

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 673 675**

51 Int. Cl.:

**H01S 3/00** (2006.01)

**G02F 1/39** (2006.01)

**G02F 1/37** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **19.03.2015 E 15159873 (7)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **11.04.2018 EP 2924500**

54 Título: **Método para generación de pulsos luminosos de femtosegundo, y fuente láser de los mismos**

30 Prioridad:

**25.03.2014 LT 2014503**

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

**25.06.2018**

73 Titular/es:

**UAB "EKSPLA" (100.0%)  
Savanoriu pr. 237  
02300 Vilnius, LT**

72 Inventor/es:

**RUSTEIKA, NERIJUS;  
DANILEVICIUS, ROKAS;  
ZAUKEVICIUS, AUDRIUS y  
MICHAILOVAS, ANDREJUS**

74 Agente/Representante:

**CAMACHO PINA, Piedad**

**ES 2 673 675 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**

Método para generación de pulsos luminosos de femtosegundo, y fuente láser de los mismos

Campo técnico al que se refiere la invención

5 **[0001]** Esta invención se refiere a láseres, particularmente a láseres ultrarrápidos, y está destinada a obtener pulsos luminosos de femtosegundos. Más específicamente, esta invención se refiere a métodos y fuentes de láser para la generación de pulsos luminosos ultracortos con duraciones menores que 100fs y energías de hasta cien milijulios.

10 **[0002]** La presente invención se puede usar para la realización de sistemas compactos y rentables de amplificación óptica paramétrica de pulsos comprimidos por modulación de frecuencia (chirped, en adelante "gorjeados") (OPCPA) que presentan radiación de salida requerida para investigación científica, medicina e industria líderes en el mundo.

Indicación de la Técnica Anterior

15 **[0003]** En aplicaciones médicas, tales como microoperaciones, los pulsos de femtosegundo (fs) tienen ventajas sobre pulsos más largos, debido a que no tienen un impacto destructivo sobre los tejidos circundantes. En micro fabricación, los pulsos de femtosegundos aseguran una mejor precisión de fabricación casi sin afectar las áreas adyacentes y logran una mayor velocidad de procesamiento, que es muy importante en la industria. Los pulsos con una duración que no excede los 100fs y potencia máxima de más de varias decenas de gigavatios abren nuevas posibilidades en la ciencia.

20 **[0004]** Hay fuentes conocidas de pulsos luminosos de femtosegundos que comprenden un oscilador basado en medio activo titanio-zafiro (Ti: S) de banda ancha seguido de al menos un amplificador de potencia multipaso (como, por ejemplo, se presenta en P. Kalashnikov et al., "Characterization of a nonlinear filter for the front-end of a high contrast double-CPA Ti:sapphire laser ", Opt. Express 12, 5088-5097 (2004)), o un amplificador de pulso gorjeado (documento US5720894 (Perry et al.)). La radiación de banda ancha del medio activo Ti: S, que se extiende desde una región de longitudes de onda largas de luz visible hasta casi infrarrojo, asegura duración del pulso de unos pocos a pocas decenas de femtosegundos, o alternativamente ofrece posibilidades para sintonización de longitud de onda. La radiación electromagnética de 700 nm a 1000 nm tiene muchas ventajas en numerosas aplicaciones.

30 **[0005]** Un inconveniente de los osciladores y amplificadores Ti: S reside en el hecho de que son bombeados por una radiación de segundo armónico de otro láser de estado sólido o radiación del láser de argón. Además, es necesario un enfriamiento efectivo debido a los efectos térmicos que ocurren dentro del medio activo Ti: S. Las fuentes de láser basadas en Ti: S, especialmente los amplificadores, requieren equipos de estabilización mecánica y de temperatura asistidos por circuitos de retroalimentación electrónicos para asegurar la reproducibilidad de la energía de pulso de salida y la alta calidad del haz. Los láseres Ti: S son complejos y costosos, mientras que la conversión total de energía eléctrica a óptica es baja.

40 **[0006]** Una alternativa a los sistemas amplificadores de potencia oscilador maestro Ti (S) descritos (MOPA) son sistemas de amplificación paramétrica óptica. Aquí, un pulso de banda ancha de onda de señal se amplifica mediante un pulso de bombeo de banda estrecha dentro de un cristal no lineal de amplificación paramétrica óptica. En primer lugar, se evita el estrechamiento de ganancia, que es un inconveniente de los amplificadores cuánticos. En segundo lugar, la ganancia de paso único del cristal de amplificación paramétrica óptica puede exceder 103, mientras que tienen lugar efectos térmicos ya que la amplificación de la radiación se produce mediante conversión de frecuencia no lineal sin absorción. Para obtener pulsos de energía de mili-julios, se necesitan varias etapas de amplificación paramétrica, mientras que los pulsos tienen que dilatarse en el tiempo, es decir, gorjearse, antes de la amplificación. Esta es una técnica conocida de amplificación paramétrica óptica de pulsos gorjeados (OPCPA). En los sistemas OPCPA, los osciladores Ti: S también se utilizan ampliamente para asegurar una amplia banda espectral para el pulso inicial ultracorto de la onda de señal (semilla) que se formará (ver, US6775053 (Jovanovic et al.); RTZinkstok et al., "High-power parametric amplification of 11.8-fs laser pulses with carrier-envelope phase control", Opt. Lett. 30, 78-80 (2005); S. Witte et al., "Generation of few-cycle terawatt light pulses using optical parametric chirped pulse amplification", Opt. Express 14, 4903-4908 (2005); N. Ishii et al., "Multimillijoule chirped parametric amplification of few-cycle pulses ", Opt. Lett., 30, 567 - 569 (2005); S. Witte et al., "A source of 2 terawatt, 2.7 cycle laser pulses based on non-collinear optical parametric chirped pulse amplification", Opt. Express 14, 8168-8177 (2006)). Adicionalmente, se puede utilizar una parte de la radiación Ti: S para la sincronización de la fuente de pulso de bombeo, es decir, la sincronización del pulso de bombeo con el pulso de semilla [WO2006122709 (Ishii et al.); N.Ishii et al., "Seeding of an eleven femtosecond optical parametric chirped pulse amplifier and its Nd3+ picosecond pump laser from a single broadband Ti: sapphire oscillator ", Sel.Tops. en QE12, 173-180 (2006); J.Rothhardt et al., "Compact fiber amplifier pumped OPCPA system delivering Gigawatt peak power 35 fs pulses", Opt. Express 17, 24130-24136 (2009); A.Harth et al., "Two-color pumped OPCPA system emitting spectra spanning 1.5 octaves from VIS to NIR", Opt. Express 20, 3076-3081 (2012)].

60 **[0007]** Una de las tareas técnicas que deben resolverse en los sistemas OPCPA que emplean el oscilador Ti: S como fuente principal es: qué medio activo de una fuente de pulsos de bombeo tiene que seleccionarse y cómo se sincronizará

con dicho oscilador Ti: S. En principio, la sincronización pasiva (óptica), en la que una parte de la radiación del oscilador se utiliza para sembrar la fuente de pulsos de bombeo, asegura una pequeña fluctuación mutua entre la semilla y los pulsos de bombeo del sistema OPCPA. Esta es la única forma de lograr una alta reproducibilidad de pulsos amplificados de onda de señal. Sin embargo, los máximos de emisión estimulados de la mayoría de los medios activos de alta ganancia están lejos de un pico de la banda de luminiscencia Ti: S. Los medios activos dopados con Nd son buenos ejemplos de medios con alto coeficiente de ganancia, también son térmicamente y mecánicamente estables, y por lo tanto, pueden operar a altas tasas de repetición y en régimen de alta potencia. Nd: YAG y Nd: YVO<sub>4</sub> son medios activos particularmente adecuados para amplificadores de alta potencia, pero son poco compatibles con los osciladores Ti: S: la radiación Ti: S tiene poca energía en el pico de amplificación (1064nm) de Nd: YAG y Nd: YVO<sub>4</sub>. Por lo tanto, la siembra directa de dicho medio dopado con Nd por osciladores Ti: S es altamente ineficiente y con frecuencia presenta un fondo luminoso de emisión espontánea.

**[0008]** En un sistema OPCPA presentado en el artículo de Ishii et al. (2006), un pulso de bombeo se amplifica en un amplificador Nd: YLF con una frecuencia posterior que se duplica en un generador de segundo armónico. Una línea espectral de 1053nm para medio activo Nd: YLF se obtiene directamente de la radiación de un oscilador Ti: S de banda ultraancha, que también es una fuente de pulso ultracorto de onda de señal inicial (semilla). Esta solución asegura la sincronización pasiva entre pulsos de señal y ondas de bombeo, sin embargo, es energéticamente ineficiente debido al bajo brillo de la radiación Ti: S a una longitud de onda de 1053 nm.

**[0009]** El documento WO2006122709 (Ishii et al.) presenta un sistema OPCPA que tiene una única fuente primaria de láser para obtener pulsos de semilla (onda de señal inicial) y radiación de onda de bombeo, que comprende un oscilador Ti: S con bloqueo de modo. Un pulso de siembra ultracorto coincide con un pulso de salida de dicho oscilador Ti: S. Un pulso destinado a ser un pulso de bombeo, que se amplifica en un amplificador de estado sólido basado en neodimio o iter-bium (seguido de un generador de segundo armónico), se obtiene al cambiar espectralmente el pulso de salida del oscilador Ti: S en una fibra de cristal fotónico (PCF) para que coincida con las líneas espectrales de los medios activos Nd o Yb. Las dificultades técnicas encontradas en el uso de fibras PCF comprenden requisitos estrictos para la orientación del haz láser y la estabilidad energética. El desplazamiento espectral causado por efectos no lineales ocurre solo en caso de que la radiación láser alcance un núcleo de fibra, que tiene solo unas pocas micras de diámetro. La radiación del oscilador que se acopla a la fibra de cristal fotónico y mantiene la dirección del haz láser estable a largo plazo no es una tarea fácil. Otro aspecto: el umbral de daño de la fibra PCF es solo ligeramente superior a la energía necesaria para causar no linealidades. Por lo tanto, es necesario garantizar una alta estabilidad energética para que no se produzcan efectos no lineales sin dañar la fibra.

**[0010]** Los sistemas de amplificación paramétrica óptica descritos anteriormente, que comprenden un oscilador Ti: S como única fuente láser primaria, incluso sin amplificadores Ti: S y elementos para ensanchamiento espectral (ya que la banda espectral Ti: S asegura duraciones de pulso de pulsos de señal de solo unos pocos femtosegundos), son complejos y costosos.

**[0011]** Mientras tanto, los sistemas que emplean láseres de estado sólido basados en otros medios activos de banda ancha, tales como Yb: KGW o Yb: KYW, así como los láseres de fibra Yb, Er, Yb/Er, Ho, Tm, se hacen populares. Principales ventajas de los medios activos dopados con Yb: su pico de absorción cae dentro de una región espectral de diodos láser; en segundo lugar, una amplia banda de emisión espontánea permite alcanzar una duración de pulso ultracorta. Una posibilidad de bombeo de diodos permite dimensiones considerablemente más pequeñas del sistema láser. Otras ventajas de los medios activos dopados con Yb son: bajo umbral de generación, sección transversal de altamente estimulada emisión y buena conductividad térmica que da como resultado una alta potencia media de radiación de salida. Esto hace que los láseres de estado sólido basados en Yb sean significativamente más simples, más fiables y rentables en comparación con los láseres Ti: S.

**[0012]** Los láseres de estado sólido Yb: KGW alcanzan duraciones de pulso en el rango de 50fs hasta unos pocos cientos de femtosegundos, mientras que una longitud de onda central está cerca del pico de amplificación de los medios activos dopados con Nd. La energía, que se alcanza con osciladores bloqueados en modo basados en medios activos cristalinos dopados con Yb, excede los 200 nJ, mientras que se alcanzan hasta varios cientos de microjulios con sistemas amplificadores osciladores. Para obtener una región de sintonización más amplia, o para duraciones de pulso de hasta 30fs, es necesario un ensanchamiento espectral. La solución más utilizada - generación continua (también llamada generación de luz blanca) en cristales voluminosos de estado sólido o fibras de cristal fotónico. Es importante señalar que las condiciones de generación continua (que se producen debido a varios fenómenos no lineales que se producen simultáneamente) en dichos materiales, así como las propiedades de la radiación continua generada son diferentes. Un umbral para la generación de continuum en fibras de PCF es mucho más bajo que en el cristal en masa, y, por lo tanto, incluso el oscilador puede proporcionar pulso con suficiente energía. El continuo generado en la salida de fibra de PCF, sin embargo, es apenas compresible hasta duraciones de pulso inferiores a 100fs (es decir, el desfase de las componentes espectrales no se puede compensar con compresores de pulsos dispersivos ordinarios). Por el contrario, los generadores continuos en masa, que aseguran un continuo altamente compresible, requieren energías superiores a las energías de dichos osciladores. Por lo tanto, el sistema OPCPA debe tener un amplificador adicional para la amplificación de la radiación de semilla de femtosegundo. Esto nuevamente aumenta la complejidad y el precio del sistema

**[0013]** En R. Antipenkov et al., "NOPA de banda ancha accionada por MOPA Yb:KGW de femtosegundo como interfaz para sistemas de pulso TW de pocos ciclos", Opt. Express 19, 3519-3524 (2011) se presenta un OPCPA que proporciona pulsos de aproximadamente 10fs a 800 nm, que emplea una única fuente láser primaria para obtener pulsos de semillas y bombas que comprenden un amplificador de potencia oscilador principal Yb: KGW:

- un pulso de semilla ultracorto (que es un pulso de la onda de señal inicial) se forma a partir de la radiación de dicho amplificador de potencia oscilador maestro Yb: KGW generando el continuo en placa de zafiro;
- un pulso de bombeo se forma por la duplicación de frecuencia de la radiación de dicho amplificador de potencia oscilador maestro Yb:KGW.

**[0014]** Debido a la posibilidad de bombear por diodo el medio activo Yb: KGW, el sistema de Antipenkov et al. es más estable y fiable que los sistemas OPCPA basados en Ti: S descritos anteriormente. Sin embargo, la eficiencia energética es baja ya que los parámetros de los amplificadores tienen que ser excesivos debido a las peculiaridades de los medios activos dopados con Yb. La energía de pulso de 20 mJ se alcanza después de dos etapas de amplificación paramétrica en el sistema OPCPA de Antipenkov et al. Una amplificación adicional de hasta milijulios no es posible cuando se utiliza el mismo MOPA.

**[0015]** En C. Agueraray et al., "Amplificación paramétrica y compresión a duración de pulso ultracorto de ondas lineales resonantes", Opt. Express 15, 5699-5710 (2007) se presenta otra OPCPA. El sistema que proporciona pulsos ultracortos a 870 nm emplea una única fuente láser primaria para obtener pulso de semilla y bombeo que comprende un oscilador Yb: KGW:

- un pulso de semilla (onda de señal inicial) se forma a partir de la radiación no amplificada de dicho oscilador Yb: KGW por ensanchamiento espectral (generación de luz blanca) en una fibra de cristal fotónico;
- se forma un pulso de bombeo amplificando la radiación de dicho oscilador Yb: KGW en amplificador de fibra dopada con Yb y mediante la duplicación de frecuencia adicional en un generador de segundo armónico.

**[0016]** En dicha solución, la atención se concentra en el control de la energía y las características temporales de la radiación del oscilador para lograr radiación de luz blanca en la salida de dicha fibra PCF con tales fases relativas entre componentes espectrales que esta radiación es compresible hasta aproximadamente 50fs con compresores dispersivos ordinarios. En la solución de Agueraray et al. con un control cuidadoso de los parámetros del oscilador, se obtuvieron pulsos ultracortos con una duración de 50fs, pero no menos. En segundo lugar, un amplificador de fibra, que se eligió para lograr mayores tasas de repetición de pulso, no permite obtener energías de pulso de bombeo que pueden alcanzarse en amplificadores basados en medios activos en masa de estado sólido, especialmente Nd: YVO<sub>4</sub>. Por ello, dicha solución no proporciona un método y una fuente de láser del mismo para obtener pulsos sub-30fs con energías dentro de mili-julios.

**[0017]** En S. Hädrich et al., " Amplificador paramétrico óptico degenerado que suministra pulsos sub 30 fs con una potencia de pico de 2GW", Opt. Express 16, 19812-19820 (2008) se presenta otra OPCPA. El Sistema que proporciona pulsos de 30 fs a 1030 nm también comprende el oscilador Yb:KGW:

- se obtiene un pulso de semilla ultracorto ampliando un espectro hasta 68nm de dicho oscilador en una fibra óptica monomodo;
- se obtiene un pulso de bombeo que amplifica la radiación de dicho oscilador en una fibra de cristal fotónico tipo varilla dopada con Yb especialmente diseñada que presenta la capacidad de alcanzar una energía de nivel 1mJ; además, se genera un segundo armónico.

**[0018]** La energía de pulso de 81 mJ se alcanza después de dos etapas de amplificación paramétrica a régimen degenerado. No se proporciona una amplificación adicional hasta milijulios. Además, la amplificación paramétrica óptica degenerada enfrenta varias limitaciones. En primer lugar, dado que las longitudes de onda de la onda de señal y de la onda inactiva coinciden, la sintonización de la longitud de onda de la radiación de salida solo es posible en la medida en que lo permita la banda espectral de radiación de bombeo. En segundo lugar, la radiación de la onda inactiva generalmente posee baja calidad de haz porque refleja energía y fluctuaciones de fase de la radiación de bombeo. Esto deterioraría todo el haz de salida.

**[0019]** Una alternativa a los osciladores con componentes de espacio libre: fuentes de láser de fibra. Los láseres de fibra basados en fibras ópticas monomodo presentan una alta calidad de haz. También, las fibras tienen una alta relación superficie-a-volumen, por lo tanto, se puede lograr una refrigeración eficiente. Esto permite el funcionamiento a altas potencias y a altas tasas de repetición. Otras ventajas de las fuentes de láser de fibra son: resistencia a factores ambientales (cambios en la temperatura o vibraciones mecánicas), transporte fácil de radiación, facilidad para ensamblar un sistema. Además, un pico de emisión estimulada de iones Yb incorporados en una matriz de vidrio de la fibra óptica, que es aproximadamente 1030 nm, está cerca de la línea de amplificación (1064 nm) de medios activos Nd: YAG y Nd:

YVO<sub>4</sub>, mientras que la banda de luminiscencia abarca hasta 1100nm en el lado de longitudes de onda largas. Como resultado, la radiación de salida de un oscilador láser de fibra basado en Yb o un oscilador-amplificador es adecuada para la siembra de amplificadores Nd.

5 **[0020]** US8023538 (Marcinkevicius et al.) presenta varias configuraciones de sistemas OPCPA que comprenden fuentes láser primarias basadas en osciladores de fibra. Los ejemplos dados describen la utilización de osciladores de fibra de femtosegundo, principalmente Er y Tm, y subsiguientemente amplificadores basados en Yb enfriados criogénicamente. La duración de los pulsos paraméricamente amplificados a la salida del sistema OPCPA es de aproximadamente 10fs. Además, la alta calidad de haz está garantizada. Además, se menciona una posibilidad de etapas de acondicionamiento de radiación no lineal durante la señal inicial (semilla) y / y la formación de pulsos de bombeo, sin embargo, ejemplos prácticos de acondicionamiento de radiación de señal inicial están limitados solo a generación continua en fibras altamente no lineales.

15 **[0021]** En la solución de Marcinkevicius et al., tampoco se garantiza un rendimiento y fiabilidad de la fuente láser primaria. Principalmente, debido a que los osciladores de femtosegundos son más sensibles a los parámetros del sistema y a los impactos externos, en comparación con los osciladores de picosegundos. Además, el sistema OPCPA de Marcinkevicius et al. opera con los amplificadores de pulso de bombeo de banda ancha. No hay configuraciones con amplificadores de pulso de bombeo basados en Nd de banda estrecha. Además, hay una falta de ejemplos prácticos de cómo emplear el oscilador dopado con Yb en el sistema OPCPA con el objetivo de obtener pulsos de nivel de milijulios. Las condiciones para la generación continua en un material a granel de estado sólido (cristal) son deficientes.

25 **[0022]** En A. Fernandez et al., "Broadly tunable carrier envelope phase stable optical parametric amplifier pumped by a monolithic ytterbium fiber amplifier", Opt. Lett. 34, 2799-2801 (2009) se presenta otra fuente primaria de láser para el sistema OPCPA. Comprende un oscilador de fibra basado en Yb de femtosegundo que opera a 1040 nm. La formación de un pulso de semilla ultracorto para amplificación paramétrica comprende el ensanchamiento de pulso del pulso de salida del oscilador, seguido por la amplificación de potencia en una secuencia de amplificadores de fibra de hasta aproximadamente 9mJ de energía. Otra formación adicional del pulso de siembra incluye compresión de pulso, conversión de longitud de onda en un cristal de generación de segundo armónico, generación continua en placa de zafiro y estabilización de fase de envoltura de portadora (fase óptica bajo envoltura de pulso) en cristales de OPA. Se afirma que, con el uso de dicha fuente primaria de láser, se puede implementar fácilmente un sistema OPCPA con sincronización pasiva de pulsos de bombeo y de semilla, porque la radiación del oscilador de fibra dopada con Yb es adecuada para la siembra de amplificadores Nd.

35 **[0023]** En la solución de Fernández et al. un sistema de formación y amplificación de todas las fibras del pulso de semilla de banda ancha se compone de estos elementos: 480 metros de fibra óptica monomodo destinados a ensanchar un pulso hasta 350ps; 1,5 m de fibra monomodo altamente dopada con Yb y 3 m de fibra de doble capa con área de modo amplio destinada a amplificar; también, algunos componentes adicionales tales como moduladores acústico-ópticos de fibra para la reducción de fondo de emisión espontánea y adaptadores de tamaño de modo. El sistema de fibra multicomponente descrito es necesario para la amplificación del pulso de femtosegundos hasta unos pocos microjulios para superar el umbral de generación continua en zafiro en masa. Pero es complejo y altamente ineficiente.

45 **[0024]** La técnica anterior más cercana de esta invención es la solución de Harth et al., "Two-color pumped OPCPA system emitting spectra spanning 1.5 octaves from VIS to NIR", Opt. Express 20, 3076-3081 (2012). El sistema OPCPA presentado en el artículo de Harth et al. (2012) comprende una única fuente láser primaria que es un oscilador Ti: S que proporciona radiación ultracorta que se divide en radiación de un brazo de semilla y radiación del brazo de bombeo. Además, están presentes dos etapas de amplificación paramétrica óptica no colineal (OPA) con una generación de luz blanca entre ellas. La primera etapa de OPA sirve como un amplificador para aumentar la energía de pulsos de dicha radiación del brazo de semilla hasta la energía necesaria para superar el umbral de generación continua en un material cristalino en masa (es decir, en la placa BaF<sub>2</sub>). De esta forma, se forma un pulso de semilla sub-5fs, sin un uso de amplificador cuántico en el brazo de semilla, que adicionalmente se amplifica paraméricamente en dicha segunda etapa de OPA. Dicha radiación del brazo de bombeo se amplifica en el amplificador multidisco regenerativo Yb: YAG, y luego se generan armónicos segundo y tercero, que están destinados a ser pulsos de bombeo para dichas etapas primera y OPA, respectivamente. Yb: YAG es un medio activo de banda ancha que se superpone bien a la banda de luminiscencia del medio activo Ti: S. Por lo tanto, una parte de la radiación separada de la radiación de Ti: S es adecuada para sembrar el amplificador Yb: YAG.

55 **[0025]** Sin embargo, condiciones particulares tales como esquemas de bombeo de alto brillo y geometría de enfriamiento efectiva se deben aplicar al medio activo Yb: YAG, que presenta una estructura cuántica de casi tres niveles, para evitar generación de radiación de superfluorescencia y / o emisión espontánea amplificada y con el fin de garantizar reproducibilidad de características de salida y alta calidad del haz. La arquitectura multidisco de discos delgados del amplificador Yb: YAG en la solución de Harth et al. es sofisticada y requiere una tecnología de fabricación precisa que aumenta el precio del amplificador. Hay pocos fabricantes de módulos multidisco de medios activos. Además, el frontal basado en Ti: S del sistema requiere equipos de temperatura y estabilización mecánica asistidos por circuitos de retroalimentación electrónicos para asegurar la reproducibilidad de la energía de pulso de salida y la alta calidad del haz. Finalmente, debido a las diferentes longitudes de onda de los pulsos de bombeo en dichas dos etapas de OPA, la energía

del pulso de la onda de señal amplificada, la primera etapa de OPA no se realiza en la segunda etapa de OPA. Por lo tanto, además de los inconvenientes relacionados con la utilización del oscilador Ti: S y el amplificador Yb: YAG, la solución de Harth et al. no proporciona una configuración del sistema OPCPA para obtener pulsos sub-30fs de milijulios de energía en la región espectral NIR.

5

Problema técnico a resolver

**[0026]** El objetivo de esta invención es simplificar la complejidad de un método y una fuente de láser del mismo para la generación de pulsos luminosos de femtosegundos con duraciones menores que 100fs, preferiblemente de 5fs a 30fs, y potencias de pico que exceden 30GW. También es un objetivo de esta invención proporcionar un sistema OPCPA que presente una configuración simplificada, compuesta de componentes ópticos de estado sólido y fibra, y que garantice una alta estabilidad y una eficiencia energética general.

10

Divulgación de la invención

15

**[0027]** Esto se consigue mediante el método para la generación de pulsos luminosos de femtosegundos, y la fuente de láser de los mismos según las reivindicaciones 1-15.

Ventajas de la invención

20

**[0028]** Una característica distintiva y una ventaja del método de esta invención es que en la etapa inicial se genera una radiación de banda relativamente estrecha, cuyo ancho de banda corresponde a una duración de pocos picosegundos de pulso de transformación limitada. En cambio, finalmente, se generan pulsos de femtosegundos.

25

**[0029]** Otra característica distintiva del método de esta invención es que dicho ensanchamiento espectral de la radiación inicial se realiza justo hasta 20 nm de ancho de banda solamente. Esto no requiere alta energía de pulsos iniciales o elementos ópticos sofisticados como fibras de cristal fotónico.

30

**[0030]** De acuerdo con el método de esta invención, los pulsos luminosos de femtosegundos se generan en dos o tres etapas (en un caso general, pueden estar presentes más etapas) de amplificación paramétrica óptica con generación de luz blanca implementada entre dichas primera y segunda etapas de amplificación óptica paramétrica. Dicha primera etapa de amplificación paramétrica óptica sirve como una etapa de preparación de radiación necesaria para la generación de luz blanca. Solo una radiación de banda estrecha debe ser amplificada en un amplificador cuántico. En todas las etapas de amplificación paramétrica óptica, los pulsos de radiación de bombeo y de semilla están ópticamente sincronizados ya que se originan a partir de la radiación de una única fuente primaria de láser.

35

**[0031]** Otra importante característica distintiva del método y fuente de láser de esta invención es: los pulsos de bombeo para la primera y la tercera etapa de OPA son de banda estrecha (<1nm), ya que se obtienen a partir de radiación amplificada en el amplificador cuántico basado en Nd, que en realidad puede comprender una secuencia de amplificadores Nd; mientras que los pulsos de bombeo para la segunda etapa de OPA tienen un ancho de banda de hasta 20 nm, ya que se obtienen a partir de una parte de la radiación de onda de señal amplificada en la primera etapa de OPA.

40

**[0032]** Otro aspecto de la presente invención es que, en todas las etapas, se lleva a cabo una amplificación de pulso gorjeado paramétrico no colineal. Una interacción no colineal asegura una amplia banda de amplificación paramétrica. Mientras el pulso está gorjeando, por lo tanto, el pulso ensanchándose en el tiempo, asegura conversión de energía eficiente de la onda de bombeo en la onda de señal. Antes de la primera etapa de la amplificación paramétrica óptica, los pulsos de radiación de la semilla se gorjean como consecuencia de la modulación de la fase propia mientras se logra el ensanchamiento espectral en una fibra óptica monomodo. Alternativamente, pulsos de radiación de semilla pueden gorjearse en elementos ópticos dispersivos suplementarios. Antes de la segunda etapa de la amplificación paramétrica óptica, los pulsos de radiación de la semilla se pican debido a las propiedades dispersivas del generador de luz blanca. Los pulsos de radiación de semillas para la tercera etapa de amplificación paramétrica se ensanchan deliberadamente en extensores de pulso para lograr las duraciones de pulso deseadas y la ganancia paramétrica más alta.

45

50

**[0033]** Todavía otro aspecto y ventaja importante de la presente invención: las potencias máximas alcanzadas en la salida de la primera etapa de amplificación paramétrica óptica aseguran la generación de luz blanca en materiales en masa cristalinos. La fuente de láser para la generación de pulsos luminosos de femtosegundos según esta invención comprende una fuente de láser primaria de picosegundo de baja energía, por ejemplo, láser de fibra dopada con Yb, compatible con el amplificador cuántico de estado sólido basado en Nd, también un cristalino ordinario material en masa, como zafiro o placa YAG, para la generación de radiación de luz blanca, por lo tanto, es simple y fiable. La relación general entre los componentes de todo el sistema da como resultado una alta eficiencia energética. Además, la fuente de láser de esta invención tiene un costo relativamente bajo en comparación con los sistemas de láser conocidos que proporcionan características análogas de radiación de salida.

55

60

**[0034]** La fuente de láser par generación de pulsos luminosos de femtosegundos según esta invención comprende una fuente primaria de láser de picosegundo de baja energía, por ejemplo, láser de fibra dopado con Yb, compatible con el

65

amplificador cuántico de estado sólido en base a Nd, también un material ordinario cristalino en masa, como zafiro o placa de YAG, para generación de radiación de luz blanca, por ello es simple y fiable. La relación general entre componentes del sistema completo resulta en eficiencia de alta potencia. Además, la fuente de láser de esta invención tiene un coste relativamente bajo si se compara con los sistemas láser conocidos que proporcionan características análogas de radiación de salida.

**[0035]** Para resumir, el método para la generación de pulsos luminosos de femtosegundos de esta invención permite la generación de pulsos con duraciones desde 30fs hasta 5fs en el rango espectral cercano al infrarrojo. La fuente de láser de pulsos luminosos de femtosegundos es más simple, más fiable y tiene un costo menor, en comparación con las fuentes de láser conocidas de la técnica anterior. Un esquema óptico híbrido, que comprende componentes de fibra óptica y de estado sólido, asegura una alta eficiencia general del sistema, energía de pulso y reproducibilidad de la duración, también, buena calidad del haz. El sistema láser de esta invención que consiste en tres etapas de amplificación paramétrica óptica genera pulsos de salida de femtosegundos a nivel multimilijoule. Es una buena alternativa a los sistemas láser Ti: S ampliamente utilizados. El sistema de láser de esta invención que consiste en dos etapas de amplificación paramétrica óptica genera pulsos de femtosegundos con energías de hasta decenas de microjulios, lo que es una alternativa para los sistemas basados en Yb: KGW.

Breve descripción de los dibujos

**[0036]** La invención se explica con mayor detalle en los siguientes dibujos, en los que:

La figura 1 es un diagrama de bloques funcional que ilustra un principio de un método de esta invención.

La figura 2 es un diagrama de bloques de una fuente de láser de esta invención con solo componentes principales mostrados necesarios para llevar a cabo el método de la figura 1.

La figura 3 es un diagrama de bloques de una realización preferible de esta invención.

Descripción detallada de las realizaciones de la invención

**[0037]** El método de esta invención para la generación de pulsos luminosos de femtosegundos es generalmente una generación de una radiación láser inicial ultracorta y su amplificación paramétrica óptica, mientras que el pulso de bombeo también se origina a partir de la misma fuente de radiación láser ultracorta inicial. Dicha amplificación paramétrica aumenta la energía del pulso y también acorta el pulso. El procedimiento comprende los siguientes pasos principales (Fig.1):

- Generación de un pulso de picosegundo;
- formación de pulsos de semilla y de bombeo;
- al menos dos etapas de amplificaciones paramétricas ópticas (OPA), en las que ocurre la amplificación de pulsos gorjeados, es decir, los pulsos de semilla se estiran en el tiempo antes de la amplificación paramétrica.

**[0038]** Más específicamente, la formación de un pulso de semilla para una segunda etapa de OPA comprende la preparación de radiación para la generación de luz blanca (WL) en un generador de luz blanca y la propia generación de WL. Dicha preparación de radiación para la generación de WL comprende el estiramiento simultáneo del pulso y el ensanchamiento espectral del pulso de picosegundo inicial, también la amplificación y una consiguiente compresión del pulso, mientras que dicha amplificación se realiza en una primera etapa de OPA.

**[0039]** Una fuente de láser (figura 2) que lleva a cabo el método de esta invención es un sistema OPCPA, en el que los pulsos de semilla y de bombeo en cada etapa de amplificación paramétrica óptica satisfacen las condiciones de coincidencia de fase no colineal, que comprende principalmente: una única fuente láser primaria 1 de radiación ultracorta, amplificador cuántico 2 de banda estrecha (ancho de banda <1nm) 2 y dos o más cristales OPA 3, 4, 5; dicho amplificador cuántico 2 comprende al menos un amplificador regenerativo; un generador de luz blanca 6, preferiblemente cristalino, situado entre el primer cristal OPA 3 y el segundo cristal OPA 4. Una radiación de banda estrecha de un brazo de bombeo originada desde dicha fuente primaria de láser 1 se amplifica regenerativamente y después de acondicionamiento adicional da como resultado pulsos de bombeo 7, 8. Mientras tanto, una radiación de banda ancha de un brazo de semilla originado a partir de dicha fuente de láser primario 1 se amplifica sin amplificación regenerativa. Los pulsos de la radiación 9 preacondicionada se amplifican paramétricamente en el primer cristal OPA 3. Los pulsos de radiación 10 de bombeo para la segunda etapa OPA tienen un ancho de banda de hasta 20 nm, ya que se obtienen de la radiación de onda de señal amplificada en la primera etapa OPA y transportan energía que no se empleó para la generación de radiación de luz blanca en dicho generador de luz blanca 6.

**[0040]** En la figura 3, se muestra un diagrama de bloques detallado de una configuración preferible de la fuente de láser de esta invención, en la que la fuente comprende tres etapas de amplificación paramétrica óptica no colineal y en cada una de dichas etapas de amplificación paramétrica se amplifican pulsos gorjeados de la onda de señal. La radiación ultracorta 11 de la fuente láser primaria 1, caracterizada por una longitud de onda central  $\lambda_0$  y una anchura espectral  $\Delta\lambda_0$ , se divide con un divisor de potencia 12 en dos partes: radiación 13 de un brazo de semilla y radiación 14 de un brazo de

bombeo. Una relación entre las energías de pulso de dichas radiaciones 13, 14 puede ser desde 10:90 hasta 90:10. La longitud de onda central  $\lambda_0$  de dicha radiación ultracorta 11 de la fuente láser primaria 1 se selecciona para solapar un pico de emisión estimulado de un medio activo de estado sólido, preferiblemente uno de cristales activos dopados con Nd, mientras que el ancho espectral  $\Delta\lambda_0$  corresponde a un pulso de transformada limitada con duración de unos pocos picosegundos. Un oscilador de fibra basado en Yb bloqueado en modo es particularmente adecuado para los objetivos de esta invención, ya que presenta una amplia banda de luminiscencia y solapa los picos de amplificación de muchos medios activos dopados con Nd (Nd: YAG, Nd: YVO<sub>4</sub>, Nd: YLF, etc.) En el régimen de modo bloqueado, los láseres de fibra Yb irradian pulsos de transformación limitada con una duración de 1ps a 5ps. La energía de salida de los osciladores de fibra Yb no supera los 100 pJ, mientras que los MOPA de Yb proporcionan hasta 10 nJ

**[0041]** Además, dicha radiación 13 del soporte del brazo de semilla se inicia a través del sistema 15 de acondicionamiento de radiación designado para gorjear el pulso. Si es necesario, incluye un preamplificador 16 que aumenta la energía del pulso hasta las energías requeridas para la modulación de fase propia (por lo tanto, ensanchamiento del espectro y estiramiento del pulso) en un elemento óptico 17 dispersante no lineal. Un pulso expandido espectralmente y temporalmente estirado, cuyo ancho de banda  $\Delta\lambda_1$  es aproximadamente (10÷20) nm, se dirige al primer cristal 3 de OPA como un pulso de radiación de semilla 9. Dichos elementos ópticos 16 y 17 también pueden estar basados en fibra. Por ejemplo, para un pulso de energía de pocos nJ de picosegundos en una salida del preamplificador 16, dicho ancho de banda de hasta 20 nm puede alcanzarse en una fibra óptica estándar monomodo con una longitud de diez a algunas decenas de metros. La modulación de la fase propia que surge debido a no linealidades de la fibra se manifiesta no solo como una ampliación del espectro de radiación sino también como un desfase de los componentes espectrales. Dicho desfase de los componentes espectrales también está influenciado por las propiedades dispersivas de los componentes de la fibra. El pulso resultante de la radiación de semilla 9 se gorjea y dura en el tiempo de 10ps a 20ps. Otra característica importante de dicho pulso gorjeado de radiación de semilla 9 a la salida de dicho sistema de acondicionamiento 15 - debido a las propiedades no lineales y dispersivas del perfil de gorjeo de fibra óptica es tal que el desfase de componentes espectrales puede cancelarse con compresores de pulso dispersivo ordinarios, por ejemplo, un par de prismas o rejillas.

**[0042]** De acuerdo con otra modificación de esta invención, dicho elemento óptico 17 dispersante no lineal es una combinación de una fibra óptica monomodo y una rejilla de Bragg gorjeada que permite un mayor gorjeado de pulsos, y, por lo tanto, un tiempo de estiramiento de hasta 100ps.

**[0043]** De acuerdo con aún otra modificación de esta invención, dicha radiación ultracorta 11 de la fuente primaria de láser 1 presenta desfase entre sus componentes espectrales, es decir, los pulsos ya están gorjeados. Se puede lograr con una configuración de la fuente primaria 1 que comprende un oscilador maestro de fibra sin una red de Bragg gorjeada para compensar la dispersión de los componentes de fibra dentro del resonador basado en fibra. En este caso, los pulsos de dicha radiación 13 del brazo de semilla ya están gorjeados y dicho ensanchamiento espectral hasta (10÷20) nm puede lograrse con otros parámetros de los elementos ópticos 16, 17 de dicho sistema de acondicionamiento 15. Aquí, pulsos de radiación 14 del brazo de bombeo también están gorjeados.

**[0044]** Simultáneamente, se realiza la formación de pulsos de bombeo para la primera y la tercera etapas de amplificación paramétrica óptica. En primer lugar, dicha radiación 14 del brazo de bombeo, separada de la radiación ultracorta inicial 1 con la ayuda de un divisor de potencia 12, se amplifica en dicho amplificador cuántico 2 compuesto por uno o varios amplificadores de estado sólido 18, 19 en base a medios activos dopados con ion Nd, en donde al menos uno de dichos amplificadores de estado sólido 18, 19 es regenerativo y, preferiblemente, se logra la amplificación de pulso gorjeado. La energía de pulso se eleva en 6 a 9 órdenes de magnitud en una secuencia de dichos amplificadores 18, 19. Debido a la banda estrecha de medios activos dopados con Nd y las distintas propiedades de los amplificadores regenerativos, el pulso amplificado tiene una duración de 10ps a 100ps (en un caso particular, se pueden alcanzar 5ps).

**[0045]** Además, se realiza duplicación de frecuencia en un cristal 20 de generación de segundo armónico. La radiación 21 de segundo armónico generada se divide en dos partes con la ayuda de un divisor de potencia 22. Una primera parte de dicha radiación con energía de pulso en el rango de algunos milijulios (de acuerdo con una configuración alternativa, unos pocos cientos de milijulios) a través de componentes ópticos suplementarios (óptica de desviación y una línea de retardo 23) se dirige al primer cristal OPA 3 como un pulso de radiación de bombeo 7. La otra parte 8 de dicha radiación de segundo armónico con energía de pulsos dentro del rango de decenas de milijulios está destinada a bombear la tercera etapa de amplificación paramétrica óptica.

**[0046]** En el primer cristal OPA 3, los pulsos de radiación de semilla 9 y de bombeo 7 se superponen en condiciones de tiempo y espacio satisfactorias de adaptación de fase no colineal. Una buena coincidencia entre la duración de pulsos de semilla y bombeo y su superposición temporal precisa no es crucial en la primera etapa de OPA. Es principalmente importante amplificar tal porción de espectro, un perfil de gorjeo y ancho de banda que permita la compresión de pulsos hasta (100÷200) fs. Con un pulso de unos cientos de milijulios de radiación de bombeo 7, es posible lograr pulsos de energía de (10÷100) mJ de radiación de onda de señal amplificada 24. Alternativamente, con bombeo de (145) mJ, la energía de dichos pulsos de radiación de onda de señal amplificada 24 alcanza (50÷300)  $\mu$ J. Esta energía es suficiente o incluso excesiva para la generación de luz blanca en el generador cristalino 6 de luz blanca, por ejemplo, placa de zafiro.

[0047] La primera etapa de amplificación paramétrica óptica finaliza con la compresión de dichos pulsos de radiación de onda de señal amplificada 24 en un compresor de pulso 25. Un ancho de banda es suficiente y una forma de perfil de gorjeo permite la compresión hasta (100÷200) fs con un par de prismas o rejillas seleccionados como dicho compresor de pulso 25. Además, se puede seleccionar una rejilla de Bragg de volumen. La energía de un pulso comprimido de radiación 26 en una salida de dicho compresor 25 está en el intervalo de unos pocos cientos de milijulios, mientras que una longitud de onda central  $\lambda_1$  es aproximadamente igual a la longitud de onda inicial  $\lambda_0$  de la fuente primaria de láser 1 de radiación 11.

[0048] Vale la pena mencionar que la primera etapa de la amplificación paramétrica óptica en el sistema de esta invención es similar, pero no igual, a un esquema tradicional conocido como NOPA, en el que la radiación con una longitud de onda inicial, v.g. 1064 nm, se amplifica paraméricamente con su segundo armónico, es decir, 532 nm de radiación. El cristal no lineal BBO es muy adecuado para estas longitudes de onda y cuenta con una amplia banda de amplificación paramétrica de hasta 300 nanómetros. Se conocen esquemas sin y con amplificadores de pulso de bombeo. En el esquema NOPA tradicional, la radiación de 1064 nm se propaga a través de un generador WL para formar una radiación de semilla de banda ancha que proporciona una libertad para el ajuste de la longitud de onda o la posibilidad de obtener pulsos sub-100fs. La primera etapa de OPA en el sistema de esta invención difiere de dicho esquema NOPA tradicional en estos aspectos: 1) el ancho de banda espectral  $\Delta\lambda_1$  de la radiación de semilla formada 9 es relativamente pequeño, significativamente más pequeño que la banda de amplificación paramétrica del cristal 3 de OPA; 2) la formación de dicho ancho de banda espectral  $\Delta\lambda_1$  de aproximadamente (10÷20) nm no requiere alta energía de radiación 13 a partir de la cual se forma dicha radiación de semilla 9; 3) se gorjean los pulsos de la radiación de semilla 9, en donde el desfase entre componentes espectrales surge automáticamente durante el ensanchamiento espectral en dicho sistema 15 de acondicionamiento de radiación o, alternativamente, se introduce deliberadamente, mientras que el perfil de gorjeado es tal que los pulsos son compresibles con un par de prismas o compresor de par de rejillas hasta (100÷500) fs o (100÷200) fs.

[0049] Para resumir, la primera etapa de amplificación paramétrica óptica en el sistema de esta invención es la preparación de la radiación 26 requerida para la generación de luz blanca en un material en masa cristalino. La principal ventaja de esta etapa es que los pulsos de la radiación de semilla 9 se generan en una secuencia de componentes ópticos totalmente de fibra basados en fibras ópticas estándar monomodo.

[0050] Además, tiene lugar una segunda etapa de amplificación paramétrica óptica. La radiación de luz blanca 27 que se usa para formar una radiación de semilla 28 para la segunda etapa de OPA se genera a partir de solo una pequeña parte de dicha radiación 26. Un divisor de potencia 29 se usa para separar una parte 30 que no excede del 5% en energía. Por lo tanto, la energía de dicha parte 30 de radiación (con pulsos que duran (100÷500) fs o (100÷200) fs en el tiempo) está en el rango de 0.5μJ a 4μJ. Esta radiación se enfoca dentro de un cristal 6 de generación de luz blanca, que preferiblemente es YAG o una placa de zafiro, donde se generan componentes espectrales adicionales como consecuencia de varios procesos no lineales simultáneos. También se pueden emplear otros cristales generadores de luz blanca conocidos. Un ancho de banda de unos pocos cientos de nanómetros de la radiación generada 27 corresponde a una duración inferior a 5fs de un pulso de transformada limitada, pero el desfase de las componentes espectrales da como resultado una duración de pulso en el rango de 100fs a 1ps. Los pulsos de dicha radiación 27 tienen energía de aproximadamente 10 nJ.

[0051] La parte principal 31 de la radiación 26 separada por dicho divisor de potencia 29 se usa para la formación de radiación de bombeo 10 para la segunda etapa de OPA. La duplicación de frecuencia de esta parte 31 de radiación que tiene una longitud de onda central casi igual a dicha longitud de onda inicial  $\lambda_0$  se realiza en un cristal de generación de segundo armónico 32. Por ejemplo, en un sistema de esta invención diseñado para tener un amplificador 2 basado en Nd: YAG, la longitud de onda inicial  $\lambda_0$  es de 1064 nm, y la radiación de segundo armónico generada es de 532 nm. Esta radiación a través de componentes ópticos suplementarios se dirige al segundo cristal 4 de OPA como radiación de bombeo 10.

[0052] En el segundo cristal 4 de OPA, dichos pulsos de radiación de semilla 28 y de bombeo 10 se superponen en condiciones de tiempo y espacio satisfactorias de coincidencia de fase no colineal. La superposición temporal precisa de pulsos de dichas radiaciones 28, 10 es muy importante en esta etapa. Esto influye en la duración del pulso de salida de todo el sistema OPCPA, e incluso su longitud de onda central. Por lo tanto, componentes ópticos adicionales tales como dilatadores de pulso y/o compresores 33, 34 y una línea de retardo variable 35 pueden estar presentes en la trayectoria de pulsos de radiación de semilla 28 y/o bombeo 10. Una relación entre las duraciones de pulsos de bombeo y de semilla y su coincidencia temporal determina qué componentes espectrales de la radiación 28 que se amplifica en el cristal 4 experimentan la ganancia paramétrica más alta. Como ambos pulsos de radiación de semilla 28 y bomba 10 tienen duraciones comparables en el rango de femtosegundos, cualquier cambio en sus duraciones y superposición mutua tiene un impacto significativo.

[0053] Según una realización particular de esta invención, dicho elemento óptico adicional 33 está ausente en un camino de pulsos de radiación de semilla 28, mientras que los pulsos de radiación de bombeo 10 se propagan a través de un dilatador de pulsos 34. Pulsos que tienen un ancho de banda de (10÷20) nm son fácilmente dilatados con dilatadores de

pulsos dispersivos ordinarios. En esta realización, la duración de los pulsos de bombeo aumenta para coincidir o exceder ligeramente la duración de los pulsos de semilla.

5 **[0054]** Según una realización particular alternativa de la presente invención, dicho elemento óptico adicional 34 está ausente en un camino de pulsos de radiación de bombeo 10, mientras que los pulsos de radiación de semilla 28 se propagan a través de un compresor de pulsos 33. Ya que los pulsos de radiación de semillas 28 están fuertemente gorjeados, pueden comprimirse reduciendo el desfase de los componentes espectrales. La duración del pulso de semilla de 10fs se puede lograr con un par de prismas comunes o un compresor de par de rejilla (más largo que una duración transformada limitada). No es necesario cancelar por completo la dispersión de alto orden originada en la generación de luz blanca y, por lo tanto, lograr una duración de pulso transformada limitada, ya que la amplificación paramétrica es razonable solo si la relación de duración de pulso de bombeo a semilla es inferior a 10. Además, la posibilidad de daño óptico se reduce cuando se trabaja con pulsos dilatados.

15 **[0055]** Según otras variaciones de la presente invención, aún son posibles diferentes combinaciones de elementos 33, 34: 1) los pulsos de radiación de semilla 28 así como los pulsos de radiación de bombeo 10 se dilatan en el tiempo; 2) los pulsos de radiación de semilla 28 se comprimen, mientras que los pulsos de radiación de bombeo 10 se dilatan. En la última configuración, pulsos gorjeados de la onda de señal inicial (semilla) se amplifican paraméricamente con pulsos de bombeo gorjeados, por lo tanto, las condiciones para la amplificación de diferentes componentes espectrales dependen de los perfiles de gorjeo y del desplazamiento temporal mutuo de dichos pulsos. Como resultado, una longitud de onda central  $\lambda_2$  de la radiación de señal amplificada 36, puede sintonizarse cambiando la longitud de una línea de retardo 35.

25 **[0056]** Al seleccionar una superposición óptima de los pulsos de radiación de semilla 28 y de bombeo 10, se pueden amplificar todos los componentes espectrales de la radiación de luz blanca generada que cae dentro de una banda de amplificación paramétrica no colineal del cristal 4 de OPA. El cristal BBO es particularmente adecuado para la amplificación paramétrica de la radiación a 1064 nm, cuando se bombea con 532 nm, ya que tiene un ancho de banda de amplificación paramétrica óptica no colineal de 300 nm. Esto significa que el ancho espectral de la radiación de onda de señal amplificada 36 correspondería a una duración de un pulso transformado limitado de menos de 10fs.

30 **[0057]** En caso de que la radiación de los pulsos de semilla 28 y de bombeo 10 no se superpongan óptimamente en el tiempo, no todos los componentes espectrales que caen dentro de la banda de amplificación 4 del cristal se amplifican paraméricamente y el ancho espectral resultante de la radiación de onda de señal 36 corresponde a duración  $(10\div 100)$  fs de un pulso transformado limitado.

35 **[0058]** En la fuente de láser de esta invención según la figura 3, en la que están presentes tres etapas de OPA, los pulsos de radiación de onda de señal 36 amplificados en el segundo cristal de OPA 4 no se comprimen antes de una etapa de amplificación paramétrica óptica posterior. La radiación 36 se gorjea, y por lo tanto, los pulsos tienen una duración más larga, en el rango de 100fs hasta 1ps o incluso más, que su duración transformada limitada. La energía se extiende de 1mJ a 10mJ.

40 **[0059]** La tercera etapa de la amplificación paramétrica óptica es similar a un esquema de amplificación de pulso gorjeado paramétrico óptico tradicional. La radiación de semilla 37 para la tercera etapa de OPA se forma a partir de la radiación de onda de señal 36 amplificada en el segundo cristal de OPA 4 dilatando pulsos en el tiempo en un dilatador de pulso 38. Un objetivo es para formar pulsos de semilla que tengan una duración comparable con la duración de pulso de radiación de bombeo 8. Como se dijo antes, para una amplificación paramétrica eficiente, los pulsos de bombeo no deben ser más largos que 10 veces más que los pulsos de semilla. En la configuración más óptima de esta invención, una relación de duración de pulso de bombeo a semilla está en el intervalo (142). En este caso y solapando pulsos en el tiempo (con la ayuda de una línea de retardo 39) de tal manera que el pulso de semilla esté recto bajo un pico de envolvente de pulso de bombeo, todas las componentes espectrales de la onda de señal experimentan ganancia paramétrica igual. Esto significa que una longitud de onda central de la radiación de onda de señal amplificada 40 coincide con la longitud de onda central de la radiación de semilla 37. También se conservan otras características espectrales: una relación entre las amplitudes espectrales y también el perfil de gorjeo. En el tercer cristal de OPA 5, la radiación de los pulsos de semilla 37 y de bombeo 8 se superponen en tiempo y espacio, satisfaciendo también las condiciones de coincidencia de fase no colineal.

55 **[0060]** Con pulsos de radiación de bombeo 8 que portan unas pocas decenas de milijulios, por ejemplo 50 mJ, de energía, los pulsos de radiación de onda de señal 40 amplificados en el tercer cristal no lineal 5 pueden ser de 2 a 20 milijulios en energía. Esta radiación 40 se dirige a un compresor de pulsos 41 donde se forman pulsos de salida de femtosegundos 42.

60 **[0061]** Las características de salida de todo el sistema dependen fuertemente del dilatador 38 de pulsos seleccionado y del compresor 41 de pulsos, también del ancho de banda espectral de radiación 36. Para resumir, los pulsos 42 de salida con: energía de  $\sim 1$ mJ y duración sub-30fs o, como alternativa, energía de  $\sim 1$ mJ y duración sintonizable en el rango de 30fs a 100fs y longitud de onda sintonizable en rango  $(650\div 1000)$  nm se pueden obtener en la configuración del sistema OPCPA que consta de tres etapas de amplificación paramétricas. Si en la segunda etapa de OPA, las duraciones de pulsos de bombeo y de semilla tienen una relación y superposición temporal que garantiza una amplificación eficiente de

5 todos los componentes espectrales que caen dentro de una amplia (~ 300nm) banda de amplificación del cristal 4 no lineal, y donde sofisticados elementos de dilatación y de compresión 38 , 41 de pulso son capaces de compensar la dispersión de alto orden de pulsos gorjeados, se pueden obtener pulsos de salida 42 de sub-10fs o incluso 5fs de duración y (145) mJ de energía con longitud de onda central a unos 800 nm. Un buen ejemplo de dicho elemento sofisticado de dilatación de pulsos es un dilatador de pulsos acústico-óptico mediante el cual se puede formar una forma deseada de perfil de gorjeo. Es posible cambiar un gorjeo que aparece en la generación de radiación de luz blanca y formar una forma deseada de perfil de gorjeo que es compresible con un compresor de pulsos 41 que puede ser un cubo de vidrio. Para alcanzar ~ 30fs de duraciones de pulsos de salida 42, son adecuados dilatadores simples de 2 rejillas o 4 rejillas y compresores para ser utilizados como el ensanchador 38 y el compresor 41. Para unas duraciones de pulso de ~ 20fs a 10 lograr, una elección adecuada son dilatadores y compresores que son una combinación de rejillas y lentes.

15 **[0062]** Dicho amplificador cuántico 2 para el sistema que tiene tres etapas de amplificación paramétrica óptica, preferiblemente es una secuencia de Nd: YAG, Nd: YVO<sub>4</sub>, Nd: YLF u otros amplificadores en estado sólido en base a Nd, en donde al menos uno de dichos amplificadores es regenerativo. La radiación 14 del brazo de semilla se amplifica hasta (100µJ÷100mJ) de energía.

20 **[0063]** De acuerdo con una realización alternativa de esta invención, la fuente de láser que genera pulsos luminosos de femtosegundos consiste en solo dos etapas de amplificación paramétrica óptica. Su esquema óptico difiere del que se muestra en la figura 3 en que no tiene los elementos 22, 38, 39 y 5. Además, se necesita un amplificador 2 cuántico menos potente. Con un amplificador cuántico 2 que produce pulsos de bombeo de 1 mJ, se pueden obtener pulsos de salida 42 de 10 µJ en energía y con duraciones de 5fs a 30fs.

25 **[0064]** El símbolo 4 (óbelo) en la descripción y reivindicaciones de esta solicitud se usa para indicar un rango de valores, es decir, incluir (10 ÷ 20) nm es equivalente a la declaración "de 10 nm a 20nm".

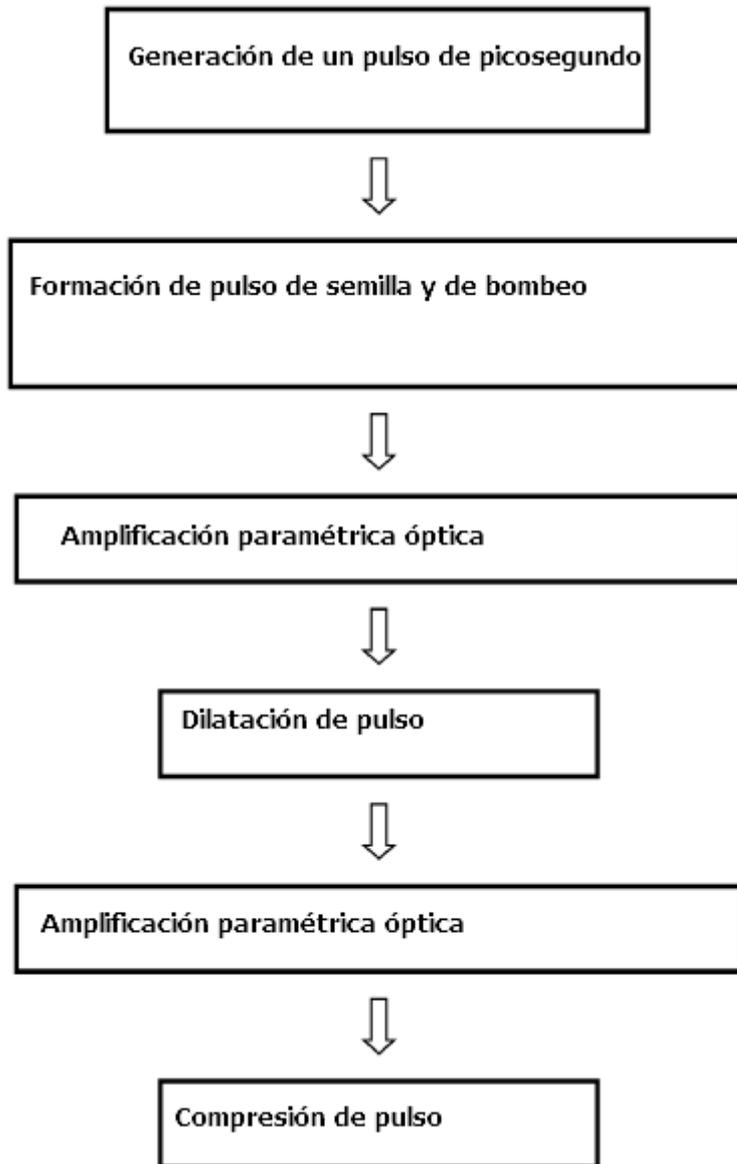
30 **[0065]** Todas las ilustraciones dadas son realizaciones posibles, pero no limitativas de la presente invención. En consecuencia, el alcance de la protección se describe en las reivindicaciones adjuntas.

**Reivindicaciones**

1. Método para la generación de pulsos luminosos de femtosegundos, que comprende al menos dos etapas de amplificación paramétrica óptica (OPA), en el que  
 5 se realiza amplificación paramétrica en una primera etapa de OPA dirigiendo pulsos ópticamente sincronizados de primera radiación de semilla (9) y primera radiación de bombeo (7) hacia un primer cristal no lineal (3) en el que se superponen en tiempo y espacio, satisfaciendo condiciones de coincidencia de fase no colineal, se realiza amplificación paramétrica en una segunda etapa de OPA dirigiendo pulsos ópticamente sincronizados de segunda radiación de semilla (28) y segunda radiación de bombeo (10) hacia un segundo cristal no lineal (4)  
 10 en el que se superponen en tiempo y espacio satisfaciendo condiciones de coincidencia de fase no colineal, pulsos salientes de radiación de onda de señal amplificados en una etapa final de OPA, que es al menos la segunda etapa OPA, se comprimen hasta pulsos de salida de femtosegundos, en donde dichas primera y segunda radiaciones de semilla (9, 28) y primera y segunda radiaciones de bombeo (7, 10) se originan a partir de una única fuente de láser primaria (1) dividiendo la radiación ultracorta (11) de dicha fuente primaria de láser (1) con un divisor de potencia (12) en radiación (13) de un brazo de semilla y radiación (14) de un brazo de bombeo,  
 15 la primera radiación de semilla (9) para dicha primera etapa de OPA se forma dilatando en tiempo pulsos de dicha radiación (13) del brazo de semilla, mientras que la primera radiación de bombeo (7) para dicha primera etapa de OPA se forma amplificando y doblando la frecuencia de dicha radiación (14) del brazo de bombeo en un generador de segundo armónico (20),  
 20 la segunda radiación de semilla (28) para dicha segunda etapa OPA se forma comprimiendo pulsos en el tiempo de radiación de onda de señal (24) amplificada en dicho primer cristal no lineal (3) para formar radiación de pulso de femtosegundo (26) y además por ensanchamiento espectral de una parte (30) de dicha radiación de pulso de femtosegundo (26) en un generador de luz blanca (6) para crear radiación espectralmente ensanchada (27) con ancho de banda de no menos de 300 nm y dirigiendo hacia el segundo cristal no lineal (4) directamente o a través de un primer acondicionador de pulsos (33), en el que dicha fuente de láser primaria (1) es una fuente de láser de baja energía de radiación ultracorta,  
caracterizado porque  
 30 se selecciona una longitud de onda central  $\lambda_0$  de dicha radiación ultracorta (11) de la fuente de láser primaria (1) para superponer un pico de emisión estimulada de un medio activo de alta ganancia de estado sólido, y su ancho espectral  $\Delta\lambda_0$  corresponde a un pulso de duración transformada limitada de 1ps a 3ps, la formación de dicha primera radiación de semilla (9) de dicha radiación (13) del brazo de semilla comprende adicionalmente ensanchar su espectro hasta (10÷20) nm de ancho de banda,  
 35 un ancho de banda espectral de dicha radiación (14) del brazo de bombeo, que se amplifica durante la formación de dicha primera radiación de bombeo (7), no excede de 1nm, la segunda radiación de bombeo (10), para crear duración de pulso en el intervalo de femtosegundos, se forma a partir de la amplificada en dicha primera etapa de OPA y comprimida a radiación de pulso de femtosegundo (26) separando su parte (31) por un divisor de potencia (29) y dirigiendo hacia un generador de segundo armónico (32) para duplicación de frecuencia, la radiación de frecuencia duplicada se dirige hacia el segundo cristal no lineal (4) directamente o mediante un segundo acondicionador de pulsos (34), en el que la relación de duraciones de pulsos de bombeo y semilla está en un intervalo de 1 a 10, lo que se consigue mediante dichos primer y / o segundos acondicionadores de pulso (33, 34) que comprenden compresores de pulso y / o dilatadores de pulso; los pulsos de onda de señal, amplificados en el final al menos en el segundo cristal no lineal (4), se comprimen en tiempo para formar pulsos de salida con una duración de 5fs a 100fs.
2. Método según la reivindicación 1, caracterizado porque  
 se proporciona una tercera etapa de OPA, en la que la amplificación paramétrica en una tercera etapa de OPA se realiza dirigiendo pulsos ópticamente sincronizados de tercera radiación de semilla (37) y tercera radiación de bombeo (8) hacia un tercer cristal no lineal (5), en el que se superponen en tiempo y espacio satisfaciendo condiciones de adaptación de fase no colineal, donde  
 50 la tercera radiación de semilla (37) para dicha tercera etapa de OPA se forma a partir de radiación de onda de señal (36) amplificada en dicho segundo cristal (4) comprimiendo sus pulsos en tiempo, mientras que la tercera radiación de bombeo (8) se forma de la misma manera que la radiación de bombeo (7) para la primera etapa de OPA; los pulsos de onda de señal, amplificados en el tercer cristal no lineal final (5), se comprimen en tiempo para formar pulsos de salida (42) con una duración de 5fs a 100fs.
3. Método según las reivindicaciones 1 - 2, caracterizado porque  
 una longitud de onda central de dicha radiación ultracorta (11) de la fuente primaria de láser (1) se selecciona de una banda de luminiscencia de medio activo dopado con Yb de tal manera que solapa el pico de emisión estimulada de medio activo dopado con Nd, y una longitud de onda central de los pulsos de salida de femtosegundo es de aproximadamente 800 nm.
4. Método según la reivindicación 3, caracterizado porque  
 una longitud de onda central de dicha radiación ultracorta (11) de la fuente primaria de láser (1) es 1064 nm.

5. Fuente de láser para la generación de pulsos luminosos de femtosegundos, que comprende una fuente de láser primario de baja energía (1) de radiación ultracorta (11) y al menos dos etapas de amplificación paramétrica óptica (OPA) que comprenden de forma correspondiente un primer cristal no lineal (3) y un segundo cristal no lineales (4), donde
- 5 dicha radiación ultracorta (11) de la fuente de láser primaria (1) se divide por un divisor de potencia (12) en radiación (13) de un brazo de semilla y en radiación (14) de un brazo de bombeo,
- 10 un sistema de acondicionamiento de radiación (15) se coloca en dicho brazo de semilla para dilatar pulsos de dicha radiación (13) y dirigir los pulsos dilatados hacia el primer cristal no lineal (3) como una primera radiación de semilla (9),
- 15 un amplificador cuántico (2) y un generador de segundo armónico (20) se colocan en dicho brazo de bombeo para generar una radiación de frecuencia duplicada (21) como una primera radiación de bombeo (7), dicha radiación de frecuencia duplicada (21) se dirige hacia el primer cristal no lineal (3) por medio de elementos ópticos (23) de tal forma que los pulsos de la primera radiación de semilla (9) y la primera radiación de bombeo (7) se superponen en tiempo y espacio satisfaciendo condiciones de coincidencia de fase no colineal,
- 20 un compresor de pulso (25) se coloca en una trayectoria de radiación de onda de señal (24) amplificada en el primer cristal no lineal (3) para formar radiación de pulso de femtosegundo (26), además en la parte de radiación (30) de la radiación de pulso de femtosegundo (26) se coloca un generador de luz blanca (6) para formar radiación espectralmente ensanchada (27) con un ancho de banda de al menos 300 nm, que se dirige a través de un primer acondicionador de pulsos (33) o directamente hacia el segundo cristal no lineal (4) como una segunda radiación de semilla (28),
- 25 una segunda radiación de bombeo (10) se forma mediante un medio de formación de pulsos. que comprende elementos ópticos (35) para dirigir la segunda radiación de bombeo (10) hacia el segundo cristal no lineal (4) de tal manera que los pulsos de la segunda radiación de semilla (28) y la segunda radiación de bombeo (10) en el cristal no lineal (4) se solapan en tiempo y espacio satisfaciendo condiciones de coincidencia de fase no colineal; la radiación de onda de señal amplificada en un cristal no lineal final que es al menos el segundo cristal no lineal (4) se propaga a través de un compresor de pulso (41) diseñado para formar pulsos de salida de femtosegundo, **caracterizado porque**
- 30 dicha fuente primaria de láser (1) está diseñada para generar radiación (11) de pulsos de picosegundos con una duración de 1 ps a 3 ps, mientras que su longitud de onda central  $\lambda_0$  se selecciona para solapar un pico de emisión estimulada de un medio activo de alta ganancia en estado sólido,
- 35 dicho sistema de acondicionamiento de radiación (15) colocado en el brazo de semilla (13) está diseñado para ampliar el espectro de radiación hasta un ancho de banda de  $(10 \div 20)$  nm,
- 40 dicho amplificador cuántico (2) es un amplificador de banda estrecha con un ancho de banda de ganancia inferior a 1 nm,
- 45 el medio de formación de pulso adaptado para formar la segunda radiación de bombeo (10) comprende un cristal de generación de segundo armónico (32) colocado en un camino de la parte de radiación (31) separado por un divisor de potencia (29) de la radiación de pulso de femtosegundo (26) para formar una radiación de frecuencia doble que es dirigida hacia el segundo cristal no lineal (4) directamente o a través de un segundo acondicionador de pulso (34), en el que
- 50 dichos acondicionadores de pulso primero y/o segundo (33, 34) que comprenden compresores de pulso y / o dilatadores de pulso se utilizan para formar una relación de duraciones de pulsos de bombeo y semilla de 1 a 10,
- 55 radiación de onda de señal amplificada en el último cristal no lineal que es al menos el segundo cristal no lineal (4) es dirigida a un compresor de pulso (41) diseñado para formar pulsos de salida de femtosegundo con duración de 5 fs a 100 fs.
6. Fuente de láser según la reivindicación 5, **caracterizada porque**
- 60 dicho amplificador cuántico (2) comprende uno o más amplificadores de láser de estado sólido dopado con Nd, en el que al menos uno de dichos amplificadores de estado sólido dopados con Nd es un amplificador regenerativo,
- 65 lo que da como resultado una energía de pulsos a la salida de dicho amplificador cuántico (2) dentro de un rango entre 100  $\mu$ J y 1 mJ,
- mientras que la energía de los pulsos de salida de femtosegundos generados en la última etapa de OPA es de 1  $\mu$ J a 10  $\mu$ J.
7. Fuente de láser según la reivindicación 5, **caracterizada porque**
- 70 se proporciona un tercer cristal no lineal (5) que constituye una base de una tercera etapa de OPA, en el que se forma una tercera radiación de semilla (37) por dilatación de pulso en un dilatador (38) de una radiación de onda de señal (36) amplificada en el segundo cristal no lineal (4),
- 75 una tercera radiación de bombeo (8) se forma separando una parte de la radiación de frecuencia duplicada (21) en la salida del generador de segundo armónico (20) con un divisor de potencia (22); dicha parte separada de la radiación de frecuencia duplicada (21) se dirige hacia el tercer cristal no lineal (5) a través de elementos ópticos (39) de tal forma que pulsos de la tercera radiación de semilla (37) y la tercera radiación de bombeo (8) se solapan en tiempo y espacio satisfaciendo condiciones de coincidencia de fase no colineal,
- 80 la radiación de onda de señal amplificada en el tercer cristal no lineal (5) se dirige a un compresor de pulso (41) diseñado para formar pulsos de salida de femtosegundos con una duración de 5 fs a 100 fs.

- 5
8. Fuente de láser según la reivindicación 7, **caracterizada porque** dicho amplificador cuántico (2) comprende uno o más amplificadores de láser de estado sólido dopados con Nd, en el que al menos uno de dichos amplificadores de láser de estado sólido dopados con Nd es un amplificador regenerativo,
- 10 lo que resulta en una energía de pulsos a la salida de dicho amplificador cuántico (2) dentro de un rango entre 100  $\mu$ J y 100 mJ, mientras que la energía de los pulsos de salida de femtosegundos (42) generados en la última etapa de OPA es de 10  $\mu$ J a 10 mJ.
- 15 9. Fuente de láser según una cualquiera de las reivindicaciones 5-8, **caracterizada porque** dicha fuente de láser primaria (1) de radiación ultracorta es un láser a base de Yb diseñado para irradiar una línea espectral que se superpone a un pico de emisión de medio activo dopado con Nd.
- 20 10. Fuente de láser según la reivindicación 9, **caracterizada porque** dicho láser a base de Yb es un láser de fibra basado en fibra óptica monomodo dopada con Yb, mientras que el amplificador cuántico (2) se basa en medio activo Nd: YAG, Nd: YVO<sub>4</sub> o Nd: YLF.
- 25 11. Fuente de láser según una cualquiera de las reivindicaciones 5-10, **caracterizada porque** la energía de dicha radiación ultracorta (11) de la fuente de láser primaria (1) no supera 100 pJ y dicho sistema de acondicionamiento de radiación (15) comprende un preamplificador (16.), destinado a aumentar la energía de pulsos en radiación (11) hasta (1÷10) nJ, también un elemento óptico adicional (17) en el que se produce la modulación de pulsos de fase propia.
- 30 12. Fuente de láser según una cualquiera de las reivindicaciones 5-10, **caracterizada porque** la energía de dicha radiación ultracorta (11) de la fuente de láser primaria (1) está en el intervalo (1÷10) nJ.
- 35 13. Fuente de láser según una cualquiera de las reivindicaciones 5-12, **caracterizada porque** dicho sistema de acondicionamiento de radiación (15) se basa en fibras ópticas monomodo.
- 40 14. Fuente de láser según una cualquiera de las reivindicaciones 5-13, **caracterizada porque** dicho generador de luz blanca (6) es una placa de zafiro o YAG.
- 45 15. Fuente de láser según una cualquiera de las reivindicaciones 5-14, **caracterizada porque** la duración de pulso de radiación (26) obtenida a la salida de dicho compresor de pulsos (25), situado aguas abajo del primer cristal no lineal (3), está dentro de un rango de 100fs a 200fs.
- 50
- 55



**Fig. 1**

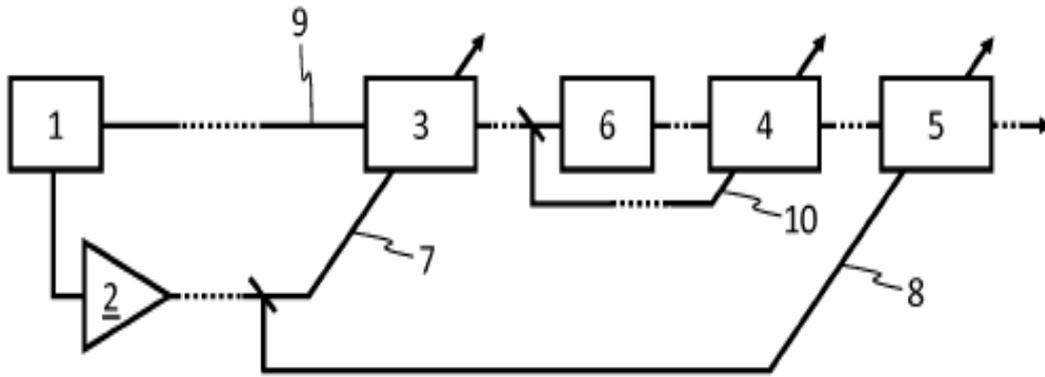


Fig.2

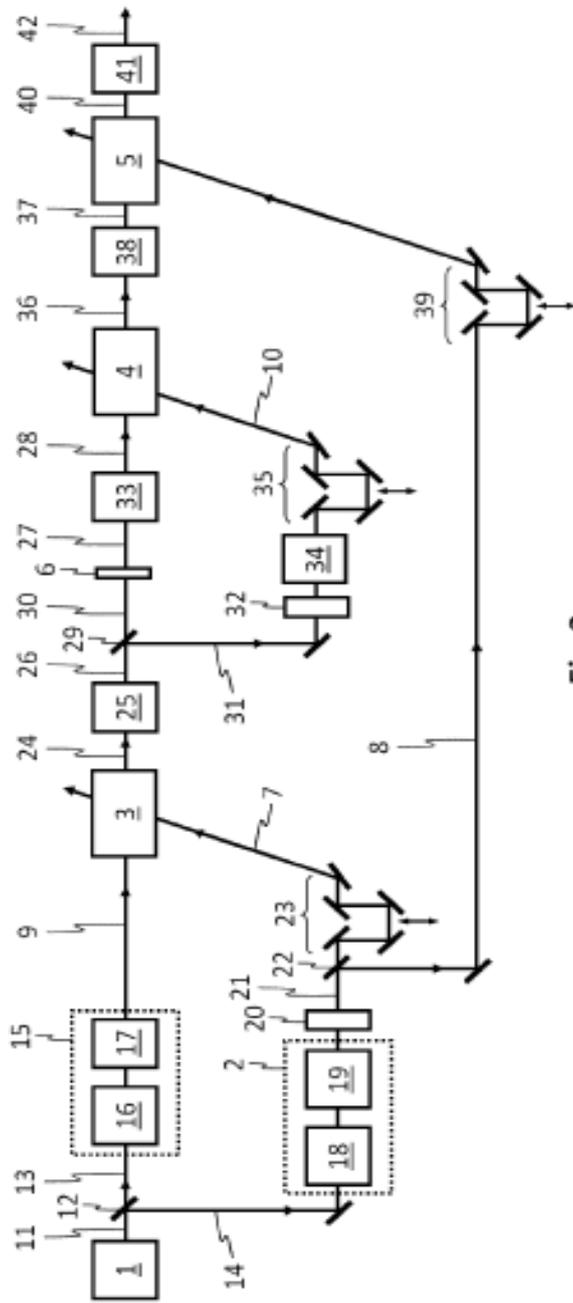


Fig.3