

Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica.

Láser Q-switched activo de fibra dopada de Er/Yb de doble revestimiento en cavidad lineal

Por Ing. Jared Alaniz Baylón

Tesis sometida como requisito parcial para obtener el grado de:

Maestro en Ciencias en la especialidad en Óptica

En el

Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica

Asesor de Tesis:

Dr. Manuel Durán Sánchez Dr. Baldemar Ibarra Escamilla

Agosto 2017 Tonanzintla, Puebla, México

INAOE 2017

©INAOE 2017

Derechos Reservados

El autor otorga al INAOE el permiso de reproducir y distribuir copias de esta tesis en su totalidad o en partes mencionando la fuente.



Resumen

En este trabajo de tesis se propone la construcción de un láser de fibra óptica en el régimen pulsado usando la técnica de operación Q conmutada del inglés (Q-switched) generada de manera activa. Éste láser está construido con elementos ópticos y electrónicos como son la fibra óptica dopada con erbio (Er) e iterbio (Yb) de doble revestimiento, un combinador de bombeo, un láser de bombeo, una rejilla de fibra de Bragg (Fiber Bragg Gratting, FBG) como espejo en uno de los extremos de la cavidad, un modulador acusto-óptico (Acusto-Optic Modulator, AOM) como el elemento activo para controlar las pérdidas en la cavidad y generar los pulsos Q-switched y un generador de señales para controlar el modulador acusto-óptico.

Se aprovechan las propiedades de la fibra dopada con Er e Yb de doble revestimiento como el medio activo para generar pulsos de salida láser de duración de nanosegundos para diferentes potencias de bombeo. En estas condiciones se genera un láser con características bien definidas. Se obtiene un láser con ancho de línea como una función de la frecuencia de repetición. Con esto se obtiene un rango de la frecuencia de repetición desde 80 hasta 270 kHz en el que se obtienen pulsos estables con la máxima potencia de bombeo de 7.7 W. Además se obtienen una duración de pulso mínima de 178 ns, una potencia pico máxima de 30.5 W, una energía de pulso máxima de 5.4 µJ y una potencia promedio máxima de 1.1 W.

El diseño del láser es un sistema simple y compacto que opera en la banda de 1550 nm. El desempeño del láser exhibe un ancho de línea espectral estrecho de 73 pm en operación pulsada. La configuración del láser de fibra es una tipo Fabry-Perot.

Agradecimientos

Expreso mi agradecimiento a mis asesores por el apoyo brindado durante la realización de este trabajo experimental. De manera especial al grupo de fibras ópticas. Al Dr. Evgeny A. Kuzin, al Dr. Baldemar Ibarra Escamilla y al Dr. Manuel Durán Sánchez por aceptarme en el grupo para la realización de este trabajo.

Al INAOE por la contribución que hace para el desarrollo de ciencia en México y por los recursos y apoyos dados durante el transcurso del posgrado. A las autoridades, directivos y cuerpo académico del INAOE por su trabajo para mi formación profesional.

Al Consejo de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo de la beca que sin ella no hubiera sido posible la realización de esta maestría. CVU: 702011

A mi esposa e hijos por el apoyo que me han brindado y por el sacrificio que han tenido que soportar junto conmigo para la realización de esta meta.

Dedicatorias

A mi esposa Jazmín e hijos Jared, Cristóbal, Andrés y Arath y a mis padres Eleazar y Margarita.

Prefacio

En años recientes, los láseres de fibra óptica que operan en la región de longitudes de onda de los 1550 nm han sido estudiados ampliamente por sus propiedades como libre de alineación y potenciales aplicaciones en la ciencia y la industria. Con el surgimiento de la fibra dopada de elementos de tierras raras y de doble revestimiento, se han reportado diferentes configuraciones de láseres de fibra para poder lograr alta eficiencia y alta potencia de emisión. En este respecto los láseres de fibra dopada con erbio e iterbio (Erbium-Yterbium Double Clad Fiber, EYDCF) utilizando la técnica de Qswitching han sido de gran interés para aplicaciones en las cuales se requieren pulsos cortos (del orden de nanosegundos) con potencias pico altas y energías de pulso altas a diferentes rangos de frecuencia de repetición. Los láseres de Q-switched de EYDCF son usados en investigación científica y para procesos industriales, sensado remoto, instrumentación y aplicaciones médicas en las cuales por lo general se requiere emisión láser a diferentes longitudes de onda, duración corta de pulso y un amplio rango de operación en la frecuencia de repetición. De aquí en adelante en este trabajo escrito usaremos **Q-switching** para referirnos a la técnica utilizada en láseres para generar pulsos y utilizaremos Q-switched para referirnos específicamente al láser o láseres que utilizan la técnica referida anteriormente. Para generar pulsos cortos en los láseres de Qswitched se realiza por medio de técnicas pasivas o activas. La técnica de Qswitching pasiva se basa en el uso de un absorbedor saturable que puede ser una fibra dopada, una fibra con grafeno, o depósitos de nanotubos de carbono entre otros, en este método la frecuencia de repetición de los pulsos generados está determinada por la potencia de bombeo la cual limita el control de las características de los pulsos láser y de la potencia de salida obtenida. La técnica de Q-switching activa por su parte requiere el uso de un modulador externo para obtener la operación láser pulsada. En comparación

con los láseres de Q-switched pasivos, cuando se aplica la técnica de Qswitching activa, las características de los pulsos se pueden modificar independientemente de la potencia de bombeo al usar un generador de pulsos electrónicos, permitiendo el control adecuado de los pulsos láser para la aplicación requerida. En este trabajo se demuestra el uso de la técnica de Q-switching activa para generar los pulsos láser. En los capítulos de ésta tesis se explicarán con más detalle el funcionamiento del láser de fibra óptica de Q-switched activo y sus elementos. Y se muestran los resultados experimentales obtenidos.

Contenido

Capítulo 1 Introducción	8
1.1 Láseres de fibra óptica	8
1.2 Objetivo General	11
1.3 Objetivos Particulares	11
1.4 Contenido de la tesis	12
Referencias	13
Capítulo 2 Elementos de fibra para Láseres de fibra óptica	15
2.1 Fibras de doble revestimiento	15
2.2 Amplificadores de Fibra	
2.3 Ecuaciones de razón de transferencia para Er/Yb	20
2.4 Rejillas de Bragg de fibra (FBG)	24
2.4.1 Reflectividad de las rejillas de Bragg	
Referencias	
Capítulo 3 Láseres Pulsados	
3.1 Introducción	34
3.2 Q-switching	35
3.2.1 Clasificación de láseres de Q-switched	
3.3 Medición de la salida de Láseres Pulsados	42
3.4 Láseres de fibra de Q-switched	44
3.4 El Modulador Acusto óptico	46
Referencias	51
Capítulo 4 Caracterización y Resultados Experimentales	52
4.1 Introducción	52
4. 2 Caracterización de los elementos que forman la cavidad láser	53
4.3 Arreglo experimental del láser de Q-switched	60
4.4 Resultados y discusiones	61
Referencias	71
Capítulo 5 Conclusiones	73
Conclusión general	73
Lista de figuras	75

ista de publicaciones

Capítulo 1 Introducción

1.1 Láseres de fibra óptica

Los láseres que utilizan fibras ópticas dopadas con tierras raras como medio de ganancia son llamados láseres de fibra óptica, a diferencia de los láseres robustos de estado sólido que utilizan otros materiales como el medio activo.

Los láseres de fibra han sido de gran interés en los últimos años ya que cada día se busca desarrollar sistemas láser que sean innovadores y por eso han llegado a ser el punto central en investigación científica e implementación industrial [1] gracias a sus propiedades como confinamiento de alta potencia, alta calidad de haz, tamaño compacto, baja pérdida de inserción, entre otras. Son atractivos para diferentes áreas de aplicación como medicina, telecomunicaciones, sensores ópticos, instrumentación y procesos industriales.

Las fibras dopadas con elementos de tierras raras ofrecen ser un medio de ganancia con buenas propiedades térmicas y ópticas para el desarrollo de láseres de fibra en comparación con los láseres de estado sólido. Las fibras dopadas con erbio (Erbium-Doped Fiber, EDF) se han utilizado ampliamente en láseres de fibra; sin embargo en los últimos años se busca mejorar la eficiencia en términos de una alta ganancia, por eso el uso del iterbio (Yb) como dopante en fibras se ha incrementado porque ofrece una alta eficiencia en algunos casos hasta del 80% [1].

El primer láser de fibra óptica que se demostró fue hecho con vidrio dopado con Neodimio (Nd) y Er en 1961 por Snitzer y Koester [2-4]. Consistía de una fibra dopada con Nd y bombeada transversalmente por una lámpara de destello y emitía cerca de 1060 nm con una salida multimodo. Poco después el primer láser de fibra bombeado longitudinalmente por un diodo láser fue realizado por Stone y Burrus [5]. Rápidamente con el avance en la fabricación de la fibra de sílice dopada con tierras raras surgió en 1985 gracias al desarrollo de la solución de dopaje como una manera de incorporar tierras raras en preformas fabricadas a través de la técnica de depósito modificado de químicos por vapor (Modified Chemical Vapor Deposition; MCVD) [6]. Después el láser de fibra monomodo de sílice dopada con Nd fue realizado por Mears [7]. Desde entonces los láseres de fibra hechos con diferentes dopantes como el Er, Nd, Yb, tulio (Tm), holmio (Ho) y praseodimio (Pr) han sido investigados [8-9]. Sin embargo fue el amplificador de fibra dopada con Er (Erbium-Doped Fiber Amplifier; EDFA) para las telecomunicaciones el que provocó la mayor parte de la investigación. El desarrollo de los EDFAs impulsado por las demandas de mercado de la industria de las comunicaciones condujo rápidamente a una amplia variedad de conocimiento, componentes, tecnologías y equipo relevante en el desarrollo de los láseres de fibra óptica, así como también a una extensiva investigación en láseres de fibra dopada con tierras raras, abarcando láseres de onda continua (Continuous Wave, CW), láseres de Q-switched, láseres de amarre de modos y láseres de una sola frecuencia a finales de los 80s y principios de los 90s.

Dos importantes tecnologías que incrementaron la potencia de salida de los láseres de fibra fueron la invención de las fibras de doble revestimiento y los diodos láser de alta potencia. En sus inicios la potencia promedio de un diodo láser de bombeo con salida de fibra monomodo era muy baja para la mayoría de las aplicaciones. El diodo de bombeo con salida monomodo era el único que podía ser acoplado al núcleo de la fibra, aun cuando tenía potencia de salida baja, era el que hacía este trabajo. Como consecuencia la potencia de salida del láser de fibra monomodo estaba restringida a niveles de pocos miliwatts. Los diodos de bombeo de alta potencia con diámetros grandes tienen salida multimodo y no se podía acoplar de manera eficiente al núcleo de la fibra monomodo. Después se propuso la fibra de doble

revestimiento por Snitzer en 1988 para mejorar la eficiencia de acoplamiento de los diodos de bombeo con salida multimodo [10]. La fibra de doble revestimiento tiene un núcleo monomodo. El revestimiento de diámetro más grande actúa como guía de bombeo multimodo, el cual permite convertir la luz de bombeo de alta potencia en haz láser guiado en el núcleo monomodo.

En la mayoría de los láseres de fibra el medio de ganancia es una fibra dopada con iones de tierras raras [11-14] y son bombeados por diodos láser acoplados a la fibra. Se diferencian de los láseres de estado sólido principalmente por el efecto de onda guiada y la pequeña área efectiva de modo. Otra de las propiedades de los láseres de fibra es que operan con una ganancia láser mucho más alta en comparación con los láseres de estado sólido [7].

Para construir un resonador láser con fibras se necesita algún tipo de reflector (espejo) para formar un resonador lineal o se puede construir también un resonador láser de anillo. Existen diferentes tipos de reflectores que se pueden usar para construir una cavidad láser de fibra óptica. Tales como filtros Fabry-Perot, espejos de lazo (FLM), interferómetros Mach-Zender (MZI) de fibra óptica, Interferómetros de Sagnac (FOLM) de fibra óptica, Rejillas de Bragg (FBG) de fibra óptica, entre otros. En este trabajo se utiliza solo una rejilla de Bragg como uno de los espejos en la cavidad y más adelante se presentará este tema con más detalle en la sección 2.4.

La mayoría de los láseres de fibra óptica son bombeados con diodos láser de fibra, donde la luz de bombeo puede ser acoplada directamente al núcleo o con mayor potencia hacia el revestimiento de bombeo como en las fibras de doble revestimiento de las cuales se toca el tema con más detalle en la sección 2.1. En este trabajo se utiliza una fibra de Er/Yb de doble revestimiento como medio de ganancia y es bombeada por un diodo láser en el revestimiento. Este trabajo se centra en continuar con la investigación de nuevos láseres de fibra óptica utilizando fibra dopada de tierras raras de Er e

10

Yb para implementar nuevos arreglos particularmente en el régimen pulsado y que sean innovadores y se consigan mejores eficiencias en términos de potencia de salida con respecto a potencias de bombeo de entrada y con ello desarrollar láseres de fibra con pulsos cortos y estables de alta energía y potencias pico altas.

1.2 Objetivo General

El alcance de esta tesis se centra en el desarrollo experimental de un láser de fibra óptica pulsado con la técnica de Q-switching que incorpora una fibra dopada con Er/Yb con doble revestimiento como medio de ganancia y una rejilla de Bragg de fibra óptica como espejo en la cavidad.

1.3 Objetivos Particulares

Aprender sobre las técnicas y equipos de experimentación para fibras ópticas, tales como empalmadora de fibra óptica, medidores de potencia óptica, Analizador de Espectros ópticos (Optical Sprectrum Analizer, OSA), osciloscopios, detectores, láseres de bombeo, moduladores acusto-ópticos, generadores de RF, etc.

- Estudio y caracterización de la fibra dopada con Er/Yb.
- Estudio y caracterización de las rejillas de Bragg sintonizables.
- Implementación de la configuración del láser en onda continúa.
- Diseño e implementación de la configuración del láser de Q-switched.

1.4 Contenido de la tesis

Después de haber expuesto en el presente capítulo un resumen de los antecedentes, y de haber dado una perspectiva de los láseres de fibra óptica. Se describe de manera general de que se trata esencialmente este trabajo así como de los objetivos del mismo. Por lo que se ha dividido en 5 capítulos, los cuales abarcan una breve introducción, tópicos de amplificadores de fibra óptica, la teoría acerca de las rejillas de Bragg y moduladores acusto-ópticos, así como los resultados experimentales del láser de fibra óptica de Q-switched.

En el capítulo 2, se presenta una descripción de las fibras de doble revestimiento, de los amplificadores de fibra dopada, del modelo teórico de las ecuaciones de razón de transferencia para la fibra dopada con Er/Yb y las características de la fibra con rejillas de Bragg.

En el capítulo 3, se presentan una breve introducción a los láseres pulsados, una descripción de los láseres de Q-switched y su clasificación, se presenta una descripción de los parámetros que se miden en los láseres de Qswitched y una descripción de los láseres de Q-switched de fibra óptica. Además, se analiza una descripción del principio de funcionamiento de los moduladores acusto-ópticos.

En el capítulo 4, se aborda la explicación de los arreglos experimentales para la caracterización de los elementos que conforman el láser y sus respectivos resultados experimentales.

En el capítulo 5 se presentan las conclusiones generales a cerca de este trabajo de tesis.

Referencias

[1] Active Q-switched Fiber Lasers with Single and Dual-wavelength Operation. R. Iván Álvarez-Tamayo, Manuel Durán-Sánchez, Olivier Pottiez, Baldemar Ibarra-Escamilla, Evgeny A. Kuzin and M. Espinosa-Martínez. INTECH Chapter 2.

[2] 1. E. Snitzer, "Proposed fiber cavities for optical lasers", J. Appl. Phys. 32, 36-39 (1961)

[3] C. J. Koester and E. Snitzer, "Amplification in a fiber laser", Appl. Opt. 3 (10), 1182 (1964)

[4] 2. E. Snitzer, "Optical maser action of Nd3+ in a barium crown glass", Phys. Rev. Lett. 7, 444-446 (1961)

[5] J. Stone, and C. A. Burrus, "Neodymium-Doped Silica Lasers in End-Pumped Fiber Geometry", Appl. Phys. Lett. **23** (7), 388-389 (1973)

[6] Hegarty J., Broer M. M., Golding B., Simpson J. R., and MacChesney J.B., "Photon Echoes Below 1 K in a Nd-Doped Glass Fiber," Phys. Rev. Lett. 51, 2033-2035 (1983)

[7] R. J. Mears, L. Reekie, S. B. Poole, and D. N. Payne, "Neodymium-doped silica singlemode fibre laser", Electron. Lett. **21**, 738-740 (1985)

[8] S. B. Poole, D. N. Payne, R. J. Mears, M. E. Fermann, and R. I. Laming, "Fabrication and characterization of low-loss optical fibers containing rare earth ions", J. Lightwave Technol. Lett. **4** (7), 870-876 (1986)

[9] J. E. Townsend, "Solution-doping technique for fabrication of rare earth doped optical fibres", Electron. Lett. **23**, 329-331 (1987)

[10] E. Snitzer, H. Po, F. Hakimi, R. Tumminelli, and B. C. McCollum, "Double-clad, offset core Nd fiber laser", in Proc. Opt. Fiber Sensors, New Orleans, 1988, post-deadline paper PD5

[11] V. Dominic, "110 W fibre laser", Electron. Lett. 35, 1158 (1999)

[12] M. J. F. Digonnet, *Rare-Earth-Doped Fiber Lasers and Amplifiers*, 2nd ed., CRC Press, Boca Raton, FL (2001)

[13] W. L. Barnes, " $Er^{3+}-Yb^{3+}$ and Er^{3+} doped fiber lasers", J. Lightwave Technol. **7** (10), 1461 (1989)

[14] S. D. Jackson, "Diode-pumped 1.7 W erbium 3-µm fiber laser", Opt. Lett.24 (16), 1133 (1999)

Capítulo 2 Elementos de fibra para Láseres de fibra óptica

2.1 Fibras de doble revestimiento

Las fibras de doble revestimiento (Double Clad Fiber, DCF) por sus siglas en inglés, es una clase de fibra óptica con una estructura que consiste de tres capas de material óptico en lugar de usualmente dos. La capa más interna que es el núcleo, está rodeado por el revestimiento interno, el cual a su vez está rodeado por el revestimiento externo. Las tres capas tienen diferentes índices de refracción como se muestra en la figura 2.1.

Esta fibra fue desarrollada a finales de la década de los 80s para el uso de amplificadores de fibra de alta potencia y láseres de fibra. En estas fibras el núcleo está dopado con material dopante activo y su función es guiar y amplificar la señal a la vez. La función del revestimiento es guiar la luz de bombeo, el cual provee la energía necesaria para permitir la amplificación.



Figura 2.1 La fibra de doble revestimiento (DCF)

Las fibras de doble revestimiento se clasifican en fibras activas y pasivas. Las activas están dopadas en el núcleo, las pasivas no están dopadas.

Las fibras de doble revestimiento son una tecnología importante entre las fibras ópticas especialmente para láseres de alta potencia y amplificadores de fibra óptica [1-2]. En la fibra el núcleo tiene mayor índice de refracción que el revestimiento interno, a su vez el revestimiento interno tiene un índice de refracción mayor que el revestimiento externo. Así el revestimiento interno es capaz de guiar la luz por reflexión interna total en la misma manera que lo hace el núcleo. Esto permite que diodos láser, los cuales tienen potencia alta pero baja irradiancia puedan ser usados como fuentes de bombeo [3]. La luz de bombeo puede ser acoplada fácilmente hacia el revestimiento interno con apertura numérica (Numerical Aperture, NA) mayor y propagarse en él como una guía de onda multimodo, mientras la señal se propaga en el núcleo con NA menor como una guía de onda monomodo.

Los amplificadores de fibra basados en fibras monomodo están limitados en su potencia de salida, debido a que es más difícil inyectar una potencia de bombeo alta en este tipo de fibras. Esto es porque es más complicado acoplarlo al núcleo de la fibra monomodo de manera eficiente. Además, como la eficiencia de acoplamiento (efficiency launch) nunca es del 100%, aun con un haz de bombeo de alta calidad, una considerable cantidad de potencia sería inyectada al revestimiento y podría destruir la fibra por sobrecalentamiento, por ejemplo debido a absorción en el recubrimiento. Este problema puede ser resuelto usando fibras de doble revestimiento. Las cuales tienen un revestimiento interno que también se llama revestimiento de bombeo, que rodea al núcleo de la fibra. El revestimiento de bombeo que tiene mayor diámetro que el núcleo de la fibra y con mayor apertura numérica constituye una guía de onda multimodal en la que el bombeo de alta potencia puede ser aplicado de manera eficiente y fácil aun si el haz de bombeo no fuera de buena calidad. El núcleo dopado gradualmente absorbe la luz del

revestimiento mientras se propaga, dando lugar a la amplificación. Este esquema de bombeo frecuentemente se llama bombeo de revestimiento (pumping cladding), el cual es una alternativa al bombeo de núcleo convencional (core pumping) en el que la luz de bombeo se acopla al pequeño núcleo. La invención del bombeo de revestimiento por un equipo de investigación por la Polariod (H. Po y colaboradores) revoluciono el diseño de los amplificadores y láseres de fibra [4]. En la fibra de doble revestimiento, el índice de refracción del núcleo es mayor que el del revestimiento de bombeo de modo que puede soportar un solo modo guiado, o algunas veces unos cuantos. La luz de bombeo aplicada al revestimiento interno también llega al núcleo de la fibra, donde es absorbida gradualmente por los iones activos, durante la propagación en el revestimiento interno. La figura 2.2 muestra como la luz de bombeo se inyecta al revestimiento interno, mientras que la señal se inyecta al núcleo de la fibra. En una fibra activa, la luz de bombeo se absorbe con mayor eficiencia ayudando a los iones del núcleo a absorber la luz de bombeo por medio de una transferencia de energía entre los iones del Er e Yb y dando lugar a mayor amplificación de la señal. En este trabajo se utiliza una fibra activa de doble revestimiento como el medio activo. Más adelante en la sección 2.3 se explicará cómo se lleva a cabo esa transferencia de energía entre el revestimiento interno y el núcleo de la fibra. La figura 2.2 muestra la estructura de la fibra de doble revestimiento y la forma en cómo se propaga la luz de bombeo y la señal.



Figura 2.2 Estructura de la fibra de doble revestimiento

La fibra de doble revestimiento tiene la ventaja de tener bajas pérdidas por *micro- curvatura* (microbending).

La forma del revestimiento es muy importante, especialmente cuando el diámetro del núcleo es pequeño comparado con el tamaño del revestimiento interno. El diseño más simple de la DCF, es un revestimiento circular de bombeo con un núcleo centrado, el cual al parecer es el más fácil de fabricar y usar. Sin embargo la simetría circular en una fibra de doble revestimiento no es la mejor solución para un láser de fibra; en este caso muchos modos de la luz en el revestimiento pierden el núcleo y por tanto no se pueden usar para bombearlo [5]. Por la óptica geométrica, la mayoría de los rayos de la luz de bombeo no pasan a través del núcleo y por tanto no lo pueden bombear. Se fabrican otros diseños de fibras de doble revestimiento como las de núcleo fuera de centro o las de revestimiento interno no circular como el rectangular, el de forma de D y el elíptico, de estos últimos el de forma de D es el mejor ya que los modos no pierden el núcleo. Deformar la simetría de la fibra para hacer los rayos irregulares puede ayudar a incrementar la eficiencia de absorción. Estos revestimientos de bombeo frecuentemente satisfacen mejor las propiedades de las fuentes de bombeo. Las aplicaciones que tienen las DCF son para construir láseres de fibra y amplificadores de alta potencia. Estos dispositivos pueden tener una buena conversión de eficiencia de alta potencia cerca del 80% combinada con una alta calidad de haz.

2.2 Amplificadores de Fibra

Las fibras dopadas con tierras raras han venido evolucionando desde 1964 y se han utilizado desde 1988 como amplificadores ópticos debido a la capacidad de amplificar la señal óptica que se inyecta en ellos y como se mencionó anteriormente debido al mejoramiento en las técnicas de fabricación de las fibras, ha mejorado la calidad y el aprovechamiento de la industria del láser y de la investigación [6]. El Er como dopante en las fibras ha causado gran interés por sus aplicaciones en el área de las telecomunicaciones y de sensores remotos ya que puede amplificar de manera eficiente la señal a la longitud de onda de 1550 nm y además es segura para el ojo y es la longitud de onda donde las fibras para las comunicaciones ópticas tienen pérdida mínima. El amplificador de fibra óptica fue inventado por H. J. Shaw y Michael Digonnet en la Universidad de Stanford a principios de 1980 y el amplificador de fibra EDFA fue demostrado por primera vez en 1987 por N.D. Payne y su grupo en la universidad de Southampton en colaboración con los laboratorios de AT&T [7-8].

Los iones de tierras raras se introducen en el núcleo de la fibra durante la fabricación y después se bombean ópticamente para producir la ganancia. La longitud de onda de trabajo de las fibras y el ancho de banda está determinado por el tipo de dopante y la cantidad de dopante. De esta manera se obtienen amplificadores de fibra a diferentes longitudes de onda, cubriendo un rango desde el visible hasta el infrarrojo.

A mediados de los 80s se observó que los iones de Er^{3+} (ion trivalente) podían exhibir ganancia a 1.5 µm que corresponde a la tercera ventana de transmisión en fibras ópticas, que es la que exhibe menores pérdidas (alrededor de 0.2 dB/km). En 1989 se empezaron a utilizar nuevos diodos láser a 1.48 µm para bombear los EDFAs, produciendo de manera eficiente ganancia de 1.55 µm. Otras características que presenta el EDFA son su elevada ganancia y bajo ruido además posee un amplio ancho de banda, transparencia a las longitudes de onda e independencia a la polarización, lo que lo hace muy atractivo para su utilización en comunicaciones ópticas y sensores.

2.3 Ecuaciones de razón de transferencia para Er/Yb

En esta sección se da una explicación de cómo interactúan los iones de Er³⁺ e Yb³⁺ (ion trivalente) dentro de la fibra co-dopada que se utiliza en este trabajo como el medio de ganancia. Y cómo al inyectarle la potencia de bombeo en el revestimiento interno, el núcleo dopado de Er³⁺ e Yb³⁺ absorbe este bombeo. En otras palabras se considera cómo se lleva a cabo el mecanismo de absorción en un sistema co-dopado de Er/Yb.

Para los amplificadores de fibras dopadas se consideran el sistema atómico de los niveles de transición [9-13]. Las características más importantes del modelo teórico de las ecuaciones de razón de transferencia para la fibra dopada con Er/Yb se describen a continuación [13]

La figura 2.3 muestra el diagrama de niveles de energía del sistema dopado con Er/Yb. Con 976 nm de longitud de onda de bombeo, el proceso de bombeo toma lugar entre los niveles del **Yb**³⁺: ${}^{2}F_{7/2}$ y ${}^{2}F_{5/2}$ y/o los niveles del **Er**³⁺: ${}^{4}I_{15/2}$ y ${}^{4}I_{11/2}$. Los iones excitados del **Yb**³⁺ transfieren energía a los iones que rodean el estado fundamental del **Er**³⁺ a través de un proceso de relajación cruzada y se excitan desde ${}^{4}I_{15/2}$ a ${}^{4}I_{11/2}$ mientras que los iones de **Yb**³⁺ regresan a su estado fundamental. El proceso se describe mediante el coeficiente de transferencia de energía R₆₁. Los iones excitados del **Er**³⁺ se relajan rápidamente no radiactivamente a ${}^{4}I_{13/2}$. La amplificación de la señal se lleva a cabo a través de las transiciones estimuladas entre ${}^{4}I_{13/2}$ y ${}^{4}I_{15/2}$. Los iones de **Er**³⁺ también pueden absorber el bombeo a 976 nm pero la eficiencia de absorción es mucho menor.



Figura 2.3 Diagrama de niveles de energía de un sistema codopado Er/Yb [13]

Las ecuaciones de razón de transferencia que describen el cambio de la densidad de población fraccional de los niveles correspondientes, se pueden expresar como [14-15]:

$$\frac{\partial n_2}{\partial t} = -\frac{n_2}{\tau_{21}} + \frac{n_3}{\tau_{32}} + W_{12}n_1 - W_{21}n_2 - 2C_{up}N_{Er}n_2^2;$$
 2.1a

$$\frac{\partial n_3}{\partial t} = -\frac{n_3}{\tau_{32}} + W_{13}n_1 + R_{61}N_{Yb}n_6n_1 - R_{35}N_{Yb}n_3n_5 + C_{up}N_{Er}n_2^2;$$
 2.1b

$$\frac{\partial n_6}{\partial t} = -\frac{n_6}{\tau_{65}} + W_{56}n_5 - W_{65}n_6 - R_{61}N_{Er}n_6n_1 + R_{35}N_{Er}n_3n_5; \qquad 2.1c$$

$$n_1 = 1 - n_2 - n_3;$$
 2.1d

$$n_5 = 1 - n_6;$$
 2.1e

donde *t* representa el tiempo, τ_{ij} es el tiempo de vida del nivel *i*-ésimo como se muestra en la figura 2.3 n_i es una matriz de $1 \times N_z$ que representa la fracción de población del *i*-ésimo nivel de todos los nodos, R_{ij} es el coeficiente de relajación cruzada entre los niveles *i* y *j*, N_{Er} y N_{Yb} son las concentraciones de dopaje de \mathbf{Er}^{3+} y de \mathbf{Yb}^{3+} , se asume que es uniforme y confinada al núcleo, la C_{up} es el coeficiente de conversión ascendente uniforme entre los niveles ${}^{4}\mathbf{I}_{13/2}$ y ${}^{4}\mathbf{I}_{9/2}$ debido a que el tiempo de vida de ${}^{4}\mathbf{I}_{9/2}$ es muy corto ($\tau_{43} \approx 0$), n_4 se ha asumido ser cero. Los términos W_{ij} representan la razón de transferencia estimulada desde el nivel *i* al nivel *j* en todos los nodos al tiempo *t*, y se pueden expresar como

$$W_{ij} = \frac{\left[C_{ij} \lambda [\![i_{Er}]\!]^T * P[\![i_{Er}, :]\!]\right]}{A_{core} hc N_{Er}}, ij = 12,21;$$
2.2a

$$W_{13} = \frac{[C_{13} \ \lambda [[i_{Yb}]]^T * P[[i_{Yb}, :]]]}{A_{core} hc N_{Er}};$$
 2.2b

$$W_{lm} = \frac{[c_{lm} \lambda [[i_{Yb}]]^T * P[[i_{Yb}, :]]]}{A_{core} hcN_{Yb}}, lm = 56.65;$$
 2.2c

donde A_{core} , es el área del núcleo de la fibra, h es la constante de Planck, c es la velocidad de la luz en el vacío, el superíndice T es una operación transpuesta. El operador "*" es una multiplicación matricial de las matrices involucradas, de otro modo la multiplicación está dada por hecho. En la ecuación anterior, los coeficientes de absorción y emisión $C_{12} C_{21} y C_{13}, C_{56} y C_{65}$ son (s + 2e) x 1 y (m + 2y) x 1 matrices calculadas respectivamente a $\lambda[[i_{\rm Er}]] y \lambda[[i_{Yb}]]$ por las siguientes relaciones

$$c_{ij,k} = \Gamma_k \sigma_{ij,k} N_{Er}, ij = 12, 21, 13;$$
 2.3a

$$c_{lm,k} = \Gamma_k \sigma_{lm,k} N_{Yb}, lm = 56,65;$$
 2.3b

donde $\sigma_{ij,k}$ y Γ_k son las secciones transversales de transición entre los niveles *i* y *j* y el factor de traslape entre el campo modal y el núcleo de la fibra a λ_k , respectivamente. Para el modo fundamental, cuya distribución de campo se puede aproximar por una función gaussiana, el factor de traslape se puede expresar como

$$\Gamma_k = 1 - e^{-2a^2/\omega^2}; \qquad 2.4$$

donde el radio del modo ω se puede calcular de la siguiente manera

$$\omega = a \left(0.65 + 1.619V^{-1.5} + 2.879V^{-6} \right);$$
 2.5

donde V = 2π a NA_{core}/ λ k es la frecuencia normalizada de la fibra, *a* y NA_{core} son el radio del núcleo y la apertura numérica de la fibra respectivamente, los EDFAs de alta potencia usualmente se construyen con DCFs para permitir el uso de diodos láser multimodos de alta potencia. La señal puede ser inyectada de manera eficiente dentro del modo fundamental de la fibra incluso para valores grandes de V en la fibra [16]. Así el valor del factor de traslape se puede estimar por la ecuación (2.4). Debido a la naturaleza altamente multimodal del revestimiento interno, el perfil de la intensidad de bombeo se asume ser uniforme en la sección transversal. Así el factor de traslape de bombeo $\Gamma_p = A_{core}/A_{clad}$, donde A_{clad} es el área del revestimiento interno. Para fibras de un solo revestimiento $A_{core} \equiv A_{clad}$. La amplificación de emisión espontánea (Amplified Spontaneous Emission, ASE) se puede

generar en todos los modos soportados por la fibra. Su factor de traslape debe ser calculado tomando en cuenta la distribución radial del modo. Solo los modos con gran superposición o traslape en el núcleo pueden ser eficientemente amplificados, como una primera aproximación como se ha propuesto y justificado experimentalmente [17]. Las ASEs o emisiones espontáneas amplificadas se pueden asumir ser acopladas dentro del modo fundamental (calculando Γ_k con la ecuación 2.4) pero con un término multiplicado por un número efectivo de modos ASE, m_p para las ASEs del **Er**.

2.4 Rejillas de Bragg de fibra (FBG)

Las rejillas de Bragg de fibra óptica (FBG) son dispositivos que han generado gran interés en la investigación y la industria y que pueden ser aplicadas en diversos campos como las comunicaciones ópticas, sensores y láseres de fibra óptica [18]. Esto gracias a las características y ventajas que presenta como los son: la inmunidad al ruido electromagnético, alta sensibilidad y tamaño reducido. Las rejillas de Bragg de fibra se pueden utilizar como espejos reflectores en una cavidad resonante en láseres de fibra. También se les suele utilizar como sensores o arreglos de sensores al aplicarles tensión o al cambiarles la temperatura, ya que al hacer esto se cambia su longitud de onda de reflexión [19]. El principio aplicado en estos ejemplos es el de monitorear los cambios en la longitud de onda de Bragg reflejada por la rejilla producidos por aplicarles tensión o temperatura [18].

La rejilla de Bragg es un grabado periódico o perturbación periódica en el núcleo de la fibra lo cual forma una variación periódica o aperiódica del índice de refracción que se forma por la exposición del núcleo a un patrón de interferencia muy intenso de luz ultravioleta (UV).

La formación de rejillas permanentes en una fibra óptica fue demostrada por primera vez por Hill y su grupo [20] en 1978. Después Meltz [20] demostró que con luz UV se podían formar rejillas que reflejaría cualquier longitud de onda y demostró que su método era más eficiente [20]. Las FBG se fabrican usando una máscara de fase o interferencia holográfica [21], normalmente se utiliza una fibra dopada con germanio para fabricarlas, la fibra dopada con germanio es fotosensitiva, lo que significa que el índice de refracción del núcleo cambia con la exposición a la luz UV. El tamaño del cambio depende en la intensidad y la duración a la exposición de la luz UV así como también a la sensitividad de la fibra. Cuando un extenso haz de luz se envía a la FBG, las reflexiones de cada segmento del índice de refracción variante interfieren constructivamente, sólo para una longitud de onda de luz determinada, conocida como la longitud de onda de Bragg. Esto causa que la FBG refleje una frecuencia específica de la luz mientras que transmite todas las demás. La expresión que define esta condición está dada por

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda; \qquad 2.6$$

donde \mathbf{n}_{eff} es el índice de refracción efectivo del núcleo, λ_b es la longitud de onda de Bragg y Λ es el periodo de la rejilla. La longitud de onda de Bragg es una función del periodo de la rejilla. Los cambios en la temperatura y el esfuerzo afectan a ambos, el periodo de la rejilla Λ y el índice de refracción efectivo \mathbf{n}_{eff} de la rejilla de Bragg que resulta en un desplazamiento de la longitud de onda reflejada [21]. La luz guiada a lo largo de la fibra será dispersada con un coeficiente de dispersión, el cual depende de la diferencia de índices de refracción de la rejilla. Sí la condición de Bragg no se satisface, la luz reflejada de los planos subsecuentes se convierte progresivamente fuera de fase y ésta cancelará eventualmente la salida. Además, la luz que no coincida con la resonancia de la longitud de onda de Bragg experimenta una reflexión muy débil a cada uno de los planos de las rejillas. Debido al índice desigual, ésta reflexión aumenta sobre la longitud de onda de la rejilla. Por otro lado, cuando la condición de onda de Bragg se satisface, la contribución de la luz reflejada de cada plano de la rejilla se agrega constructivamente en la dirección hacia atrás para formar un pico reflejado con la longitud de onda central definida por los parámetros de la rejilla. La condición de Bragg es el requisito para satisfacer la conservación de energía y momento



Figura 2.4 Rejilla de Bragg de fibra óptica uniforme con modulación del índice de refracción y periodo constante

La luz guiada a través del núcleo de la fibra será dispersada por cada plano de la rejilla. Existe una relación importante entre los haces que interactúan con la rejilla que está relacionada con la condición de Bragg; la cual tiene que ver con la conservación de energía y momento, la cual requiere que la frecuencia de la radiación incidente y la reflejada sean iguales $h\omega_i = h\omega_r$. La conservación del momento requiere que el vector de onda incidente $\vec{k_i}$ más el vector de onda de la rejilla \vec{K} sea igual al vector de onda de la radiación reflejada $\vec{k_r}$, así

$$\vec{k_1} + \vec{K} = \vec{k_r}; \qquad 2.7$$

donde el vector de onda de la rejilla K, tienen dirección normal a los planos de la rejilla y su magnitud es de $K = 2\pi/\Lambda$, el vector de onda reflejada tiene la misma magnitud pero de dirección opuesta al vector de onda incidente, $k_r =$

 $(\textbf{-k}_i=2n_{eff}/\lambda_B)$ por lo que, la condición de conservación de momento se convierte en

$$\frac{2\pi}{\Lambda} = 2\frac{2\pi n_{eff}}{\lambda_B}; \qquad 2.8$$

Lo cual simplifica la condición de Bragg expresada en la ecuación (2.6) que ya se ha mencionado anteriormente. Donde la longitud de onda de Bragg λ_B es de longitud de onda central de la luz en el espacio libre de entrada que será reflejada por la rejilla y **n**_{eff} es el índice de refracción efectivo del núcleo de la fibra a la longitud de onda central en el espacio libre y se expresa como

$$n_{eff} = \sqrt{\frac{(n_2^2 + n_3^2)}{2}};$$
 2.9

donde n_3 es el índice de los planos que forman la FBG y n_2 es el índice de refracción del núcleo. Como se mencionó anteriormente en la ecuación (2.6) de la condición de Bragg, la longitud de onda de resonancia de Bragg depende del periodo de la rejilla (Λ) y del índice de refracción efectivo (\mathbf{n}_{eff}). Este índice de refracción efectivo depende de la constante de propagación (β) y del número de onda en el vacío (k), con valor de $\mathbf{k} = 2\pi/\lambda$, y donde λ es la longitud de onda. Se tiene la siguiente expresión

$$n_{eff} = \frac{\beta}{k}; \qquad 2.10$$

El cálculo de la constante de propagación β se hace obteniendo una solución a través de las funciones Bessel, la cual es relativamente complicado, así que es válido utilizar la aproximación para fibras monomodo de índice escalonado dado por

$$n_{eff}^2 = n_{core}^2 + \frac{\lambda^2}{4\pi^2 r^2} (1.1428V - 0.996)^2; \text{ para } 1.5 \le V \le 2.4;$$
 2.11

donde V es la frecuencia normalizada de la fibra que determina el número de modos de una fibra de índice escalonado y está dado por

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} r N A = \frac{2\pi}{\lambda} r \sqrt{n_{core}^2 - n_c^2}; \qquad 2.12$$

donde r es el radio del núcleo, n_{core} y n_c son los índices de refracción del núcleo y del revestimiento respectivamente y que se utilizan para obtener la apertura numérica NA de la fibra.

2.4.1 Reflectividad de las rejillas de Bragg

Una rejilla uniforme puede representarse a través de una modulación cosenoidal del índice de refracción n(z) en el núcleo de la fibra, dada por [18]

$$n(z) = n_c + \Delta n \left[1 + \cos\left(\frac{2z\pi}{\Lambda}\right) \right]; \qquad 2.13$$

donde Δn es el incremento en el índice de refracción promedio de la fibra y en los planos de la rejilla, con valores típicos 10⁻⁵ hasta 10⁻³ y con *z* como la distancia a lo largo del eje longitudinal de la fibra.

Utilizando la descripción analítica de la teoría de modos acoplados que describe las propiedades de la reflexión de la rejilla de Bragg y que utiliza para la caracterización de filtros ópticos desarrollada por Lam y Garside en 1981, la reflexión de una rejilla uniforme está dada por [22]

$$R(L,\lambda) = \frac{\Omega^2 senh^2(sL)}{\Delta k^2 senh^2(sL) + s^2 cosh^2(sL)};$$
2.14

donde $R(L, \lambda)$ es la reflectividad que es función de la longitud L de la rejilla y de la longitud de onda incidente λ , Ω es el coeficiente de acoplamiento, $\Delta k = k - \pi/\lambda$ es el vector de desintonización y $s^2 = \Omega^2 - \Delta k^2$. Tomando en cuenta que el coeficiente de acoplamiento Ω para una variación sinusoidal de la perturbación del índice de refracción a lo largo del eje de la fibra es

$$\Omega = \frac{\pi \Delta n}{\lambda} \eta(V); \qquad 2.15$$

donde $\eta(\mathbf{V})$ es la fracción de la potencia del modo contenida por el núcleo de la fibra y es función del parámetro V y considerando que el núcleo de la rejilla está uniformemente repartido por los planos, $\eta(\mathbf{V})$ se puede aproximar a $\eta(\mathbf{V})$ = $1 - \mathbf{V}^2$. A una longitud igual a la de Bragg ($\lambda = \lambda_B$) no existe vector de desintonización y $\Delta k = 0$; por tanto, la reflectividad pico la cual representa la longitud de onda de Bragg utilizando la ecuación (2.14) se tiene

$$R_{\lambda_B} = \tanh^2(\Omega L); \qquad 2.16$$

Con estas expresiones se pueden obtener los espectros de reflexión de una rejilla de Bragg para diferentes longitudes L de la rejilla. La reflectividad se incrementa con el incremento del cambio del índice de refracción inducido o bien cuando la longitud de la rejilla incrementa. En la figura (2.5) se muestra el ejemplo de un espectro de reflexión evaluado con la ecuación (2.14) con una longitud de onda de Bragg de $\lambda_B = 1550$ nm, la longitud de la rejilla es de 10 mm y la reflectividad de 95%.



Figura 2.5 Espectro de reflectividad de una rejilla de Bragg

Las bandas laterales de la resonancia son debido a múltiples reflexiones hacia y desde extremos opuestos de la región de la rejilla. El espectro sinusoidal surge por la transformada de Fourier de una señal armónica que tiene extensión finita.

Referencias

[1] A. Tunnermann, T. Schreiber, F. Roser, A. Liem, S. Hofer, H. Zellmer, S. Nolte, and J. Limpert, "The renaissance and bright future of fibre lasers," Journal of Physics B-Atomic Molecular and Optical Physics **38**, S681-S693 (2005)

[2] J. Limpert, F. Roser, S. Klingebiel, T. Schreiber, C. Wirth, T. Peschel, R. Eberhardt, and A. Tunnermann, "The rising power of fiber lasers and amplifiers" IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics **13**, 537-545 (2007)

[3] D. Kouznetsov, J. V. Moloney (2003). "Highly efficient, high-gain, shortlength, and power-scalable incoherent diode slab-pumped fiber amplifier/laser" IEEE Journal of Quantum Electronics **39** (11) 1452–1461 (2003)

[4] H. Po; E. Snitzer, L. Tumminelli, F. Hakimi, N. M. Chu, T. Haw. "Doubly clad high brightness Nd fiber laser pumped by GaAlAs phased array". Proceedings of the Optical Fiber Communication Conference, PD7, (1989)

[5] S. Bedö, W. Lüthy, H. P. Weber. "The effective absorption coefficient in double-clad fibers" Optics Communications **99** (5–6) 331–335 (1993)

[6] Erbium-Doped Fiber Amplifiers Fundamentals and Technology, P.C. Becker, N.A. Olsson, J.R. Simpson. Academic Press, (1999)

[7] R.J. Mears, L. Reekie, I.M. Jauncey and D. N. Payne: "Low-noise Erbiumdoped fibre amplifier at 1.54µm", Electron. Lett, 1987, **23**, pp.1026–1028 (1987)

[8] HISTORY OF OPTICAL AMPLIFIERS Optics & Photonics News, Jeff Hecht, August (2002) [9] E. Desurvire, "Erbium Doped Fiber Amplifiers", Edt. John Wiley and sons in., Chapter 1 y 4 (1994)

[10] G. P. Agrawal, "Fiber Optics Communications Systems", Edit. John Wiley and sons, inc., Chapter 2 (1992)

[11] B. E. A. Saleh, M. C. Teich, "Fundamentals of Photonics", John Wiley and Sons, (1991)

[12] Becker, Olsson, Simpsom, "Erbium Doped Fiber Amplifiers", Fundametals and Technology, Academic Press, (1999)

[13] Qun Han, Tiegen Liu, Xiaoyin Lü and Kun Ren. "Numerical methods for hign-power Er/Yb-codoped fiber amplifiers". Opt Quant Electron, **47**: 2199-2212 (2015)

[14] Karasek, M. "Optimum desing of Er3+ - Yb3+ codoped fibers for large – signal high – pump – power applications". IEEE J. Quantum Electron. 33 (10), 1699 – 1705 (1997)

[15] Han, Q., Ning, J., Sheng, Z. "Numerical investigation of the ASE and power scaling of cladding - pumped Er-Yb codoped fiber amplifiers". IEEE J. Quantum Electron. 46 (11), 1535 – 1541 (2010)

[16] Koplow, J.P., Kliner, D.A.V., Goldberg, L. "Single – mode operation of a coiled multimode fiber amplifier". Opt Lett. **25** (7), 442 – 444 (2000)

[17] Canat, G., Mollier, J. -C., Bouzinac, J.-P., Williams, G.-M., Cole, B., Goldberg, L., Jaouën, Y., Kulcsar, G. "Dynamics of high-power erbium-ytterbium fiber amplifiers". J. Opt. Soc. Am. B **22** (11), 2308 – 2318 (2005)

[18] A. Othonos, "Fiber Bragg gratings," Rev.Sci. Instrum. **68**, 4309-4340 (1997)

[19] K.O. Hill and G. Meltz, "Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview," J. Lightwave Technol. 15(8), 1263-1276, (1997)

[20] Fiber Bragg Grating Technology Fundamentals and Overview. Kenneth O Hill and Gerald Meltz. Journal of Lightwave Technology, **15**, No. 8, 1263-1276 (1997)

[21] Fabrication and applications of Fiber Bragg Grating- A review. SanjeevDewra and Amit Grover. Advanced Engineering Technology and application.An International Journal. 4, No. 2, 15-25 (2015)

[22] 16. D. K. W. Lam, B. K. Garside, "Characterizacion of single-mode optical fiber filters," Appl. Opt. **20** (3), 440-445 (1981)

Capítulo 3 Láseres Pulsados

3.1 Introducción

La operación pulsada de láseres se refiere a láseres que no sean de operación continua, de modo que la potencia óptica aparezca en pulsos de alguna duración a una frecuencia de repetición. Abarca un amplio rango de tecnologías direccionadas a un número de diferentes motivaciones [1].

En otros casos la aplicación requiere la producción de pulsos que tengan la mayor energía posible. Ya que la energía del pulso es igual a la potencia promedio dividida entre la frecuencia de repetición, esto se puede conseguir al bajar la frecuencia de repetición de los pulsos de modo que se pueda obtener más energía. En ablación láser por ejemplo, un volumen pequeño de material se puede evaporar en la superficie de una pieza de trabajo, sí es calentada en un tiempo muy corto, mientras se suministra energía gradualmente permite que el calor sea absorbido en la pieza, sin nunca alcanzar suficiente temperatura alta en un punto particular.

Los láseres pulsados también se aplican en la medicina. Cuando un haz láser entra en contacto con un tejido biológico, un factor importante es que no sobrecaliente tejidos cercanos, de esta manera se previene la necrosis o muerte del tejido. Los pulsos de láser deben ser espaciados para permitir un enfriamiento eficiente del tejido (tiempo de relajación térmico) [1-2].

Otras aplicaciones dependen de la potencia pico del pulso, como por ejemplo para obtener efectos ópticos no lineales. Para una energía de pulso dada, esto requiere crear pulsos con una duración lo más corta posible utilizando técnicas como Q-switcing, Mode-locking, entre otras.

Para sistemas láser no-militares las potencias de salida de onda continua (Continuous Wave, CW) están limitadas alrededor de 10kW para láseres de estado sólido y 20 kW para láseres de gas. Se pueden alcanzar picos de potencia de salida más elevada al hacer uso de la capacidad de almacenaje de energía del medio activo y liberar toda esa energía en pulsos cortos. Se pueden conseguir potencias pico de hasta varios cientos de MW con duración de pulso del orden de 10 ns usando la técnica referida como Qswitching. Con esta técnica las pérdidas de oscilación del resonador son incrementadas para prevenir que se alcance el umbral de láser durante un intervalo de tiempo definido de bombeo. La energía almacenada durante éste tiempo, es luego parcialmente liberada en forma de un pulso corto después de que las pérdidas de oscilación hayan sido disminuidas a su valor normal. En otras palabras, para almacenar y liberar energía, el factor de calidad Q del resonador es cambiado desde un valor bajo a un valor alto y de regreso [3].

3.2 Q-switching

Q-switching es una de varias técnicas para producir salida láser pulsada. La energía de un láser pulsado está concentrada en pequeños paquetes. Q-switching es una técnica en láseres que se utiliza para la generación de pulsos cortos de alta energía (del orden de nanosegundos). Esta energía concentrada es mucho mayor (potencia pico) que la energía que sale de un láser de onda continua (potencia promedio). La energía debe ser almacenada en la inversión de población de un láser de Q-switched. El tiempo de vida espontanea de un láser de colorante y de la mayoría de los láseres de gas es muy breve para permitir un almacenamiento de energía significativo en la inversión de población, de modo que simplemente no pueden ser conmutados en su valor de Q. En seguida se dará la definición de Q. Los láseres no han probado ser útiles para alguna aplicación [4].

La definición de Q en general se aplica a circuitos, sistemas mecánicos, cavidades de microondas y cavidades láser. Q es el factor de calidad de una cavidad resonante y se define como la razón de la energía almacenada en la cavidad en relación con la pérdida o disipación de energía por viaje de ida y vuelta (round trip) [5] y está dado por

$$Q = \frac{2\pi x \ energía \ almacenada}{energía \ disipada \ por \ ciclo};$$
3.1

También está relacionada con la frecuencia de resonancia de la cavidad con respeto al ancho de banda de forma simple como

$$Q = \frac{\nu}{\Delta \nu}; \qquad \qquad 3.2$$

En óptica, el factor Q de una cavidad resonante está dada por

$$Q = \frac{2\pi\nu W}{P};$$
 3.3

Donde *v* es la frecuencia de resonancia, W es la energía almacenada en la cavidad y P = -dW/dt es la potencia disipada.

En una cavidad láser o resonador láser existen pérdidas durante cada oscilación de la luz debido a la reflexión y transmisión de los espejos por el material de que están hechos, solo hasta que la energía suministrada en el medio de ganancia supera esas pérdidas, es cuando se produce luz láser en onda continua. Todo resonador láser tiene un factor de calidad Q. Un resonador con una Q alta significa que tiene pérdidas bajas. Por ejemplo un resonador con espejo bloqueado no tiene una Q alta pero cuando el espejo se desbloquea repentinamente la Q se cambia de un valor bajo a alto. Así entonces un láser de Q-switched (en español es Q conmutada) es uno cuyo resonador puede ser cambiado de baja calidad a alta calidad y de regreso
[8], de ahí el término en inglés switch de cambiar o conmutar. Controlar el valor de Q, permite modular las pérdidas de la cavidad.

Toda cavidad resonante láser tiene un factor de calidad característico Q, que mide las pérdidas internas. Entre más alta la Q menores son las pérdidas. Las pérdidas no necesariamente son malas ya que una cavidad con pérdidas altas puede almacenar más energía. En el caso de una cavidad con espejos sí se bloquea uno de estos y se excita el medio láser, la excitación produce una inversión de población, pero el láser no oscilará por que el espejo no refleja la luz. Sí repentinamente se desbloquea el espejo, la inversión de población será mucho más grande que la necesaria para la acción láser. La emisión estimulada rápidamente drenará la energía láser almacenada en la cavidad en un pulso corto con una potencia pico muy alta que el láser no podría producir de otra manera. Se puede pensar en Q-switched como un dispositivo que rápidamente cambia de absorbente a transmisor reduciendo rápidamente las pérdidas [6]. Cuando se tiene este dispositivo dentro de la cavidad que controle la oscilación láser se le llama Q-switched.

En el inicio se previene la oscilación láser en la cavidad al tener las pérdidas a un nivel alto lo que significa una Q baja, mientras tanto se aplica energía al medio de ganancia por medio del bombeo y se produce una gran inversión de población, luego se conmuta repentinamente por medio de medios activos o pasivos el valor de Q a un valor alto, lo que significa que las pérdidas se vayan a un nivel muy bajo. El resultado es un estallido de salida de láser muy corto e intenso que desaloja toda la inversión de población acumulada en un solo pulso corto de láser.

La operación de láser de Q-switched se encuentra dentro de la clasificación de láseres pulsados. Para generar láser de Q-switched se debe incluir en la cavidad un dispositivo que module las perdidas como se muestra en la figura 3.1.

3.2.1 Clasificación de láseres de Q-switched

Básicamente se puede clasificar la operación Q-switched en dos tipos: Qswitched Activo y Q-switched Pasivo. Para el Q-switched Activo, las pérdidas son moduladas con un elemento activo de control, ya sea un modulador electróptico, o un acusto-óptico o por algún otro mecanismo. Para Q-switched pasivo las pérdidas se modulan de forma automática con un absorbedor saturable, el cual puede ser algunos cristales, nanotubos de carbono, grafeno y tierras raras, entre otros. En la figura 3.1 se ve como se ha incluido algún elemento activo o pasivo para llevar a cabo la operación de Qswitching. En seguida se muestra una clasificación de la operación de láseres de Q-switched.

Clasificación:

- 1. Q-switching Activo
 - a) Modulador Electróptico
 - b) Modulador Acusto-óptico
 - c) Modulador Mecánico
- 2. Q-Switching Pasivo
 - a) Absorbedor saturable
 - Nanotubos de carbono
 - Grafeno
 - Tierras raras
 - Otros cristales



Figura 3.1 Dispositivo Q-switching dentro de la cavidad láser

En el Q-switched activo el pulso se forma rápidamente después de que una señal eléctrica de disparo llega. Por ejemplo, en éste método, un cristal de quarzo es incluido en la cavidad láser además del medio de ganancia y se generan ondas acústicas de alta intensidad en el cristal por medio de un transductor piezo-eléctrico adjunto como se muestra en la figura 3.2. Las ondas acústicas crean una variación periódica del índice de refracción del cristal, la cual forma una rejilla de volumen-fase. Este cristal es un modulador acusto-óptico. La luz que se difracta de ésta rejilla incrementa la pérdida de la cavidad y Q decrece. El proceso Q-switched comienza con las ondas acústicas puestas dentro, tal que Q sea suficientemente bajo para prevenir la oscilación láser. Las ondas acústicas son luego rápidamente puestas fuera, lo que incrementa la Q y se genera el pulso.



Figura 3.2 Operación de Q-switched activo basado en un cristal y un modulador Acustoóptico

También se puede ver gráficamente el proceso en la figura 3.3. La dinámica es la siguiente: en el inicio se comienza a bombear el medio de ganancia, representado en la gráfica por el intervalo de bombeo, pero no existe oscilación láser porque no hay retroalimentación en la cavidad, lo que representa un nivel alto de las pérdidas, mientras tanto se realiza una gran inversión de población por medio del bombeo y una gran cantidad de energía se almacena en el medio de ganancia, después de cierto tiempo el nivel de energía llega a un máximo, en ese punto se hace que el dispositivo Qswitched conmute rápidamente de valor bajo a alto, con esto las pérdidas se van a un valor normal y permite la amplificación de emisión estimulada por la retroalimentación que ahora existe en el resonador, y el resultado es que un gran pulso corto de luz láser de alta intensidad se forme, haciendo que la energía almacenada en el medio de ganancia se agote.



Figura 3.3 Gráfica de la operación de Q-switching activa



Figura 3.4 Tren de pulsos de Q-switched Activo

La operación de Q-switching genera un tren de pulsos, y sí estos pulsos son estables se puede medir el periodo y con esto se puede conocer la frecuencia de repetición. En la figura 3.4 se observa un tren de pulsos estable, donde la gráfica muestra el nivel de las pérdidas, la energía almacenada y el pulso de láser que se forma.

3.3 Medición de la salida de Láseres Pulsados

Medir la salida de un láser de onda continua es prácticamente simple porque la energía fluye suave y constantemente desde el láser como se muestra en la figura 3.5a. Sin embargo con el láser pulsado es diferente. Cuando se mide la salida de un láser de onda continua, se mide la cantidad de energía que sale durante un periodo de tiempo, la energía se mide en Joules y el tiempo en segundos [4].



Figura 3.5 Salida de láser de onda continua y salida de láser pulsado [4]

La tasa a la cual la energía sale del láser, es decir la cantidad de Joules por segundo, es la potencia del láser, medido en Watts. La energía se mide en Joules y se define como la capacidad de realizar trabajo (como mover o calentar algo). Por otra parte la potencia es la tasa de energía consumida y

se mide en Joules por segundo (Watts). En láseres existen dos mediciones de potencia para un láser pulsado: *la potencia pico* y *la potencia promedio*. La potencia promedio es simplemente una medida de la tasa promedio a la cual la energía fluye del láser durante un ciclo completo. Por ejemplo sí un láser produce un solo pulso de medio Joule por segundo, su potencia promedio es 0.5 W. La potencia pico por otro lado es una medida de la tasa a la cual la energía aparece durante el pulso. Sí el mismo láser produce el medio Joule de salida en un pulso de una duración de un micro segundo, entonces la potencia pico es de 500 000 W (0.5 J/1x10⁻⁶ s = 500 000 J/s).

La frecuencia de repetición del pulso es una medida del número de pulsos que el láser emite por segundo. El *periodo* de un láser pulsado es la cantidad de tiempo desde el inicio de un pulso hasta el inicio del siguiente y es el reciproco de la frecuencia de repetición. El ciclo de trabajo de un láser es la fracción de tiempo que el láser está produciendo una salida, la duración del pulso dividida entre el periodo. Por ejemplo un láser de Q-switched de Nd:YAG que produce 100 mJ y pulsos de 20 ns a una frecuencia de repetición de 10 Hz. En este caso la potencia promedio es igual a la energía del pulso dividida por el periodo o bien multiplicada por la frecuencia de repetición, así

$$P_{promedio} = \frac{Energía \ de \ pulso}{periodo} = \frac{0.1 \ J}{0.1 \ s} = 1W$$

Por otro lado, la potencia pico es igual a la energía del pulso dividida entre la duración del pulso, así

$$P_{pico} = \frac{Energía \ de \ pulso}{duración \ del \ pulso} = \frac{0.1 \ J}{2x10^{-9}s} = 5 \ MW$$

La potencia pico es cinco millones de veces más grande que la potencia promedio. Lo que significa que si se toma un láser de onda continua con un 1

W de salida y se compacta esa energía, es decir se comprime esa energía en 10 pulsos con una duración cada uno de 20 ns, se pueden crear 5 MW de potencia de láser. No se ha agregado ninguna energía después de todo, sólo se ha compactado la energía que de por si estaba ahí. Y entonces hay muchas cosas que se pueden hacer con 5 MW que no se pueden realizar con 1 W. Este el motivo por qué se hacen láseres pulsados [8].

3.4 Láseres de fibra de Q-switched

Los láseres de fibra han sido investigados casi desde los inicios de la demostración del láser. La investigación en el desarrollo de nuevos sistemas láser ha sido de constante interés en la óptica y ha tenido un crecimiento muy elevado llegando a ser un área de investigación en la ciencia y en las aplicaciones industriales. Los láseres de fibra han sido estudiados ampliamente por sus características únicas como alto confinamiento de potencia, alta calidad de haz, pérdida de inserción baja, y de dimensiones compactas. En general son atractivos para diferentes aplicaciones como la medicina, las telecomunicaciones, sensores ópticos y procesamiento de materiales en la industria.

Los láseres de fibra utilizan como medio de ganancia fibras dopadas con tierras raras como se mencionó en el capítulo anterior, ya que tienen propiedades térmicas y ópticas adecuadas para el desarrollo de láseres de fibra, en contraste con los láseres de estado sólido. Las fibras dopadas con Er (EDF) han sido usadas para construir láseres de fibra, sin embargo en las últimas décadas la constante búsqueda de mejoras en la eficiencia en términos de alta ganancia con bajos umbrales de bombeo ha incrementado significativamente el uso de fibras dopadas con iones de Yb porque ofrecen una eficiencia de hasta el 80% [7].

Como es sabido los diodos de bombeo proveen potencia de bombeo limitada de unos cuantos watts. Esta restricción también limita la potencia de salida del láser de fibra cuando se utilizan fibras convencionales, dopadas y de un solo revestimiento. Con el desarrollo de las fibras de doble revestimiento (DCF) se tienen avances significativos al alcanzar altas potencias en los láseres de fibra en conjunto con las técnicas de bombeo en el revestimiento. Las DCF ofrecen una gran tasa de ganancia por área con respecto a volumen, además una alta concentración de dopaje que ofrece alta potencia de salida con una mejora espacial de confinamiento de haz en comparación con el uso de las fibras de un solo revestimiento [7].

Sin embargo conseguir altas potencias en operación de onda continua (CW) de un láser de fibra sin fluctuaciones de potencia de salida no es tan directo. Tomando en cuenta que el desarrollo de láseres de fibra en el régimen pulsado ofrece una alternativa práctica. En comparación con los láseres de CW, los láseres pulsados proveen alta potencia pico.

Los regímenes pulsados más importantes son Q-switching y Mode-locking. En contraste con la operación CW, en los regímenes pulsados la salida es dependiente del tiempo. En láseres pulsados por la técnica de Q-switching, se obtienen pulsos cortos, estables y regulares con duraciones de pulso de nanosegundos. La operación de Q-switching se puede desarrollar por medios pasivos o activos en el caso de este trabajo se consigue con un medio activo. El uso de la técnica de Q-switching activa para la operación de láser pulsado permite pulsos de energía alta y estabilidad alta [7].

El primer laser de fibra de Q-switched fue demostrado por I. P. Alcock y su grupo en 1986 [8] con una fibra dopada con Neodimio (Nd). Posteriormente se han desarrollado láseres de fibra en operación de Q-switching tanto activos como pasivos con diferentes materiales como se ha mencionado anteriormente y componentes como la óptica integrada [7].

3.4 El Modulador Acusto óptico

Como se mencionó anteriormente en un láser con operación de Q-switching activo se pueden modular las pérdidas en la cavidad con un dispositivo de control como un modulador Electróptico (EOM), un modulador Acusto-óptico (AOM) u otros dispositivos, en estos dispositivos la diferencia está en el rango de frecuencias de repetición con las que se puede trabajar. En este trabajo se utilizó un modulador Acusto-óptico para modular las pérdidas en la cavidad.

El principio de funcionamiento del AOM es el siguiente. En 1922 Brillouin predijo la difracción de la luz por ondas acústicas que se propagan en un medio de interacción. Un modulador acusto-óptico utiliza el efecto acustoóptico para difractar o desplazar la frecuencia de la luz por medio de ondas de sonido, usualmente de radio frecuencia. Un transductor piezo-eléctrico está unido a un material óptico como un cristal y una señal eléctrica oscilante hace vibrar al transductor el cual crea ondas acústicas viajando a la velocidad del sonido en el material y con una longitud de onda que depende de la frecuencia de la señal de radio frecuencia (RF). Una onda acústica es capaz de crear una perturbación en el índice de refracción del cristal en forma periódica de manera que forma un medio con un índice de refracción estratificado que se asemeja a las rendijas de una rejilla de difracción, sin embargo a diferencia de la rejilla de difracción son ondas de sonido viajando en el material como se muestra en la figura 3.6. La forma más simple de interacción entre la luz y el sonido es la reflexión parcial de una onda óptica plana desde los planos paralelos periódicos que representan las variaciones del índice de refracción creados por las ondas acústicas planas separadas una distancia igual a longitud de onda del sonido Λ .



Figura 3.6 Difracción de la luz por medio de ondas acústicas

Se puede comparar a un conjunto de reflectores paralelos separados por la longitud de onda del sonido Λ , los cuales reflejan la luz, sí el ángulo de incidencia θ satisface la condición de Bragg para la interferencia constructiva dada por [9]. Un haz difractado emerge a un ángulo θ que depende de la longitud de onda de la luz λ y de la frecuencia de la señal de RF.

$$2\Lambda sen\theta = m\lambda;$$
 3.4

donde λ es la longitud de onda de la luz en el medio, Λ es la longitud de onda de la onda acústica, m es el orden de difracción m =...,-1, 0, +1... Para la interferencia constructiva esta expresión exige que la diferencia de camino óptico debe ser igual a un número entero de veces la longitud de onda del haz (m λ). En el régimen de Bragg esta expresión se reescribe como

$$2\Lambda sen\theta = \frac{m\lambda}{n};$$
 3.5

Donde n es el índice de refracción del cristal. Ésta interacción de la luz láser y las ondas acústicas se llama difracción de Bragg o reflexión de Bragg, como se muestra en la figura 3.6.

La interacción acusto-óptica ocurre en un medio óptico cuando una onda de sonido y un haz láser están presentes en el medio, se crea una modulación del índice de refracción que se comporta como una rejilla sinusoidal o rejilla de fase [10]. Un haz láser incidente que pase a través de la rejilla se difracta en varios órdenes, con un diseño apropiado el primer orden tendrá la eficiencia más alta. El orden cero es el haz transmitido directamente a través de la rejilla. El primer orden es el haz difractado generado cuando el haz láser interactúa con la onda acústica. El ángulo de Bragg (θ_B) es el ángulo de incidencia entre el haz incidente y el plano de la onda acústica para que se genere el primer orden. El ángulo de Bragg y el ángulo de separación entre el orden cero y el primer orden dependen de la longitud de onda de la luz, de la señal de RF y de la velocidad acústica en el cristal. El ángulo de Bragg está dado por

$$\theta_{Bragg} = \frac{\lambda f}{2V}; \qquad 3.6$$

donde *f* es la frecuencia de RF, λ es longitud de onda del haz incidente, V es la velocidad del sonido en el cristal



Figura 3.6 Difracción de Bragg en un cristal

Un AOM puede controlar la dirección espacial de un haz láser con una señal eléctrica controladora basado en el efecto explicado anteriormente, el elemento clave es el cristal por el que se propaga la luz. Se coloca un AOM dentro de la cavidad como se muestra en la figura 3.7 y se genera una onda acústica por medio de un transductor piezo-eléctrico unido al cristal que recibe una señal de un generador de radio frecuencia RF, la onda acústica se propaga a lo largo del cristal y una fracción de la radiación incidente será reflejada por los planos periódicos del índice de refracción, se dice que experimenta difracción de Bragg, y no habrá oscilación láser. Con el valor bajo de la señal de RF aplicada el cristal acusto-óptico incrementa las pérdidas en la cavidad. Para la mayoría de las aplicaciones, los dispositivos AOM se diseñan para maximizar la difracción del haz láser de entrada a una sola posición del primer orden. Con el valor alto de la señal de RF se remueven las pérdidas y se establece el valor de Q a alto. De manera simple lo que hace el AOM es abrir y cerrar la cavidad para que haya retroalimentación en la cavidad y para bloquear la oscilación. Durante el tiempo en que el AOM está cerrado se realiza la inversión de población en el medio de ganancia y cuando abre, se descarga la energía almacenada en el medio de ganancia con lo cual se forma el pulso Q-switched. La frecuencia de la señal de RF que se envía al AOM es la misma frecuencia con la que van apareciendo los pulsos, que es llamada tasa frecuencia de repetición.



Figura 3.7 Cavidad con modulador acusto-óptico

En la ecuación (3.4) vemos la condición de Bragg para la reflexión en el cristal transparente de la radiación incidente al ángulo θ sobre la onda acústica de longitud Λ . El tiempo de conmutación se logra en tiempos cortos que corresponde al tiempo que toma la onda acústica propagarse fuera de la región del modo de la cavidad. Sabiendo que la velocidad del sonido en el cristal es de 5 km/s se puede estimar el tiempo de Q-switched que es de 200 ns para un 1 mm de diámetro del haz. La frecuencia de repetición del pulso se puede variar controlando el modulador con un generador de funciones a diferentes frecuencias, típicamente la frecuencia de repetición se encuentra en el rango de 10- 200 kHz. La duración del pulso y la energía del pulso dependen de la energía almacenada dentro de la cavidad que a su vez depende de la frecuencia del modulador y de la potencia de bombeo.

Referencias

[1] Silfvast, William T. Laser Fundamentals, Cambridge University Press, (1996)

[2] Choi, B.; Welch, A. J "Analysis of thermal relaxation during laser irradiation of tissue". Lasers in Surgery and Medicine, **29** (4): 351–359, (2001)

[3] Laser Resonators and Beam Propagation, Fundamentals, Advanced Concepts and Applications. Norman Hodgson and Horst Weber. Optical Sciences. Springer, (2005)

[4] Introduction to Laser Technology. Breck Hitz, J. J. Ewing, Jeff Hecht. IEEE Press, (2001)

[5] An introduction to Lasers and their applications, O'shea Callen Rhodes, Addison-Wesley, (1978)

[6] Understanding Lasers, Jeff Hecht. IEEE Press, (1994)

[7] R.Iván Álvarez Tamayo, "Active Q-Switched Flber Lasers with single and dual wavelength Operation. INTECH. (2016)

[8] Q-Switched Operation of a Neodymium-Doped Monomode Fibre Laser. I.
P. Alacock, A. C. Tropper, A. I. Ferguson, D. C. Hanna. Electronics Letters 22
(2), pp 84-85, January 16, (1986)

[9] Fundamentals of photonics, Saleh y Teich, Wiley and Sons Inc, (1991)

[10] Introduction to Optical Engineering, Francis T. S. Yu, Xiangyang Yang, Cambrige University Press, (1997)

Capítulo 4 Caracterización y Resultados Experimentales

4.1 Introducción

En años recientes los láseres de fibra que operan en el rango de 1550 nm han sido estudiados gracias a sus propiedades, como ganancia alta, emisión segura para el ojo humano y operación monomodo, entre otras [1-3]. Gracias al desarrollo de las EYDCF se han reportado diferentes configuraciones de láseres de fibra que pueden alcanzar una eficiencia alta y potencia de salida alta [4-6]. En este campo los láseres de fibra de Q-switched con EYDCF han sido de gran interés para aplicaciones en las que se requieren pulsos cortos con energías de pulso y potencias altas. Los láseres de Q-switched con EYDF se utilizan en maquinado industrial, instrumentación, aplicaciones médicas y otras más, en las que se requiere emisión láser a diferentes longitudes de onda, duración de pulso corta y un amplio rango de frecuencia de repetición. Hasta la fecha los láseres pulsados con operación de Qswitching se pueden hacer por medios activos o pasivos. La operación de láseres de Q-switched pasivos han sido investigados ampliamente usando grafeno, nanotubos de carbono, espejos semiconductores, entre otros, como absorbedores saturables [7-11]. Para esta operación la frecuencia de repetición para un amplio rango y otras características de los pulsos de láser están limitados a la potencia de bombeo. En comparación con un láser de fibra de Q-switched activo se logra controlar la frecuencia de repetición para un rango amplio de operación [12-15].

En este trabajo se presenta un láser de fibra de Q-switched activo de fibra dopada con Er/Yb de doble revestimiento. Los resultados muestran un ancho espectral estrecho en operación pulsada y se obtiene un amplio rango de operación en régimen pulsado desde 80 kHz hasta 270 kHz.

4. 2 Caracterización de los elementos que forman la cavidad láser

Los resultados experimentales de la caracterización de los componentes que forman la cavidad láser, tales como, láser de bombeo, fibra dopada con Er/Yb con doble revestimiento y rejillas de Bragg, se mostrarán en esta sección.

La figura 4.1 muestra el arreglo experimental utilizado para la caracterización del láser de bombeo. El esquema mostrado es utilizado para medir la potencia óptica de bombeo del diodo láser. El láser que se utilizó en este arreglo experimental es un sistema diodo láser FL-FCMSE55-25-976-5 de la marca FOCUSLIGHT, con salida de fibra óptica. El sistema está integrado con el manejador de corriente y control de temperatura, con las siguientes características:

Potencia óptica de salida máxima del láser en onda continua (CW): 25 W.

Longitud de fibra 1.5 m, con apertura numérica (NA) de 0.22.

Diámetro de núcleo de la fibra de 105µm.

Longitud de onda central: 976±5nm.

La alimentación eléctrica es AC de 110V a 50Hz.

Controlador de temperatura para TEC (Temperature Electronic Controller) integrado.



Figura 4.1. Arreglo experimental para caracterizar el láser de bombeo

La dependencia de la potencia óptica entregada por el diodo láser en función de la corriente de bombeo es mostrada en la Figura 4.2. La corriente máxima que puede soportar el diodo es de 10 A. Los resultados muestran variaciones hasta un máximo de 5 A que corresponde a una potencia óptica entregada por el láser de 11.79 W. La potencia es medida con un detector térmico (THORLABS, 900-1650 nm, @20 W) y observado en el medidor de potencia óptica (THORLABS-PM100D). La corriente de umbral para esta fuente de bombeo aparece en ~600 mA y la región de trabajo seleccionada es de 0.7 a 5 A, las cuales corresponden a las potencias de bombeo de 0.5 W a 11.79 W.



Figura 4.2. Gráfica de corriente de bombeo vs Potencia óptica de salida.

En la Figura 4.3 se muestra el arreglo experimental para caracterizar la potencia de salida de la EYDCF. El láser de bombeo está empalmado al Puerto 1 del combinador empleado para acoplar la señal de bombeo a la fibra dopada de doble revestimiento. El combinador de bombeo es empalmado a una sección de 3.3 m de EYDCF. En los Puertos 2 y 3 se les realizaron cortes con ángulo y se sumergieron en glicerina para evitar reflexiones de Fresnel. Los diámetros de la fibra del láser de bombeo y los de

la entrada del combinador son iguales, así como la de la salida del combinador y la fibra dopada con doble revestimiento son compatibles para poder ser acoplados. Los combinadores de bombeo son diseñados para aplicaciones de láseres de fibra de alta potencia que emplean fibras dopadas con doble revestimiento desempeñando la función de un multiplexor por división de longitud de onda (Wavelength Division Multiplexing, WDM). En este caso se emplea un combinador con las siguientes características: Tipo (2+1)x1 (dos entradas de bombeo, un canal de salida de la señal y canal para fibra dopada), longitud de onda de operación 1550 nm, dos puertos (puerto 1 y puerto 2) de entrada de fibra óptica para bombeo con diámetro 105 μm y apertura numérica 0.22, puerto 3 de salida de la señal con características de una fibra estándar (SMF-28), puerto 4 con salida de fibra óptica con un diámetro de núcleo de 10 μm y apertura numérica 0.46 (características similares a la fibra dopada con doble revestimiento), la potencia máxima por puerto es de 50 W.



Figura 4.3. Arreglo experimental para caracterizar la potencia óptica de bombeo a través del combinador de bombeo

En la Figura 4.4 se presentan tres gráficas que corresponden a los resultados experimentales de potencia de salida de la fibra dopada en función de la potencia de bombeo del sistema láser. Los resultados fueron obtenidos con el medidor de potencia en los puntos P1, P2 y P3 de la Figura 4.3. La señal de bombeo que atraviesa la fibra dopada sufre una atenuación debido a que parte de ella es absorbida por los iones de Erbio e Iterbio, además otra parte es convertida en otro tipo de energía como calor y también depende de la longitud de la fibra dopada. En la gráfica se puede observar que las curvas P1 y P2 tienen el mismo comportamiento, correspondientes a la entrada y salida en el combinador de bombeo, teniendo como resultado una eficiencia de acoplamiento del bombeo de aproximadamente ~95%. La respuesta en triángulos verdes es la señal de bombeo que pasa a través de la fibra dopada medida en el punto P3 la cual muestra una atenuación considerable atribuible a la absorción de los iones de la fibra dopada, al empalme en P1 y P2 y a las pérdidas intrínsecas del combinador de bombeo.



Figura 4.4. Caracterización del láser de bombeo con el combinador de bombeo

El espectro óptico de la emisión espontánea amplificada (Amplified Spontaneous Emission, ASE) se observó utilizando un analizador de espectros ópticos (Optical Spectrum Analyzer, OSA) Modelo: AQ6375 Yokogawa en la salida de la fibra dopada y en la salida de la señal del combinador de bombeo (puerto 3), como se puede observar en la Figura 4.5. En el OSA es posible observar las longitudes de onda de la señal proveniente de la fibra dopada en el rango que comprende el ancho de banda de la emisión espontánea amplificada.

Cuando la EYDCF es bombeada con el láser a 976 nm con una potencia mayor a 0.218 W, el sistema se comporta como un láser con modelo de tres niveles, emitiendo radiación en la región de 1550 nm con ancho de banda de ~40 nm, el fenómeno de emisión espontánea es producto del decaimiento de algunos fotones al estado base, lo cual origina la emisión de ASE. Para implementar el arreglo mostrado en la Figura 4.5 se empalmo un conector de fibra en el puerto 3; en el extremo libre de la fibra dopada se realizó un corte con ángulo y se sumergió en glicerina para evitar reflexiones.



Figura 4.5. Arreglo experimental con el OSA en el Puerto 3

La Figura 4.6 muestra el espectro del ASE en contra-propagación para diferentes potencias de bombeo medidos en el puerto 3 del combinador de bombeo. Esta emisión depende de la potencia de bombeo y de la longitud de la fibra. La curva de emisión muestra un pico centrado a longitud de onda de 1536 nm y otro en 1542 nm. Como se observa en la figura, el umbral de ASE es mostrado a partir de 137 mW de potencia de bombeo. Las gráficas de potencia ASE con respecto al bombeo aplicado corresponden a la escala utilizada en la caracterización del sistema del láser de bombeo.



Figura 4.6 Espectro de ASE en contra-propagación de la fibra dopada

Como siguiente paso, se modificó el arreglo experimental empalmando un conector de fibra en el extremo libre de la fibra dopada y al puerto 3 del combinador de bombeo se le hizo corte en ángulo y se sumergió en glicerina para evitar reflexiones; posteriormente el conector empalmado a la fibra se conectó al OSA para observar la potencia de ASE, tal como se muestra en la Figura 4.7.



Figura 4.7 Arreglo experimental con el analizador de espectro óptico en la fibra dopada

La Figura 4.8 muestra el espectro de ASE para diferentes potencias de bombeo a la salida de la fibra dopada. Como se puede ver en la gráfica, el eje vertical corresponde a la potencia en dBm. El rango de la banda de emisión de esta fibra se observa en un rango de 1530 nm a 1570 nm con dos máximos y para bajas potencias de bombeo, el pico centrado en 1536 es más bajo y es más grande el pico centrado a 1544 nm debido a la longitud de la fibra dopada y conforme se incrementa la potencia de bombeo, el pico de 1536 nm aumenta su amplitud.



Figura 4.8 Espectro propagado en la fibra dopada para diferentes potencias de bombe

El propósito de medir estos espectros de ASE es conocer el rango de emisión de la fibra dopada y conocer en que rango de emisión trabajará el arreglo del láser de fibra de Q-switched.

4.3 Arreglo experimental del láser de Q-switched

El arreglo experimental del láser de Q-switched basado en la EYDCF se muestra en la figura 4.9 la cual es una cavidad lineal. Primero en la figura 4.9a muestra la cavidad en operación de CW y en la figura 4.9b muestra la cavidad en operación pulsada. La cavidad en CW está compuesta por una FBG como espejo en uno de los extremos y el corte normal al 4% de reflexión como el otro espejo en la salida libre (salida 2), incluye una fuente de diodo láser de alta potencia de 25 W junto con un combinador (2+1)x1 componen el sistema de bombeo, el medio de ganancia es una EYDCF de 3.3 m (CorActive DCFEY-10/128) con un diámetro de núcleo de 10 μ m, un diámetro de revestimiento de 128 μ m, bombeada por el sistema de bombeo a 976 nm. La cavidad en operación pulsada se compone de los mismos elementos solo que se ha agregado un AOM dentro de la cavidad para modular las pérdidas.

La operación pulsada de Q-switching se muestra en la figura 4.9b. Se utiliza un AOM con salida de fibra óptica. La longitud de onda central de la FBG es de 1548.3 nm con una reflexión de aproximadamente de 96%. El extremo libre de la FBG (salida 1) se utiliza para medir el espectro óptico con el OSA con resolución de 50 pm y los pulsos son detectados por un fotodetector y observados en el osciloscopio por la salida 2. También la salida 2 se utiliza para medir la potencia promedio por medio de un medidor de potencia óptico.



Figura 4.9a Arreglo experimental del láser de fibra en operación CW



Figura 4.9b Arreglo experimental del láser de fibra óptica de Q-switched

4.4 Resultados y discusiones

En la gráfica de la figura 4.10 se muestra la dependencia de la potencia de salida del láser en operación de CW respecto de la potencia de bombeo de entrada. Como se puede ver el umbral del láser es de 0.6 W de potencia de bombeo. Cuando la potencia de bombeo aumenta hasta 11.14 W, se obtuvo una potencia de salida de 4.32 W, con una eficiencia de la pendiente del 38%. En la figura 4.11 muestra el espectro del láser de CW a la longitud de

onda que opera, la cual corresponde a 1548.3 nm con un ancho de banda de 0.4 nm.



Figura 4.10 Dependencia de la potencia promedio total, con longitud de onda central de 1548.3 nm



Figura 4.11 Espectro del láser en operación onda continua con resolución de 50 pm

La figura 4.12 muestra el espectro óptico del láser de Q-switched de fibra óptica a temperatura ambiente. Estas mediciones se realizaron con el OSA con una resolución de 50 pm en un rango de 2 nm y una potencia de bombeo de ~3 W. El espectro óptico del láser Q-switched de fibra óptica se muestra para dos frecuencias de repetición de 85 kHz (línea negra) y de 155 kHz

(línea roja), como se puede observar la longitud de onda del láser es de 1548.3 nm con un ancho de banda estrecho que varía con la frecuencia de repetición, ésta longitud de onda de emisión corresponde a la reflexión de la FBG, además se puede observar que a mayor frecuencia de repetición, el ancho de banda espectral es un poco más estrecho y con amplitud mayor.



Figura 4.12 Espectro óptico del láser de Q-switched. Operando a 85 y 155 kHz de frecuencia de repetición.

En la figura 4.13 se muestran los resultados de la variación del ancho de banda espectral y potencia de salida respecto a cambios de la frecuencia de repetición con un bombeo de 3 W. Se observa que conforme se incrementa la frecuencia de repetición, el ancho espectral es más angosto y la potencia de salida incrementa, es decir a 85 kHz se tienen 311 mW de potencia de salida con un ancho espectral de 92 pm y a 155 kHz se tiene una potencia de 401 mW con un ancho espectral de 73 pm, como se observa el espectro muestra un ancho de banda estrecho.



Figura 4.13 Comportamiento del espectro óptico y la potencia promedio respecto a la variación de la frecuencia de repetición.

En la figura 4.14 se muestra el arreglo experimental y el equipo con el que se hicieron las mediciones. Por medio de un detector conectado al osciloscopio se midieron los pulsos por la salida 2 en el AOM por la fibra en corte normal y se observan los pulsos generados por láser, al mismo tiempo la señal RF que se envía al AOM se puede observar en la pantalla del osciloscopio. Por la salida 1 se muestra como se obtuvo el espectro del láser pulsado, conectando el analizador de espectros ópticos a la salida de la FBG.



Figura 4.14 Arreglo experimental con instrumentos

La figura 4.15 muestra un pulso de manera individual línea en color azul junto a la señal de RF que se envía al AOM en línea negra tomada desde el osciloscopio. Se observa que el ancho del tiempo de modulación que es de 4 µs y corresponde al valor bajo de la señal de RF debido a que esta señal es enviada desde el canal B del generador de funciones mientras que desde el canal A se envía al AOM de manera invertida. La ventana de modulación es el tiempo en que el AOM está abierto para descargar toda la energía acumulada en la inversión de población del medio de ganancia. En la figura se observa que una frecuencia de 85 kHz de la señal de RF, después de aproximadamente 1µs de abrir la ventana de modulación, el pulso aparece.



Figura 4.15 Pulso de Q-switched generado en la ventana de modulación

En la figura 4.16 se muestra un tren de pulsos de Q-switched generado a partir de una señal de RF de 80 kHz. Se observa un tren de pulsos característicos de Q-switched a la misma frecuencia de repetición de la señal de RF enviada al AOM.



Figura 4.16 Tren de pulsos de Q-switched Tiempo (µs) ncia de repetición de 80 kHz

La figura 4.17 muestra el perfil de los trenes de pulsos láser a una frecuencia de repetición de 150 kHz que se mantiene fija, con variación de la potencia de bombeo de entrada. Se muestran trenes de pulsos de Q-switched dependiendo de la variación de la potencia de bombeo. Como se puede ver los pulsos se desplazan hacia tiempos más cortos conforme se incrementa el bombeo, además al incrementar el bombeo incrementa la amplitud y disminuye el ancho de pulso.



Figura 4.17 Trenes de pulsos a diferentes potencias de bombeo

Por otra parte cuando se suministra un bombeo de ~3 W se obtiene una duración de pulso de 662 ns con una potencia promedio de 336 mW. Se observó que con este bombeo el pulso se sale de la ventana de modulación por la parte derecha lo que hace que el pulso se empiece a deformar. Cuando se empieza a suministrar un bombeo de 7.7 W la duración del pulso disminuye a 160 ns con una potencia promedio de 640 mW los cuales se pueden ver en la figura 4.18



Figura 4.18 Comportamiento de la potencia promedio y duración del pulso vs. La potencia de bombeo.

En la figura 4.19 se muestra el desplazamiento del pulso conforme se incrementa la potencia de bombeo en el tiempo que el AOM está abierto que corresponde al valor alto de la señal de RF. Cuando la potencia de bombeo inicial a 2.9 W el tiempo de retardo del pulso desde que abre el AOM es de 3.8 µs y a un bombeo final de 7.75 W el retardo es de 1.15 µs, como se puede observar con un bombeo bajo no se sale del tiempo de modulación por la parte derecha y a potencia de bombeo alta, se está aproximando al

tiempo de respuesta del modulador por la izquierda, lo que limita incrementar la potencia de bombeo a la frecuencia de repetición de 150 kHz.



Figura 4.19 Desplazamiento del pulso en la ventana del modulador a 150 kHz

La figura 4.20 representa las características de los pulsos a diferentes frecuencias de repetición en el intervalo de 80 a 270 kHz. La operación láser fue a 7.2 W de potencia de bombeo con una longitud de onda de emisión de 1548.3 nm. Como se esperaba, la duración del pulso disminuye con la frecuencia de repetición reducida y a la vez la energía del pulso aumenta. La joroba en la curva indica el cambio de la forma del pulso (formación de lóbulos laterales distintos) que se presenta cerca de 160 kHz. La frecuencia de repetición máxima en el láser pulsado Q-switched es de 270 kHz con duración de pulso de 520 ns y una energía de 4 μ J. Para la mínima frecuencia de repetición de 105 kHz, la duración del pulso fue de 141 ns y una energía de 5.4 μ J. A frecuencias de repetición más bajas de 80 kHz el láser opera con emisión espuria y arriba de 270 kHz los pulsos se deforman. La energía del pulso se estimó a partir de las mediciones de la potencia promedio y de la frecuencia de repetición.



Figura 4.20 Duración del pulso (línea roja) y energía de pulso (línea azul) como una función de la frecuencia de repetición

La figura 4.21 muestra la potencia promedio y la potencia pico como una función de la frecuencia de repetición para la operación láser a 7.2 W de potencia de bombeo con una longitud de onda de emisión de 1548.3 nm. Como se observa cuando la frecuencia de repetición se incrementa, la potencia promedio aumenta y la potencia pico disminuye. La potencia pico máxima se obtiene a la frecuencia de repetición de 90 kHz que corresponde a 33.9 W y a 270 kHz se obtiene la potencia promedio máxima de 1.15 W.



Figura 4.21 Potencia promedio (línea roja) y potencia pico (línea azul) como una función de la frecuencia de repetición

Cabe mencionar que el valor de la potencia promedio se tomó de la potencia medida directamente en el detector a la salida 2. Los valores de la energía del pulso y la potencia pico fueron estimados a partir de la potencia promedio con las siguientes expresiones [16]

$$Energía \ de \ pulso = \frac{Potencia \ promedio}{Frecuencia \ de \ repetición};$$
4.1

$$Potencia \ pico = \frac{Energía \ de \ pulso}{duración \ de \ pulso};$$
4.2

Referencias

[1] R. J. Williams, N Javanovic, G. D. Marshall, and M. J. Withford, "All-optical, actively Q-switched fiber laser", Opt. Express **18**, 7714 (2010)

[2] B. Peng, Q. Liu, M. Gong, and P. Yan, "Acousto-optics Q-switched claddingpumed ytterbium-doped fiber laser", Chinese Opt. Lett. **5**, 415 (2007)

[3] T. V. Anderson, P. Pérez-Millan, S. R. Keiding, S. Agger. R. Duchowicz, and M.V. Andrés, "All-fiber actively Q-switched fiber laser", Opt. Commun. 260, 251 (2006)

[4] J. Nilsson, S. U. Alam, J. A. Alvarez-Chavez, P. W. Turner, W. A. Clarkson, A. B. Grudinin, "High-power and tunable operation of erbium–ytterbium co-doped cladding- pumped fiber lasers", IEEE J. Quantum Electron. **39**, 987 (2003)

[5] A. González-García, B. Ibarra-Escamilla, O. Pottiez, E. A. Kuzin, F. Maya-Ordoñez, M. Durán-Sánchez, C. Deng, J. W. Haus and P. E. Powers, "High efficiency, actively Q-switched Er/Yb fiber laser", Opt. & Laser Technol. **48**, 182 (2013)

[6] D. J, Richardson, J. Nilsson, W. A. Clarkson, "High power fiber lasers: current status and future perspectives", J. Opt. Soc. Am. B **27**, 63 (2010)

[7] W. J. Cao, H. Y. Wang, A. P. Luo, and W. C. Xu, "Graphene-based, 50 nm wideband tunable passively Q-switched fiber laser", Laser Phys. Lett. **9**, 54 (2012)

[8] B. Dong, C. Y. Liaw, J. Hao, and J. Hu, "Nanotube Q-switched low-threshold linear cavity tunable erbium-doped fiber laser", Appl. Opt. **49**, 5989 (2010)

[9] D. P. Zhou, L. Wei, B Dong, and W. K. Liu, "Tunable passively Q-switched Erbium-Doped fiber laser with carbon nanotubes as a Saturable Absorber", IEEE Photon. Technol. Lett. **22**, 9 (2010)

[10] H. H. Liu, K. K. Chow, S. Yamashita, S. Y. Set, "Carbon-nanotube-based passively Q-switched fiber laser for high energy pulse generation", Opt. & Laser Technol. **45**, 713 (2013)

[11] A. S. Kurkov, "Q-switched all-fiber lasers with saturable absorbers", Laser Physics Lett. **8**, 335 (2011)

[12] M. Delgado-Pinar, D. Zalvidea, A. Díez, P. Pérez-Millán, and M. V. Andrés, "Qswitching of an all-fiber laser by acouto-optic modulation of a fiber Bragg grating", Opt. Express **14**, 1106 (2006)

[13] N. K. Chen, Z. Z. Feng, and S. K. Liaw, "All-fiber pulsewidth tunable actively Qswitched erbium fiber laser using abrupt-tapered Mach-Zehnder block filter", Laser Phys. Lett. 7, 363-366 (2010)

[14] L. Escalante-Zarate, Y. O. Barmenkov, S. A. Kolpakov, J. L. Cruz, and M. V. Andrés, "Smart Q-switching for single-pulse generation in an erbium-doped fiber laser", Opt. Express **20**, 4397-4402 (2012)

[15] Durán-Sánchez, M.; Kuzin, E.A.; Pottiez, O.; Ibarra-Escamilla, B.;
González-García, A.; Maya-Ordoñez, F.; Álvarez-Tamayo, R.I.; Flores-Rosas,
A. Tunable dual-wavelength actively Q-switched Er/Yb doublé-clad fiber laser.
Laser Phys. Lett. **11**, 015102 (2014)

[16] Introduction to Laser Technology. Breck Hitz, J. J. Ewing, Jeff Hecht. IEEE Press, (2001)
Capítulo 5 Conclusiones

Conclusión general

Con este trabajo se han mostrado los resultados experimentales de un láser pulsado de Q-switched de fibra con características definidas. Con la caracterización previa de los elementos que componen el láser de fibra, las mediciones y las repetidas pruebas que se hicieron en el laboratorio y a los cálculos de los valores de las gráficas que se hicieron con software apropiado (Origin[®]) se obtuvieron las siguientes características:

Emisión en la región de 1550 nm, específicamente en 1548.3 nm que corresponde a la longitud de onda de la regilla de Bragg. Se ha demostrado la variación del ancho espectral en función de la frecuencia de repetición. Se ha demostrado la evolución de los pulsos en función de la potencia de bombeo. Se demostrado que los pulsos son estables en un rango de frecuencia de repetición amplio de 80 a 270 kHz a una potencia máxima de 7.7 W aplicada. Se ha demostrado que la eficiencia del láser en operación de onda continua es de 38%. Se ha conseguido generar una potencia promedio máxima en régimen pulsado de 1.1 W. Los pulsos que se generaron mediante la técnica Q-switched pasiva son de una energía máxima del pulso de 5.42 µJ y con una potencia pico máxima de 30.52 W y de duración mínima de 172 ns.

La configuración propuesta es un láser de Q-switched activo, el cual resulta ser confiable, mantiene un diseño simple y compacto, además ofrece un potencial para ser empleado en diferentes aplicaciones.

En general se han logrado cumplir el objetivo general del trabajo y los objetivos particulares. Se ha revisado la teoría y coincide con los resultados experimentales. La relevancia de este trabajo radica en la utilización de la fibra co-dopada de Erbio e Iterbio de doble revestimiento como el medio de ganancia y a las potencias promedio y pico obtenidas, a la energía del pulso

y al amplio rango de la frecuencia de repetición en que se generan los pulsos en comparación con otros trabajos reportados estos resultados son de mayor alcance.

Lista de figuras

Figura 2.1 La fibra de doble revestimiento (DCF) 15
Figura 2.2 Estructura de la fibra de doble revestimiento 17
Figura 2.3 Diagrama de niveles de energía de un sistema codopado Er/Yb [13]21
Figura 2.4 Rejilla de Bragg de fibra óptica uniforme con modulación del índice de refracción y periodo constante
Figura 2.5 Espectro de reflectividad de una rejilla de Bragg
Figura 3.1 Dispositivo Q-switching dentro de la cavidad láser
Figura 3.2 Operación de Q-switched activo basado en un cristal y un modulador Acusto-óptico
Figura 3.3 Gráfica de la operación de Q-switching activa
Figura 3.4 Tren de pulsos de Q-switched Activo 41
Figura 3.5 Salida de láser de onda continua y salida de láser pulsado [4] 42
Figura 3.6 Difracción de la luz por medio de ondas acústicas
Figura 3.6 Difracción de Bragg en un cristal 48
Figura 3.7 Cavidad con modulador acusto-óptico
Figura 4.1. Arreglo experimental para caracterizar el láser de bombeo 53
Figura 4.2. Gráfica de corriente de bombeo vs Potencia óptica de salida 54

Figura 4.3. Arreglo experimental para caracterizar la potencia óptica de bombeo a través del combinador de bombeo
Figura 4.4. Caracterización del láser de bombeo con el combinador de bombeo
Figura 4.5. Arreglo experimental con el OSA en el Puerto 3 57
Figura 4.6 Espectro de ASE en contra-propagación de la fibra dopada 58
Figura 4.7 Arreglo experimental con el analizador de espectro óptico en la fibra dopada
Figura 4.8 Espectro propagado en la fibra dopada para diferentes potencias de bombe
Figura 4.9a Arreglo experimental del láser de fibra en operación CW 61
Figura 4.9b Arreglo experimental del láser de fibra óptica de Q-switched 61
Figura 4.10 Dependencia de la potencia promedio total, con longitud de onda central de 1548.3 nm
Figura 4.11 Espectro del láser en operación onda continua con resolución de 50 pm
Figura 4.12 Espectro óptico del láser de Q-switched. Operando a 85 y 155 kHz de frecuencia de repetición63
Figura 4.13 Comportamiento del espectro óptico y la potencia promedio respecto a la variación de la frecuencia de repetición
Figura 4.14 Arreglo experimental con instrumentos
Figura 4.15 Pulso de Q-switched generado en la ventana de modulación 65

Figura 4.16 Tren de pulsos de Q-switched a una frecuencia de repetición de 80 kHz	∍ 66
Figura 4.17 Trenes de pulsos a diferentes potencias de bombeo	66
Figura 4.18 Comportamiento de la potencia promedio y duración del pulso v La potencia de bombeo.	vs. 67
Figura 4.19 Desplazamiento del pulso en la ventana del modulador a 150 kHz	68
Figura 4.20 Duración del pulso (línea roja) y energía de pulso (línea azul) como una función de la frecuencia de repetición	69
Figura 4.21 Potencia promedio (línea roja) y potencia pico (línea azul) como)
una función de la frecuencia de repetición	69

Lista de publicaciones

1.- Compact Narrow Linewidth Actively Q-Switched Er–Yb Double-Clad Fiber Laser. *Fibers* 2017, *5*, *21*; doi:10.3390/fib5020021

2.- All-fiber multi-wavelength passive Q-switched Er/Yb fiber laser based on a Tm-doped fiber saturable absorber. Laser Phys. **27** (2017) 035103 (5pp); doi:10.1088/1555-6611/aa528f