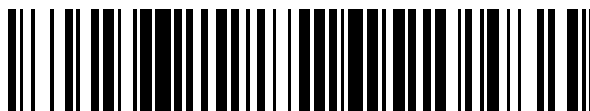


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 710 480**

51 Int. Cl.:

H01S 3/098 (2006.01)

H01S 3/067 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **18.12.2008** **PCT/DK2008/050325**

87 Fecha y número de publicación internacional: **25.06.2009** **WO09076967**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **18.12.2008** **E 08862828 (4)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **12.09.2018** **EP 2223396**

54 Título: **Láser de fibra de modo bloqueado con periodo de vida mejorado de absorbente saturable**

30 Prioridad:

18.12.2007 DK 200701814

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:

25.04.2019

73 Titular/es:

NKT PHOTONICS A/S (100.0%)

Blokken 84

3460 Birkerød, DK

72 Inventor/es:

ANDERSEN, THOMAS VESTERGAARD;

LEICK, LASSE y

LÆGSGAARD, JESPER

74 Agente/Representante:

ARIAS SANZ, Juan

ES 2 710 480 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín Europeo de Patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre Concesión de Patentes Europeas).

DESCRIPCIÓN

Láser de fibra de modo bloqueado con periodo de vida mejorado de absorbente saturable

- 5 La invención se refiere a un sistema de láser de fibra de modo bloqueado que se dispone para tener un ancho de banda de láser y que tiene una cavidad lineal, comprendiendo dicha cavidad un medio de ganancia, un absorbente saturable que tiene una potencia de saturación, y un filtro que tiene una respuesta espectral.

Antecedentes

- 10 Los láseres de ps de modo bloqueado de forma pasiva basados en fibra son de un interés considerable como osciladores maestros baratos y robustos para los sistemas de amplificador de potencia de oscilador maestro (MOPA, *master oscillator power amplifier*) de ps y de fs de alta potencia. En particular, se ha hallado que los osciladores en modo bloqueado por medio de espejos absorbentes saturables semiconductores (SESAM, *semiconductor saturable absorber mirror*) proporcionan un autoarranque sencillo y una estabilidad ambiental buena. En lo últimos tiempos se ha dedicado un esfuerzo considerable al desarrollo de osciladores de fibra a base de Yb capaces de entregar unos pulsos autosimilares de alta calidad con un ancho de banda grande tanto en el intervalo de ps como en el de fs.

- 15 Aparte del ancho de banda y la calidad de pulso, los osciladores para un uso práctico también han de satisfacer unos requisitos estrictos sobre el periodo de vida y la estabilidad. Esto último es especialmente importante si los pulsos de salida se van a amplificar fuertemente. Con respecto al periodo de vida, el SESAM es un componente particularmente crítico. Para estabilizar el láser, por lo general el SESAM se ha de hacer funcionar en un régimen de saturación fuerte, en donde se nivela el aumento en la reflectividad con la energía de pulso. A su vez, esto requiere una intensidad de luz alta sobre el dispositivo, reduciendo de este modo el periodo de vida. Durante el uso, el desempeño de la mayor parte de los absorbentes saturables se deteriora, dando como resultado un aumento en la ganancia requerida en la cavidad que es suficiente para lograr un funcionamiento de modo bloqueado. En muchas configuraciones de los láseres de fibra de modo bloqueado, este aumento se puede compensar mediante el aumento del bombeo del medio de ganancia. No obstante, en algún punto el bloqueo de modo deja de ser posible, punto en el cual se puede considerar que el periodo de vida del absorbente saturable ha expirado. En algunos casos, el absorbente saturable se vuelve insensible a la potencia óptica entrante. El absorbente saturable también puede expirar de forma instantánea si la potencia óptica incidente supera su umbral de daño. A veces, esto tiene lugar si se permite que el láser lleve a cabo una conmutación Q con una ganancia elevada en el medio de ganancia del láser.

- 20 En Herda y col.: "Semiconductor Quantum-Dot Saturable Absorber Mode-Locked Fiber Laser", *IEEE Phot. Tech. Lett.*, Vol. 18, n.º 1, 2006, se divulga un láser de fibra de iterbio de modo bloqueado de forma pasiva. La cavidad de láser que se muestra comprende un filtro de transmisión de 3 nm. En Shieh J. M. y col.: "Broadly tunable self-starting passively mode-locked Ti:sapphire laser with triple-strained quantum-well saturable Bragg reflector", *Opt Comm.*, vol. 156, n.º 1 - 3, 1998, se obtiene un láser por debajo de 100 fs con una fluencia de saturación baja debido a un nuevo tipo de reflector de Bragg saturable.

- 25 Los inventores de la presente invención han hallado que, a menudo, el periodo de vida de los láseres de fibra de modo bloqueado que utilizan un absorbente saturable está limitado por el periodo de vida del absorbente saturable. En muchos casos, los periodos de vida son del orden de cientos de horas, lo que es insuficiente para la mayor parte de las aplicaciones comerciales del láser.

Sumario de la invención

- 30 Por consiguiente, existe la necesidad de un sistema de láser de fibra de modo bloqueado con un periodo de vida ampliado del absorbente saturable. De forma sorprendente, los inventores de la presente invención han hallado que se puede obtener un funcionamiento adecuado al tiempo que se logra un periodo de vida largo del absorbente saturable mediante la reducción de la potencia óptica incidente en el absorbente saturable.

- 35 En una forma de realización, la invención se refiere a un sistema de láser de fibra de modo bloqueado de acuerdo con la reivindicación 1.

- 40 En una forma de realización, se puede obtener un funcionamiento de modo bloqueado de CW sustancial con menos de 2 veces la potencia de saturación que incide sobre el absorbente saturable, tal como 1 vez la potencia de saturación que incide sobre el absorbente saturable, tal como 0,5 veces la potencia de saturación que incide sobre el absorbente saturable, tal como 0,1 veces la potencia de saturación que incide sobre el absorbente saturable, tal como 0,01 veces la potencia de saturación que incide sobre el absorbente saturable.

- 45 En una forma de realización, la invención se refiere a un sistema de láser de fibra de modo bloqueado que se dispone para tener un ancho de banda de láser y que tiene una cavidad lineal, comprendiendo dicha cavidad un medio de ganancia, un absorbente saturable que tiene una potencia de saturación, y un filtro que tiene una respuesta espectral, en donde dicho sistema de láser de fibra de modo bloqueado se dispone de tal modo que se

puede obtener un funcionamiento de modo bloqueado de CW sustancial con menos de 3 veces la potencia de saturación que incide sobre el absorbente saturable, tal como 2 veces la potencia de saturación que incide sobre el absorbente saturable, tal como 1 vez la potencia de saturación que incide sobre el absorbente saturable, tal como 0,5 veces la potencia de saturación que incide sobre el absorbente saturable, tal como 0,1 veces la potencia de saturación que incide sobre el absorbente saturable, tal como 0,01 veces la potencia de saturación que incide sobre el absorbente saturable.

Por medio de la presente invención, el periodo de vida del absorbente saturable de un sistema de láser de fibra de modo bloqueado se puede ampliar de forma significativa. Por consiguiente, en una forma de realización, la invención se refiere a un sistema de láser de fibra de modo bloqueado con un ancho de banda de láser y que tiene una cavidad lineal, comprendiendo dicha cavidad un medio de ganancia, un absorbente saturable que tiene un periodo de vida, y un filtro que tiene una respuesta espectral, en donde dicho sistema de láser de fibra de modo bloqueado se dispone de tal modo que el periodo de vida de dicho absorbente saturable supera 500 horas, tal como que dicho periodo de vida supera 1000 horas, tal como que dicho periodo de vida supera 5000 horas, tal como que dicho periodo de vida supera 10000 horas.

En el contexto del presente texto, el periodo de vida del absorbente saturable se refiere al número de horas de funcionamiento con una carga particular de pulsos con una duración, una energía de pulso, una potencia de pico y una tasa de repetición particulares. Durante el uso, el desempeño de la mayor parte de los absorbentes saturables se deteriora, dando como resultado un aumento en la ganancia requerida en la cavidad que es suficiente para lograr un funcionamiento de modo bloqueado. En muchas configuraciones de los láseres de fibra de modo bloqueado, este aumento se puede compensar mediante el aumento del bombeo del medio de ganancia. No obstante, en algún punto el bloqueo de modo ha dejado de ser posible, punto en el cual se puede considerar que ha expirado el periodo de vida del absorbente saturable. A veces, tal expiración va acompañada de una conmutación Q potente, debido a que el láser deja de llevar a cabo un bloqueo de modo. Esta conmutación Q puede quemar el absorbente saturable haciéndole un agujero, y también destruir otros componentes. Se ha hallado que, a menudo, esto tiene lugar después de que la potencia de bombeo necesaria para una salida constante se haya aumentado un factor de 2. Por consiguiente, en una forma de realización, se considera que el absorbente saturable ha expirado (es decir, su periodo de vida ha terminado) cuando la potencia de bombeo para una salida constante se ha aumentado, por ejemplo, un 50 % de tal modo que se evitan tales sucesos de conmutación Q. En otra forma de realización, el absorbente saturable se considera expirado cuando el bloqueo de modo de CW deja de ser posible. Dependiendo del tipo de absorbente saturable así como del método de acoplamiento para la luz con el absorbente saturable, un absorbente saturable puede comprender varios puntos en donde se puede configurar la luz para que interaccione. El periodo de vida a la que se hace referencia en el presente contexto se refiere al funcionamiento en un punto de este tipo.

Un sistema de láser de modo bloqueado de acuerdo con la invención comprende un filtro que se coloca en la cavidad, tal como el reflector de extremo de la cavidad. El filtro tiene una respuesta espectral que se dispone para penalizar la inestabilidad en la cavidad. Este efecto se logra al percatarse de que un pulso con una potencia óptica aumentada (por ejemplo, debido a una fluctuación térmica) experimentará una no linealidad más grande en la cavidad, aumentando el efecto de la modulación de autofase, lo que, a su vez, aumenta el ancho espectral del pulso. Debido a que el pulso se encuentra con el filtro, preferentemente este se dispone para eliminar por filtración al menos parte de este ensanchamiento, penalizando de este modo la fluctuación. Por consiguiente, en una forma de realización, la invención se refiere a un sistema de láser de fibra de modo bloqueado que se dispone para tener un ancho de banda de láser y una potencia de pico de pulso, teniendo dicho sistema una cavidad lineal con una propiedad no lineal, comprendiendo dicha cavidad un medio de ganancia, un absorbente saturable, y un filtro que tiene una respuesta espectral, en donde la respuesta espectral de dicho filtro se dispone para reducir las componentes espectrales fuera de dicho ancho de banda de láser que surgen de la modulación de autofase que es causada por dicha propiedad no lineal y un aumento en la potencia de pico de pulso.

Objetos adicionales de la invención se logran por medio de las formas de realización que se definen en las reivindicaciones dependientes y en la descripción detallada de la invención.

Se debería destacar que se interpreta que la expresión “comprende / comprendiendo / que comprende”, cuando se usa en la presente memoria descriptiva, especifica la presencia de componentes, números enteros, etapas o características expuestos pero no excluye la presencia o adición de otros uno o más componentes, números enteros, etapas o características expuestos, o grupos de los mismos.

Detalles de la invención

La invención se explicará más plenamente en lo sucesivo con referencia a los dibujos, en los que:

la figura 1 muestra un diagrama del modelo de láser que se aplica en el modelo teórico que se analiza en lo sucesivo. La amplificación de láser se modela como una amplificación puntual al tiempo que la SPM y la dispersión se modela por medio de la inserción de una fibra pasiva con los valores apropiados. El amplificador

con $A_{\text{ef}} = 18 \mu\text{m}^2$ se dispone entre la sección de 31 cm y 18 cm, de forma respectiva. Todas las otras fibras son fibras de PM pasivas con $A_{\text{ef}} = 43 \mu\text{m}^2$,

la figura 1P muestra una forma de realización a modo de ejemplo de un láser modo bloqueado de acuerdo con la invención,

la figura 2 muestra unos perfiles de pulso (a) y de modulación de frecuencia pulsada (b) en el dominio del tiempo de los osciladores de láser con las rejillas BG3 y BG7 que se usan como espejos de extremo de cavidad tal como se calcula por medio del modelo teórico.

La figura 2P muestra una forma de realización a modo de ejemplo de un láser modo bloqueado de acuerdo con la invención,

la figura 3 muestra unas curvas de dispersión (las líneas de trazo continuo) de las rejillas de BG3 y de BG7. La reflectividad de rejilla multiplicada por 10 se muestra por medio de unas líneas de trazo discontinuo.

La figura 3P muestra una forma de realización a modo de ejemplo de un láser modo bloqueado de acuerdo con la invención,

la figura 4 muestra la duración de pulso simulada frente a la energía de pulso para 7 rejillas de Bragg uniformes diferentes en un láser de 80 MHz. La energía de pulso más baja se corresponde con el umbral de bloqueo de modo y la energía más alta se corresponde con el principio de bloqueo de modo de pulso doble.

La figura 4P muestra unos espectros de reflexión (A), espectros de dispersión de velocidad de grupo (B), el perfil de pulso frente al tiempo (C) y el espectro de pulso (D) a modo de ejemplo calculados para una rejilla de Bragg de fibra uniforme de 1,5 mm de longitud con una modulación de índice de 0,0014.

La figura 5 muestra unos espectros de reflexión (A), espectros de dispersión de velocidad de grupo (B), el perfil de pulso frente al tiempo (C) y el espectro de pulso (D) a modo de ejemplo calculados para una rejilla de Bragg de fibra uniforme de 0,75 mm de longitud con una modulación de índice de 0,0012.

La figura 6 muestra unos espectros de reflexión (A), espectros de dispersión de velocidad de grupo (B), el perfil de pulso frente al tiempo (C) y el espectro de pulso (D) a modo de ejemplo calculados para una rejilla de Bragg de fibra uniforme de 0,75 mm de longitud con una modulación de índice de 0,00045.

La figura 7 muestra la potencia de salida frente al tiempo para un láser de modo bloqueado de CW en el umbral (A), un 13 % por encima del umbral (B) y un 26 % por encima del umbral (C).

La figura 8 muestra la potencia de salida de un láser de modo bloqueado de CW como una función del tiempo (A). Después de 402 horas, el absorbente saturable (un SESAM) expira.

La figura 8B muestra una imagen de una superficie de SESAM que ha sido quemada por conmutaciones Q.

La figura 9 muestra la evolución en la potencia de bombeo en el umbral de bloqueo de modo con el tiempo.

La figura 10 muestra la reflectividad no lineal de un SESAM como una función de la fluencia en el absorbente. ΔR_{ns} y ΔR son la pérdida no saturable y saturable, F_{sat} es la fluencia de saturación y R_{ns} es la reflexión no saturable. La fluencia no saturable se define como la fluencia en donde la reflexión ha aumentado en 1 / e multiplicado por ΔR .

La figura 11 muestra un volcado de pantalla a partir de un osciloscopio rápido que se usa para registrar 4000 arranques de un láser modo bloqueado usando una persistencia infinita. La potencia de bombeo al láser modo bloqueado se acciona con un generador de funciones externo (A) y la potencia de salida resultante se muestra en la figura (B).

La figura 12 muestra unos trenes de pulsos de salida típicos para un modo bloqueado de CW (A) y un modo bloqueado de conmutación Q (B).

La figura 13 muestra la respuesta de un SESAM en donde se aplican los dos pulsos de 200 fs para examinar la reflectividad que logra una saturación alta para un retardo nulo entre los pulsos. Con un retardo de aproximadamente 500 fs, la reflectividad del SESAM parece ser sustancialmente independiente para los dos pulsos.

La figura 14 muestra la forma de pulso (A), el espectro de reflectividad de rejilla (B) y la dispersión de rejilla (C) para tres rejillas de Bragg con una modulación de frecuencia pulsada de 0,1, 0,3 y 0,5 nm / mm, de forma respectiva. La modulación de frecuencia pulsada añade una dispersión positiva, como consecuencia el pulso de

láser para una rejilla con una modulación de frecuencia pulsada de 0,5 nm / mm experimenta una dispersión anómala a lo largo de la totalidad del ancho de banda de pulso. Esto da como resultado una supresión de la cola temporal del pulso.

- 5 De principio a fin del presente texto, las expresiones “sistema de láser de fibra de modo bloqueado”, “láser de fibra de modo bloqueado”, “láser”, “láser de fibra”, “sistema de láser” y “láser de modo bloqueado” se aplican de forma intercambiable.

10 En lo sucesivo, se hace referencia a un absorbente saturable reflectante en donde la reflectividad aumenta con la potencia óptica incidente; no obstante, las consideraciones que se presentan se pueden aplicar igualmente bien a un absorbente saturable transmisivo en donde la transmisión aumenta con el aumento de la potencia óptica. En una forma de realización de la invención, el absorbente saturable es un absorbente saturable reflectante, al que también se hace referencia como espejo absorbente saturable, formando un reflector de extremo de la cavidad del láser en donde el material saturable es, en sí mismo, reflectante, y / o el material saturable está encolado a un espejo. En una forma de realización, el absorbente saturable es un absorbente saturable transmisivo que está ubicado en la cavidad del láser. En una forma de realización, el absorbente saturable es un absorbente saturable semiconductor, tal como un espejo absorbente saturable semiconductor (SESAM, *semiconductor saturable absorber mirror*). En una forma de realización de la invención, el absorbente saturable comprende unos materiales que se seleccionan de entre el grupo de un cristal de absorbente saturable de Cr⁴⁺:YAG, un cristal de absorbente saturable de V³⁺:YAG, GaAs, Al_xGa_{1-x}As, In_xGa_{1-x}As; AlGaAsSb; GaInNA, una fibra óptica dopada con los materiales dopantes cromo, samario o bismuto, un material que comprende puntos cuánticos tal como absorbentes de pozo cuántico múltiple de InGaAs - GaAs.

25 Un absorbente saturable reflectante aumenta la reflectividad, que se aproxima a un valor máximo (R_{ns}) con una fluencia óptica o potencia óptica aumentada que incide sobre su superficie. Una curva para la reflectividad de un absorbente saturable típico se muestra en la figura 10 en donde la fluencia es la cantidad de energía que se experimenta dentro del tiempo de relación, τ , por unidad de área mediante el absorbente saturable. En el presente caso, ΔR_{ns} y ΔR son la pérdida no saturable y saturable, F_{sat} , A es la fluencia de saturación y R_{ns} es la reflexión no saturable. La fluencia de saturación se define como la fluencia en donde la reflexión ha aumentado en 1 / e multiplicado por ΔR . En el caso en el que el pulso es más corto que el tiempo de relación, sustancialmente la totalidad de la energía del pulso contribuye a la fluencia. En el caso en el que el tiempo de relación es más corto que el pulso, el absorbente saturable se recuperará, al menos hasta cierto punto, durante el pulso y, por lo tanto, será capaz de responder a diferentes partes del pulso de forma sustancialmente independiente. Se especula que el periodo de vida de un absorbente saturable en un láser que funciona en un bloqueo de modo de CW depende de la potencia promedio en relación con la potencia de saturación P_{sat} . La potencia de saturación es la potencia óptica constante por unidad de área que da como resultado una fluencia de saturación, de tal modo que la fluencia y las saturaciones están relacionadas entre sí como P_{sat} multiplicado por τ . Por consiguiente, P_{sat} puede ser considerablemente más grande para un absorbente saturable con un tiempo de relación corto en relación con un absorbente saturable con un tiempo de relación largo incluso aunque la fluencia de saturación puede ser idéntica.

40 En una forma de realización, la fluencia de saturación es más grande que 10 $\mu J / cm^2$, tal como de más de o igual a 30 $\mu J / cm^2$, tal como de más de o igual a 50 $\mu J / cm^2$, tal como de más de o igual a 80 $\mu J / cm^2$, tal como de más de o igual a 100 $\mu J / cm^2$, tal como de más de o igual a 130 $\mu J / cm^2$, tal como de más de o igual a 160 $\mu J / cm^2$, tal como de más de o igual a 200 $\mu J / cm^2$, tal como de más de o igual a 230 $\mu J / cm^2$, tal como de más de o igual a 260 $\mu J / cm^2$, tal como de más de o igual a 300 $\mu J / cm^2$.

50 En una forma de realización, el tiempo de relación es más largo que o igual a 50 fs, tal como más largo que o igual a 100 fs, tal como más largo que o igual a 250 fs, tal como más largo que o igual a 500 fs, tal como más largo que o igual a 750 fs, tal como más largo que o igual a 1 ps, tal como más largo que o igual a 2 ps.

En una forma de realización, la absorción no saturable es menos de o igual a un 40 %, tal como de menos de o igual a un 30 %, tal como de menos de o igual a un 20 %, tal como de menos de o igual a un 10 %, tal como de menos de o igual a un 5 %, tal como de menos de o igual a un 1 %. En una forma de realización, la absorción saturable es más de o igual a un 1 %, tal como de más de o igual a un 5 %, tal como de más de o igual a un 10 %, tal como de más de o igual a un 15 %, tal como de más de o igual a un 20 %, tal como de más de o igual a un 25 %, tal como de más de o igual a un 35 %.

En resumen, un sistema de láser de fibra de modo bloqueado puede funcionar en uno de los siguientes modos:

- 60 • Conmutación Q, en donde se acumula energía en la cavidad a lo largo de un periodo de tiempo después del cual la misma se desencadena sustancialmente en un único pulso. Después del pulso, la cavidad puede acumular energía una vez más. A menudo, se hace referencia a tales pulsos como eventos de conmutación Q. Estos sucesos pueden ser destructivos para uno o más de los componentes ópticos del sistema, tal como el absorbente saturable, y cualquier objeto con el que interacciona el láser. En el caso de las aplicaciones médicas, los eventos de conmutación Q pueden ser particularmente críticos, debido a que los mismos pueden dañar al paciente.

- Modo bloqueado de CW en donde el láser tiene una salida pulsada con unos pulsos sustancialmente idénticos que se repiten con la tasa de repetición de la cavidad del láser. Por lo general, este es el funcionamiento deseado del láser.
- Modo bloqueado de conmutación Q que es una combinación de los otros dos modos en donde el láser fluctúa, emitiendo unos pulsos más largos que se modulan por medio de un tren de pulsos similar al que se halla en un funcionamiento de modo bloqueado de CW. Por lo general, cada pulso modulado es seguido por un periodo de emisión muy baja al tiempo que la cavidad acumula energía de nuevo.
- Un funcionamiento pulsado doble (triple o más alto) puede ser similar a un modo bloqueado de CW pero en donde una multitud de pulsos existen de forma simultánea en la cavidad y la tasa de repetición del láser se multiplica por el número de pulsos en la cavidad. Los diferentes pulsos pueden competir por la energía, creando inestabilidad y ruido.

En una forma de realización de las invenciones, un funcionamiento de modo bloqueado de CW sustancial se define como las fluctuaciones máximas en la energía de pulso menos de o igual a un 20 % de la amplitud de pulso promedio, tal como de menos de o igual a un 10 % de la amplitud de pulso promedio, tal como de menos de o igual a un 5 % de la amplitud de pulso promedio, tal como de menos de o igual a un 1 % de la amplitud de pulso promedio.

En una forma de realización, el espectro de ruido de amplitud en un funcionamiento de modo bloqueado de CW comprende más de o igual a un 80 % de la energía de ruido en el intervalo de 0 a 20 kHz, tal como de más de o igual a un 90 % de la energía de ruido en el intervalo de 0 a 20 kHz, tal como de más de o igual a un 99 % de la energía de ruido en el intervalo de 0 a 20 kHz. En una forma de realización, el sistema de láser de fibra de modo bloqueado comprende un mecanismo desencadenante electrónico que se establece a un nivel de porcentaje por encima de la amplitud de pulso promedio. En el caso en el que se libera este mecanismo desencadenante, se puede suponer la conmutación Q.

En donde el láser tiene un bloqueo de modo de conmutación Q, se ha observado que, a menudo, hay una amplitud de ruido significativa hasta aproximadamente 4 MHz, por ejemplo, que hasta un 70 % de la energía se almacena en el presente caso. En otra forma de realización, el sistema de láser de fibra de modo bloqueado del sistema de láser comprende un circuito electrónico de seguridad para apagar el sistema si el bloqueo de modo es demasiado ruidoso. En una forma de realización, esto se pone en práctica al tener un diodo de supervisión que se acopla con un filtro de paso de banda que permite que pase a su través una señal con una frecuencia alta tal como entre 30 kHz y 4 MHz. Si la transmisión a través del filtro de paso de banda es demasiado alta, esto indica que el bloqueo de modo tiene demasiadas fluctuaciones de tal modo que es probable un bloqueo de modo de conmutación Q o es probable un cuarto evento de conmutación Q venidero. En una forma de realización, entonces el sistema se apaga o la potencia de bombeo al medio de ganancia se reduce.

En lo sucesivo, se analiza el mecanismo físico detrás del funcionamiento de los sistemas de láser de fibra de modo bloqueado de la técnica anterior basándose en absorbentes saturables. La función del absorbente saturable en una cavidad es favorecer la emisión de pulsos al favorecer una intensidad alta. Considerando como una ilustración el caso en el que la ganancia del medio de ganancia de la cavidad se aumenta a partir de cero. Para una fibra activa que funciona como un medio de ganancia, por lo general esto será equivalente a aumentar la potencia de una fuente de luz de bombeo, proporcionando un bombeo óptico de la fibra activa. Debido a que el sistema no ha comenzado aún a emitir luz coherente, la energía de bombeo se volverá a emitir como una emisión espontánea (despreciando en el presente caso toda pérdida). A una potencia de bombeo baja, el sistema de láser puede comenzar a emitir luz coherente en CW (*continuous wave*, onda continua) como el absorbente saturable tiene una reflectividad sustancialmente constante a una potencia baja. Debido a las fluctuaciones térmicas, esta emisión variará, dando como resultado unos picos aleatorios y / o la cavidad puede acumular energía y liberar pulsos de conmutación Q. Una vez que la potencia es suficiente para que el absorbente saturable varíe la reflectividad con la fluencia incidente, uno de estos picos puede experimentar una pérdida reducida en la reflexión en el absorbente saturable, favoreciendo de este modo este pico. A su vez, esto puede iniciar el láser emitiendo un tren de pulsos con una tasa de repetición igual al tiempo de ida y vuelta del pulso, es decir, el bloqueo de modo. Estos pulsos pueden experimentar fluctuaciones aleatorias debido al ruido u otras contribuciones. De nuevo, si un aumento en la energía de pulso es favorable en la cavidad, la amplitud del tren de pulsos puede aumentar adicionalmente hasta que el mismo agota con el tiempo el medio de ganancia, punto en el cual la cavidad puede requerir tiempo para acumular energía una vez más. Esto se corresponde con un funcionamiento de modo bloqueado de conmutación Q. Esto se ilustra en la figura 12B. A medida que se aumenta adicionalmente la ganancia, aumentará la fluencia óptica que incide sobre el absorbente saturable, accionando de este modo la parte saturable más cerca de la reflectividad máxima. En un punto, el aumento en la reflectividad equilibrará sustancialmente la disminución en la ganancia que es causada por el empobrecimiento, por el pulso, del medio de ganancia, punto en el cual se obtiene un funcionamiento de modo bloqueado de CW estable. Esto se ilustra en la figura 12A. Este mecanismo se corresponde con el método que se aplica para obtener un funcionamiento de modo bloqueado de CW en la técnica anterior. Un inconveniente de la aplicación de este mecanismo es que el absorbente saturable ha de hacer funcionar

varios factores por encima de la fluencia saturable con el fin de lograr un funcionamiento de modo bloqueado de CW estable. Por lo general, se aplica una fluencia de 4 a 15 veces la fluencia de saturación. Parece que operar a tal fluencia reduce de forma significativa el periodo de vida del absorbente saturable. En una forma de realización, la fluencia o la fluencia de funcionamiento se refiere a la fluencia máxima que es experimentada por el absorbente saturable que depende de la potencia incidente y el tiempo de relación tal como se ha explicado en lo que antecede. En otra forma de realización, la fluencia o la fluencia de funcionamiento se refiere a la fluencia promedio que es experimentada por el absorbente saturable que depende de la potencia incidente y el tiempo de relación tal como se ha explicado en lo que antecede.

Los inventores de la presente invención han hallado, de forma sorprendente, que se puede lograr un bloqueo de modo de CW estable al tiempo que se operan los valores significativamente por debajo de lo convencional para la fluencia sobre el absorbente saturable. Esto se logra mediante la aplicación de un filtro en la cavidad del sistema de láser de modo bloqueado que se dispone para amortiguar un ensanchamiento espectral en relación con el ancho de banda de láser.

El ancho de banda de láser es el ancho de banda del láser durante el funcionamiento de modo bloqueado de tCW. En una forma de realización, el ancho de banda de láser se refiere al ancho de banda de 3 dB pero, en algunas formas de realización, el ancho de banda de láser se refiere a de 2 veces el ancho de banda de 3 dB. En algunas formas de realización, este se refiere al ancho de banda de 10 dB.

Un filtro de este tipo puede servir para penalizar un aumento en la potencia de pulso debido a que un aumento de este tipo dará lugar a un ensanchamiento espectral debido a la no linealidad aumentada del material que forma los componentes de la cavidad, tal como el material de fibra habitualmente de vidrio de sílice. En una forma de realización, el ensanchamiento espectral que es causado por un aumento en la potencia óptica de un pulso es un resultado de efectos no lineales, tales como la modulación de autofase. En una forma de realización, esto tiene lugar principalmente o en su totalidad en la fibra óptica que es comprendida por la cavidad. Debido a que las propiedades del filtro se pueden diseñar (al menos en cierta medida) la penalización del filtro se puede diseñar para equilibrar la absorción reducida con una fluencia más baja sobre el absorbente saturable, es decir, en donde la reflectividad del absorbente saturable sería por lo demás demasiado abrupta para compensarse por medio del empobrecimiento de ganancia en el medio de ganancia. Por lo tanto, se puede lograr un bloqueo de modo de CW estable para una fluencia relativamente baja.

Debido a que el filtro debería penalizar el ensanchamiento espectral en relación con el ancho de banda de láser que, por lo general, es del orden de 1 nm, el filtro en una forma de realización tiene un ancho de banda de menos de 3 nm, tal como de menos de 1 nm, tal como de menos de 0,5 nm, tal como de menos de 0,1 nm. En una forma de realización, el filtro tiene un ancho de banda en relación con el ancho de banda de láser de menos de un 300 %, tal como de menos de un 200 %, tal como de menos de un 100 %.

Con el fin de proporcionar una penalización suficiente para estabilizar el láser, el filtro debería mostrar una pérdida aumentada de forma significativa fuera del ancho de banda de láser. Por consiguiente, en una forma de realización, la profundidad de la caída de transmisión principal de la respuesta espectral del filtro es más de o igual a 3 dB, tal como de más de o igual a 6 dB, tal como de más de o igual a 9 dB, tal como de más de o igual a 12 dB, tal como de más de o igual a 16 dB, tal como de más de o igual a 19 dB, tal como de más de o igual a 21 dB, tal como de más de o igual a 30 dB, tal como de más de o igual a 40 dB, tal como de más de o igual a 50 dB.

No obstante, un filtro fuerte puede tener un efecto de distorsión sobre la forma de los pulsos que se emiten a partir del sistema de láser. Por consiguiente, en una forma de realización de la invención, la profundidad de la caída de transmisión principal de la respuesta espectral del filtro es menos de 30 dB, tal como de menos de 27 dB, tal como de menos de 24 dB, tal como de menos de 21 dB, tal como a menos de 18 dB, tal como de menos de 15 dB, tal como de menos de 12 dB, tal como de menos de 9, dB, tal como de menos de 6 dB, tal como de menos de 3 dB.

En una forma de realización, la profundidad de la caída de transmisión principal de la respuesta espectral del filtro se encuentra entre 3 dB y 50 dB, tal como entre 6 dB y 21 dB.

La expresión "caída de transmisión principal" se refiere al caso en el que la respuesta espectral oscila como una función de la longitud de onda. El filtro se diseña preferentemente para que tenga una reflectividad máxima en torno al ancho de banda de láser. No obstante, se pueden aplicar otras configuraciones siempre que el filtro lleve a cabo la función que se ha descrito en lo que antecede. En el caso en el que múltiples picos existen en el espectro de reflexión del filtro, la reflexión principal se refiere a un pico que está centrado sustancialmente en el ancho de banda de láser. En el caso en el que la respuesta espectral no oscila, la caída de transmisión principal simplemente se refiere a la respuesta espectral como un todo. Por lo general, una caída en el espectro de transmisión se corresponde con un pico en el espectro de reflexión al menos en el caso en el que la pérdida es despreciable.

En muchas formas de realización, parece que hay una compensación recíproca entre la profundidad de la caída de transmisión principal y la calidad de pulso en la salida, es decir, una desviación baja con respecto a un único pico cuya naturaleza se prefiere por lo general que sea gaussiana o de secante hiperbólica. Se puede dar lugar a esto

último al “recortar” el filtro el espectro del pulso. Esta compensación recíproca tiene lugar debido a que muchos tiempos de filtro muestran una respuesta espectral de parte de arriba más plana cuando dicha caída es profunda (la reflexión es alta) mientras que se observa una respuesta redondeada más suave para una caída de transmisión relativamente poco profunda, véase, por ejemplo, la figura 4P (A) (con una forma de parte de arriba plana) y la figura 6A (redondeada). Por consiguiente, se puede favorecer un filtro con una caída de transmisión poco profunda con el fin de lograr una calidad de pulso buena. Esta consideración se ejemplifica en las figuras 4P a 6 que se analizan en lo sucesivo. No obstante, con un pico de reflexión redondeado, un ensanchamiento pequeño puede tener una tendencia a verse más penalizado en relación con un pico de reflexión de parte de arriba plana. Por lo tanto, la cavidad puede tener una tendencia aumentada a funcionar en un modo pulsado doble, debido a que la división de la energía disponible entre dos pulsos se puede favorecer por medio del filtro redondeado.

Dependiendo de la configuración, se puede desear una reflectividad más alta o más baja del filtro en el ancho de banda de láser. En una forma de realización de la invención, la reflexión de pico de la respuesta espectral del filtro es menos de o igual a un 99 %, tal como de menos de o igual a un 80 %, tal como de menos de o igual a un 70 %, tal como de menos de o igual a un 60 %, tal como de menos de o igual a un 50 %, tal como de menos de o igual a un 40 %, tal como de menos de o igual a un 30 %, tal como de menos de o igual a un 20 %, tal como de menos de o igual a un 10 %, y en una forma de realización de la invención, la reflexión de pico de la respuesta espectral del filtro es más de o igual a un 5 %, tal como más de o igual a un 10 %, tal como más de o igual a un 20 %, tal como más de o igual a un 30 %, tal como más de o igual a un 40 %, tal como más de o igual a un 50 %, tal como más de o igual a un 60 %, tal como más de o igual a un 70 %, tal como más de o igual a un 80 %, tal como más de o igual a un 90 %, tal como más de o igual a un 99 %. En una forma de realización, la reflexión de pico, a la que también se hace referencia como reflectividad a menos que sea obvia otra cosa, se encuentra entre un 80 % y un 100 % tal como un 99 %. En una forma de realización, la reflectividad se encuentra entre un 70 % y un 80 %, tal como un 75. En una forma de realización, la reflectividad se encuentra entre un 10 % y un 25 %, tal como un 15 %.

En una forma de realización, la respuesta espectral del filtro comprende una parte de arriba sustancialmente plana que se extiende más de o igual a un 30 % del ancho de banda de láser, tal como de más de o igual a un 50 % del ancho de banda de láser, tal como de más de o igual a un 75 % del ancho de banda de láser, tal como de más de o igual a un 100 % del ancho de banda de láser, tal como de más de o igual a un 150 % del ancho de banda de láser, tal como de más de o igual a un 200 % del ancho de banda de láser. La expresión parte de arriba sustancialmente plana se corresponde con una variación de la reflectividad de menos de o igual a un 20 %, tal como de menos de o igual a un 10 %, tal como de menos de o igual a un 1 %.

En una forma de realización, la respuesta espectral del filtro comprende al menos una pendiente hacia una reflectividad más baja de más de un 70 % por nm, tal como de más de un 95 % por nm, tal como de más de un 200 % por nm, tal como de más de un 500 % por nm, tal como de más de un 1000 % por nm, tal como de más de un 2000 % por nm, tal como de más de un 5000 % por nm, tal como de más de un 10000 % por nm.

En una forma de realización, puede ser preferible que el filtro muestre una dispersión anómala, debido a que esto servirá para mantener los pulsos cortos, contrarrestando la dispersión de la fibra de la cavidad, con lo que se pueden obtener pulsos de tipo solitón. Puede que sea preferible tener una dispersión que sea tan uniforme como sea posible (normal o anómala) de tal modo que todas las partes del espectro o bien se comprimen o bien se ensanchan. No obstante, debido a que, a menudo, son preferibles unos pulsos cortos, se puede preferir que el filtro tenga una respuesta espectral que proporcione una dispersión anómala a lo largo del ancho de banda de láser. En una forma de realización de la invención, la respuesta espectral del filtro muestra una dispersión anómala en más de o igual a un 30 % del ancho de banda de láser, tal como de más de o igual a un 40 % del ancho de banda de láser, tal como de más de o igual a un 50 % del ancho de banda de láser, tal como de más de o igual a un 60 % del ancho de banda de láser, tal como de más de o igual a un 70 % del ancho de banda de láser, tal como de más de o igual a un 80 % del ancho de banda de láser, tal como de más de o igual a un 90 % del ancho de banda de láser, tal como de más de o igual a un 100 % del ancho de banda de láser, tal como de más de o igual a un 110 % del ancho de banda de láser, tal como de más de o igual a un 120 % del ancho de banda de láser, tal como de más de o igual a un 130 % del ancho de banda de láser, tal como de más de o igual a un 150 % del ancho de banda de láser.

En una forma de realización, el filtro comprende una rejilla en donde dicha rejilla puede ser una rejilla de tipo másico y / o una rejilla de fibra (una rejilla que está comprendida en una fibra óptica). Las rejillas son preferibles debido a que las mismas proporcionan una flexibilidad sustancial en lo que respecta a la respuesta espectral así como a la longitud de la rejilla puede determinar cuánto se puede estirar un pulso incidente tras la reflexión. No obstante, puede que sea preferible aplicar un filtro de película delgada como el primer y / o el segundo reflector. De forma similar a las rejillas, los filtros de película delgada (o filtros dicróicos) están reflejando la luz en una banda y transmitiendo otra luz. En general, los filtros de película delgada están más confinados espacialmente en relación con una rejilla, lo que puede dar como resultado un menor ensanchamiento de un pulso reflejado; no obstante, los filtros delgados también son, por lo general, de una banda más ancha, lo que puede ser, o no, adecuado para estabilizar el láser.

En una forma de realización preferida, el filtro es una rejilla de Bragg de fibra. Al diseñar un filtro adecuado, en la técnica se sabe que la intensidad de la rejilla de Bragg, es decir, la modulación de índice, se puede establecer para

obtener el ancho de banda deseado de la rejilla y la longitud de la rejilla se puede usar para establecer la reflectividad de pico. En una forma de realización de la invención, el filtro es una rejilla de Bragg más corta que o igual a 10 mm, tal como más corta que o igual a 5, tal como más corta que o igual a 2, tal como más corta que o igual a 1, tal como más corta que o igual a 0,75, tal como más corta que o igual a 0,5, tal como más corta que o igual a 0,25. En una forma de realización, la modulación de índice de dicha rejilla de Bragg es menos de o igual a 3 / 1000, tal como de menos de o igual a 1,5 / 1000, tal como de menos de o igual a 1 / 1000, tal como de menos de o igual a 0,5 / 1000, tal como de menos de o igual a 0,1 / 1000.

En una forma de realización, la rejilla de Bragg es sustancialmente uniforme, lo que proporciona una producción simplificada. Además, una rejilla uniforme puede proporcionar una caída de transmisión relativamente profunda al tiempo que se mantiene una longitud corta. Esto último es preferible debido a que una rejilla larga puede tener una tendencia a ensanchar un pulso de forma temporal a medida que tiene lugar la reflexión a lo largo de una longitud más grande. Sustancialmente uniforme en el presente contexto se refiere a una variación del periodo de rejilla y / o la modulación de índice de menos de un 50 %, tal como de menos de un 25 %, tal como de menos de un 10 %, tal como de menos de un 1 %.

En una forma de realización, la rejilla de Bragg se somete a modulación de frecuencia pulsada, proporcionando la opción de diseñar la dispersión de la respuesta espectral, proporcionando de ese modo, para algunas formas de realización, la opción de tener una dispersión anómala a lo largo del ancho de banda de láser que se analizó en lo que antecede (véase la figura 14).

En una forma de realización de la invención, la rejilla de Bragg está apodizada, lo que puede proporcionar la ventaja de suprimir los lóbulos laterales del espectro de reflexión, lo que, a su vez, puede proporcionar una calidad de pulso mejorada en el caso en el que el pulso puede interactuar por lo demás con los lóbulos laterales.

Para lograr una calidad espectral y / o una calidad de pulso alta, en algunas formas de realización, puede que sea ventajoso filtrar la salida de un sistema de láser de modo bloqueado de acuerdo con la invención. Por lo tanto, en una forma de realización, el láser comprende una trayectoria de salida, comprendiendo dicha trayectoria de salida un filtro de salida óptico. En una forma de realización, el filtro de salida óptico es un filtro sintonizable que prevé eliminar de forma precisa las componentes espectrales no deseadas. En una forma de realización, el filtro de salida óptico es una rejilla de Bragg, tal como una rejilla de Bragg de fibra. En una forma de realización, la rejilla de Bragg de fibra se sintoniza mediante el estiramiento de la fibra que comprende la rejilla.

En una forma de realización, los pulsos de salida del sistema de láser de acuerdo con la invención se caracterizan por tener una forma de pulso de salida que tiene un pico principal y una distribución espectral de salida. Entonces, preferentemente el filtro de salida óptico se dispone para reducir la distorsión de la distribución espectral de salida en relación con una distribución espectral de salida ideal. En una forma de realización, dicha distribución espectral de salida ideal se corresponde con más de o igual a un 80 % de la energía se encuentra en el pico principal de la forma de pulso de salida, tal como de más de o igual a un 90 % de la energía se encuentra en el pico principal de la forma de pulso de salida, más de o igual a un 95 % de la energía se encuentra en el pico principal de la forma de pulso de salida, más de o igual a un 99 % de la energía se encuentra en el pico principal de la forma de pulso de salida. En una forma de realización, la distribución espectral de salida ideal se corresponde con un funcionamiento de modo bloqueado de CW con una salida que comprende unos pulsos con un ajuste a una función gaussiana de una función de secante hiperbólica es mejor que o igual a un 80 %, tal como mejor que o igual a un 90 %, tal como mejor que o igual a un 95 %, tal como mejor que o igual a un 99 %.

En una forma de realización, el filtro de salida óptico se dispone para reducir las puntas en la distribución espectral de salida, tales como las puntas que son causadas por dicha respuesta espectral del filtro.

En una forma de realización de la invención la cavidad del sistema de láser de modo bloqueado comprende una fibra óptica con una no linealidad baja, tal como una fibra de diámetro de campo de modo grande que tiene un campo de modo con un radio de más de o igual a 6 μm , tal como de más de o igual a 10 μm , tal como de más de o igual a 15 μm , tal como de más de o igual a 20 μm . Esto puede proporcionar la ventaja de prever una longitud de cavidad más grande, lo que, a su vez, prevé una tasa de repetición más baja, sin tener demasiada no linealidad en la cavidad. Demasiada no linealidad en la cavidad puede proporcionar una calidad de pulso pobre o evitar el bloqueo de modo.

En una forma de realización, tal fibra óptica con una no linealidad baja puede ser una fibra de cristal fotónico, tal como una fibra con agujeros. Esta fibra puede comprender una o más de las propiedades diferenciadoras que se seleccionan de entre el grupo de una fibra de núcleo hueco, una fibra de núcleo macizo, y una fibra fotónica de banda prohibida. Las fibras de cristal fotónico proporcionan ventajas en el diseño disponible de propiedades tales como la dispersión y la apertura numérica. Las fibras de núcleo hueco pueden proporcionar una no linealidad muy baja debido a que el guiado se puede producir sustancialmente en el aire; no obstante, tales fibras pueden plantear desafíos en el acoplamiento con una fibra de núcleo macizo.

En muchas aplicaciones, es preferible proporcionar una salida en una única polarización. Además, limitar un sistema de láser de acuerdo con la invención a una única polarización puede reducir las contribuciones de ruido debido a la competición entre diferentes modos de polarización. En una forma de realización, la cavidad comprende al menos un componente de polarización. Los medios de ganancia emiten luz debido a la emisión espontánea y estimulada. La emisión espontánea es un proceso estocástico, lo que quiere decir que la polarización y la potencia de salida fluctúan. Mediante la inserción de un elemento de polarización en la cavidad, una polarización se vuelve dominante, lo que estabiliza la potencia de salida del láser y aumenta la tolerancia del láser hacia cambios ambientales tales como la temperatura y la humedad.

En una forma de realización, la cavidad del sistema de láser de acuerdo con la invención mantiene sustancialmente la polarización, de tal modo que al menos un componente de la cavidad mantiene la polarización, preferiblemente la totalidad de los componentes de la cavidad mantienen la polarización. Mantener la polarización se ha de entender en un sentido amplio, en donde un componente que mantiene la polarización puede alterar la polarización de manera deliberada, tal como el rotador de Faraday que se analiza en lo sucesivo. Preferiblemente, la polarización se restablece o bien por medio de otro componente y / o bien al volver a pasar por el componente. Preferiblemente, se mantiene una única polarización a través del medio de ganancia.

En una forma de realización, un sistema de láser de modo bloqueado de acuerdo con la invención tiene una salida pulsada en donde dicho pulso tiene un intervalo de tiempo (de FWHM) de más de o igual a 100 fs, tal como de más de o igual a 0,5 ps, tal como de más de o igual a 1 ps, tal como de más de o igual a 2 ps, tal como de más de o igual a 5 ps, tal como de más de o igual a 10 ps, tal como de más de o igual a 15, tal como de más de o igual a 30 ps. En una forma de realización, los pulsos de la salida pulsada se someten a una compresión adicional, por ejemplo, hasta el régimen de fs.

En una forma de realización, un sistema de láser de modo bloqueado de acuerdo con la invención tiene una salida pulsada y una tasa de repetición, en donde dicha tasa de repetición es más alta que o igual a 0,1 MHz, tal como más alta que o igual a 1 MHz, tal como más alta que o igual a 10 MHz, tal como más alta que o igual a 60 MHz, tal como más alta que o igual a 150 MHz, tal como más alta que o igual a 500 MHz. En una forma de realización, un sistema de láser de modo bloqueado de acuerdo con la invención tiene una salida pulsada y una tasa de repetición más alta que o igual a 0,1 MHz, tal como más alta que o igual a 1 MHz, tal como más alta que o igual a 10 MHz, tal como más alta que o igual a 60 MHz, tal como más alta que o igual a 150 MHz, tal como más alta que o igual a 500 MHz. Por lo general, la tasa de repetición se diseña mediante la elección de la longitud de la cavidad; no obstante, en particular para una tasa de repetición por debajo de 10 MHz, la longitud requerida de la cavidad puede ser demasiado extensa incluso si se aplican fibras con una no linealidad baja. En su lugar, la tasa de repetición se puede diseñar mediante la combinación de una cavidad con una tasa de repetición más alta con un seleccionador de pulsos.

Por lo general, la ganancia del medio de ganancia se controla por medio de la cantidad de energía de bombeo que se inyecta. En los láseres de fibra, a menudo el medio de ganancia es una fibra activa ópticamente bombeada. No obstante, en principio el medio de ganancia puede ser cualquier tipo adecuado tal como un amplificador semiconductor.

El medio de ganancia del láser de fibra puede comprender (o estar comprendido en) una guía de ondas de fibra óptica, tal como una fibra monomodo o multimodo en donde un núcleo dopado actúa como un medio de ganancia. Este diseño tiene la ventaja de una construcción simple y resistente que se pone en práctica con relativa facilidad en el láser de fibra, tal como mediante un empalme por fusión. Además, la fibra activa también puede ser una fibra microestructurada de núcleo hueco sellado que se carga con un tipo de gas particular. No obstante, el medio de ganancia también puede comprender (o estar comprendido en) una guía de ondas óptica de vidrio o de semiconductor plana que tiene la ventaja de que se puede lograr una concentración dopante más alta del material activo. El láser de fibra también se puede diseñar para usar otros tipos de medios de ganancia o una combinación de tipos de medios de ganancia.

Preferentemente, el medio de ganancia puede comprender al menos uno de los siguientes materiales activos Yt, Eb, Tm, Pr, Ho, Sm, Nd, todos ellos bien conocidos en la técnica, para tener unas características adecuadas dependiendo de la aplicación - en particular en lo que respecta a la longitud de onda. Además, preferentemente el láser de fibra comprende al menos una fuente de luz de bombeo que está adaptada para activar al menos parte de dicho medio de ganancia. Principalmente, la idoneidad de una fuente de luz de bombeo se determina por medio de la longitud de onda emitida, la potencia óptica y, en algunos casos, por las características de pulso.

Preferentemente, el láser de fibra comprende un elemento óptico de acoplamiento externo, al que también se hace referencia como acoplador de salida, para acoplar la luz fuera de la cavidad que forma la salida del láser. En una forma de realización, dicho elemento óptico de acoplamiento externo comprende un acoplador, tal como un acoplador de polarización. No obstante, el elemento óptico de acoplamiento externo también puede comprender un reflector semi transparente, preferentemente como uno de los reflectores que forman la cavidad. En algunas formas de realización, se aplican dos elementos ópticos de acoplamiento externo: uno acopla la luz de la cavidad que se va a usar para supervisar del desempeño del láser, el otro elemento óptico de acoplamiento externo acopla la luz de la cavidad que forma la salida del láser de fibra.

En una forma de realización, el acoplador de salida acopla más de o igual a un 1 % de la cavidad, tal como de más de o igual a un 1 % de la cavidad, tal como de más de o igual a un 5 % de la cavidad, tal como de más de o igual a un 10 % de la cavidad, tal como de más de o igual a un 15 % de la cavidad, tal como de más de o igual a un 20 % de la cavidad, tal como de más de o igual a un 25 % de la cavidad, tal como de más de o igual a un 40 % de la cavidad.

Preferiblemente, el láser está aislado de tal modo que se evita que sustancialmente toda luz se propague hacia la cavidad desde la salida del láser, debido a que tal luz puede proporcionar por lo demás una realimentación no deseada al interior de la cavidad de láser, lo que puede dar lugar a inestabilidad. En una forma de realización preferida, el láser de fibra comprende al menos una unidad para evitar que sustancialmente toda luz se propague hacia la cavidad desde la salida del láser, tal como un elemento aislante. No obstante, en algunas aplicaciones del láser, puede haber poco o ningún riesgo de que la luz se propague de vuelta al láser y, por lo tanto, dicho elemento aislante se puede omitir para ahorrar costes y / o evitar complejidad.

En el contexto del presente texto, se interpreta que una cavidad lineal quiere decir una cavidad de láser que se define por medio de dos reflectores. En el presente caso, se considera que los reflectores se encuentran en la cavidad. En principio, la cavidad lineal puede ser cualquier tipo de oscilador para un funcionamiento de modo bloqueado en la que una potencia aumentada da lugar a un ensanchamiento de los pulsos debido a la no linealidad aumentada.

En el contexto del presente texto, una respuesta espectral puede ser cualquier propiedad como una función de la longitud de onda o la frecuencia. En relación con los filtros, la espectral es la reflectividad y la transmisión.

En el contexto del presente texto, un láser de fibra es un láser que comprende una fibra óptica como una guía para al menos parte de la luz en la cavidad. En una forma de realización, el láser de fibra tiene un medio de ganancia de fibra óptica. En una forma de realización, el láser es un láser completamente de fibra.

Detalles de las figuras

En el siguiente análisis de las variaciones de la configuración del sistema de láser, el experto observará que, debido a la configuración modular del láser que se analiza en la presente solicitud, una divulgación en lo que respecta a un elemento particular de la configuración es aplicable a cualquiera de las formas de realización que se han analizado en lo que antecede y / o en el juego de reivindicaciones adjunto. En particular, este se refiere a unos elementos tales como un medio de ganancia, una cavidad, etc.

La figura 1P muestra un ejemplo de un sistema de láser de modo bloqueado 1 de acuerdo con la invención que comprende una WDM 2 para introducir una luz de bombeo por medio de una entrada 4. La cavidad de láser se define por medio de la rejilla de Bragg 5 y un SAM 9 que actúan como el primer y el segundo reflectores. El medio de ganancia, que se muestra en el presente caso como una fibra activa 6, amplifica la emisión espontánea a partir del medio de ganancia que se ha filtrado mediante el filtro, en este caso una rejilla de Bragg 5, por lo tanto solo se reflejan las longitudes de onda deseadas. El acoplador de salida 7 acopla parte de la luz que se desplaza en la cavidad con el orificio de salida 8 y se evita que la luz entre en la cavidad a través del acoplador de salida 7 por medio del elemento aislante 10. Preferentemente, la cavidad comprende componentes que mantienen la polarización y el acoplador de salida es preferentemente de polarización, de tal modo que el acoplador de salida 7 preferentemente tiene una pérdida baja en el eje lento pero una pérdida grande en el eje rápido. La WDM 2 comprende adicionalmente un orificio 3 a través del cual se puede supervisar la luz que pasa por la rejilla de Bragg 5. Dependiendo de la reflectividad de la rejilla de Bragg 5, este orificio también se puede utilizar como un orificio de salida.

La figura 2P muestra un ejemplo de un sistema de láser de modo bloqueado de acuerdo con la invención 1 similar a la figura 1P. En el presente caso, el filtro óptico 5 y la WDM 2 han intercambiado sus posiciones en comparación con la figura 1. Por ello, el filtro funciona tanto como un espejo de extremo de cavidad como un acoplador de salida, lo que posibilita una cavidad de láser más corta. Además, esta cavidad posibilita el bombeo la luz láser lejos del SAM 10, lo que puede mejorar adicionalmente su periodo de vida. A diferencia del láser que se muestra en la figura 1P, esta cavidad no tiene unas salidas adicionales que se puedan usar para la supervisión de los pulsos. Esta funcionalidad se puede lograr, por ejemplo, mediante la inserción de un acoplador de derivación después del elemento aislante.

La figura 3P muestra otro ejemplo de un sistema de láser de modo bloqueado de acuerdo con la invención 1 con la adición de un fragmento adicional de fibra entre la fibra activa 6 y la rejilla de Bragg 5. Por lo tanto, es posible lograr una cavidad más larga y, por lo tanto, una tasa de repetición más baja. Para este fin, es ventajoso el uso de una fibra con una no linealidad de material baja o un diámetro de campo de modo grande.

En las curvas calculadas de las figuras 4P, 5 y 6 se consideran unas formas de realización a modo de ejemplo. En el presente caso, se considera un láser de fibra de modo bloqueado de acuerdo con la invención que tiene una tasa de

repetición de 80 MHz. Se muestran los espectros de reflexión (A), espectros de dispersión de velocidad de grupo (B), el perfil de pulso frente al tiempo (C) y el espectro de pulso (D). Todas las formas de realización emplean una rejilla de Bragg de fibra uniforme con los siguientes parámetros:

- La figura 4: 1,5 mm de longitud con una modulación de índice de 0,0014 que proporciona una caída de transmisión de 50 dB.
- La figura 5: 0,75 mm de longitud con una modulación de índice de 0,0012 que proporciona una caída de transmisión de 16 dB.
- La figura 6: 0,75 mm de longitud con una modulación de índice de 0,00045 que proporciona una caída de transmisión de 5 dB.

A partir de estas figuras, se puede observar que, para la caída de transmisión grande de la figura 4P, el pulso tiene una cola significativa que se extiende a 50 ps después del pulso principal. Esta cola está espectralmente relacionada con la punta de longitud de onda grande a 1063,5 nm. En una forma de realización de la invención el sistema de láser comprende un filtro de salida óptica de banda estrecha que se sintoniza para eliminar esta punta después de lo cual la forma de pulso se mejora de forma significativa. También se observa que parece que se mejora la forma espectral y temporal del pulso (consúltese el análisis de la forma espectral ideal en lo que antecede) a medida que la caída de transmisión se reduce en las figuras 5 y 6. Preferiblemente, el filtro de salida óptico se coloca después de un elemento aislante de tal modo que ninguna retroreflexión vuelve a entrar de vuelta a la cavidad.

La figura 4 muestra la duración de pulso simulada frente a la energía de pulso para 7 rejillas de Bragg uniformes diferentes en un láser de 80 MHz. La energía de pulso más baja es el umbral de bloqueo de modo y la energía más alta es el principio de bloqueo de modo de pulso doble. Se ha hallado que esta energía es aproximadamente igual a dos veces la energía de pulso en el umbral. Esta figura ilustra que, a menudo, la duración de pulso disminuye con el ancho espectral de la rejilla de Bragg. Variando de 8 ps en una rejilla de 506 pm a 3,5 ps en una rejilla de 1200 pm. La duración de pulso depende menos de la reflectividad, pero se observa que la energía de pulso aumenta rápidamente con la reflexión. Esto se confirma por medio de unos experimentos en los que se halló que las rejillas débiles tenían un intervalo estrecho de potencias de bombeo en donde era posible un funcionamiento estable, y que había una reflexión mínima por debajo de la cual no era posible lograr un bloqueo de modo de un único pulso.

La figura 7 muestra la potencia de salida frente al tiempo para un láser de modo bloqueado de CW en el umbral (A), un 13 % por encima del umbral (B) y un 26 % por encima del umbral (C). La potencia de salida se deteriora con < un 1 %, un 3 % y un 6 % / 100 h para A, B y C, de forma respectiva. Un experimento similar muestra unas tasas de deterioro comparables para unos pulsos con 5 y 10 ps cuando se acciona con la misma potencia de bombeo. Esto indica que, en un bloqueo de modo de CW, el deterioro depende de la potencia promedio y no de la potencia de pico.

La figura 8A muestra la potencia de salida de un láser de modo bloqueado de CW como una función del tiempo. Después de 400 horas, el SESAM expira. La figura 8B muestra una imagen de una superficie de SESAM que ha sido quemada por conmutaciones Q. Cada punto se corresponde con un punto sobre el SESAM.

La figura 9 muestra la evolución en la potencia de bombeo en el umbral de bloqueo de modo con el tiempo. La potencia de bombeo en el umbral se normaliza al umbral inicial. También se muestra un ajuste lineal al umbral de potencia de bombeo. El ajuste solo se basa en los primeros cinco puntos de mediciones. Este muestra que, para una aproximación buena, el deterioro es lineal con el tiempo durante las primeras 1300 horas. Posteriormente, la tasa de desintegración aumenta. El SESAM expiró después de 2000 horas de funcionamiento.

La figura 11 muestra un volcado de pantalla a partir de un osciloscopio rápido que se usa para registrar 4000 arranques de un láser modo bloqueado usando una persistencia infinita. El láser modo bloqueado se acciona con un generador de funciones externo.

Cuando se activa el generador de funciones, hay un retardo de ~ 3 ms hasta que responde la unidad de accionamiento del diodo de láser. En lo sucesivo en el presente caso, hay ~ 0,2 ms hasta que se inician los láseres de ML y ~ 1 ms hasta que ha cesado la conmutación Q y el láser se encuentra en un régimen de ML estable.

Las figuras son esquemáticas y están simplificadas por razones de claridad, y las mismas simplemente muestran unos detalles que son esenciales para la comprensión de la invención, mientras que otros detalles se dejan al margen. De principio a fin del presente documento, se usan los mismos números de referencia para partes idénticas o correspondientes.

Un ámbito de aplicabilidad adicional de la presente invención será evidente a partir de la descripción detallada que se da en lo sucesivo en el presente documento. No obstante, se debería entender que la descripción detallada y los ejemplos específicos, a pesar de que indican algunas formas de realización preferidas de la invención, se dan solo a modo de ilustración, debido a que diversos cambios y modificaciones dentro del espíritu y el alcance de la invención serán evidentes a los expertos en la materia a partir de la presente descripción detallada.

La invención se define por medio de las características de la reivindicación o reivindicaciones independientes. Algunas formas de realización preferidas se definen en las reivindicaciones dependientes. No se tiene por objeto que número de referencia alguno en las reivindicaciones sea limitante para su alcance.

5 En lo anterior se han mostrado algunas formas de realización preferidas, si bien se debería destacar que la invención no se limita a estas, sino que se puede materializar de otras formas dentro de la materia objeto que se define en las siguientes reivindicaciones.

10 Algunos ejemplos adicionales de formas de realización de la invención se analizan en lo sucesivo por medio de consideraciones teóricas.

Tablas

FWHM (pm)	R _{máx} (%)	Δn	Longitud (mm)	Etiqueta
506	99	1,1 · 10 ⁻³	1,87	BG1
696	99	1,5 · 10 ⁻³	1,32	BG2
706	79	1,22 · 10 ⁻³	0,79	BG3
930	96	1,875 · 10 ⁻³	0,83	BG4
1000	99	2,168 · 10 ⁻³	0,83	BG5
1160	99	2,61 · 10 ⁻³	0,78	BG6
1200	90	2,26 · 10 ⁻³	0,55	BG7

15 Tabla 1. Datos para las rejillas de Bragg de fibra que se insertan como espejos de extremo de cavidad en las simulaciones numéricas.

20 Para esclarecer los hallazgos experimentales, la evolución de un pulso de modo bloqueado en circulación en la cavidad se investigó por medios numéricos. El diseño de láser del modelo se muestra en la figura 1. La reflexión del pulso en la FBG en el extremo izquierdo de la cavidad se describe al multiplicar la envolvente del pulso, $G(\omega, z)$ en el dominio de la frecuencia por el coeficiente complejo de reflexión $R(\omega)$ de la rejilla. El pulso transmitido se halla de forma similar al multiplicar G por el coeficiente complejo de transmisión T . De esta forma, tanto la intensidad de reflexión dependiente de la frecuencia como la dispersión de rejilla se tienen plenamente en cuenta. De hecho, tal como se verá, la dispersión de rejilla es decisiva a la hora de determinar la forma del pulso de modo bloqueado.

25 La acción del SESAM en el extremo derecho de la cavidad se describe en el dominio del tiempo, de acuerdo con las ecuaciones:

$$G(t, z) \rightarrow G(t, z) \sqrt{1 - A_0 - N_1^S(t) \sigma_S} \quad (1)$$

$$\frac{dN_1^S}{dt} = -\frac{dN_2^S}{dt} = \frac{N_2^S}{\tau_S} - \frac{N_1^S |G(t, z)|^2}{A_{eff}^S F_S} \quad (2)$$

30 En el presente caso, N_2^S , N_1^S es la concentración (por unidad de área) de los absorbentes de SESAM en los estados fundamental y excitado, de forma respectiva. σ_S es su sección transversal de absorción, τ_S es su tiempo de relación, y A_0 es la absorción insaturable del SESAM, A_{eff}^S es un área de enfoque eficaz del punto de láser sobre el SESAM que, en todos los cálculos que se presentan en el presente caso, se estableció a $9\pi \mu\text{m}^2$, lo que se corresponde con un diámetro de punto de $6 \mu\text{m}$. F_S indica la fluencia de saturación del SESAM. Los parámetros σ_S y $N_0^S = N_1^S + N_2^S$ se pueden calcular a partir de la fluencia de saturación y la absorción saturable, ΔA , del dispositivo de acuerdo con:

$$\sigma_S = \frac{\hbar \omega}{F_S}, \quad N_0^S = \frac{\Delta A}{\sigma_S} \quad (3)$$

40 Los inventores de la presente invención usan los parámetros $\Delta A = 0,24$, $F_S = 70 \text{ J / cm}^2$, $A_0 = 0,16$, y $\tau_S = 500 \text{ fs}$.

45 Para la propagación en las fibras, se investigaron dos esquemas de modelado. En el primer enfoque, la propagación se describe por medio de una ecuación de Schrödinger no lineal generalizada (GNLSE, *generalized non-linear Schrödinger equation*), incluyendo una dispersión de tercer orden, así como los efectos de Raman y de autoprionunciación. La fibra dopada con Yb que sirve como un medio de ganancia se aproximó por medio de un amplificador puntual (el punto de color verde en la figura 1, que está rodeado por unas fibras pasivas (las líneas de

color verde en la figura 1) con un área eficaz que es apropiada para la fibra dopada con Yb real. Los valores de A_{ef} para las fibras tanto activas como pasivas se estimaron a partir de las mediciones del perfil de modo. Para ambos tipos de fibra, se usaron los parámetros de dispersión de $\beta_2 = 0,0023 \text{ ps}^2 / \text{m}$ y $\beta_3 = 3,9 \cdot 10^{-5} \text{ ps}^3 / \text{m}$, de acuerdo con los datos que son publicados por Nielsen y col. para fibras similares a la fibra pasiva que se usa en el presente caso.

Debido a que las fibras contribuyen con solo una fracción pequeña de la dispersión total en la cavidad (véase en lo sucesivo), la precisión de estos parámetros de dispersión no es crucial para el modelo. Por otro lado, los valores de A_{ef} son sumamente significativos, debido a que la SPM en las fibras desempeña un papel importante en la conformación de pulsos.

La ganancia total de la fibra activa viene dada por:

$$g(\omega) = \exp \{ (\sigma_e(\omega)N_2 - \sigma_a(\omega)N_1)L \} \quad (4)$$

en donde $\sigma_a(\omega)$, $\sigma_e(\omega)$ son las secciones transversales de absorción y de emisión del Yb, de forma respectiva, N_1 y N_2 son las concentraciones de los iones en los estados fundamental y excitado, y L es la longitud del amplificador. La concentración total de los iones de Yb. $N_t = N_1 + N_2$ se deduce a partir de la absorción de señales pequeñas medida de la fibra activa. Para unos cálculos rápidos de las formas de pulso y los umbrales de pulso doble, la inversión de la población, $N_2 - N_1$, se relaja de acuerdo con la fórmula:

$$N_2 = \frac{N_t}{2 + E_p/E_{sat}} \quad (5)$$

en donde E_{sat} es un parámetro de modelo que controla la energía de pulso de equilibrio. De esta forma, el modelo se relaja con rapidez a un estado estacionario, con independencia de la forma de pulso inicial. No obstante, para el modelado de umbrales de conmutación Q, se requiere una descripción más realista de la saturación de ganancia. En estos cálculos, se supone que una potencia de bombeo, P_p , constante a una longitud de onda de 976 nm, es absorbida plenamente por la fibra activa, de tal modo que entre las pasadas del pulso de modo bloqueado, N_2 evoluciona de acuerdo con:

$$\frac{dN_2}{dt} = \frac{P_p}{h\nu_p A_{ef} L} - N_2/\tau \quad (6)$$

mientras que, en cada pasada del pulso de modo bloqueado, N_2 se reduce una cantidad:

$$\Delta N_2 = \int d\omega \frac{E_{sal}(\omega) - E_{en}(\omega)}{h\nu\omega} \quad (7)$$

En estas fórmulas, ω_p es la frecuencia de bombeo, A_{ef} es el área eficaz del amplificador. τ es el periodo de vida de emisión espontánea de Yb de 840 μs , y $E_{en}(\omega)$, $E_{sal}(\omega)$ indican la densidad de energía espectral del pulso antes y después del paso de amplificador, de forma respectiva. Este esquema ofrece una descripción mucho más realista de la dinámica de un láser, y permite que los inventores de la presente invención investiguen por medios numéricos la estabilidad del láser frente a la conmutación Q. No obstante, por lo general se requiere un número grande (de varios miles) de idas y vueltas de cavidad para la relajación a un estado estacionario, incluso cuando la simulación se inicia a partir de una solución de estado estacionario a un valor ligeramente diferente de P_p . Esta dificultad motivó el desarrollo de un esquema aproximado en el que se desprecia la dispersión en la fibra y los efectos de Raman y los efectos de autopronunciación en las fibras. En ese caso, el pulso solo experimenta una SPM en las fibras, y la evolución del pulso a lo largo de una longitud z de fibra se puede determinar de forma analítica en el dominio del tiempo:

$$G(t, z) = G(t, 0) \exp(i\phi(t)z), \quad \phi(t) = z \frac{\omega_0 n_2 |G(t, 0)|^2}{c A_{ef}} \quad (8)$$

El racionamiento para despreciar la dispersión en la fibra es que la dispersión de las FBG que se consideran en el presente caso es mucho más intensa que la dispersión en ~ 3 metros de fibra monomodo convencional. Debido a que las FBG también limitan el ancho de banda de pulso, esta es una aproximación razonable para despreciar la dependencia de la frecuencia de la ganancia de amplificador, usando los valores de σ_a y σ_e a la frecuencia central de la rejilla. Se puede añadir una ganancia independiente de la frecuencia en el dominio del tiempo, por lo tanto con esta aproximación, una ida y vuelta completa de cavidad requiere solo dos operaciones de Transformada Rápida de Fourier (FFT, *Fast Fourier Transform*), con el fin de ir al dominio de la frecuencia y de vuelta en la FBG. Debido a que el esfuerzo de cómputo principal en el cómputo completo radica en las FFT que se requieren para solucionar la GNLSE, esto da como resultado una reducción significativa del tiempo de cómputo. Por lo tanto, este método aproximado se ha usado para probar la estabilidad de la conmutación Q, y se ha hallado que el mismo predice las

energías de umbral de conmutación Q con un error no mayor que un pequeño porcentaje, y que proporciona una descripción incluso mejor de los perfiles de pulso.

En la figura 2(a), se muestran dos ejemplos típicos de perfiles de modo de láser estables. Los perfiles se calculan con los reflectores de FBG de BG3 y de BG7 en la cavidad, y tienen unas energías de pulso comparables. No obstante, en el caso de la rejilla de BG7, el láser se encuentra cerca del umbral de pulso doble, mientras que el pulso en el láser de BG3 se encuentra en la parte media del régimen de bloqueo de modo estable. En la figura 2(b), la modulación de frecuencia pulsada de los pulsos se ilustra mediante la representación gráfica de la longitud de onda instantánea. $\lambda(t)$, que los inventores de la presente invención definen como:

$$\lambda(t) = \frac{2\pi c}{\omega(t)}, \quad \omega(t) = \frac{\partial \Phi}{\partial t}, \quad G(t, z) = |G(t, z)| \exp(i\Phi(t, z)) \quad (9)$$

Es evidente, a partir de las figuras, que el pico principal del pulso de modo bloqueado se forma sobre el lado de longitud de onda larga de la longitud de onda central de FBG, mientras que los satélites posteriores se forman sobre el lado de longitud de onda corta de esta longitud de onda. Este hallazgo se explica fácilmente al considerar las diversas contribuciones a la dispersión en la cavidad. Las curvas de dispersión de las dos rejillas se muestran en la figura 3, y se puede ver que la dispersión de FBG es del orden de varios ps / nm. En contraposición, la dispersión total en 2,6 metros de fibra es $\sim -0,1$ ps / nm. Por lo tanto, la evolución del pulso en la cavidad es una aproximación buena que se describe al considerar solo la dispersión de FBG, la SPM que tiene lugar en las fibras, y la acción del SESAM. La dispersión de FBG se corresponde con la de una fibra con $\beta_2 = 0$ pero un β_3 finito y positivo. Es bien sabido que un pulso que se acopla a una fibra de este tipo evolucionará a un pulso de tipo solitón sobre el lado de longitud de onda larga del punto $\beta_2 = 0$, con unas ondas dispersivas de salida sobre el lado de longitud de onda corta.

Los resultados de modelado principales para los regímenes de ancho de pulso y de energía de pulso para un bloqueo de modo estable se resumen en la figura 4, lo que se debería comparar con los resultados experimentales en la figura ?? . El ancho de pulso se representa gráficamente como una función de la energía de pulso para láseres con diversos espejos de extremo de FBG insertados, y las curvas se extienden a lo largo del intervalo determinado de un bloqueo de modo de un único pulso estable. En este caso, el ancho de pulso se determinó como la FWHM del pico principal, que se identificó de forma inequívoca en todos los casos. Se puede ver que los resultados de modelado reproducen bien las tendencias experimentales observadas. El ancho de pulso disminuye con el aumento del ancho espectral de la rejilla, en parte debido a un aumento correspondiente en el ancho de banda de pulso, pero también debido a la magnitud reducida de la dispersión de rejilla. Por otro lado, el ancho de banda de la rejilla tiene poca influencia sobre el intervalo de energías de pulso a lo largo de las cuales se halla que un único pulso es estable. Este intervalo se ve más influenciado por la intensidad de rejilla, un hallazgo que los inventores de la presente invención atribuyen a la forma de los espectros de reflexión de rejilla. Las rejillas con unas reflexiones más débiles tienden a tener una curvatura considerable a la longitud de onda de reflexión central, mientras que las rejillas de reflexión alta tienen una estructura de parte de arriba plana en torno a la longitud de onda central. Entonces, el efecto de estabilización de la FBG frente a la conmutación Q tiene lugar debido a la interacción entre el ensanchamiento espectral inducido por SPM del pulso de modo bloqueado y el efecto de filtrado de ganancia muy intenso que la FBG imparte de forma eficaz sobre la cavidad. Si la energía de pulso aumenta de forma infinitesimal, el aumento en el ensanchamiento espectral conduce a un aumento correspondiente en la pérdida en el espejo de FBG, que puede compensar entonces el aumento en la reflectividad de SAM.

Se podría esperar que una disminución en el ancho de la rejilla también aumentase el efecto de filtrado de ganancia, no obstante las rejillas estrechas tienen una dispersión más alta, y el aumento resultante en el ancho de pulso reduce los efectos del ensanchamiento espectral. Por otro lado, una disminución en la intensidad de rejilla reduce en la práctica la dispersión, conduciendo de este modo a unos pulsos ligeramente más estrechos, una tendencia que también se puede percibir en la figura 4. Por lo tanto, la reducción en la intensidad de rejilla aumenta tanto los efectos de la SPM como el filtrado de ganancia, empujando de ese modo el intervalo de un bloqueo de modo de un único pulso estable hacia unas energías de pulso más bajas.

El sistema de láser se puede simplificar adicionalmente al descartar el acoplador de salida y, en su lugar, usar la propia FBG como el orificio de salida. En general, los inventores de la presente invención han hallado que esto deteriora la calidad de los pulsos de salida en cierta medida, debido a que de esta forma, preferentemente, los flancos del espectro de pulso están acoplados externamente. Si la FBG no es demasiado fuerte y el láser se hace funcionar sustancialmente por debajo del umbral de pulso doble, se pueden extraer unas formas de pulso razonablemente suave, no obstante las ondas dispersivas de salida portan una parte más grande de la energía de pulso total de lo que es el caso cuando la salida se toma del interior de la cavidad. A medida que la energía de pulso se aumenta hacia el umbral de pulso doble, las ondas dispersivas se vuelven más y más pronunciadas. Para las rejillas de alta reflectividad, los pulsos que se transmiten a través de la FBG son en general de una calidad pobre.

Por último, los inventores de la presente invención mencionan que es posible un acortamiento de pulso adicional mediante el aumento del ancho de banda de la FBG. Unos pulsos más cortos facilitan la generación de ancho de

banda y una modulación de frecuencia pulsada lineal en fases de amplificación posteriores. Usando una rejilla con un espectro de reflexión de FWHM de 2300 pm, y una reflectividad máxima de 0,99 como un espejo de extremo de cavidad, los inventores de la presente invención obtuvieron unos pulsos únicos con una FWHM de 1,63 ps en el pico principal. Por lo tanto, el ancho de banda más grande y la dispersión más débil de la FBG disminuye el ancho de pulso de forma considerable, pero persiste la forma genérica del pulso a partir de las rejillas más estrechas que se han analizado en lo que antecede. Al mismo tiempo, el régimen de bloqueo de modo de un único pulso estable se mueve a unas energías de pulso por debajo de 10 pJ. La fabricación de una FBG de este tipo requeriría una modulación de índice de $5 \cdot 10^{-1}$, lo que no es inviable, pero probablemente requerirá el uso de una fibra especializada con un contenido de Ge alto en el núcleo.

5

10

REIVINDICACIONES

1. Un sistema de láser de fibra de modo bloqueado (1) que se dispone para tener un ancho de banda de láser y una potencia de pulso en funcionamiento de modo bloqueado de CW, teniendo dicho láser una cavidad lineal, comprendiendo dicha cavidad un medio de ganancia (6), un absorbente saturable (9) que tiene una fluencia de saturación, y filtro (5) que tiene una respuesta espectral, **caracterizado por que** dicho filtro (5) es una rejilla de Bragg de fibra más corta que o igual a 10 mm
dicho filtro (5) tiene un ancho de banda de menos de 3 nm y una caída de transmisión principal de la respuesta espectral que tiene una profundidad de más de o igual a 3 dB, y se dispone de tal modo que se puede obtener funcionamiento de modo bloqueado de CW sustancial con menos de 3 veces la fluencia de saturación que incide sobre el absorbente saturable.
2. El sistema de láser de modo bloqueado (1) de la reivindicación 1, en donde dicha pérdida se dispone de tal modo que, si aumenta la energía de pulso, el aumento en el ensanchamiento espectral conduce a una pérdida correspondiente en el filtro, lo que compensa entonces el aumento en la reflectividad del absorbente saturable.
3. El sistema de láser de modo bloqueado (1) de cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde dicho filtro (5) tiene un ancho de banda de menos de 1 nm, tal como de menos de 0,5 nm, tal como de menos de 0,1 nm.
4. El sistema de láser de modo bloqueado (1) de cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde dicha caída de transmisión principal de la respuesta espectral que tiene una profundidad de más de o igual a 6 dB, tal como de más de o igual a 9 dB, tal como de más de o igual a 12 dB, tal como de más de o igual a 16 dB, tal como de más de o igual a 19 dB, tal como de más de o igual a 21 dB, tal como de más de o igual a 30 dB, tal como de más de o igual a 40 dB, tal como de más de o igual a 50 dB.
5. El sistema de láser de modo bloqueado (1) de cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde dicha rejilla de Bragg es más corta que o igual a 5 mm, tal como más corta que o igual a 2 mm, tal como más corta que o igual a 1 mm, tal como más corta que o igual a 0,75 mm, tal como más corta que o igual a 0,5 mm, tal como más corta que o igual a 0,25 mm.
6. El sistema de láser de modo bloqueado (1) de cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde dicha rejilla de Bragg es sustancialmente uniforme.
7. El sistema de láser de modo bloqueado (1) de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 7, en donde dicha rejilla de Bragg está apodizada.
8. El sistema de láser de modo bloqueado (1) de cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde dicho sistema de láser comprende una fibra óptica con no linealidad baja, tal como una fibra con una fibra de diámetro de campo de modo grande que tiene un campo de modo con un radio de más de o igual a 6 μm , tal como de más de o igual a 10 μm , tal como de más de o igual a 15 μm , tal como de más de o igual a 20 μm , tal como que una dicha fibra óptica es una fibra de cristal fotónico, tal como una fibra con agujeros.
9. El sistema de láser de modo bloqueado (1) de cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde dicha cavidad mantiene sustancialmente la polarización, tal como que la cavidad comprende al menos un componente de polarización, tal como que la totalidad de los componentes de la cavidad mantienen la polarización.
10. El sistema de láser de modo bloqueado (1) de cualquiera de las reivindicaciones anteriores que tiene una salida pulsada en donde dicho pulso tiene un intervalo de tiempo (de FWHM) de aproximadamente más de 1 ps, tal como de más de 2 ps, tal como de más de 5 ps, tal como de más de 10 ps, tal como de más de 15, tal como de más de 30 ps.
11. El sistema de láser de modo bloqueado (1) de cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que tiene adicionalmente una trayectoria de salida, comprendiendo dicha trayectoria de salida un filtro de salida óptico, tal como un filtro sintonizable, tal como una rejilla de Bragg, tal como una rejilla de Bragg sintonizable.
12. El sistema de láser de modo bloqueado (1) de cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde el absorbente saturable es un absorbente saturable semiconductor.
13. El sistema de láser de modo bloqueado (1) de cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde el absorbente saturable es un espejo absorbente semiconductor.
14. Un sistema óptico que comprende un sistema de láser de modo bloqueado (1) de cualquiera de las reivindicaciones anteriores.

Figura 1

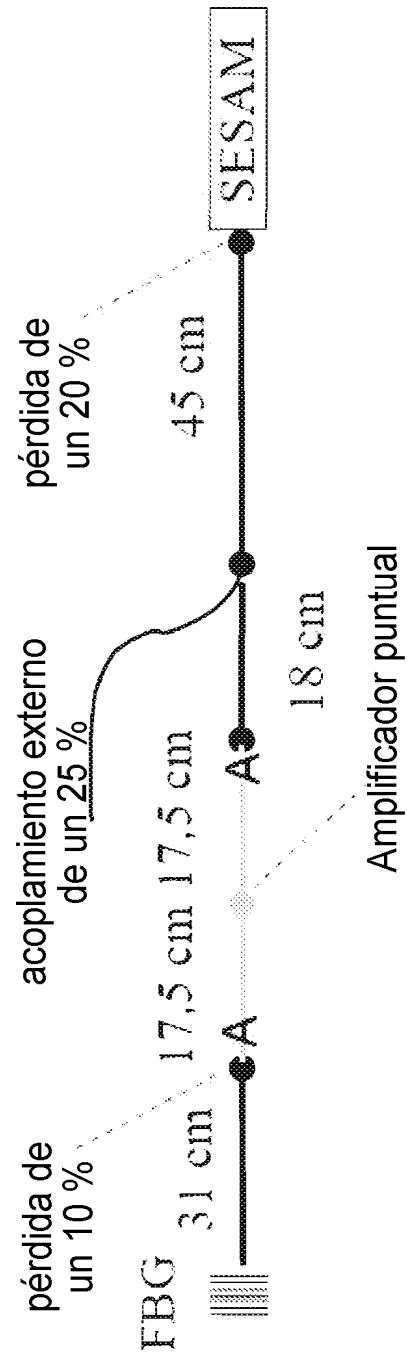


Figura 1P

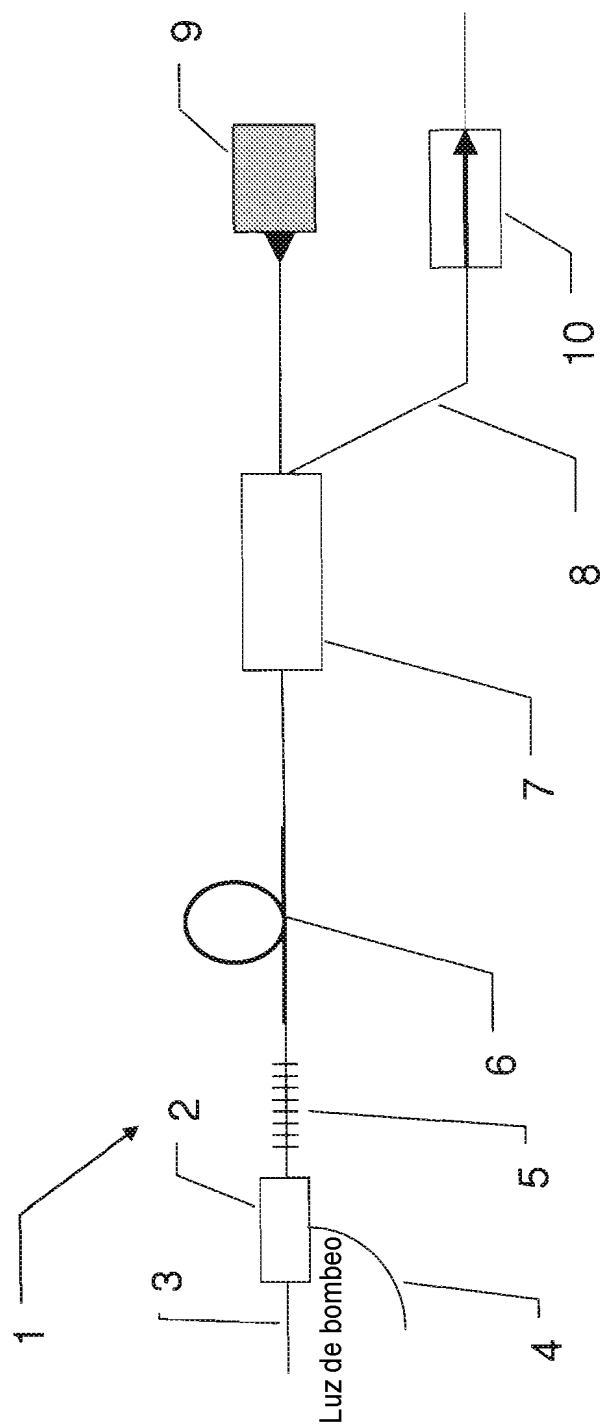


Figura 2

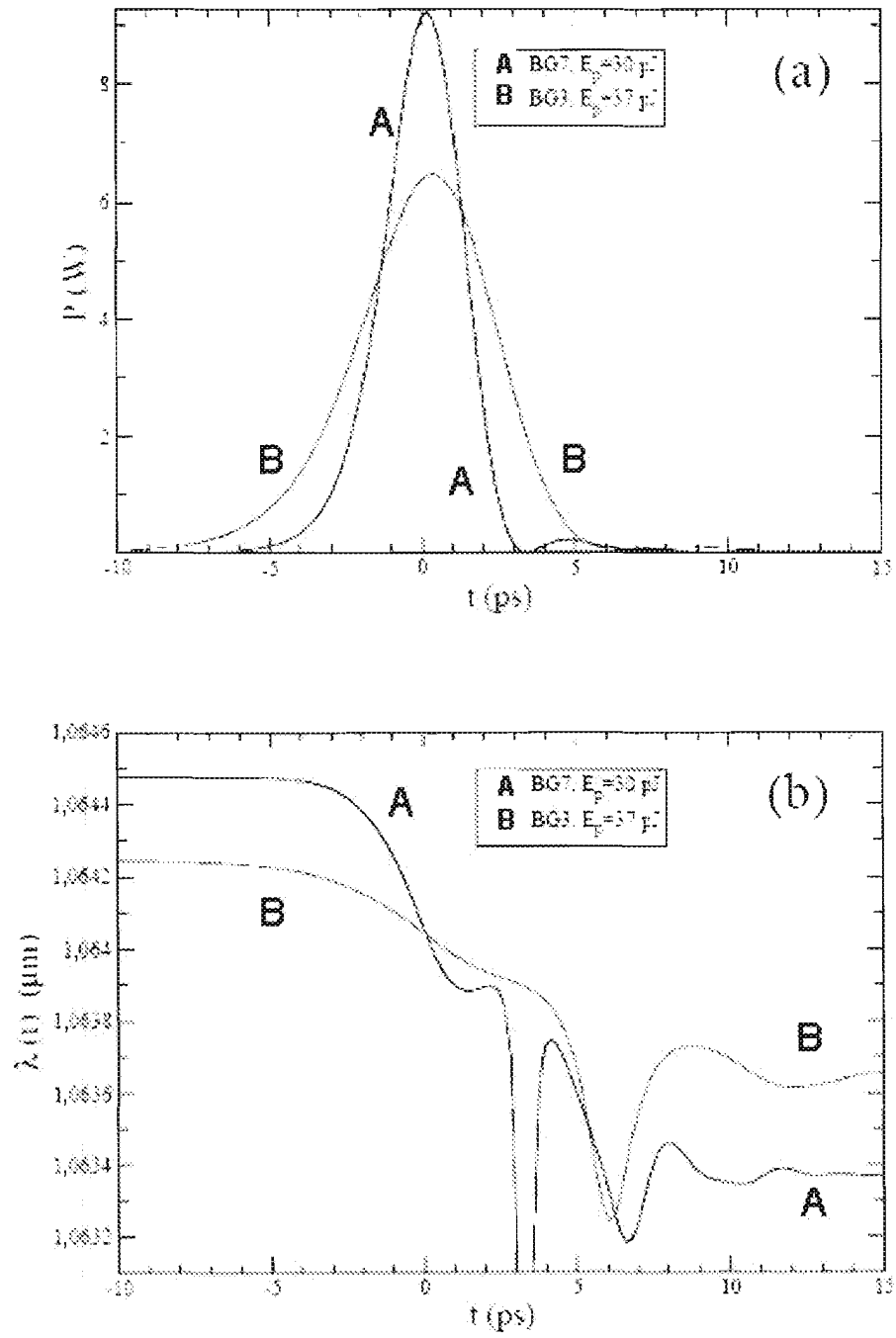


Figura 2P

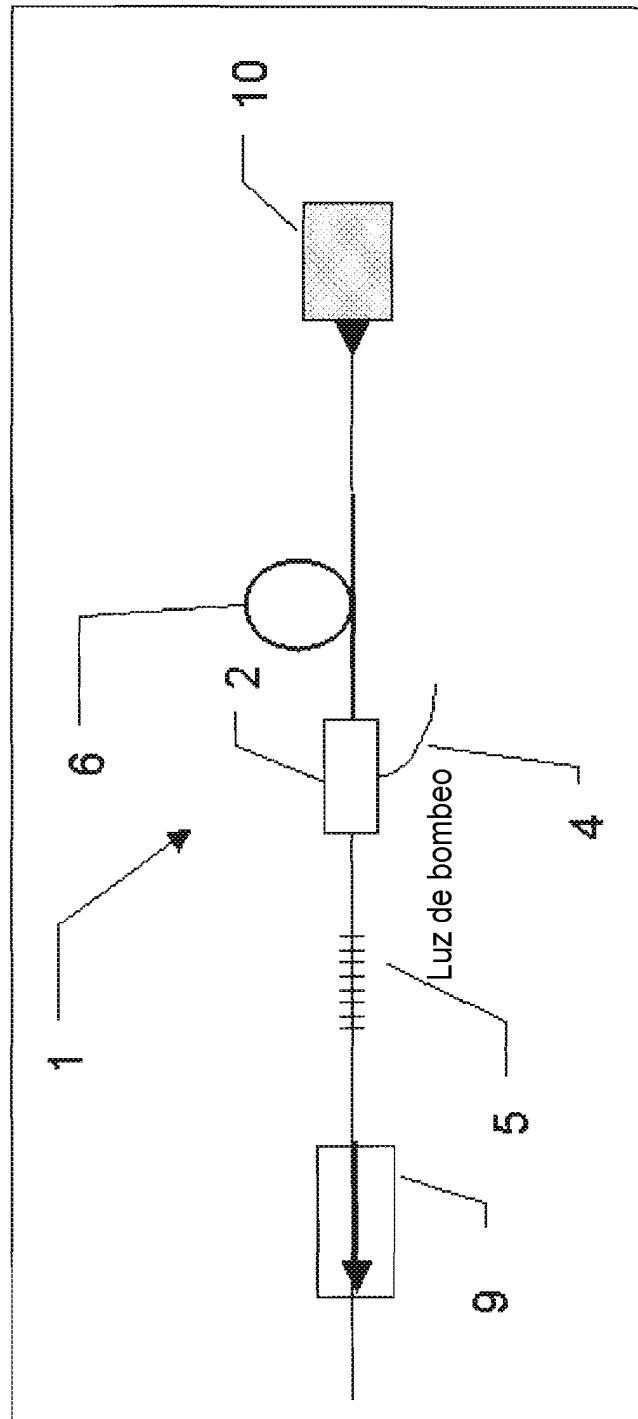


Figura 3

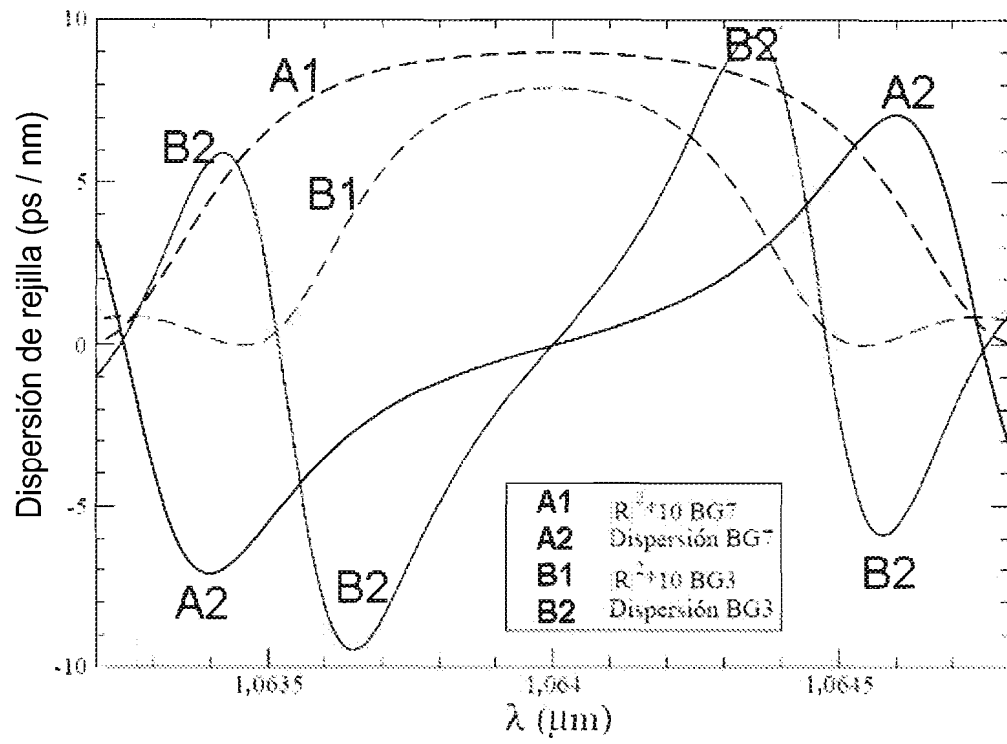


Figura 3P

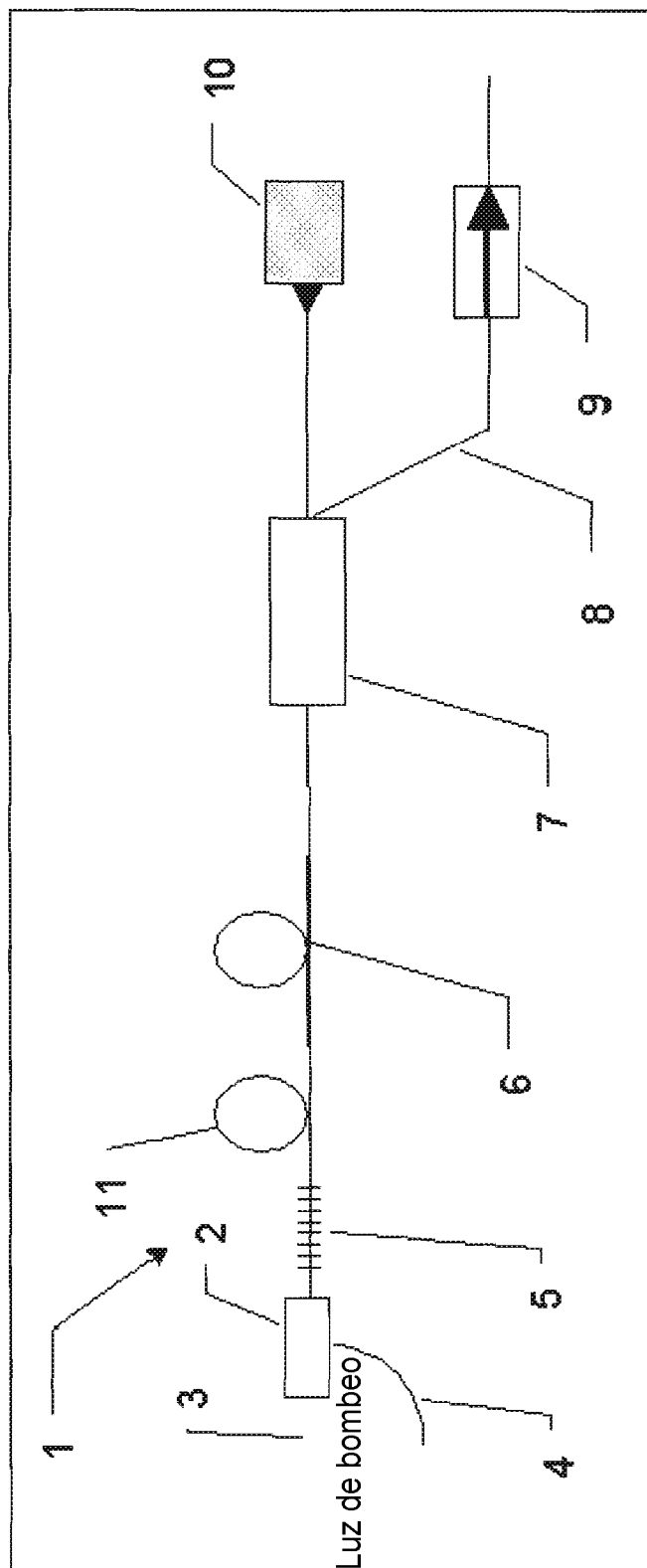


Figura 4

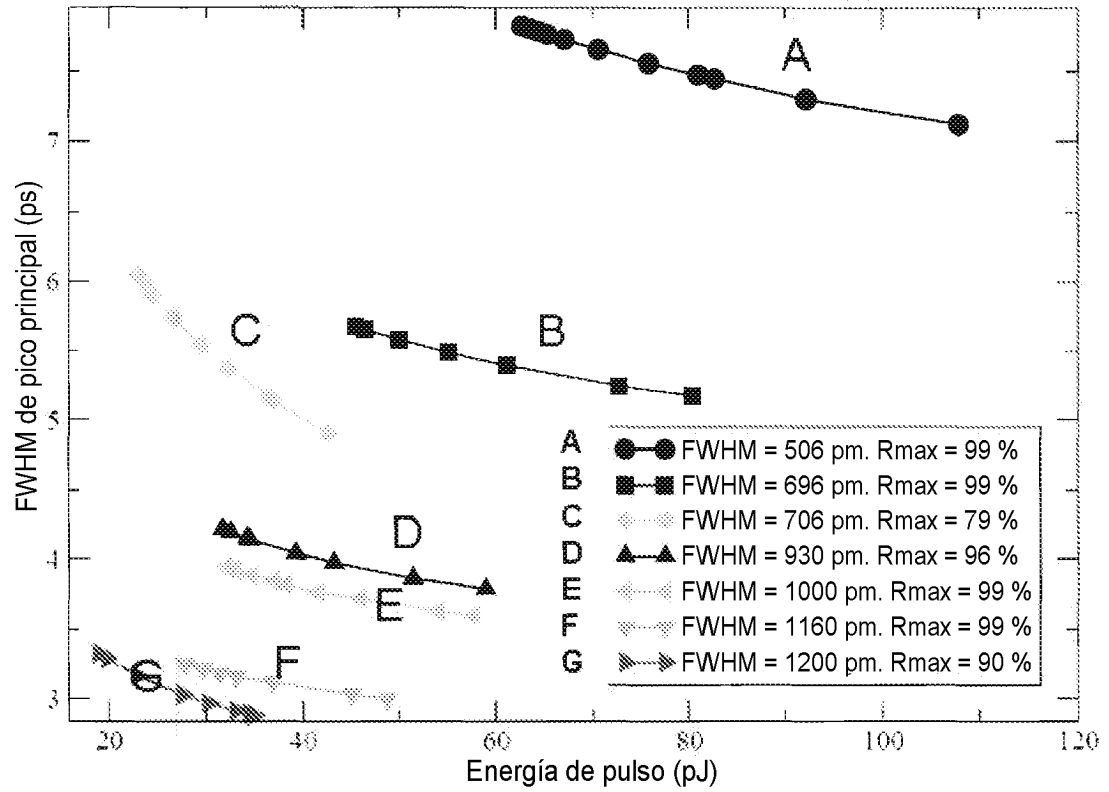


Figura 4P

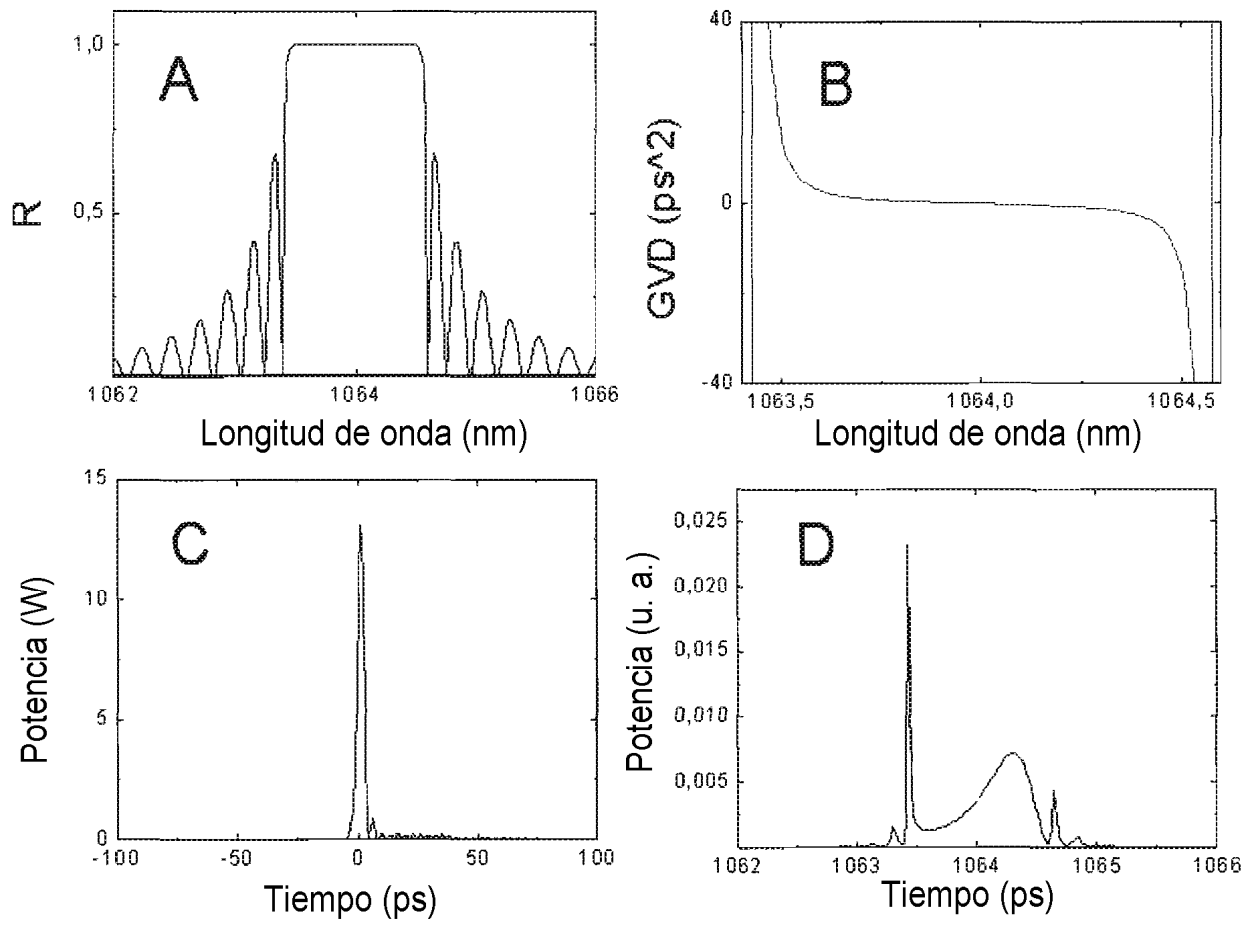


Figura 5

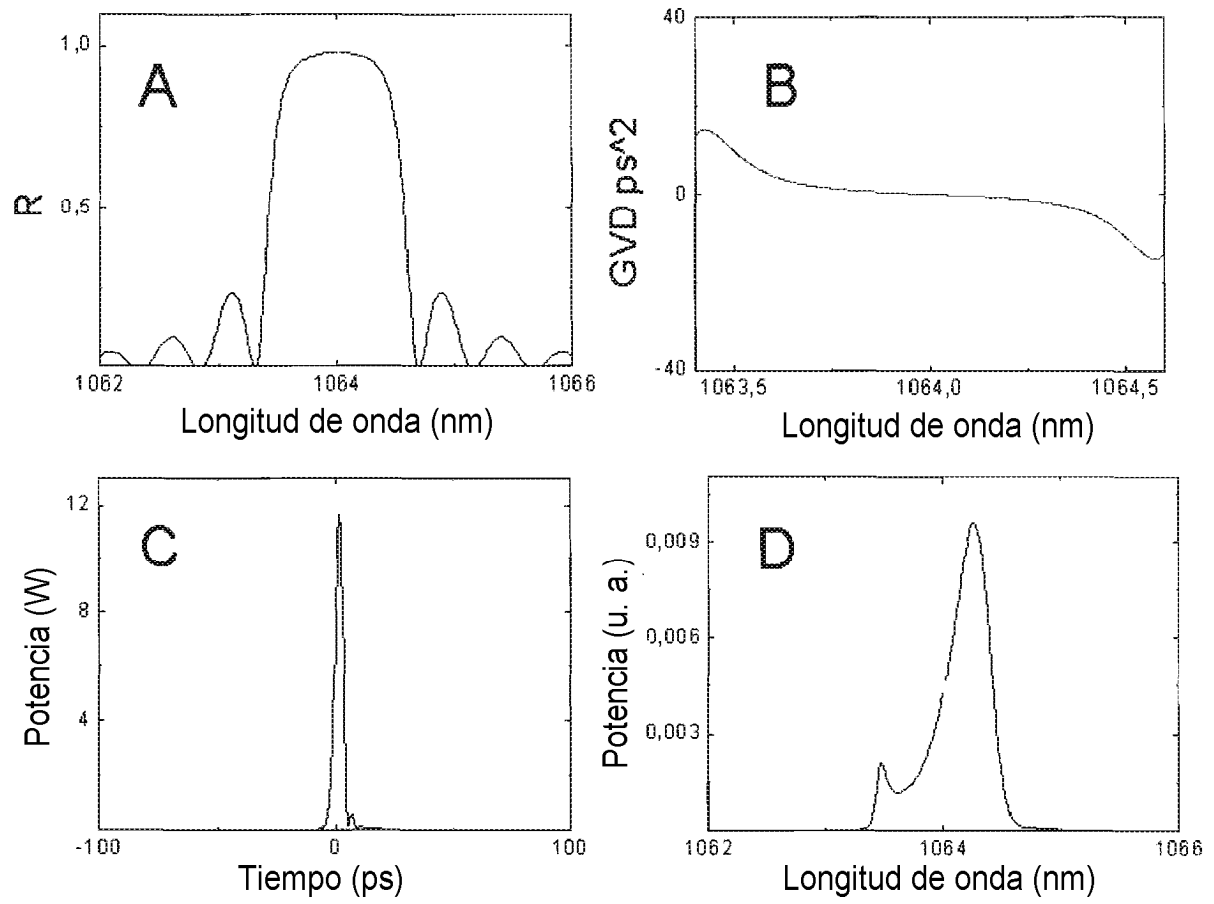


Figura 6

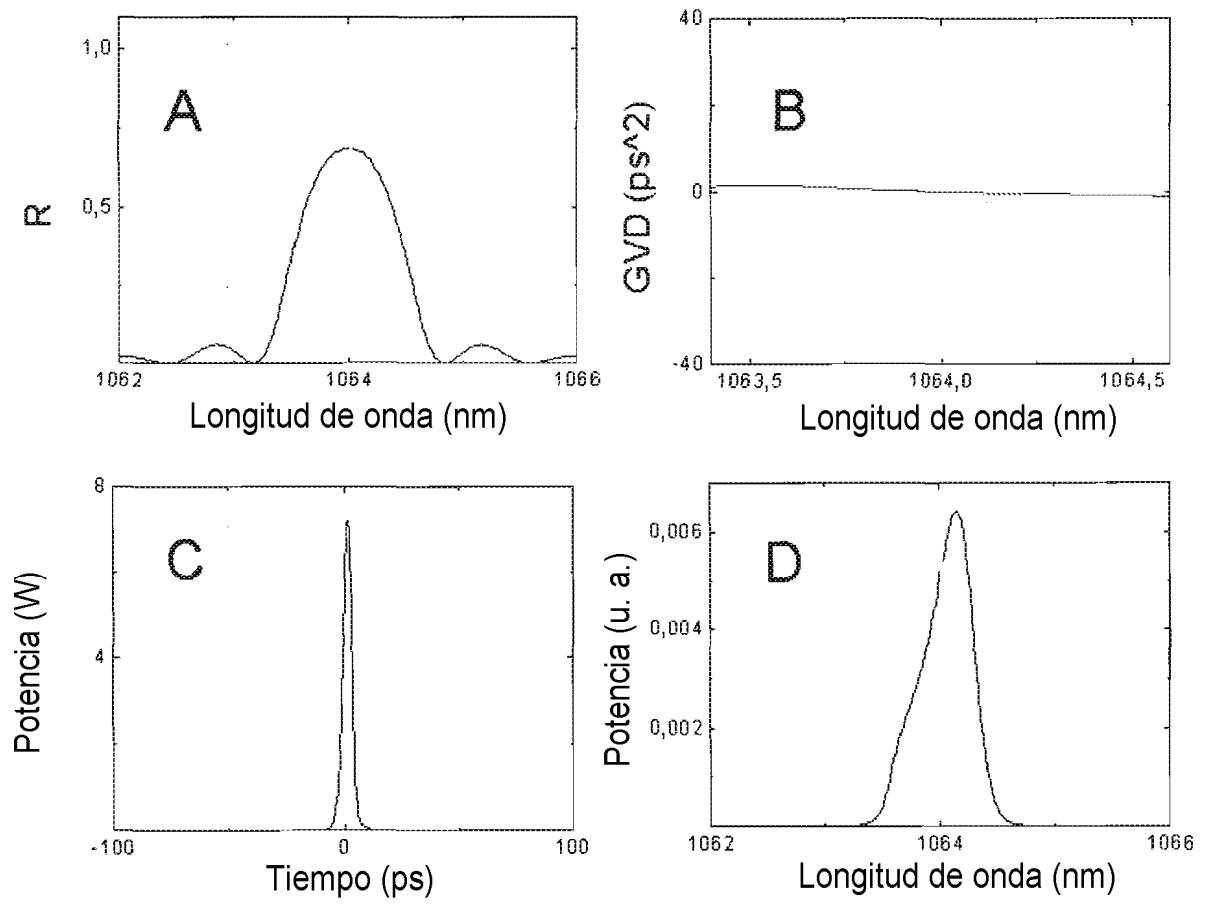


Figura 7

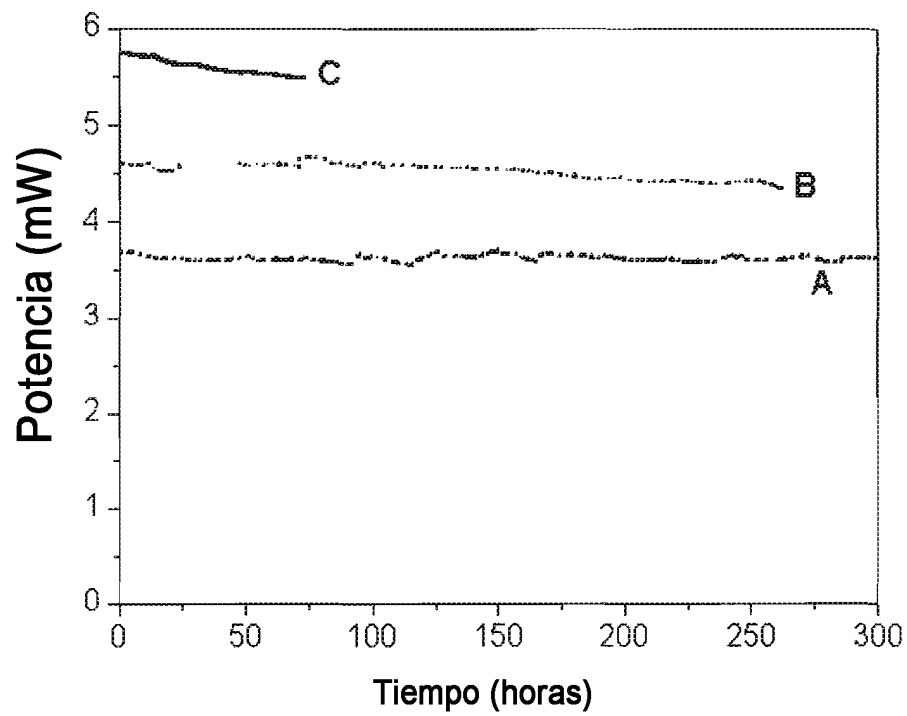


Figura 8

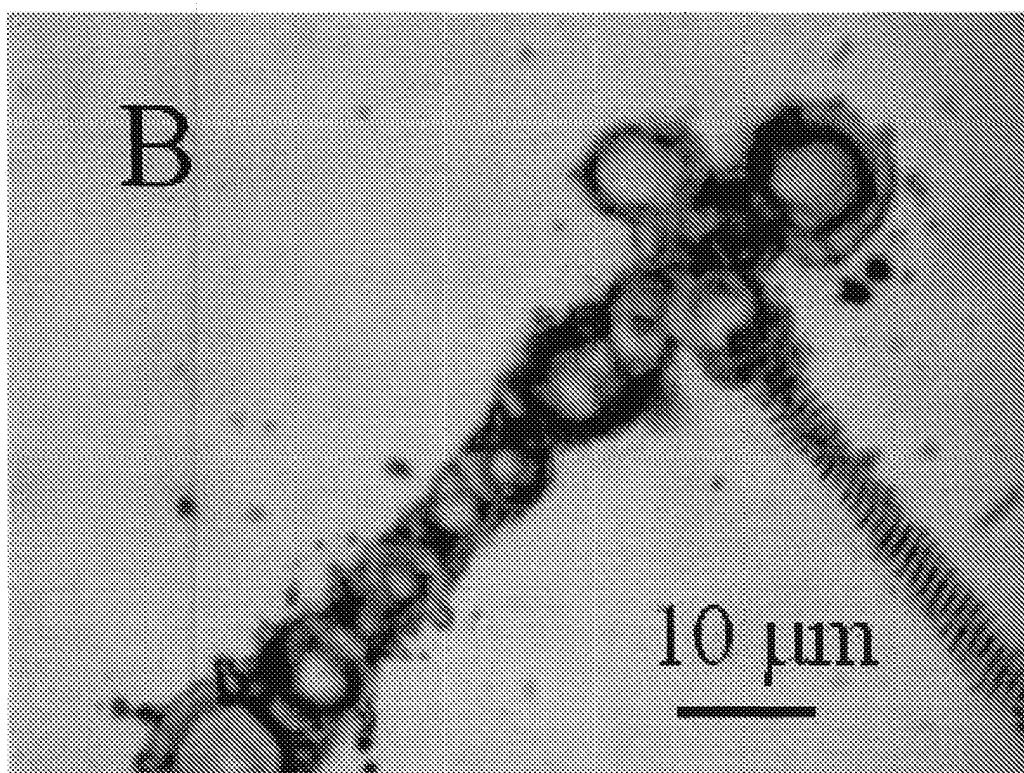
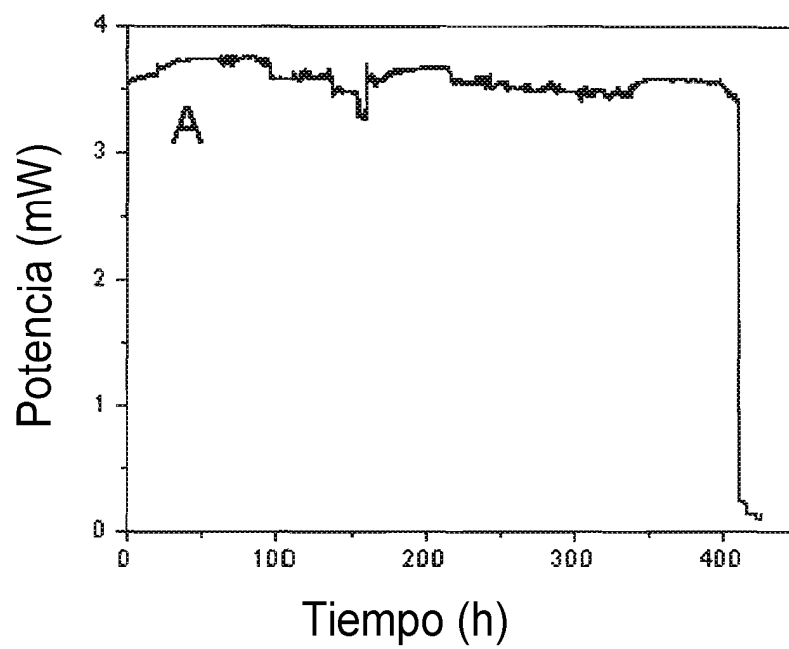


Figura 9

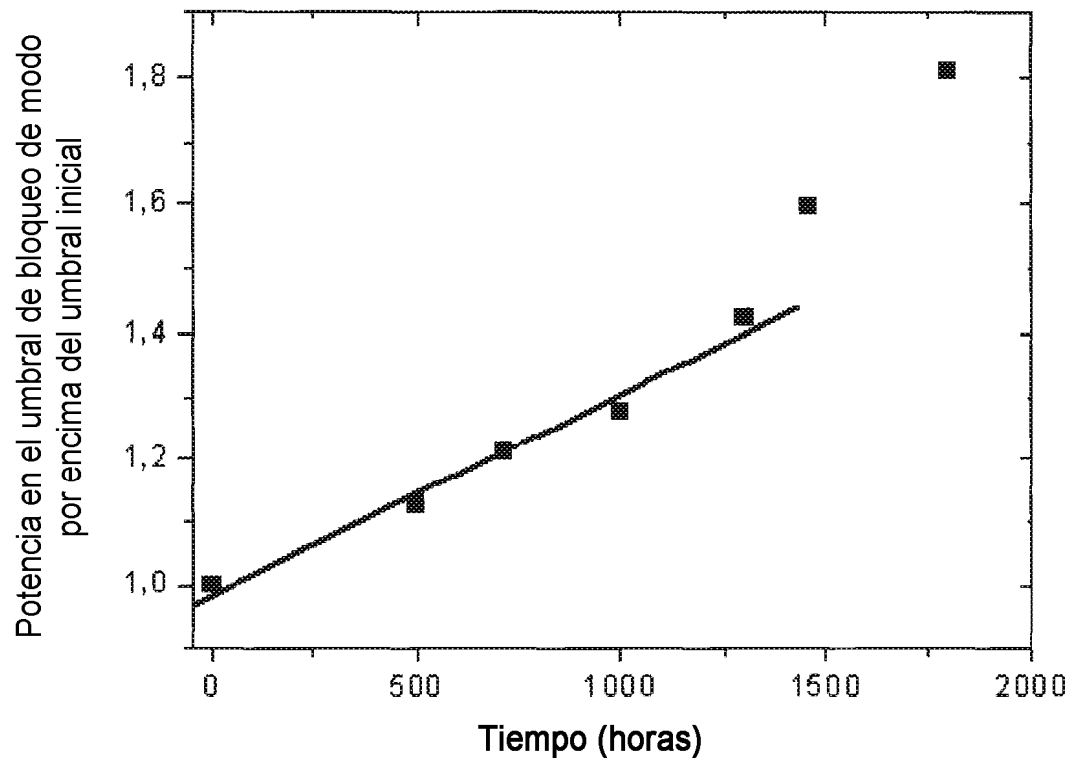


Figura 10

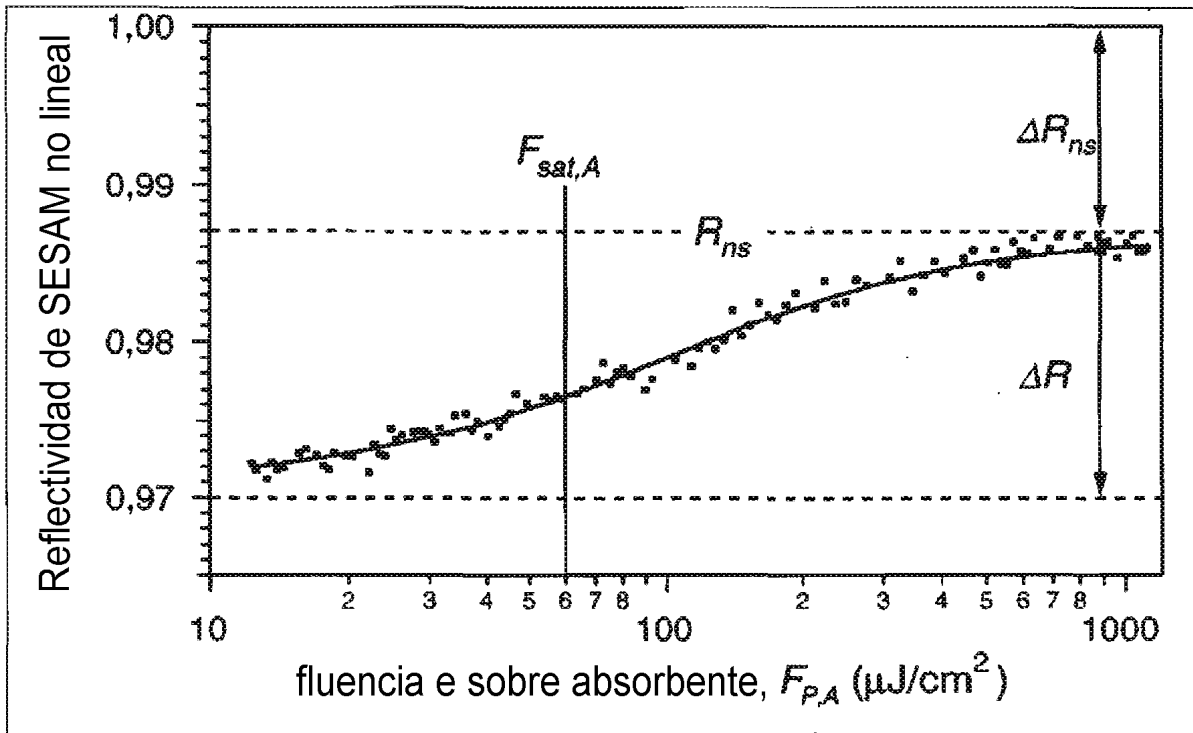


Figura 11

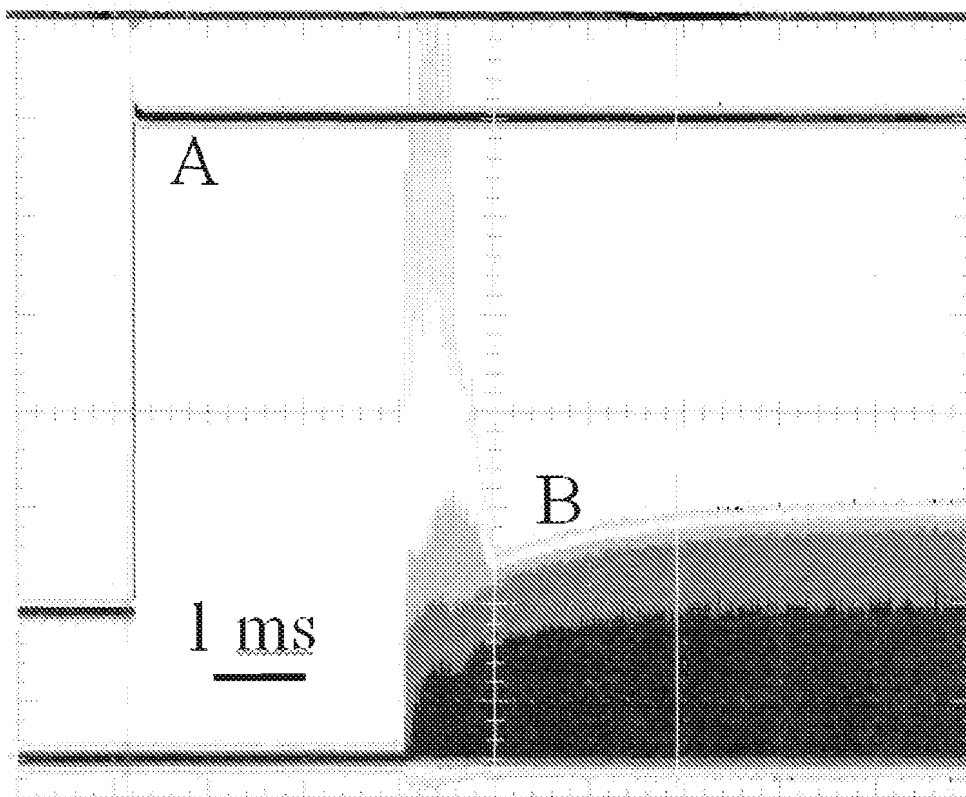


Figura 12

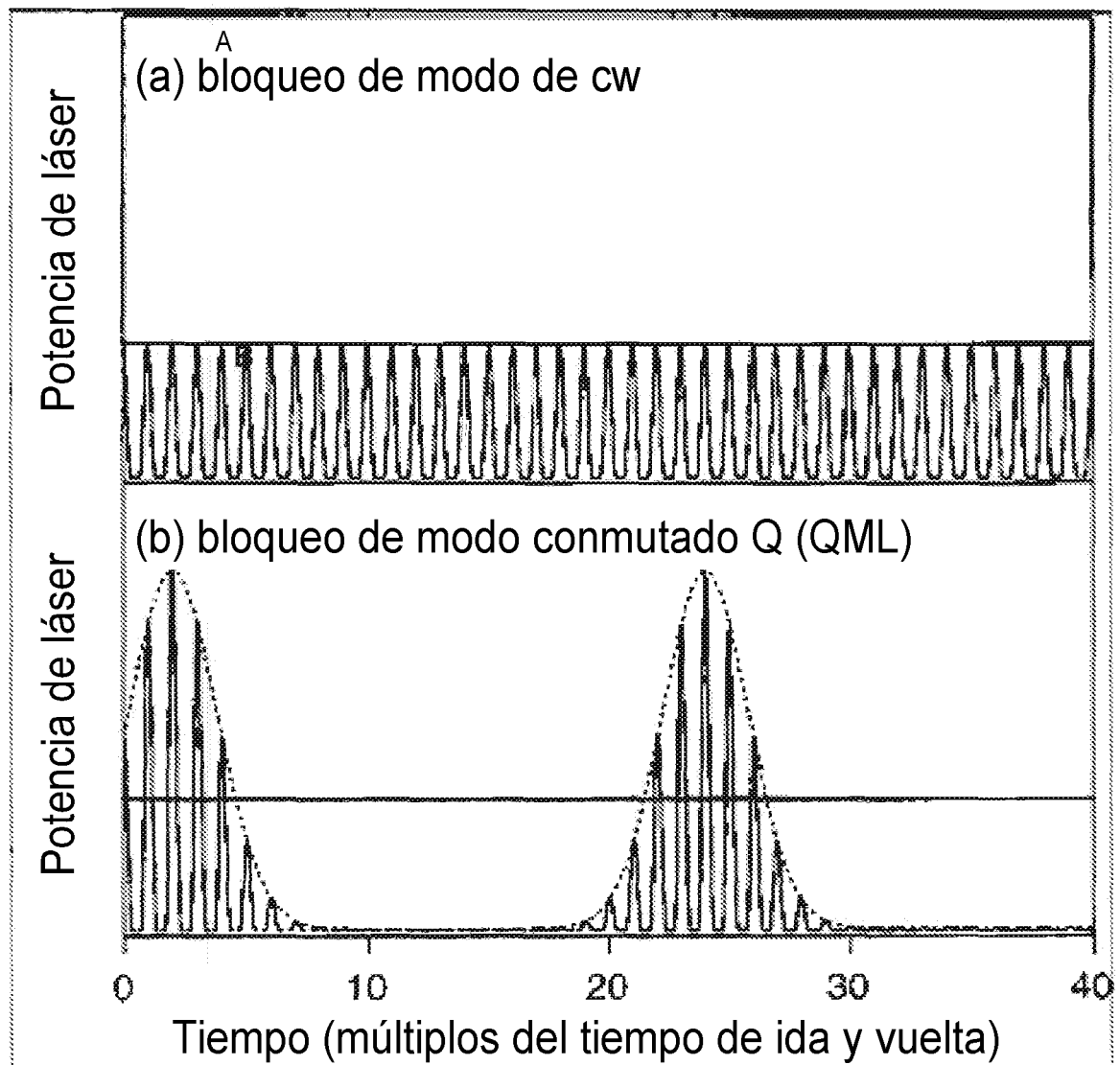


Figura 13

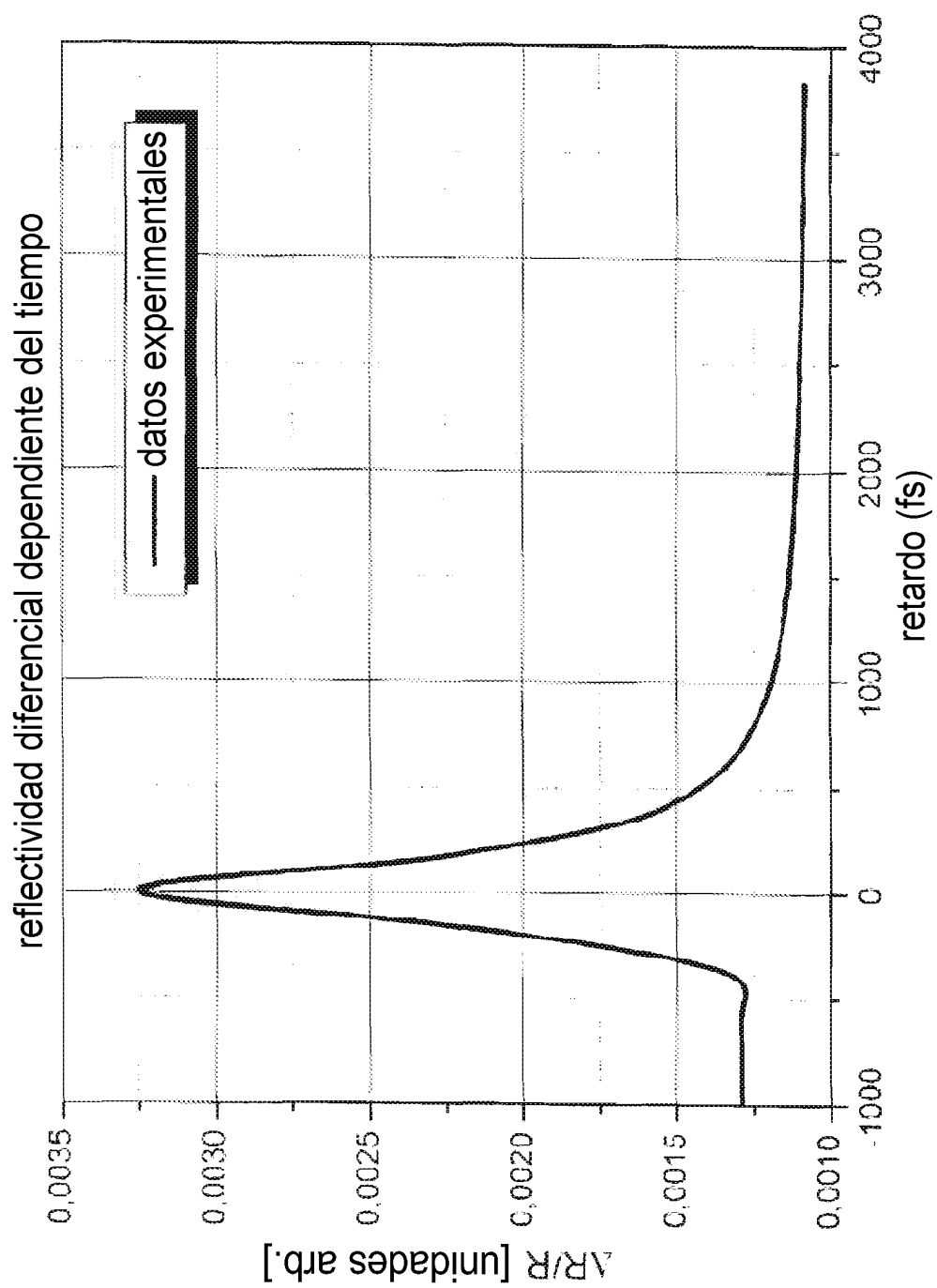


Figura 14

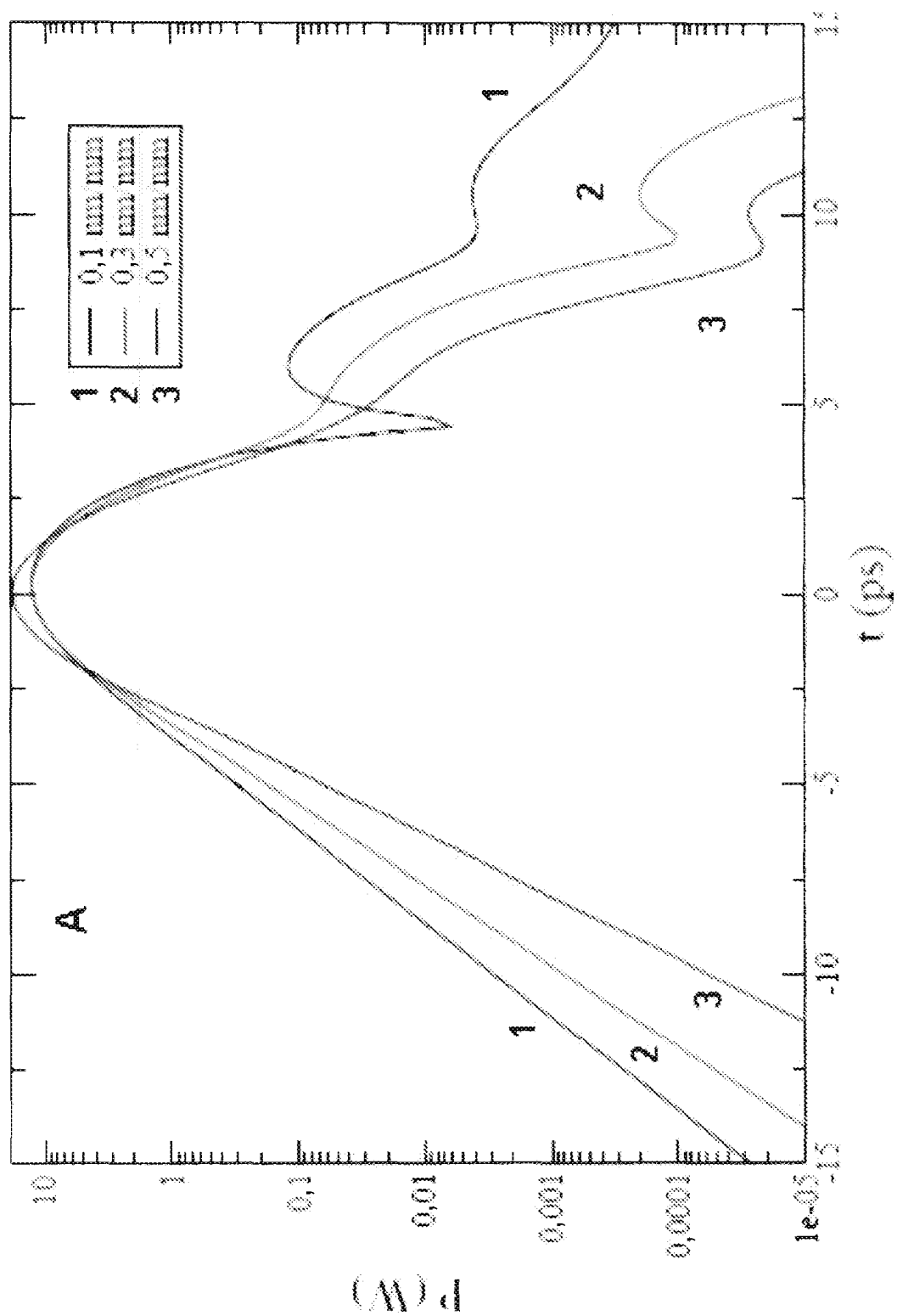


Figura 14B

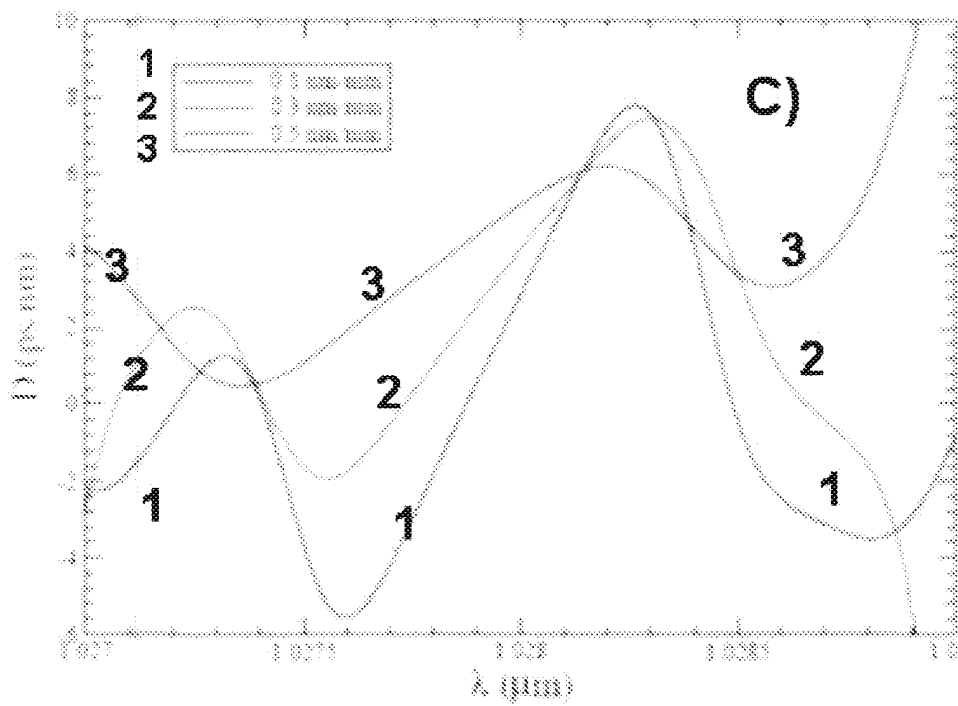
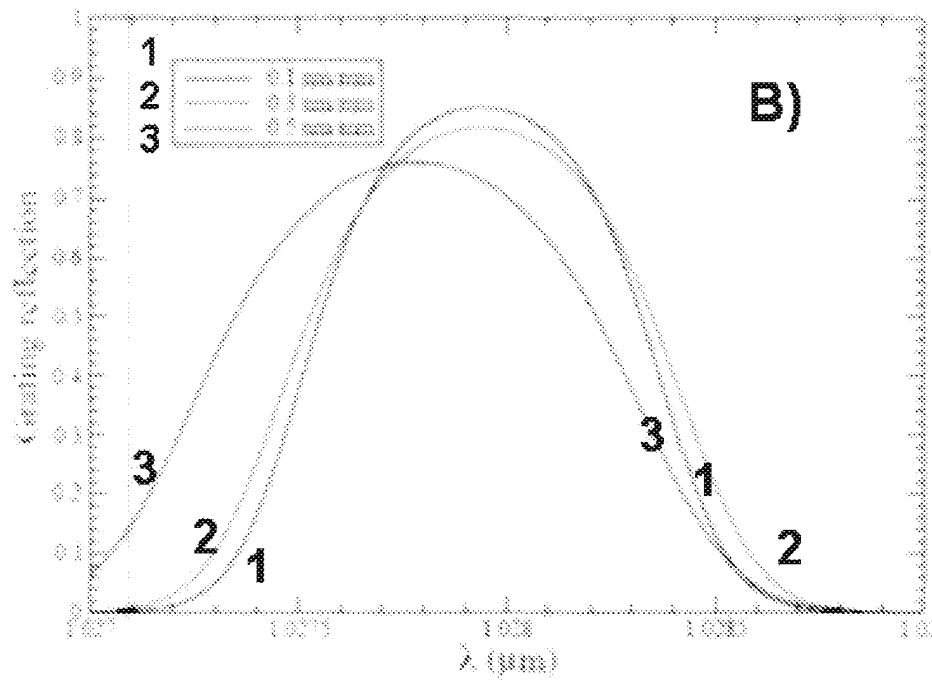


Figura 14C