-1.7 [dBm]
P_{min}	-4.6 [dBm]

Tabla 2.1: Especificaciones del láser HP 83403A [21].

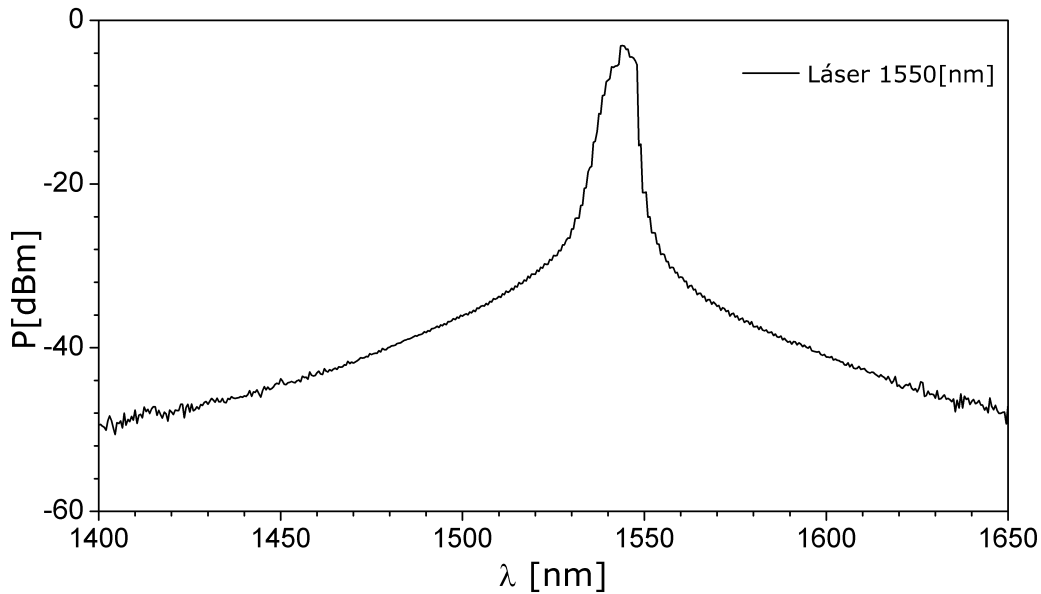


Figura 2.1: Espectro de emisión del láser HP 83403A.

2.2 Componentes de fibra óptica

2.2.1 *Pigtails*

La conexión entre los componentes del sistema se realizará por medio de *pigtails*. A pesar de que éstos se suponen de pérdidas despreciables, es importante cuantificarlas ya que el envejecimiento, el deterioro por uso y, en general, las condiciones en las que son conectados, pueden afectar sensiblemente dichas pérdidas. Es por eso que se caracterizaron las pérdidas de cada *pigtail* a utilizar, puesto que considerar éstas en nuestros experimentos es crucial para optimizarlos.

El diagrama experimental mostrado en la Fig. 2.2 muestra la manera de realizar la caracterización de las pérdidas de un *pigtail*. Como puede observarse se utilizó el láser cuya emisión es a 1544 [nm] y un medidor de potencia óptica. Al *pigtail* propio

2.2. COMPONENTES DE FIBRA ÓPTICA

del láser se le conecta un extremo del *pigtail* a caracterizar y el otro extremo es conectado al medidor de potencia óptica. La razón de no utilizar el OSA es porque los *pigtails* no inducen ningún cambio en el espectro y, por ende, el cuantificar la potencia promedio con el medidor de potencia basta.

Es importante destacar que, antes de introducir el *pigtail* a caracterizar y, en general, al realizar cualquiera de las conexiones, todos los conectores deben inspeccionarse con el microscopio portátil y limpiarse debidamente para que esto influya lo menos posible en las mediciones de las pérdidas de inserción.

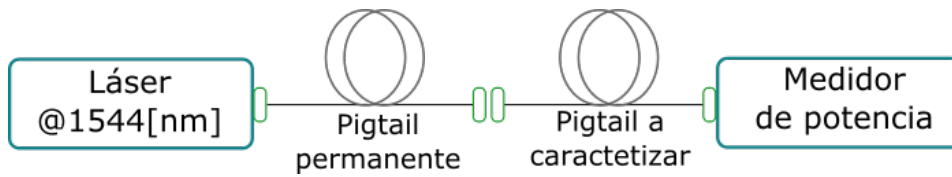


Figura 2.2: Diagrama experimental para la medición de las pérdidas aportadas por el *pigtail*.

Para la caracterización, primeramente se realizó una medida de la potencia sin el elemento a caracterizar, obteniendo una potencia de $P = 0.6820[mW]$, $P = -1.6621[dBm]$. Posteriormente se midió la potencia incluyendo el *pigtail* a caracterizar. La diferencia entre estas potencias es lo que proporciona una estimación de las pérdidas de inserción de cada uno de los *pigtails*.

Las mediciones se hicieron de forma repetida, cinco veces por cada uno de los cuatro *pigtails*, para de esta forma calcular el margen de confianza de la medida.

Con las cinco mediciones para cada *pigtail* se realizó el promedio para determinar el valor correspondiente a las pérdidas de inserción (IL) de los *pigtails*, las cuales son las mostradas en la Tabla 2.2. En ésta se puede constatar que, como indica el fabricante, las pérdidas están por debajo de los $0.2[dB]$, por lo que estos *pigtails* se pueden utilizar con fiabilidad. Sin embargo, se procurará el uso de los *pigtails* con menores IL para intentar asegurar menores pérdidas en el sistema.

<i>Pigtail</i>	<i>IL[dB]</i>
1	0.1979 ± 0.02
2	0.0364 ± 0.01
3	0.0350 ± 0.01
4	0.1276 ± 0.04

Tabla 2.2: Pérdidas por inserción de los *pigtails*.

2.2.2 Acopladores

El acoplador es una estructura con dos puertos de entrada y dos puertos de salida. Este dispositivo tiene como objetivo dividir la potencia que entra por uno de los puertos de entrada entre los dos puertos de salida. En este caso, se caracterizaron tres acopladores: 5/95, 50/50 y 10/90. Donde cada cociente hace alusión a los porcentajes de potencia en unidades naturales que respectan a cada uno de las terminales de salida.

La caracterización de los acopladores se centra en cuantificar las pérdidas en cada puerto para hallar la configuración que entrega la relación de porcentajes correspondiente y, una vez hallada, medir con precisión dichos porcentajes.

Para la caracterización, el montaje consistió en conectar el láser de 1544[nm], con su pigtail *permanente*, al OSA para medir el espectro sin el acoplador, cuya potencia pico es de $P = -3.65[dBm]$. Posteriormente, se agregó el acoplador al montaje, conectando uno de sus puertos de entrada al láser y conectando al OSA el puerto al que se le realizaría la medición. Antes de realizar todas las conexiones, al igual que en todos los montajes que involucren dispositivos de fibra óptica, es fundamental realizar la observación con el microscopio portátil y la limpieza adecuada de todos los conectores.

Una vez conectado el acoplador, se midió con el OSA el espectro para cada uno de los tres puertos restantes. La razón por la que las mediciones se realizaron con el OSA es porque, además de medir las potencias, con este instrumento se puede apreciar si el acoplador induce alguna modificación en el espectro de entrada. Para el caso de las medidas aquí presentadas se ha configurado el OSA con una sensibilidad de $-36.82[dBm]$, un span de 317.5[nm] en el rango de 1384 – 1701.5[nm] y se presentan valores de potencia pico.

Una vez que han sido cuantificadas la potencia en el puerto de entrada y la potencia para cada uno de los otros puertos es posible obtener la relación entre éstas y el porcentaje asociado. A pesar de que la relación indicada por los acopladores únicamente hace alusión a los puertos de salida, es importante medir también la potencia en el otro puerto de entrada para verificar que exista aislamiento entre los dos puertos de entrada.

Una vez realizadas las mediciones de potencia es posible determinar los porcentajes correspondientes al acoplador. Para ello, se hace la suma de todas las potencias de los tres puertos (dos de salida y el otro de entrada), que se considerará la potencia total. Después se obtiene el porcentaje que representa la potencia en cada puerto de la potencia total. Finalmente se hace la diferencia entre la potencia de entrada y la potencia total para determinar cuáles son las pérdidas de inserción del acoplador.

Realizando este tipo de caracterización de los acopladores es posible determinar cuál es la configuración más conveniente para ser utilizada en el sistema, siendo ésta la que ofrezca los porcentajes más próximos a los establecidos.

2.2. COMPONENTES DE FIBRA ÓPTICA

Acoplador 5/95 (JDSU00919909)

Después de realizar el procedimiento de caracterización mencionado anteriormente, en las Figuras 2.3 y 2.4 se muestran los porcentajes para cada uno de los puertos, en las distintas configuraciones cuya diferencia es el puerto de entrada utilizado. Al comparar ambas figuras puede observarse que la configuración más acertada es cuando se utiliza el puerto 2 como entrada, ya que el dispositivo tiene menores pérdidas de inserción y los porcentajes se ajustan a los esperados.

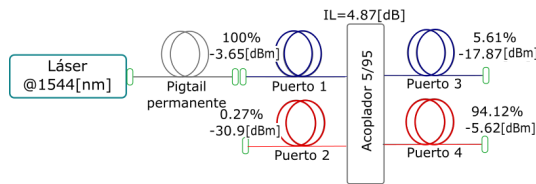


Figura 2.3: Porcentajes y valores de potencia en el acoplador 5/95 utilizando el puerto 1 como puerto de entrada.

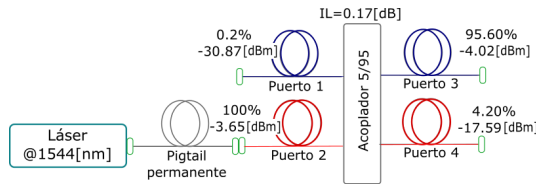


Figura 2.4: Porcentajes y valores de potencia en el acoplador 5/95 utilizando el puerto 2 como puerto de entrada.

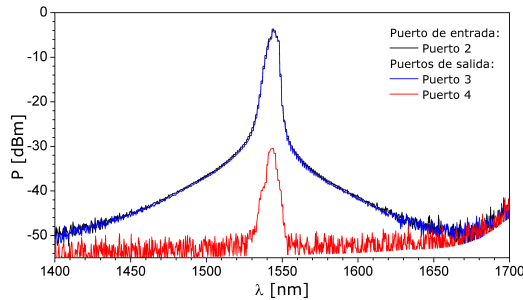


Figura 2.5: Espectros obtenidos en cada uno de los puertos del acoplador 5/95 en la configuración óptima.

En la Fig. 2.5 se muestra la distribución de la potencia en los puertos de salida en comparación a la de entrada.

Acoplador 50/50 (JDSU00919672)

De igual forma que el acoplador 5/95, en las Figuras 2.6 y 2.7 se muestran los porcentajes para cada uno de los puertos, en las distintas configuraciones cuya diferencia es el puerto de entrada utilizado. Igual que en el caso anterior, al comparar ambas figuras puede observarse que la configuración más acertada es cuando se utiliza el puerto 2 como entrada, por sus menores pérdidas de inserción y mayor ajuste a los porcentajes de potencia esperados.

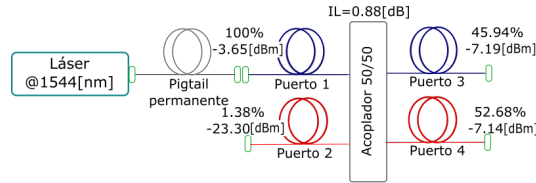


Figura 2.6: Porcentajes y valores de potencia en el acoplador 50/50 utilizando el puerto 1 como puerto de entrada.

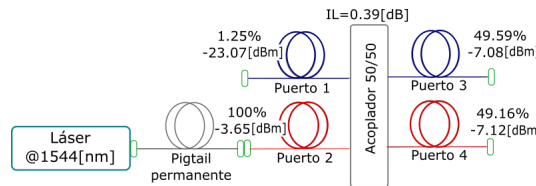


Figura 2.7: Porcentajes y valores de potencia en el acoplador 50/50 utilizando el puerto 2 como puerto de entrada.

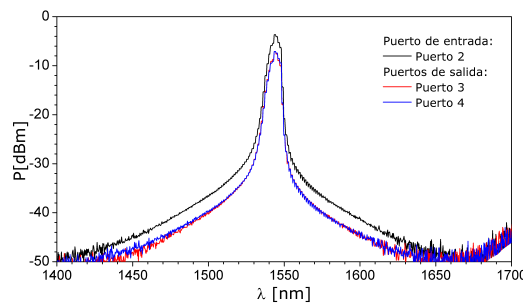


Figura 2.8: Espectros obtenidos en cada uno de los puertos del acoplador 50/50.

En la Fig. 2.8 se puede apreciar la distribución de la potencia en los puertos de salida en comparación a la de entrada.

2.2. COMPONENTES DE FIBRA ÓPTICA

Acoplador 10/90 (JDSU00919629)

De igual forma que el acoplador 5/95, en las Figuras 2.9 y 2.10 se muestran los porcentajes para cada uno de los puertos, en las distintas configuraciones cambiando el puerto de entrada utilizado. Con las figuras se puede observar que la configuración cuya entrada es el puerto 2 tiene menores pérdidas de inserción.

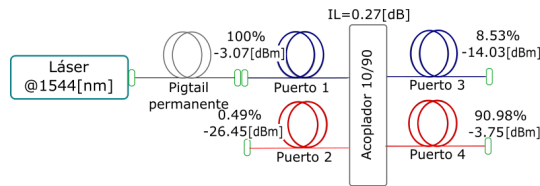


Figura 2.9: Porcentajes y valores de potencia en el acoplador 10/90 utilizando el puerto 1 como puerto de entrada.

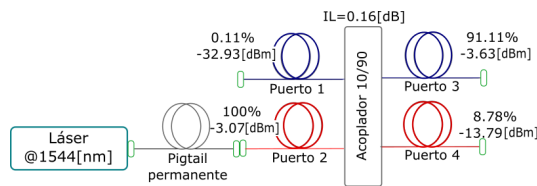


Figura 2.10: Porcentajes y valores de potencia en el acoplador 10/90 utilizando el puerto 2 como puerto de entrada.

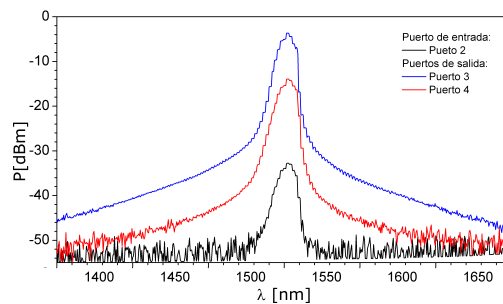


Figura 2.11: Espectros obtenidos en cada uno de los puertos del acoplador 10/90.

En la Fig. 2.11 se muestra la distribución de la potencia en los puertos de salida en comparación a la de entrada.

2.2.3 Amplificador de Fibra Dopada con Erblio (JDSU OA400)

Un dispositivo fundamental para la implementación del láser de fibra dopada con erbio es el amplificador de fibra dopada con Erblio (EDFA, por sus siglas en inglés), ya que es el elemento que proporcionará ganancia al sistema.

Los EDFA's son elementos de amplificación que destacan por su ganancia, ancho de banda y poca generación de ruido. En ese sentido, las especificaciones del EDFA utilizado (JD OA400) son las mostradas en la Tabla 2.3 ¹.

Parámetro	Valor
λ de bombeo	980[nm]
λ de la señal	1529 a 1562 [nm]
Ganancia en pequeña señal	$\approx 24[dB]$
Potencia total de entrada	-30 a $0[dBm]$
Potencia total de salida	$\approx 15[dBm]$

Tabla 2.3: Especificaciones del EDFA JD OA400 utilizado en los experimentos.

El EDFA está asociado a un controlador (LDC3908) para manipular los parámetros del diodo láser de bombeo. La caracterización completa del EDFA en esta configuración puede consultarse en [7]. En este trabajo se presentan la caracterización de la ganancia en función de la corriente de bombeo y, puesto que ésta está definida por: $G = \frac{P_o - P_{ASE}}{P_s}$, la potencia de emisión espontánea (ASE, por sus siglas en inglés) P_{ASE} .

En la referencia [7] se realizó la caracterización de la ganancia del EDFA en función de la corriente de bombeo I_p teniendo como parámetros fijos la potencia de entrada en $-7[dBm]$ y la longitud de la señal de entrada en $\lambda = 1550[nm]$. En la Fig. 2.12 se muestra la caracterización obtenida al reproducir dicha caracterización. A esta caracterización se le ha realizado un ajuste, identificando que el comportamiento de la ganancia del EDFA en función de la I_p tiene un comportamiento lineal.

En cuanto al espectro ASE del EDFA este se adquirió haciendo una conexión directa entre el OSA y el EDFA y con una corriente de bombeo de $I_p = 165[mA]$, que es la corriente de bombeo a utilizar en la mayoría de los experimentos, obteniendo el espectro mostrado en la Fig. 2.13. En ésta se puede observar cómo es la variación del espectro en función de la longitud de onda; se observa que el máximo se encuentra en $\approx 1533[nm]$, que después presenta un ancho de banda ($1535 - 1565[nm]$) en el que la respuesta es bastante plana, y que después de esta zona la potencia comienza a decaer.

¹La ganancia de pequeña señal de un medio de ganancia (por ejemplo, el medio activo de un láser o amplificador) es la ganancia obtenida para una señal de entrada que es tan débil que no causa ninguna saturación de ganancia. En el funcionamiento de onda continua, esto significa que en todas partes en el medio de ganancia la intensidad de la señal es muy inferior a la intensidad de saturación.

2.2. COMPONENTES DE FIBRA ÓPTICA

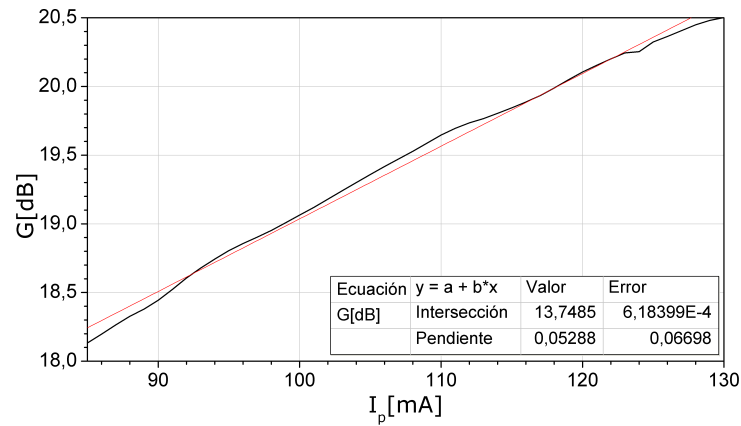


Figura 2.12: Ganancia del EDFA en función de la corriente de bombeo [7].

Al observar las variaciones del espectro, quedan evidenciadas las zonas espectrales con mayor ruido ASE, que a la vez son las que mayor ganancia podrán ofrecer; sin embargo, considerando que también las pérdidas en función del espectro de las componentes de la cavidad juegan un papel importante, la emisión estará en la región de 1560[nm] y no en las zonas del espectro cuya potencia de ruido ASE es la más alta (1530[nm]).

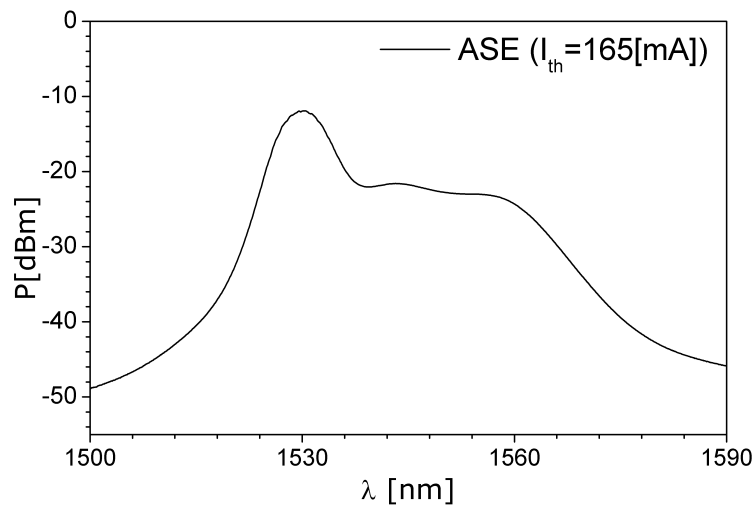


Figura 2.13: Espectro ASE del EDFA.

2.2.4 Controladores de polarización (Thorlabs FPC560)

Para poder realizar el montaje experimental que permita el *mode-locking* se necesitan dispositivos que permitan hacer modificaciones en la polarización de la luz.

En este caso se utilizaron los controladores de polarización Thorlabs FPC560 [22]. Estos controladores de polarización manuales aprovechan la birrefringencia inducida por el estrés en la fibra para así permitir cambios en la polarización de la luz que viaja en una fibra monomodo que da un número de vueltas distinto en cada una de las tres bobinas que componen el dispositivo. De esta forma, cada una de las bobinas funcionan como retardadores de fibra. La cantidad de birrefringencia inducida en la fibra está una función del diámetro del revestimiento de la fibra, el diámetro de la bobina (fijo), el número de vueltas de fibra por bobina, y la longitud de onda de la luz.

Para los experimentos se utilizaron dos controladores con la misma configuración. Ambos son controladores de polarización de tres bobinas que combinan una placa de $\lambda/4$ (6 vueltas), una $\lambda/2$ (3 vueltas), y finalmente otra $\lambda/4$ (6 vueltas); los cuales son capaces de transformar un estado de polarización arbitraria en cualquier otro estado de polarización. La primera placa de cuarto de onda sirve para transformar el estado de polarización de entrada en un estado de polarización lineal. La placa de $\lambda/2$ gira el estado de polarización lineal, mientras que la última placa de cuarto de onda sirve para transformar el estado lineal en un estado de polarización que optimice el efecto no lineal en el EDFL.

2.2.5 Polarizador lineal en línea (Thorlabs ILP1550SMFC)

Para favorecer una sola polarización lineal de la luz y posibilitar la extinción de otros estados de polarización que no son de interés en el sistema de *mode-locking*, se hizo uso de un polarizador lineal en línea Thorlabs ILP1550 SMFC [23]. Éste está diseñado para permitir el paso de la luz polarizada linealmente, mientras que bloquea la polarización ortogonal de una fuente de luz no polarizada (o polarizada aleatoriamente).

Este dispositivo está constituido por una fibra que tiene una parte del revestimiento pulido y reemplazado con una capa de película delgada, de tal forma que esto hace que la fibra tenga propiedades de polarización. Este efecto se da porque en la región del recubrimiento, un modo de polarización de la fibra monomodo es altamente atenuada y el otro modo se propaga con prácticamente ninguna pérdida, debido a que el recubrimiento actúa como una guía de onda multimodo que permite que la luz a ciertas longitudes de onda resonantes sea removida de la fibra al no poderse acoplar.

El polarizador usado permite atenuar la luz polarizada ortogonalmente con las especificaciones mostradas en la Tabla 2.4.

2.3. DETECTORES Y OTROS EQUIPOS

<i>Parámetro</i>	<i>Valor</i>
λ central	1550[nm]
Ancho de banda	± 50 [nm]
IL	≤ 0.8 [dB]
Radio de extinción	28[dB]
P_{max}	≤ 300 [mW]

Tabla 2.4: Especificaciones del polarizador lineal ILP1550SMFC .

2.3 Detectores y otros equipos

2.3.1 Analizador de Espectros Ópticos (Agilent B6145B)

Para realizar las mediciones de potencia óptica, en la mayoría de los casos, se utilizará un Analizador de Espectros Ópticos (OSA, por sus siglas en inglés) Agilent B6145B. El OSA se utiliza para realizar medidas de potencia óptica en función de la longitud de onda. Siendo sus principales aplicaciones la caracterización de fuentes de luz, así como la medida de la transmisión de componentes ópticos pasivos.

El principio de funcionamiento del OSA [24] consta en que la luz que entra en éste pasa a través de un filtro óptico sintonizable en longitud de onda, en este caso en un interferómetro, el cual selecciona las componentes espectrales individuales. A continuación, un fotodetector convierte la señal de potencia óptica en corriente eléctrica proporcional a la señal incidente. La corriente en el fotodetector se convierte en tensión mediante un amplificador de transimpedancia y seguidamente se digitaliza. Los procesados de la señal después de este paso son totalmente digitales.

Para que las mediciones tengan mayor grado de precisión es indispensable calibrar el OSA, para con ello poder identificar las contribuciones que tiene éste en las mediciones. Con el fin de obtener los parámetros iniciales se realizó la autocalibración del OSA. La autocalibración se realiza con un *pigtail* que conecta al LED y al detector integrados en el OSA, como se indica en el manual del instrumento. Esta etapa es importante porque, además de proveer mayor fidelidad en las mediciones, los valores proporcionados por el fabricante que caracterizan al OSA son para cuando el instrumento está autocalibrado.

El OSA tiene dos rangos de calibración: *Telecom* (1270 – 1550[nm]) y *Full* (605 – 1670[nm]). Es importante considerar que, según el manual, entre más esté centrada la lectura del OSA en un rango específico habrá menos incertidumbre para longitudes de onda lejanas al centro. Debido a esto y considerando que el láser a utilizar para las calibraciones emite en ~ 1550 [nm], se optó por seleccionar el rango *Telecom*. En este rango, las especificaciones proporcionados por el fabricante como característicos del OSA se presentan en la Tabla 2.5.

Longitud de onda	[nm]
Rango espectral	600-1700
Rango <i>span</i>	0.2
Precisión @1480-1570[nm]	0.01
Precisión @1570-1620[nm]	0.025
Amplitud	[dBm]
Sensibilidad	-90
P_{max} por canal	+15
P_{max} total	+30
P_{total} en 10[nm]	+23
Rango dinámico	[dB]
@1550[nm]	-60

Tabla 2.5: Especificaciones del OSA Agilent B6145B [25].

2.3.2 Filtro sintonizable (JDSU VCF 100 2CA NC C 1.0)

Los filtros JDSU VCF son filtros paso de banda sintonizables controlados por voltaje. La selección de longitud de onda central se sintoniza con precisión utilizando un motor paso a paso impulsado por un controlador de circuito integrado externo. El motor provoca que la longitud de onda central que selecciona el filtro se desplace hacia arriba o hacia abajo en pasos uniformes, de forma que proporciona alta resolución. Cabe señalar que la respuesta del filtro depende de la dirección en la que se mueva el motor, por lo que se debe procurar movimientos unidireccionales [26].

Las características principales del filtro sintonizable JDSU VCF 100 2CA NC C 1.0 se recopilan en la Tabla 2.6.

Parámetro	Valor
Rango espectral	1525 – 1565[nm]
$BW@ - 3[dB]$	70[GHz]
Rechazo de f adyacentes	-40[dB]
$Potencia_{max}$	23[dBm]
IL	3[dB]

Tabla 2.6: Especificaciones del filtro sintonizable JDSU VCF 100 2CA NC C 1.0 [26].

2.3.3 Medidor de potencia óptica (Photom 230)

Para hacer mediciones de potencia óptica, que no requieren la información de la distribución espectral de ésta, se hará uso de un medidor Photom 230, cuyas características se engloban en la Tabla 2.7 [27].

2.3. DETECTORES Y OTROS EQUIPOS

Es importante apreciar que la potencia está limitada a los $4.7[dBm]$, por lo que para potencias superiores será indispensable el uso del OSA.

Parámetro	Valor
$\lambda_{operacion}$	820, 850, 1310, 1550[<i>nm</i>]
Rango de operación	$-70 - +4.7[dBm]$
Resolución	0.001[<i>dB</i>]

Tabla 2.7: Especificaciones del medidor de potencia Photon 230 [27].

2.3.4 Osciloscopios: Tektronix TDS3052B y Agilent Infiniium DCA 86100B

Para poder observar el comportamiento temporal y hacer las mediciones de la tasa de repetición de los pulsos generados por el láser emitiendo en régimen pulsado, se utilizaron dos osciloscopios.

Por un lado, en primera instancia, se utilizó un osciloscopio digital, Tektronix TDS3052B, cuyas características principales se muestran en la Tabla 2.8.

Parámetro	Valor
Ancho de banda	500[<i>MHz</i>]
f de muestreo	5[<i>GS/s</i>]
Sensibilidad (/div)	1[<i>mV</i>] – 10[<i>V</i>]
$Voltaje_{max}$	150[<i>V_{RMS}</i>]

Tabla 2.8: Especificaciones del osciloscopio Tektronix TDS3052B [28].

Debido a que con el osciloscopio digital se ve en cierto grado limitadas las mediciones por ser pulsos de corta duración y con una tasa de repetición en el rango de los [*MHz*], se decidió utilizar, de forma auxiliar, un osciloscopio óptico de mayor ancho de banda (Agilent Infiniium DCA 86100B) para ver si con ello era posible resolver los pulsos. Las características de este instrumento de medición se muestran en la Tabla 2.9.

Parámetro	Valor
Ancho de banda óptico	10[<i>GHz</i>]
Rango de λ	1000 – 1600[<i>nm</i>]
Sensibilidad	$-15[dBm]$
P_{max} pico	10[<i>dBm</i>]

Tabla 2.9: Especificaciones del osciloscopio óptico Agilent Infiniium DCA 86100B[29].

Este osciloscopio tiene dos modos de operación: osciloscopio y diagrama de ojo. Este segundo modo permite observar la superposición los pulsos que se van recibiendo.

Cabe señalar que para el uso de ambos equipos, debido a sus limitaciones en cuanto a la potencia máxima que no causa daños en éstos, es necesario utilizar algún acoplador para que únicamente incida en los detectores una fracción de la potencia total y no dañar.

Capítulo 3

EDFL con emisión en régimen continuo

El objetivo final de este trabajo es implementar EDFL con emisión en régimen pulsado; sin embargo, para asegurar el funcionamiento en este régimen, es necesario maximizar la potencia del láser en configuración de anillo para el régimen continuo. Esto partiendo de la premisa de que al tener la mayor potencia en régimen continuo dentro de la cavidad, se inducirá mayor efecto no lineal en el montaje experimental, incrementando la posibilidad de entrar en régimen pulsado.

Buscando esta maximización en la potencia del láser en régimen continuo, primeramente se implementó el montaje experimental del láser en anillo y se observó que con éste se obtenía la respuesta de emisión láser en régimen continuo esperada. Posteriormente se sustituyó un acoplador por otro y se probaron distintas combinaciones de los puertos de entrada y salida, para con ello observar las variaciones que conllevaban en la respuesta del EDFL. Finalmente se seleccionó el montaje experimental con el acoplador que mayores potencias entregaba y se caracterizó.

Este capítulo tiene como objetivo describir las etapas antes mencionadas, incluyendo los múltiples montajes experimentales realizados y los experimentos necesarios para llegar a una conclusión del que se utilizará para la implementación del EDFL en régimen pulsado.

3.1 Implementación del montaje experimental del EDFL

Para la implementación del láser con emisión en régimen continuo se realizó una configuración en anillo, cuyo funcionamiento se explica en la Sección 1.3. El diagrama experimental utilizado se presenta en la Fig. 3.1, en la cual se muestra como se forma una cavidad de anillo con el EDFA. En este arreglo, el acoplador tiene la función de cerrar el anillo y permitir que parte de la potencia sea extraída de la cavidad para poder medirla con el OSA.

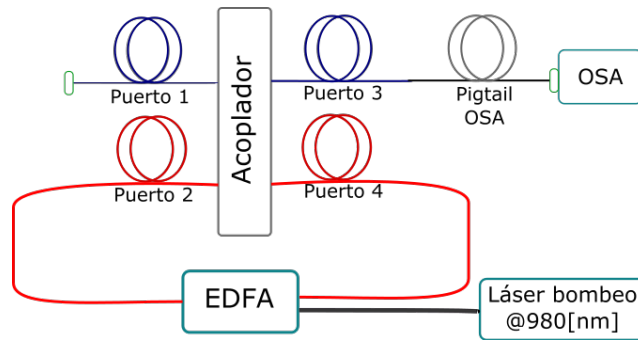


Figura 3.1: Configuración en anillo para la implementación del láser en régimen continuo.

En un inicio el arreglo se realizó utilizando el acoplador 5/95 con el puerto de 5% al OSA y el 95% a la cavidad. Para observar la existencia de emisión láser, se hizo un barrido en la corriente del bombeo (I_p) del EDFA de $25[mA]$ a $165[mA]$ y fueron apreciados los efectos. Se pudo observar que existe un valor de corriente, corriente umbral (I_{th}), en la que se ve una disminución dramática del ancho espectral, lo cual prueba la emisión láser. En la Fig. 3.2, se muestra el espectro cuando la I_p es menor que la I_{th} , para cuando ésta iguala la corriente umbral y para cuando se tiene la I_p máxima que se le puede proporcionar al EDFA ($I_p = 165[mA]$). Estas mediciones se realizaron con un ancho de banda de resolución (RBW) de $2[nm]$, *span* de $199[nm]$ y sensibilidad de $-34.89[dBm]$.

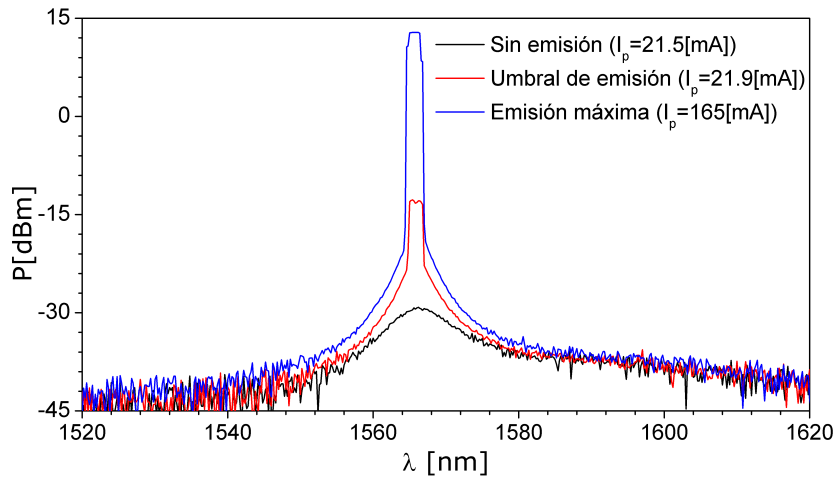


Figura 3.2: Comparación de espectros antes y después de la emisión láser en régimen continuo.

3.2. EDFL CON DISTINTOS ACOPLADORES

En la Fig. 3.2 se puede observar que los espectros parecen estar saturados; sin embargo, no lo están. Esta apariencia es debida a que la resolución empleada en esa medida no resuelve los diversos picos espectrales de emisión que genera el EDFL.

Debido a que en esta primera prueba se obtuvo emisión en régimen continuo, se decidió intercambiar el acoplador utilizado (5/95) por los otros acopladores (50/50 y 10/90) por separado. De esta forma se perseguía conseguir el objetivo señalado al principio de este capítulo: encontrar el arreglo experimental que entregara la mayor potencia dentro de la cavidad con objeto de lograr el régimen de *mode-locking* en el EDFL. Los resultados de utilizar los diferentes acopladores se presentan en la siguiente sección.

3.2 EDFL con distintos acopladores

Debido a como es implementada la configuración de anillo, el acoplador juega un papel fundamental, pues es el que determinará el porcentaje de potencia que circulará repetidas veces por la cavidad de anillo y el porcentaje que será extraído de ésta; en este caso la potencia extraída es la que se medirá con el OSA.

Como antes se ha mencionado, se decidió probar utilizando diferentes configuraciones de acopladores para hallar el montaje experimental que permitiera la emisión láser de mayor potencia. Considerando la caracterización previa de los acopladores, mostrada en la Sección 2.2.2, únicamente se hicieron las pruebas del EDFL en régimen continuo para las tres mejores configuraciones de acopladores, esto es, para las que menores pérdidas de inserción introducían y las que más se acercaban al reparto teórico de potencias. Estas configuraciones son las mostradas en las Fig. 2.4, 2.7 y 2.10, que corresponden a cada uno de los acopladores cuando el puerto rojo (2) es el que cierra la cavidad.

La caracterización de los diferentes montajes experimentales realizados constó de hacer un barrido en función de la I_p , en el rango de $25 - 165[mA]$, para obtener, como puntos clave, la corriente umbral, la potencia para ésta, y la máxima potencia obtenida adquirida a la máxima corriente de bombeo ($165[mA]$).

Un concentrado de los resultados de caracterización de las diferentes configuraciones se muestra en la Tabla 3.1 ^{1 2}. Los datos registrados en esta tabla corresponden a las corrientes indicadas por el controlador del EDFA y a las potencias pico y longitudes de onda medidos con el OSA; así mismo, las indicaciones (ext) e (int) hacen alusión al exterior e interior de la cavidad.

¹La $P_{max}(int)$ es teórica y se ha calculado considerando los porcentajes que se caracterizaron para el acoplador en uso.

²Las letras R y A se utilizan para identificar las distintas configuraciones del acoplador 50/50, haciendo éstas alusión al color del cable respectivo.

CAPÍTULO 3. EDFL CON EMISIÓN EN RÉGIMEN CONTINUO

% ext	% int	$I_{th}[mA]$	$P(I_{th})[dBm]$	$P_{max}[dBm](ext)$	$P_{max}[dBm](int)$	$\lambda[nm]$
95	5	30.0	-2.57	12.89	13.08/-0.68	1559.40
5	95	21.5	-23.22	2.40	16.07/15.97	1559.40
90	10	26.0	-5.67	14.38	14.78/4.22	1560.44
10	90	20.7	-21.94	6.24	16.8/16.39	1560.44
50A	50R	21.9	-11.69	12.91	15.97/12.89	1565.48
50R	50A	21.9	-13.5	12.85	15.91/12.87	1565.48

Tabla 3.1: Caracterización de las seis configuraciones de EDFL analizadas ($P_{max}[dBm](int)$ antes/después del acoplador).

De los resultados de la tabla se pueden destacar varios aspectos importantes a tomar en cuenta. En primer lugar, se observa que la potencia dentro de la cavidad antes de ser dividida por el acoplador es parecida para todas las configuraciones, siendo entonces la variación del porcentaje de potencia que el acoplador extrae de la cavidad, el único factor que determina el incremento o decremento de la potencia medida por el OSA. En cuanto a lo que sucede después de que la potencia es dividida por el acoplador, se observa que para porcentajes bajos, la potencia dentro de la cavidad decae bastante; sin embargo, el EDFA amplifica la señal obteniendo de nuevo una potencia alta. Por otro lado, para cuando a la cavidad ingresa un porcentaje alto de potencia, la potencia que ha sido dividida por el acoplador apenas disminuye, por lo que al llegar al EDFA su amplificación es casi nula puesto que son potencias que están muy cerca de la potencia máxima del amplificador. Tomando esto en cuenta, es posible decir que en realidad para estas configuraciones la potencia del sistema se verá limitada por lo que pueda otorgar el EDFA.

Debido a la disminución en las potencias obtenidas en el interior de la cavidad, las configuraciones 95/5, 90/10 y 50A/50R fueron descartadas para su futuro uso en la implementación del *mode-locking*; puesto que, como se ha mencionado, para la implementación de régimen pulsado se necesita la mayor potencia en el interior del resonador.

Es importante destacar que en cuanto a las corrientes umbrales, los resultados coinciden con lo esperado. Ya que en teoría las configuraciones que otorgan mayor potencia a la cavidad tienen una corriente umbral más baja, puesto que al tener menores pérdidas en la cavidad se necesitaría menor amplificación (menor I_{th}) para compensarlas y obtener la emisión láser.

De las tres posibles configuraciones restantes, cabe señalar que la de mejor prestaciones **en régimen continuo** es la configuración de 90/10 al brindar la potencia máxima al exterior de la cavidad; sin embargo, para el objetivo de lograr *mode-locking*, lo óptimo sería utilizar el montaje con la potencia máxima en el interior de la cavidad para incrementar la excitación de efectos no lineales, el cual no corresponde a esta configuración de acoplador. Partiendo de esta premisa, la configu-

3.3. ESQUEMA EN RÉGIMEN CONTINUO SELECCIONADO PARA IMPLEMENTAR EL EDFL EN RÉGIMEN PULSADO

ración 10/90 sería la más favorecedora para la implementación del EDFL en régimen pulsado. Esto coincide con la literatura [19][30][20][31], en donde el mejor compromiso entre porcentaje de energía interna y el ruido ASE se consigue ingresando el 90% de la potencia a la cavidad y extrayendo el 10%. Debido a lo antes dicho, se decidió utilizar el acoplador 10/90 para los experimentos relativos al régimen pulsado. Tiene cabida señalar que la primera prueba para régimen pulsado se realizó con esta configuración de acoplador y, debido a que las potencias que se consiguieron en régimen continuo están por debajo de la de los trabajos antes citados, una vez que se obtuvo régimen pulsado se decidió mantener esta configuración fija para asegurar el funcionamiento.

Antes de continuar es importante destacar que en la Tabla 3.1 se observa que la emisión del láser en configuración de anillo emite a diferentes longitudes de onda dependiendo del acoplador utilizado, lo cual evidencia que cada acoplador favorece en cierta medida a una λ específica. Para hacer un análisis más completo de esto, se realizaron experimentos con un filtro sintonizable para poder caracterizar el comportamiento del EDFL en sus diferentes longitudes de onda de emisión, las cuales se abordan en la Anexo A. Cabe señalar que estos experimentos únicamente se han realizado para optimizar la potencia del EDFL en el caso de que se quiera utilizar en régimen continuo, ya que la introducción al sistema del filtro sintonizable impide la generación del *mode-locking* y, por tanto, no permite conseguir el régimen pulsado.

3.3 Esquema en régimen continuo seleccionado para implementar el EDFL en régimen pulsado

Una vez seleccionada la configuración 10/90 de cara a ser utilizada para la implementación del EDFL en régimen pulsado, fue necesario caracterizar el comportamiento del EDFL en régimen continuo para este caso en particular. Para ello, se obtuvo el espectro de emisión para los tres diferentes estados: sin emisión, en el umbral de emisión y con la emisión máxima; los cuales se muestran en la Fig. 3.3. Además, se realizó la caracterización de la potencia de emisión del EDFL en función de la corriente de bombeo.

La curva de caracterización se muestra en la Fig. 3.4, en donde se corrobora que $I_{th} = 30[mA]$. Debido a que no se contaba con un medidor de potencia capaz de funcionar en el rango de potencias que el EDFL emitía, las mediciones se realizaron con el OSA. Para asegurar una medida acertada, se hizo uso de la utilidad de promediado del OSA, fijándose el parámetro en la media las 20 últimas trazas capturadas en el rango espectral de $1557 - 1563[nm]$. Las trazas de algunos de los espectros adquiridos conforme se variaba la I_p pueden observarse en la Fig. 3.5. En ésta puede observarse que, aunque el pico máximo de potencia siempre permanece en $\lambda = 1560.4[nm]$, conforme aumenta la potencia se empieza a observar la aparición de nuevos picos de emisión y la competencia entre éstos.

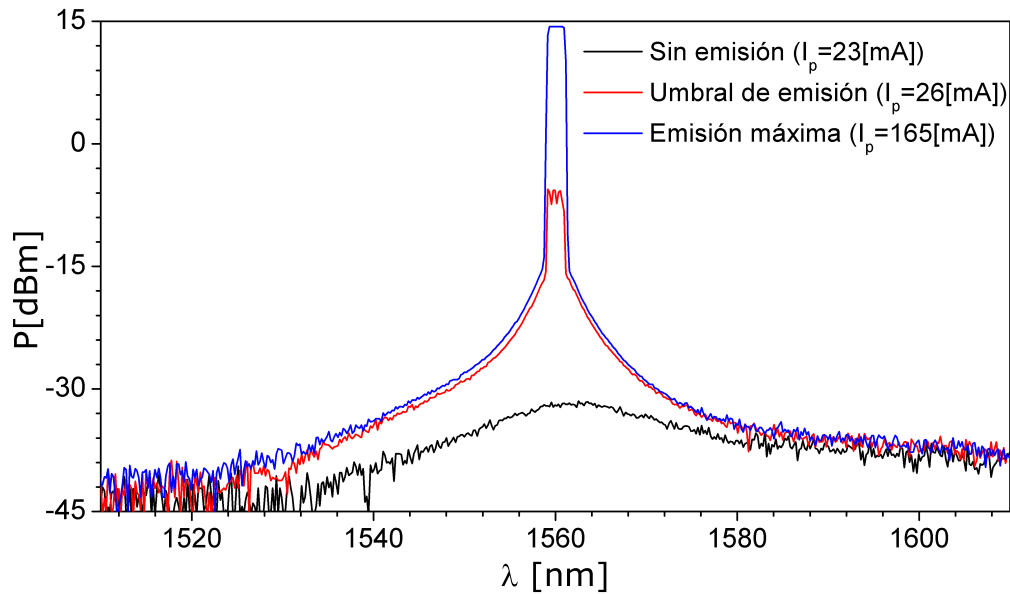


Figura 3.3: Comparación de espectros antes y después de la emisión láser en régimen continuo con el acoplador 10/90.

Debido a las inestabilidades causadas la competición de bandas espectrales, se optó por utilizar un filtro sintonizable para observar si era posible disminuir esos efectos y obtener un espectro con un único pico espectral. Debido al escaso interés que tienen esta serie de experimentos para el objetivo final de este trabajo, y por mejorar la legibilidad de éste, los resultados a estos experimentos se muestran en el Anexo A por si desean ser consultados.

3.3. ESQUEMA EN RÉGIMEN CONTINUO SELECCIONADO PARA IMPLEMENTAR EL EDFL EN RÉGIMEN PULSADO

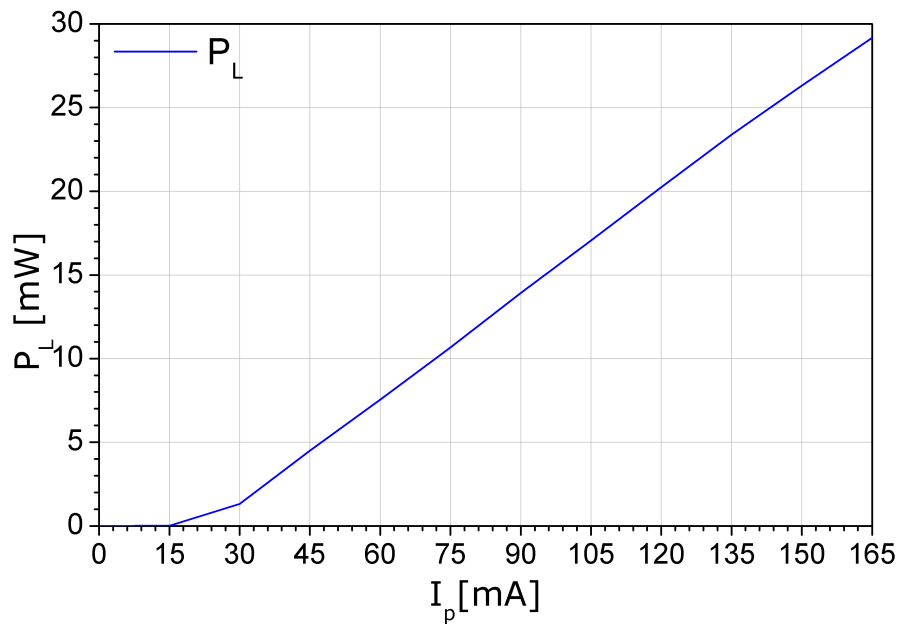


Figura 3.4: Curva de caracterización del EDFL en función de la potencia de bombeo.

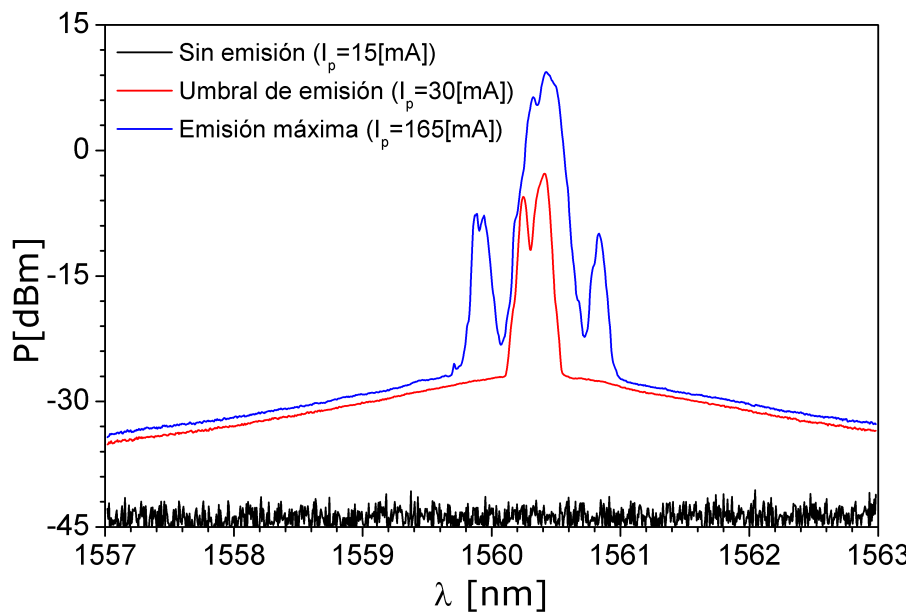


Figura 3.5: Espectros a distintas corrientes de bombeo: se aprecia la generación de nuevos picos conforme la potencia de bombeo aumenta.

Capítulo 4

EDFL con emisión en régimen pulsado

Para la implementación del EDFL con emisión en régimen pulsado, una vez que se decidió y caracterizó el montaje en anillo a utilizar, se introdujo al sistema la etapa de control de polarización constituida por dos controles de polarización manual y un polarizador lineal en línea. De esta manera, el montaje experimental con el que se realizaron los experimentos para régimen pulsado se muestra en la 4.1, cuyo principio de operación es el descrito en la Sección 1.4.

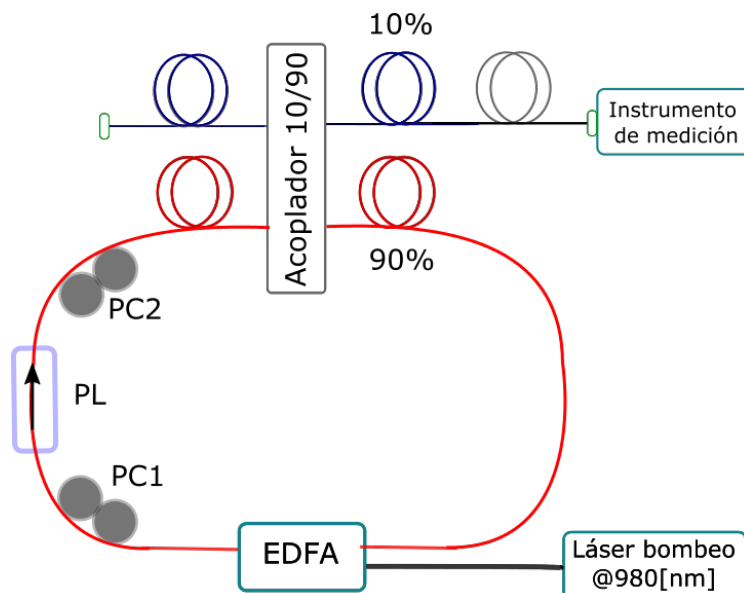


Figura 4.1: Configuración en anillo para la implementación del láser en régimen pulsado.

En este montaje experimental, cabe señalar que los controles de polarización (PC) manuales, aunque se sabe la forma en la que operan, no permiten conocer a ciencia cierta el estado de polarización que están favoreciendo. Por ende, es necesario observar cualitativamente el efecto que tienen las modificaciones en el ángulo en el que son colocados las bobinas de cada PC.

Este capítulo tiene como objetivo mostrar los resultados obtenidos con la implementación del EDFL en régimen pulsado. Primeramente se muestra cualitativamente la transición del régimen continuo al pulsado haciendo variaciones en los controles de polarización. Una vez realizado este análisis, se presenta la caracterización de la respuesta del régimen pulsado en función de la corriente de bombeo y de su comportamiento temporal. Finalmente se discute la posible generación de nuevas tasas de repetición con este montaje experimental.

4.1 Análisis cualitativo de la transición de régimen continuo a pulsado

Lo que se pretende con los experimentos mostrados en esta sección es mostrar algunos casos obtenidos según la configuración de los controladores de polarización. Como se ha mencionado antes, no es posible conocer el estado de polarización que imponen los controladores de polarización manual, por lo que los experimentos se limitan a cambiar el ángulo de inclinación de las bobinas que conforman cada PC y de esta forma obtener una serie de espectros más o menos típicos en este tipo de experimentos, es decir, un espectro ensanchado. Para ello, se variará la posición de cada uno de los módulos de cada PC para obtener diferentes respuestas.

Un aspecto importante a tomar en cuenta es que, debido al funcionamiento de los controles de polarización, éstos son muy susceptibles a tensiones y torsiones en la fibra óptica; por lo que modificaciones en estos factores para evitar cambios en las birrefringencias que se inducen y evitar cambios en el estado de polarización dentro de la cavidad, con lo que es posible que se pierda el mode locking.

Debido a que las combinaciones entre las posiciones de los múltiples bloques de cada control de polarización son innumerables, se han adquirido sólo los casos más representativos; es decir, los que permiten observar casos particulares entre la transición de régimen continuo a pulsado. A continuación se presentan estos diferentes estados de la transición, mostrando la configuración de los controles de polarización, el espectro adquirido por el OSA ¹, la respuesta temporal obtenida con el osciloscopio digital y el diagrama de ojo capturado por el osciloscopio óptico².

Para la posterior referencia de los estados a analizar, considerando su respuesta espectral (Figuras 4.2, 4.3), se definirán tres diferentes estados de la transición:

¹Con un $RBW = 1[nm]$, span de $100[nm]$ y en el rango de $1510 - 1610[nm]$, $1530 - 1630[nm]$ y sensibilidad de $-35.45[dBm]$, $-81.96[dBm]$, respectivamente.

²Las escalas de medición para los osciloscopios se indican para cada caso en particular.

4.1. ANÁLISIS CUALITATIVO DE LA TRANSICIÓN DE RÉGIMEN CONTINUO A PULSADO

- Estado 1: En este estado se observa cómo, en comparación a la emisión del EDFL en régimen continuo, el EDFL emite en un ancho de banda más ancho y centrado en otra λ . Con esto se evidencia que se está saliendo del régimen continuo, y se comienza a ver el efecto de ensanchamiento espectral producto del *mode-locking*.
- Estado 2: Para este estado ya se tiene un espectro con anchura espectral que denota claramente la existencia de *mode-locking* en el EDFL; sin embargo, la respuesta que se observa no es plana en todo el espectro ensanchado y es más ruidoso. Con esta variación de intensidad para las diferentes componentes espectrales es complicado optar por un criterio que permita cuantificar el ancho de banda que verdaderamente corresponde a los pulsos producidos, es por eso que se optó por intentar aplanar la respuesta espectral para tener un valor de ancho espectral más certero.
- Estado 3: Este es el que se consideró es mejor resultado obtenido espectralmente, ya que corresponde a una respuesta plana en todo el espectro ensanchado. Para lograrlo bastó con ajustes en los controles de polarización. Para la caracterización del EDFL en régimen pulsado se consideró este estado con respuesta plana.

Cabe destacar que para los dos últimos estados las potencias pico son menores que en el estado 1, esto puede deberse principalmente a que en el primer estado la potencia está confinada en un ancho espectral menor. Así mismo, al comparar el primer estado con los dos siguientes se ve que el ancho del espectro se ha duplicado ($25[nm]$ a $48[nm]$).

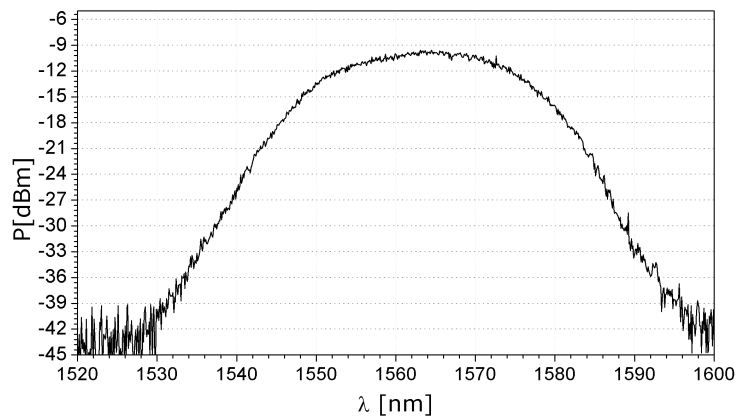


Figura 4.2: Respuesta espectral del EDFL para el estado 1 de la transición de régimen continuo a pulsado.

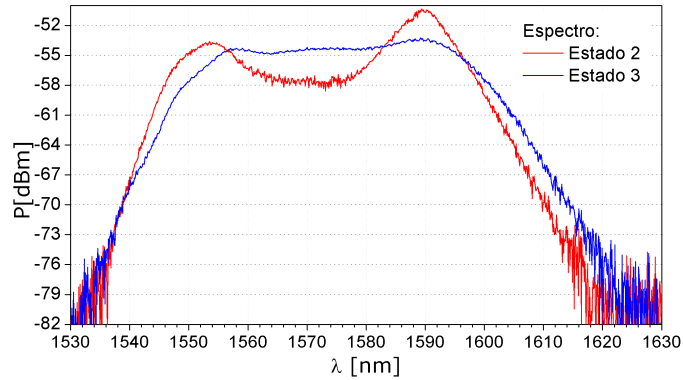


Figura 4.3: Respuesta espectral del EDFL para los estados 2 y 3 de la transición de régimen continuo a pulsado.

La posición de los controles de polarización respectivos a los tres casos se muestran en la Fig. 4.4. En ésta puede observarse que para obtener las respuestas de los tres estados descritos bastó con hacer modificaciones en la posición del primer bloque del segundo control de polarización. Obteniendo el estado tres cuando todos los bloques de este control se encuentran en la misma posición. Haciendo las modificaciones en la posición de este bloque también se observa que conforme más inclinación tiene, la respuesta es más cercana al régimen continuo. Es importante señalar que las posiciones presentadas únicamente son ilustrativas del caso particular que se implementó ya que, en el momento en el que la fibra sea movida, su birrefringencia y con ello las posiciones de los módulos de los PCs necesarias para el *mode-locking* serán distintas.

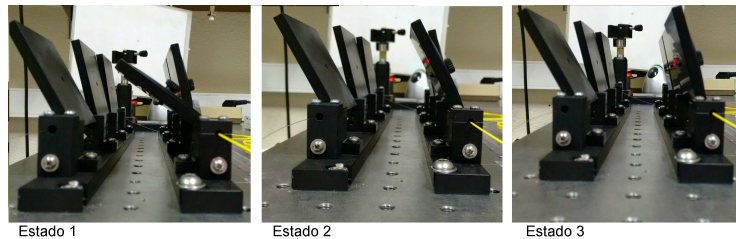


Figura 4.4: Posición de los módulos de los controles de polarización para los diferentes estados.

Por otro lado, en las Figuras 4.5 y 4.6 se visualiza la salida negativa obtenida con el osciloscopio digital para los últimos dos estados ³

³No se cuenta con el oscilograma del Estado 1 porque sólo se hizo análisis temporal de los espectros de mayor ensanchamiento o con tasas de repetición peculiares.

4.1. ANÁLISIS CUALITATIVO DE LA TRANSICIÓN DE RÉGIMEN CONTINUO A PULSADO

Cabe mencionar que el osciloscopio digital no provee la resolución necesaria para resolver el pulso, por lo que la única información que se puede adquirir con los oscilogramas es la tasa de repetición y el periodo (*roundtrip*, τ) que tiene el EDFL para cada estado. Donde τ es un parámetro que permite obtener información de la longitud efectiva de la cavidad (nL), siendo la relación entre éstos $\tau = \frac{2nL}{c}$. En cuanto a estos parámetros, para ambos estados, se obtuvo una tasa de repetición de $4.258[MHz]$, $\tau = 234.4[ns]$ y $L = 35.5[m]$. Esta igualdad en las medidas es debida a que los éstas son dependientes únicamente del resonador implementado, la cual es el mismo para ambos casos.

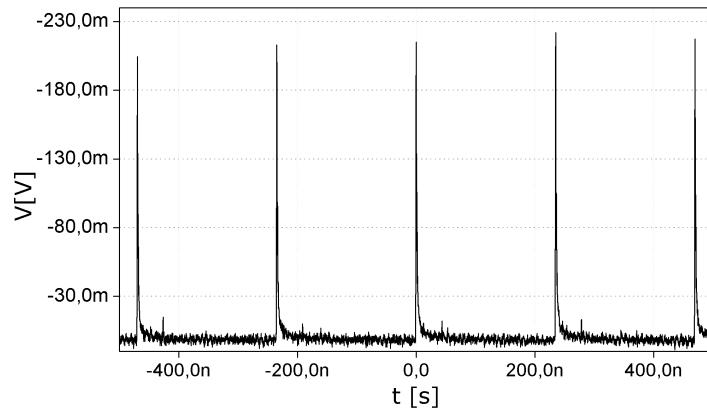


Figura 4.5: Respuesta temporal del estado 2 capturada con el osciloscopio digital: $20[mV/\Omega]$, $10[ns/div]$, $40[mV/div]$.

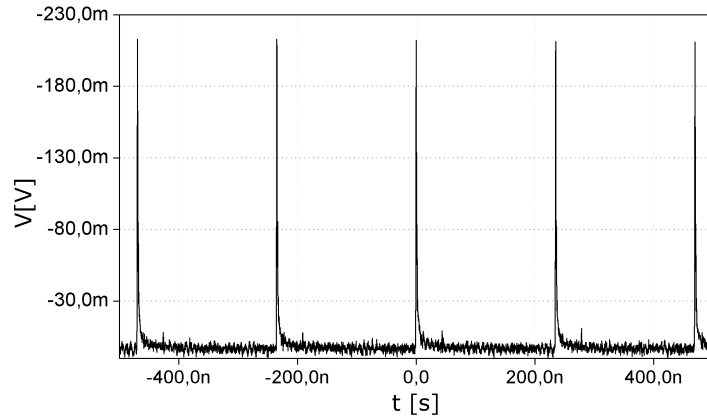


Figura 4.6: Respuesta temporal del estado 3 capturada con el osciloscopio digital: $20[mV/\Omega]$, $10[ns/div]$, $40[mV/div]$.

Finalmente en la Fig. 4.7 están recopilados los diagramas de ojo respectivos a cada estado. En esta figura puede observarse cómo con el osciloscopio óptico se tiene la misma respuesta y periodicidad, sólo que el diagrama de ojo permite observar que la generación de pulsos tiene repetibilidad al generarse un diagrama en el que todas las respuestas están superpuestas en las mismas zonas. Al comparar los dos estados, aunque presentan la misma tasa de repetición, el 2, a diferencia del 3, presenta un segundo pico en su respuesta temporal; lo cual posiblemente se atribuye a la diferencia de intensidades entre las componentes espectrales que conforman la respuesta del estado 2. Aunque el objetivo de usar este equipo era observar un pulso únicamente, debido a que no está diseñado para esta aplicación en concreto, no fue posible lograrlo.

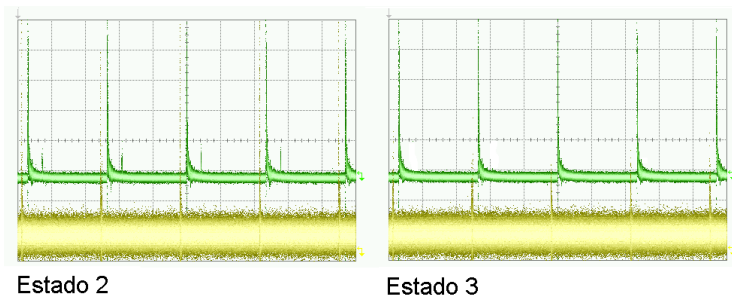


Figura 4.7: Diagrama de ojo para el estado 2 y el 3: $40[mV/div]$ y $100[ns/div]$. Entrada óptica sin pasar por un receptor intermedio (amarillo), señal proveniente del EDFL (verde).

Es importante mencionar que para obtener más información temporal de los pulsos generados, y no sólo las antes presentadas, es necesario utilizar técnicas ópticas que permitan mediciones con total resolución (ej. FROG, SPIDER, autocorrelador). Sin embargo, este tipo de caracterización no se ha realizado porque sobrepasa los objetivos del presente trabajo.

4.2 Caracterización de la emisión en régimen pulsado

Para hacer la caracterización del EDFL en régimen pulsado, se consideró un estado en el que la respuesta fuera plana, y se modificó la corriente de bombeo del EDFA para observar las variaciones en el espectro; éstas pueden observarse en la Fig. 4.8. En la figura se muestra que comienza a existir ensanchamiento espectral con respuesta plana es cuando $I_p = 60[mA]$. Antes de esta corriente, se observa como el montaje tiene una respuesta como la del estado 1. De igual forma, se observa cómo a partir de la corriente de bombeo antes mencionada, el espectro mantiene el mismo ensanchamiento sin cambiar de amplitud, lo cual lleva a pensar que la respuesta que se observa es el límite de lo que se puede obtener con este montaje experimental.

4.3. GENERACIÓN DE NUEVAS TASAS DE REPETICIÓN.

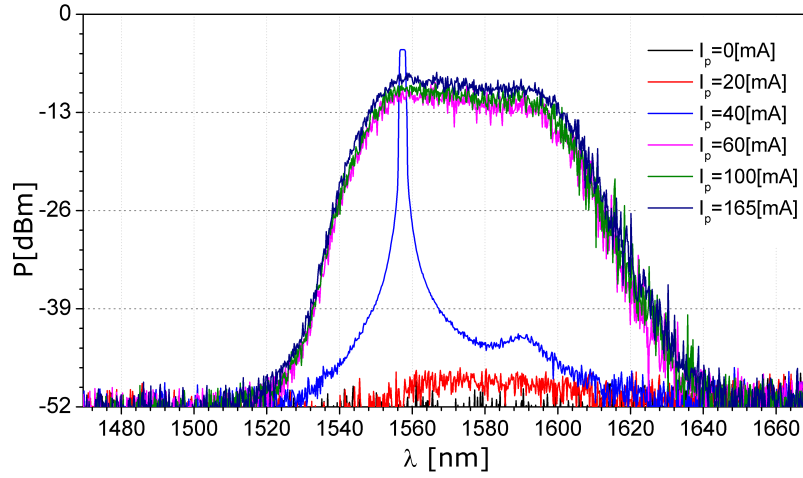


Figura 4.8: Espectros del EDFL en régimen pulsado en función de la corriente de bombeo (Adquirido con $RBW = 2[nm]$, span de $200[nm]$ en el rango de $1470 - 1670[nm]$ y sensibilidad de $-42.7[dBm]$).

Con la mejor respuesta espectral, es decir, la de mayor ensanchamiento y la más plana, se pudieron calcular los parámetros mostrados en la Tabla 4.1, los cuales caracterizan al EDFL en régimen pulsado. Para esta tabla, el parámetro $\Delta\tau_{FWHM}$ ha sido calculado considerando el pulso límite de Fourier, para ello se ha supuesto un haz gaussiano (con *time bandwidth product* $TBWP = 0.44$) y la ecuación:

$$TBWP = \frac{c}{\lambda^2} \Delta\tau_{FWHM} \Delta\lambda_{FWHM}$$

Parámetro	Valor
Tasa de repetición	$4.258[MHz]$
$\Delta\lambda_{FWHM}$	$48[nm]$
$\Delta\tau_{FWHM}$	$75.73[fs]$
$nL_{cavidad}$	$35.15[m]$

Tabla 4.1: Parámetros característicos del EDFL en régimen pulsado.

4.3 Generación de nuevas tasas de repetición.

Durante la realización de los experimentos para obtener la emisión en régimen pulsado, se ha observado un comportamiento peculiar en la respuesta del sistema cuando el *mode-locking* no se alcanza a lograr del todo.

Para ejemplificar este comportamiento se presentan las Figuras 4.9 y 4.10. En cuanto a la respuesta espectral se observa como se empieza a originar el ensanchamiento espectral, pero éste es inhomoéneo en amplitud y no logra tener tanto ancho de banda como los casos de régimen pulsado antes mostrados. Si bien esto es entendible como parte del proceso de transición de régimen continuo a pulsado, la respuesta temporal para esta situación genera un especial interés porque muestra una frecuencia de repetición muy por encima de la del montaje del EDFL pulsado ($f = 4.258[MHz]$).

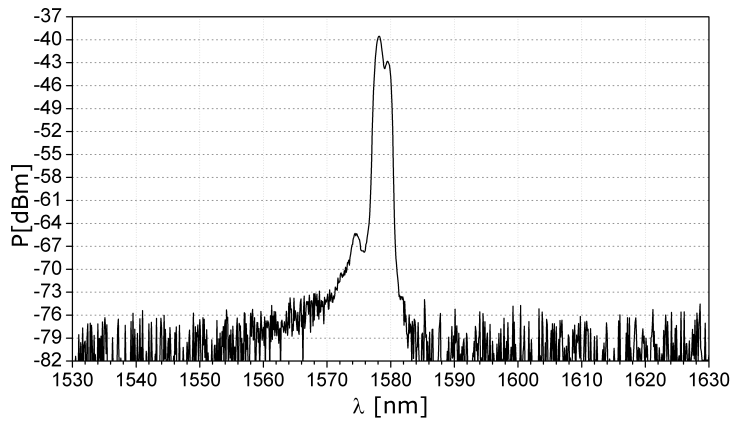


Figura 4.9: Respuesta espectral del EDFL para la transición del régimen continuo al pulsado.

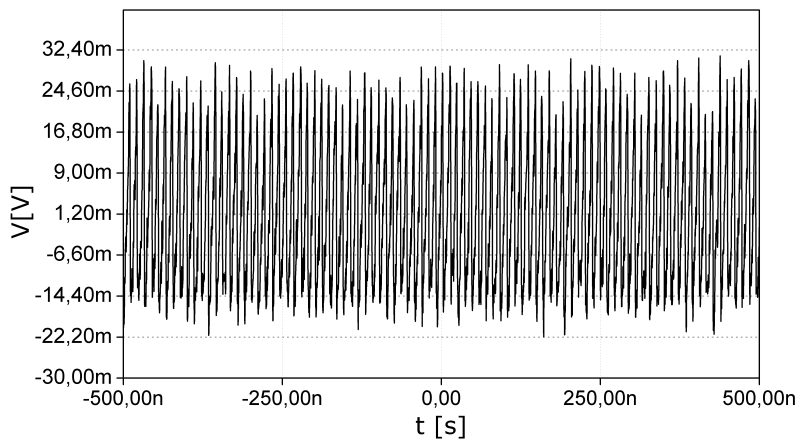


Figura 4.10: Respuesta temporal de la transición del régimen continuo al pulsado: $P = 11.14[ns]$, $f = 89.79[MHz]$. (Adquirido con: $20[mV/\Omega]$, $10[ns/div]$, $4[mV/div]$).

4.3. GENERACIÓN DE NUEVAS TASAS DE REPETICIÓN.

Buscando información acerca de este caso, se encontró que la referencia [32], cuyo montaje experimental es muy similar al implementado en este trabajo, y presenta la generación de pulsos a frecuencias armónicas de la frecuencia fundamental de resonancia. Considerando que posiblemente a eso se atribuía la respuesta que se halló, se recopilaron los datos de las múltiples tasas de repetición obtenidas con estas configuraciones y se calcularon los armónicos de $f = 4.258[MHz]$ para ver si había coincidencia con éstos. Algunos de los casos encontrados se encuentran recopilados en la Tabla 4.2. En esta puede observarse que, si bien no son exactamente iguales, la similitud entre los valores existe.

N° Armónico	$f_{teorica}[MHz]$	$f_{obtenida}[MHz]$
14	59.612	60.39
20	85.160	85.63
21	89.418	89.79
28	204.384	203.80

Tabla 4.2: Comparación de las tasas de repetición obtenidas experimentalmente y las frecuencias armónicas correspondientes.

Para aseverar que las respuestas peculiares que se han obtenido son debidas a la operación del EDFL a una frecuencia armónica haría falta considerar el análisis de más casos y calcular el error de las mediciones, para observar si a esto se debe la diferencia entre valores teóricos y experimentales. Sin embargo, estos experimentos quedan al margen del objetivo de este trabajo; aunque, sin duda, dan pie a un interés por estudiar a fondo este fenómeno en un futuro.

Capítulo 5

Conclusiones

De forma global, este trabajo permitió llegar a la conclusión de que con el material que se cuenta, destinado en un inicio a la industria de las telecomunicaciones, es posible la implementación del EDFL en configuración de anillo en ambos regímenes: continuo y pulsado.

En cuanto al régimen continuo, se observaron las implicaciones que tiene el acoplador utilizado, al ser éste un factor preponderante en las potencias que se pueden extraer del EDFL implementado. Así mismo, aunque para el láser en continuo es importante esta potencia, se valoraron las diferentes configuraciones implementadas para seleccionar, en base a la máxima potencia dentro de la cavidad, la más óptima en cara a la implementación del EDFL pulsado. En base a esto, se pudo concluir que la mejor configuración en régimen continuo es la 90/10, mientras que para régimen pulsado es la 10/90. Siendo este último arreglo correspondiente a lo que indica la literatura.

Con la configuración seleccionada el montaje experimental fue modificado y se logró conseguir que el EDFL emitiera de forma pulsada con una tasa de repetición de $4.258[MHz]$. Aunque no fue posible una caracterización temporal completa de los pulsos generados, la duración de los pulso límite de Fourier indica duraciones por debajo de los $100[fs]$, lo cual hace que este láser sea atractivo para su uso en distintas aplicaciones, por poner un ejemplo, en el procesado y caracterización de materiales.

Si bien el trabajo elaborado ha cumplido su objetivo último de conseguir la emisión pulsada por *mode-locking* pasivo de forma satisfactoria, es importante destacar que también ha cumplido un propósito más enriquecedor que es asegurar el funcionamiento y proporcionar la caracterización de los montajes experimentales. De tal forma que esto puede ser aprovechado para su utilización en futuras líneas de trabajo. A continuación se mencionan las que surgen como aspectos que han quedado pendientes en la elaboración de este trabajo y habrían que desarrollarse:

- Utilización de otras configuraciones de acopladores. Como se mostró en la Sección 3.2, hay configuraciones cuyas potencias son muy similares a las de la seleccionada. Sabido esto, podrían probarse estas configuraciones para así observar el cambio en la respuesta del régimen pulsado debido a esta modificación.
- Caracterización temporal de los pulsos. El uso de una técnica óptica que permita obtener la información completa del comportamiento temporal del pulso con total resolución es algo que enriquecería mucho al proyecto ya que, además de completar la caracterización del régimen pulsado, permitiría obtener información de los fenómenos que experimenta el pulso dentro de la cavidad (ej. no linealidades).
- Comprobación de la operación del EDFL en armónicos de la frecuencia fundamental. Este trabajo ha permitido observar respuestas peculiares que pueden asociarse, en un principio, a la operación del EDFL en frecuencias armónicas; sin embargo, hace falta desarrollar más experimentos que ahonden en el tema, de tal forma que se pueda comprobar y caracterizar el fenómeno que sustenta las respuestas encontradas.

Las líneas futuras que pueden seguirse son más que las antes enunciadas, incluyendo las posibles aplicaciones del EDFL implementado, evidenciando que este trabajo sólo constituye las bases de un proyecto con un gran potencial.

Anexo A

EDFL en régimen continuo con filtro sintonizable

Como se ha comentado, la inclusión del filtro sintonizable en el sistema imposibilita que suceda el mode-locking y con ello que el EDFL emita en régimen pulsado. Sin embargo, se consideró prudente dejar registro de la inclusión del filtro sintonizable para la optimización de la potencia de salida del EDFL con emisión en régimen continuo.

A.1 EDFL con emisión en un sólo pico espectral

Para observar la posibilidad de que, al seleccionar un rango muy estrecho de longitudes de onda dentro de la configuración de anillo, se pudiera disminuir la inestabilidad espectral generada por la competencia de picos espectrales, al montaje original se le agregó un filtro sintonizable. Considerando que este filtro podría incluirse en dos posiciones, antes o después del EDFA (como se muestra en la Fig. A.1), se realizaron experimentos para ambos montajes y se observaron las contribuciones en el comportamiento del EDFL en régimen continuo. Para ambas configuraciones se probó mantener la corriente de bombeo fija y modificar la longitud de onda con el filtro sintonizable y viceversa.

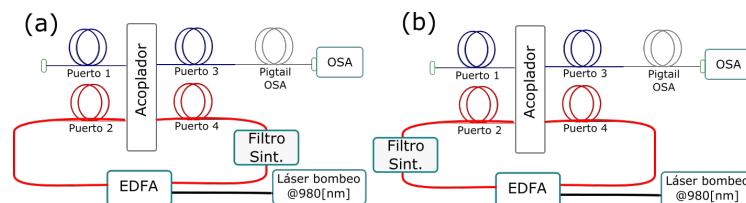


Figura A.1: Diagrama experimental para observar la influencia de la inclusión del filtro sintonizable.

ANEXO A. EDFL EN RÉGIMEN CONTINUO CON FILTRO SINTONIZABLE

En las Figuras A.2 y A.3 se observa que, para ambas configuraciones, la inserción del filtro sintonizable permite la obtención de emisión en un sólo pico espectral, dejando a un lado la competencia de picos que se tenía con el montaje original analizado. Así mismo, se aprecia que el láser experimenta cambios en su λ conforme se cambia la longitud de onda que selecciona el filtro. Para el caso de la configuración (a), Fig. A.2, se observa que el láser emite exactamente a la longitud de onda que se selecciona con el filtro; sin embargo, cuando el filtro es colocado después del EDFA (b), Fig. A.3, no ocurre lo mismo. Esto pudiera tener justificación si las mediciones no se han realizado utilizando el motor paso a paso en el mismo sentido, ya que la repetibilidad de las mediciones depende del sentido en el que éstas se realizan. A pesar de ello, la variación cae dentro del margen de error que presenta el filtro sintonizable.

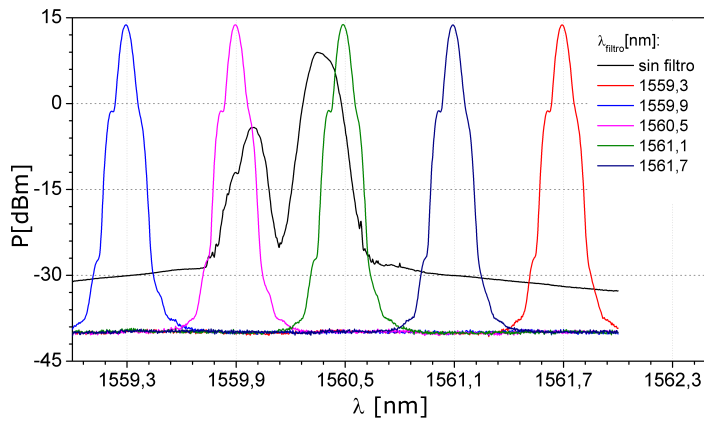


Figura A.2: Espectros obtenidos a la misma I_p y variando la longitud de onda que se selecciona para ser amplificada por el EDFA: Configuración (a).

En cuanto a la potencia, en ambos casos, se puede apreciar como con el filtro sintonizable en el anillo las potencias alcanzadas, en comparación al montaje original, son mayores; esto es posiblemente a que al no haber competición de picos de emisión toda la potencia se concentra en uno solo. También se observa que las potencias respectivas a cada configuración no presentan variaciones con el cambio de la λ_{filtro} , aunque comparativamente con la configuración (a) se obtienen mejores potencias que con la (b). Hacer una afirmación de la razón de este cambio es la potencia sería muy aventurado al no tener una medida certera de lo que pasa dentro de la cavidad; sin embargo, posiblemente se deba a que las pérdidas que mide el OSA son distintas de una configuración a otra. En la configuración (a) lo que detecta el OSA no considera las pérdidas del filtro sintonizable, mientras que para la configuración (b) sí lo hace; siendo de esta forma las pérdidas que introduce el filtro sintonizable la diferencia entre las potencias que se consiguieron.

A.1. EDFL CON EMISIÓN EN UN SÓLO PICO ESPECTRAL

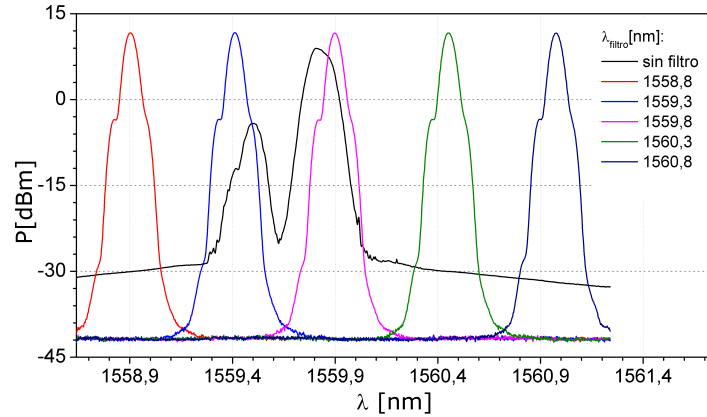


Figura A.3: Espectros obtenidos a la misma I_p y variando la longitud de onda que se selecciona después de que la señal ha sido amplificada por el EDFA: Configuración (b)

En cuanto al comportamiento al variar la corriente de bombeo y manteniendo la longitud de onda seleccionada ($\lambda_{filtro} = 1560.5[nm]$), mostrado en la Figura A.4, se observa que en ambas configuraciones la distribución espectral de un sólo pico espectral se mantiene y únicamente va variando la amplitud en función de la I_p . En este caso, se obtuvieron potencias mayores cuando el filtro se encontraba antes del EDFA. En esta misma configuración se observó que la longitud de onda de emisión corresponde exactamente con la seleccionada por el filtro sintonizable; mientras que, cuando el filtro se ubica después del EDFA, la longitud de onda de emisión del láser sufre un pequeño distanciamiento ($0.02[nm]$) con respecto a la λ_{filtro} . Lo cual lo asociamos a las misma razón que las variaciones de longitud de onda antes explicada.

Después de los experimentos, se pudo concluir que colocando el filtro sintonizable dentro de la configuración de anillo es posible omitir las inestabilidades espectrales y conseguir que el EDFA de emisión continua que emita en una único pico espectral de forma constante. Así mismo, se observó que el colocar el filtro sintonizable antes del EDFA es la mejor opción puesto que ofrece mayores potencias y mayor ajuste de la longitud de onda de emisión a la sintonizada.

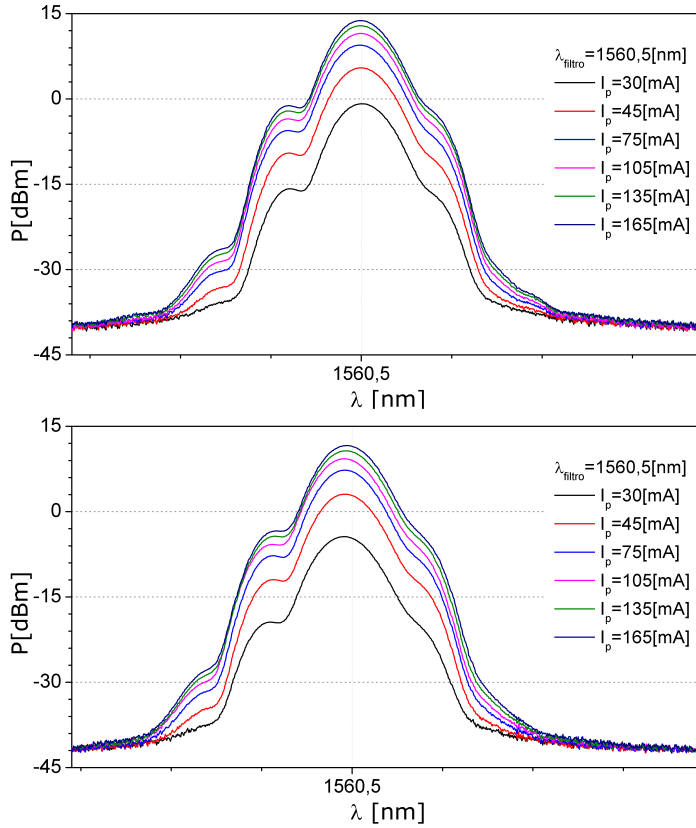


Figura A.4: Espectros obtenidos a una misma longitud de onda y variando la I_p : Superior: configuración (a). Inferior: configuración (b).

A.2 EDFL a otras longitudes de onda

Como se mencionó en la Sección 3.2, dependiendo del acoplador utilizado en la implementación, el EDFL implementado tendrá una emisión en torno a una longitud de onda distinta. Debido a esto y a que, como se expuso en la sección anterior, el uso del filtro sintonizable posibilita la obtención de un sólo pico espectral, se decidió caracterizar el comportamiento del EDFL con los diferentes acopladores incluyendo el filtro sintonizable. Con esto se pretende observar el comportamiento del EDFL implementado con un sólo pico de emisión centrado en diferentes longitudes de onda.

Para la realización de esta etapa, se implementó la configuración de anillo con el filtro sintonizable colocado antes del EDFA y sintonizando la longitud de onda de emisión respectiva a cada acoplador (mostradas en la Tabla 3.1). Los experimentos se basaron en poder obtener la curva de caracterización (I_p vs. P_L) para los distintos acopladores.

A.3. CARACTERIZACIÓN DE LA CONFIGURACIÓN ÓPTIMA

Las curvas para cada uno de los montajes experimentales con acopladores distintos se muestra en la Fig. A.5. Las potencias mostradas fueron adquiridas considerando la media de cincuenta trazas tomadas por el OSA en un rango de $1540 - 1580[nm]$.

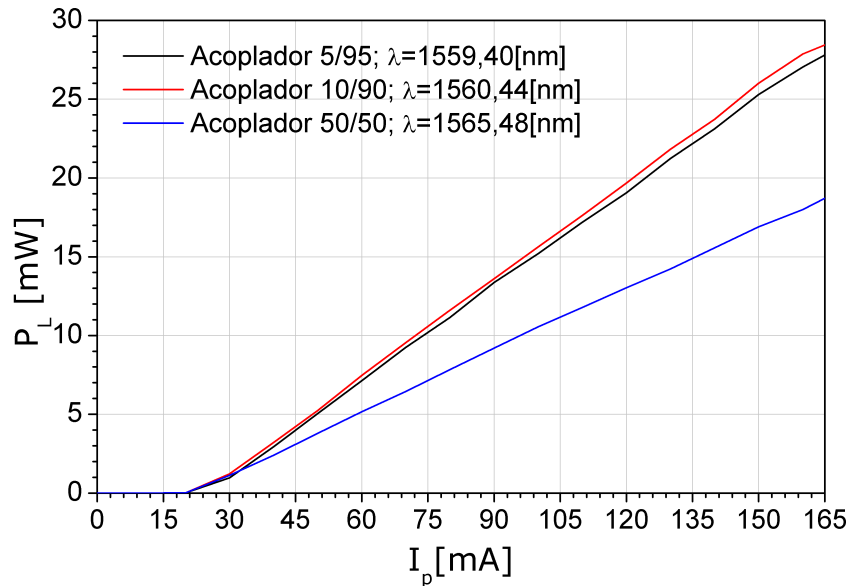


Figura A.5: Curvas de caracterización del EDFL con filtro sintonizable a las diferentes longitudes de onda de emisión correspondientes a distintos acopladores.

Con estos resultados se obtuvo la caracterización de los EDFL con emisión en régimen continuo en las siguientes longitudes de onda: $1559.4[nm]$, $1560.44[nm]$ y $1565.48[nm]$. En todas éstas se observan buenos comportamientos para todas, pero en especial para las dos primeras.

A.3 Caracterización de la configuración óptima

Una vez realizados todos los experimentos, se concluyó que la mejor implementación del EDFL en régimen continuo, por permitir la mayor extracción de potencia y tener buena estabilidad espectral, es cuando se utiliza el acoplador con 10% ext- 90% int y se incluye el filtro sintonizable para seleccionar la longitud de onda de emisión de $1560.44[nm]$ (obtenida con el montaje inicial).

A modo de concluir, se muestra el diagrama (Fig. A.6) y la curva de caracterización (Fig. A.7) de lo que se ha considerado, de los implementados, como el EDFL en régimen continuo con las mejores características.

ANEXO A. EDFL EN RÉGIMEN CONTINUO CON FILTRO SINTONIZABLE

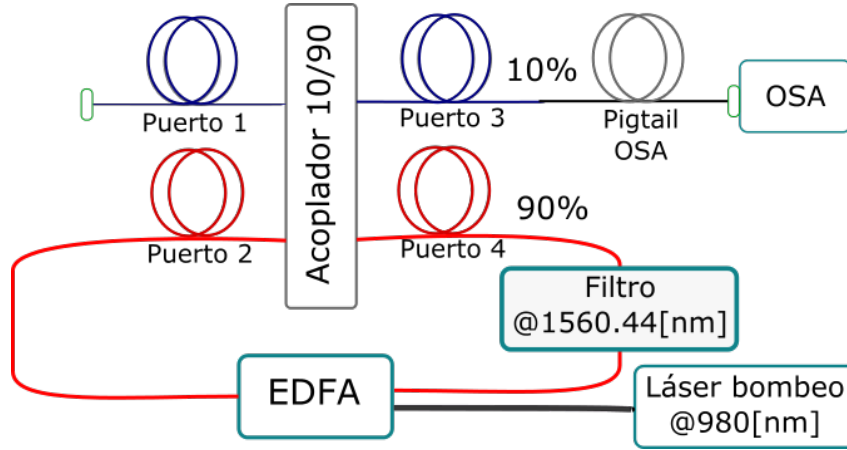


Figura A.6: Diagrama experimental óptimo de la implementación del EDFL en régimen continuo.

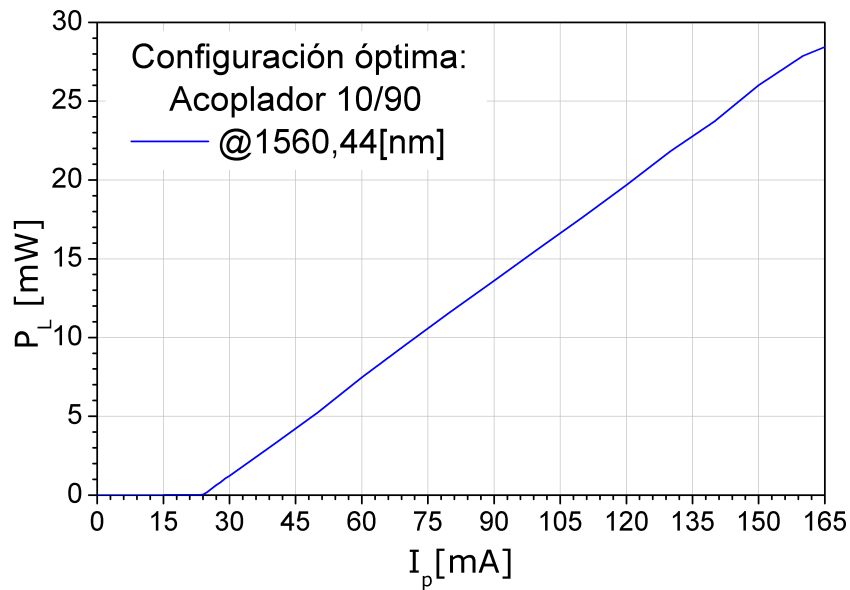


Figura A.7: Curva de caracterización de la implementación óptima del EDFL en régimen continuo.

Referencias bibliográficas.

- [1] M. Grupp. Fiber lasers change the cutting market. *LTJ*, 8(3), 2011.
- [2] M. J. Digonnet. *Rare-Earth-Doped Fiber Lasers and Amplifiers*. Marcel Dekker, USA, 2 edition, 2001.
- [3] E. Desurvire. *Erbium-Doped Fiber Amplifiers. Principles and Applications*. Wiley Interscience, USA, 1994.
- [4] I. Sola. *Análisis dinámico y espectroscópico de láseres de fibra óptica dopada con erbio*. Universidad de Zaragoza, España, 2003.
- [5] M. Yamada. Noise characteristics of er^{3+} doped fiber amplifiers pumped by 0.98 and 1.48 μm laser diode. *IEEE Photonics Reports*, 2(205), 1990.
- [6] E. F. Pinón. *Análisis de los réimenes de emisión láser en fuentes de fibra óptica dopada con erbio e itebio*. Universidad Nacional Autónoma de México, México, 2013.
- [7] E. García. *Control y caracterización de un amplificador de fibra óptica dopada con erbio (EDFA)*. Universidad de Valladolid, España, 2013.
- [8] G. P. Agrawal. *Application of Nonlinear Fiber Optics*. Elsevier Science, USA, 1 edition, 2001.
- [9] Suda H. Horiguchi M. Shimizu, M. High-efficiency nd-doped fibre lasers using direct-coated dielectric mirrors. *Electron. Lett.*, 23(768), 1987.
- [10] Monrey W. W. Kersey, A. D. Multi-element bragg-grating based fibre laser strain sensor. *Electron. Lett.*, 29(964), 1993.
- [11] Mortimore D. B. Urquhart P. Ainslie B. J. Miller, I. D. A nd^{3+} doped cw fiber laser using all-fiber reflectors. *Appl. Opt.*, 26(2197), 1987.
- [12] Urquhart P. Milar C. Brierley M. Barnsley, P. Fox-smith resonators: application to single-longitudinal-mode operation of fiber lasers. *OSA*, 5(8), 1998.

- [13] Schmuck H. Biilow H. Pfiffer, T. Output power characteristics of erbium-doped fiber ring lasers. *IEEE Photonics Technology Letters*, 4(8), 1992.
- [14] Morey W. W. Ball, G. A. Standing-wave monomode erbium fiber laser. *IEEE Photonics Technology Letters*, 3(613), 1991.
- [15] W. H. Loh. All-solid-state subpicosecond passively mode locked erbium-doped fiber laser. *Appl. Phys. Lett*, 63(1), 1992.
- [16] I. N. Duling. All-fiber ring soliton laser mode locked with a nonlinear mirror. *Opt. Lett*, 16(8), 1991.
- [17] M. E. Fermann. Passive mode locking by using nonlinear polarization evolution in a polarization-maintaining erbium-doped fiber. *Opt. Lett*, 18(13), 1993.
- [18] R. Paschotta. Nonlinear polarization rotation. [Online] *Encyclopedia of Laser Physics and Technology*, 2008.
- [19] Xueming L. Dong M. Xiaohong H. Hua L. Xiaohui, L. Tunable and switchable multiwavelength fiber lasers with broadband range based on nonlinear polarization rotation technique. *Optical Engineering*, 49(9), 2010.
- [20] Jacob S. Amnon Y. Avi, Z. Birefringence-induced trains of high-rate pulses in a mode-locked fiber laser. *IEEE Photonics Journal*, 1(2), 2009.
- [21] Hewlett Packard. *System lightwave source characteristics*. USA, 2002.
- [22] Thorlabs. *Manual Fiber Polarization Controllers: User guide*. USA, 2014.
- [23] Thorlabs. *Test Data Sheet In-line Polarizer*. USA, 2013.
- [24] Agilent Technologies. *Optical Spectrum Analysis*. USA, 1996.
- [25] Agilent Technologies. *Optical Spectrum Analyzer*. Germany, 2005.
- [26] JDSU Optical Communications. *Voltage-Controlled Optical Filters VCF Series*. USA, 2013.
- [27] Hakuto Co. *Optical Power Meter 230 Specifications*. USA, 2003.
- [28] Tektronix. Enablig Innovation. *Digital Phosphor Oscilloscopes. Specifications*. USA, 2004.
- [29] Agilent Technologies. *Agilent 86100B Wide-Bandwidth Oscilloscope. Technical Specifications*. USA, 2003.
- [30] Dongfang J. Jingwen Y. Jiong C. Zhaoying W. Tianxin Y. Tonghui, L. An ultra-long cavity passively mode-locked fiber laser based on nonlinear polarization rotation in a semiconductor optical amplifier. *IOP Laser Physics*, 23, 2013.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- [31] Ling Y. Dongdong, H. Q-switched mode-locking and dissipative soliton operations in a large-anomalous-dispersion fiber laser. *SPIE Optical Engineering*, 51(4), 2012.
- [32] Haboucha A. Salhi M. Leblond H. Amrani, F. Passively mode-locked erbium-doped double-clad fiber laser operating at the 332nd harmonic. *Opt. Lett*, 34(14), 2009.