

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 384 871**

51 Int. Cl.:  
**H01S 3/23** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

- 96 Número de solicitud europea: **03003459 .9**  
96 Fecha de presentación: **14.02.2003**  
97 Número de publicación de la solicitud: **1447891**  
97 Fecha de publicación de la solicitud: **18.08.2004**

54 Título: **Procedimiento de generación de al menos un impulso y/o secuencia de impulsos con parámetros controlables**

45 Fecha de publicación de la mención BOPI:  
**13.07.2012**

45 Fecha de la publicación del folleto de la patente:  
**13.07.2012**

73 Titular/es:  
**UNIVERSITÄT HEIDELBERG  
GRABENGASSE 1  
69117 HEIDELBERG, DE y  
TECHNOLAS PERFECT VISION GMBH**

72 Inventor/es:  
**Zickler, Leander y  
Sauter, Thomas**

74 Agente/Representante:  
**Roeb Díaz-Álvarez, María**

**ES 2 384 871 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

Procedimiento de generación de al menos un impulso y/o secuencia de impulsos con parámetros controlables.

La invención se refiere a un procedimiento de generación de al menos un impulso y/o una secuencia o secuencias de impulsos con parámetros controlables tales como: energía del impulso, duración del impulso, sincronización del impulso, valor máximo de energía del impulso, forma del impulso, frecuencia de repetición del impulso, y temporización y/o parámetros obtenidos a partir de ellos; así como un programa informático. En particular, la invención se refiere a una generación de secuencias de impulsos controlables de impulsos ultracortos (del orden de femto y el picosegundo).

El gran abanico de campos de aplicación incluye, si bien no exclusivamente: el procesamiento de materiales con láser, aplicaciones médicas de láseres como, por ejemplo, microqueratoma por láser LMK, cirugía refractiva de la córnea, fs-LASIK, neurocirugía por láser, tecnología y/o procesamiento de datos de medición óptica.

## TÉCNICA ANTERIOR

Las tecnologías ópticas (fotónica) se están usando cada vez más, en particular, en los campos del procesamiento de materiales con láser, por ejemplo, en nanotecnología o para la manipulación precisa de material biológico. De particular interés e importancia resulta la interacción de luz láser y un material con impulsos de láser muy cortos (de  $10^{-12}$  a  $10^{-15}$  seg) que se basa en procesos físicos fundamentalmente nuevos y se puede usar ventajosamente para el procesamiento de materiales de alta precisión.

Los sistemas convencionales de láser de impulsos ultracortos están contruidos y optimizados para generar secuencias de impulsos con una frecuencia de repetición de impulsos constante (es decir, una sincronización constante o una distancia temporal constante entre dos impulsos consecutivos) y con energías de impulso constantes. En particular, cuando se construyen láseres pulsantes, hasta ahora estos sistemas se están optimizando para una frecuencia de repetición de impulsos fija (es decir, la secuencia de impulsos se genera de forma asíncrona con respecto a la aplicación de destino y con una distancia constante de impulso a impulso. La sincronización del impulso o impulsos únicos pertenecientes a la secuencia de impulsos generada de manera continua (también denominada tren de impulsos), por ejemplo como un procedimiento externo o con una aplicación de destino en tales sistemas se suele materializar con la ayuda de otros elementos ópticos (conmutador óptico) que pueden desacoplar (separar) o seleccionar un impulso único o varios impulsos de la secuencia de impulsos ya generada. Este procedimiento es caro y no resulta eficaz, ya que no se hace uso de gran parte de la energía generada.

Aparte de la sincronización de la emisión de impulsos de láser con acontecimientos externos (es decir, la temporización de los impulsos únicos en la secuencia de impulsos), otro parámetro importante es la energía del impulso. En los sistemas de láser convencionales se pueden generar impulsos con la energía que se desee mediante la introducción de pérdidas variables en el haz útil generado. Esto se lleva a cabo, por ejemplo, induciendo cambios en la polarización juntamente con un elemento óptico con transmisión en función de la polarización. No obstante, con los medios técnicos disponibles, esto solo resulta posible con una alta inercia temporal. Por ejemplo, consideremos una configuración mecánica que pueda cambiar la polarización de un haz de láser hasta alcanzar una orientación deseada en 0,1 seg y una frecuencia de repetición de impulsos de 10 kHz (impulsos separados por 100 microsegundos). Por lo tanto, hasta ahora, la energía de los impulsos en una secuencia de impulsos solo se puede controlar a lo largo de 1000 impulsos o más, mientras que para muchas aplicaciones resulta deseable cambiar la energía de impulso a impulso.

Por ejemplo, se lleva a cabo un intento de controlar las propiedades de los impulsos dentro de la cavidad del láser con el fin de lograr características estables de impulso a impulso (normalmente una secuencia de impulsos con una frecuencia de repetición constante y una pequeña variación de las energías de los impulsos únicos) con un láser por conmutación Q (conmutación Q: modulación de la cavidad del láser).

En el documento US-A-5 982 790 se describe un sistema y un procedimiento para reducir la variación en la energía y la potencia máxima de impulso a impulso en diversos tipos de láseres de impulsos, en particular láseres por conmutación Q. El sistema láser descrito en el documento comprende una cavidad de láser que posee un medio emisor de láser bombeado mediante un dispositivo de bombeo para entregar energía de bombeo al medio. El sistema también incluye un dispositivo detector y unos circuitos para determinar las magnitudes de los impulsos de láser, tales como las amplitudes máximas de los impulsos, las energías de los impulsos, las anchuras de los impulsos u otros parámetros de medición de los impulsos. El sistema comprende también un mecanismo de realimentación que está comunicado con el dispositivo de bombeo y que garantiza la estabilidad de impulso a impulso aumentando la energía de impulso cuando la magnitud de impulso del impulso  $i$ -ésimo supera una magnitud media de los impulsos y disminuyéndola cuando es menor que la magnitud media de los impulsos. Otra posibilidad consiste en que el mecanismo de realimentación esté comunicado con el dispositivo de conmutación que controla el factor de pérdida variable del conmutador Q para lograr la estabilidad de la energía y del valor máximo de los impulsos.

En el documento US-A-6 339 604 se describe un sistema de láser de impulsos que incluye una bomba de láser, una varilla de láser, un reflector interpuesto entre la bomba de láser y la varilla de láser, a través del cual entra en la varilla de láser la energía procedente de la bomba de láser, un reflector de salida a través del cual se emite energía desde la varilla de láser, un conmutador interpuesto entre la varilla de láser y el reflector de salida y un dispositivo de control.

5 Cuando está cerrado, el conmutador hace que la energía se almacene en la varilla de láser y, cuando está abierto, permite la emisión de energía desde la varilla de láser durante un periodo de emisión. El dispositivo de control permite que un impulso primario emitido desde la varilla de láser durante el periodo de emisión incida sobre una pieza y, posteriormente, bloquea o elimina la emisión de láser secundaria de la pieza que se produce durante el periodo de emisión tras la emisión del impulso primario. El sistema de láser de impulsos se aplica a lo largo de un intervalo de

10 frecuencias de repetición, para hacer que la energía láser se emita durante una pluralidad de periodos de emisión a cada frecuencia de repetición. Al menos una parte de la energía láser emitida durante los periodos de emisión se dirige hacia la estructura de destino. El conmutador se mantiene cerrado durante un periodo de tiempo predeterminado y fijo antes de cada periodo de emisión independientemente de la frecuencia de repetición del impulso de láser primario dentro del intervalo de repetición con el fin de almacenar energía en la varilla de láser. La bomba funciona de manera

15 continua a una potencia constante.

Con láseres de impulsos en el intervalo de los nanosegundos, basados en el principio de la conmutación Q (control de las pérdidas en la cavidad), la duración del impulso y la energía del impulso no se pueden ajustar de manera independiente mediante la variación del tiempo de amplificación. Es decir, al aumentar la energía del impulso, la duración del impulso también aumenta considerablemente. Además, estos sistemas están destinados a la generación

20 de impulsos de nanosegundos, en lugar de a la generación de impulsos ultracortos en el intervalo de los pico a los femtosegundos.

En el documento EP-A-0 609 978, se muestra un sistema de láser para generar al menos un impulso con al menos una propiedad específica. El sistema de láser comprende una cavidad amplificadora, al menos unos medios de detección para supervisar un proceso en la cavidad amplificadora y una conexión física entre el fotodiodo y unos medios de

25 conmutación.

HANKLA A. K., en OPTICS LETTERS, vol. 22, n.º 22, 15/11/1997, pág. 1713, describe una fuente de láser de onda de batido e impulso corto sintonizable que funciona a 1 µm. Al salir del amplificador regenerativo, el haz se transmite a través de dos rebanadores de impulsos, reduciendo el preimpulso a menos de  $10^{-8}$  con respecto al impulso principal, a continuación se amplifica mediante varillas de 7 y 9 mm de Nd:silicato y una única varilla de 16 mm de Nd:fosfato, lo

30 cual da lugar a una ganancia total en las lentes amplificadores de aproximadamente 100.

### PROBLEMA TÉCNICO RESUELTO POR LA INVENCION

En vista de los problemas citados, el objeto de la presente invención consiste en crear un procedimiento mejorado que sea capaz de generar secuencias de impulsos arbitrarias, programables y, en particular, sincronizables dinámicamente.

### SOLUCIÓN SEGÚN LA INVENCION

35 Este objeto se soluciona mediante un procedimiento para generar una secuencia de impulsos según la reivindicación 1 y un programa informático 3. En la reivindicación dependiente se describen formas de realización preferidas.

El procedimiento se puede llevar a cabo en un sistema láser para generar al menos un impulso y/o una secuencia o secuencias de impulsos con al menos una propiedad específica (predeterminada o predeterminable), tal como la energía de los impulsos, duración, intensidad máxima, forma del impulso y/o temporización, que comprende una

40 cavidad amplificadora;

al menos unos medios de detección para supervisar un proceso de amplificación en la cavidad amplificadora y obtener datos acerca de al menos una propiedad de la secuencia de impulsos y/o el impulso o impulsos únicos;

al menos unos medios de control que pueden comparar los datos obtenidos por los medios de detección con datos de referencia y controlar al menos unos medios de conmutación para introducir, emitir y/o retener el impulso o impulsos en

45 la cavidad amplificadora de manera que al menos una propiedad de las secuencias de impulsos y/o los impulsos en una salida del sistema láser posea sustancialmente un valor específico (predeterminado o predeterminable).

En particular, el impulso inicial (semilla) procedente de una fuente de impulsos ópticos se amplifica al tiempo que realiza sus desplazamientos de ida y vuelta (circula) en la cavidad amplificadora y es supervisado/detectado por los medios de detección (sensor) contenidos en la cavidad amplificadora. El instante en el que el impulso entra y/o abandona la

50 cavidad amplificadora (o, dicho de otro modo, la temporización de entrada/salida) se determina y/o controla mediante los medios de control que reciben una señal procedente de los medios de detección, de tal manera que el impulso amplificado posea en un instante específico (predeterminado o predeterminable) una o más propiedades específicas

(predeterminadas o predeterminables). En lo sucesivo, a este principio lo denominaremos de forma abreviada "impulso bajo demanda". De este modo, la presente invención se diferencia de los láseres de conmutación Q convencionales en que la modulación de las propiedades del impulso se logra mediante una selección específica de la temporización de entrada/salida, en particular de la temporización de salida, en lugar de hacerlo por medio de un control de las pérdidas de la cavidad como en la técnica anterior.

Todo impulso lumínico se puede definir por sus parámetros físicos tales como la longitud de onda, ancho de banda, duración del impulso (o anchura temporal), forma del impulso, energía del impulso, ubicación en el tiempo (o temporización del impulso) y otros parámetros obtenidos a partir de estos. Por ejemplo, una secuencia de impulsos designada como  $\{P\} = \{E_0; T_0; \tau_0; P_0(\Delta E_0; \Delta T_0; \Delta \tau_0)\}$  se puede definir de manera recursiva mediante la energía  $E_0$ , el instante  $T_0$  y la anchura temporal (duración)  $\tau_0$  del impulso de láser inicial  $P_0$ , así como las diferencias de energía  $\Delta E_k = E_k - E_{k-1}$ , la distancia temporal  $\Delta T_k = T_k - T_{k-1}$  del impulso  $k$ -ésimo con respecto a su predecesor (impulso  $k-1$ -ésimo), y la diferencia en anchura temporal  $\Delta \tau_k = \tau_k - \tau_{k-1}$ . Formalmente, se define  $\Delta E_0 = \Delta T_0 = \Delta \tau_0 = 0$ . Según la invención, la secuencia de impulsos específica (o deseada)  $\{P\}$  se puede predeterminar o ser predeterminable (o controlarla dinámicamente) durante la emisión del impulso. De este modo, dependiendo de la aplicación, se pueden generar impulsos o secuencias de impulsos específicas, en función de la aplicación, con propiedades específicas (predeterminadas o predeterminables) o una combinación de las mismas y, preferentemente, ajustarlas dinámicamente, lo cual permite, por ejemplo, una sincronización de la generación de impulsos con procesos externos asíncronos. Además, dado que las secuencias de impulsos con parámetros deseados se generan directamente en lugar de obtenerlas simplemente seleccionando una parte de la secuencia de impulsos ya generada, el sistema permite, en particular, un uso eficiente de la energía disponible. Otra ventaja consiste en que ciertas propiedades de la secuencia de impulsos se pueden controlar de manera independiente, de tal modo que se pueden generar impulsos que posean parámetros específicos (predeterminados o predeterminables).

El sistema de láser genera o se usa para la generación de impulsos y/o secuencias de impulsos ultracortos, en particular impulsos del orden de los femto y los picosegundos (con un amplio ancho de banda espectral) con propiedades específicas (predeterminadas o predeterminables) en la salida del sistema de láser. Esto resulta complicado, si no imposible, de realizar con sistemas de láser convencionales, que se basan en el principio de la conmutación Q, es decir, la modulación/control de las pérdidas de la cavidad. Por el contrario, el presente sistema de láser se basa en la selección del instante en que el impulso entra en la cavidad amplificadora o la abandona. Esto permite ventajosamente generar impulsos y/o secuencias de impulsos ultracortos con propiedades específicas (predeterminadas o predeterminables) en la salida del sistema.

Preferentemente, el sistema de láser comprende o se usa como un amplificador de láser regenerativo.

Más preferentemente, los medios de control controlan los medios de conmutación de tal manera que al menos una propiedad de la secuencia de impulsos y/o el impulso o impulsos posea en una salida del sistema de láser un valor sustancialmente constante o varíe de acuerdo con una ley predeterminada, preferentemente de manera independiente de otra u otras propiedades distintas.

En particular, los instantes  $T_k = \Delta T_k + T_{k-1}$  y/o las energías  $E_k = \Delta E_k + E_{k-1}$  de los impulsos únicos  $P_k$  se pueden especificar o controlar (impulso bajo demanda). Preferentemente, se controlan el instante  $T_k = \Delta T_k + T_{k-1}$  de la emisión de impulsos y/o la energía  $E_k = \Delta E_k + E_{k-1}$  para cada impulso de la secuencia de impulsos, mientras que la anchura temporal del impulso (duración del impulso)  $\tau_k = \Delta \tau_k + \tau_{k-1}$  se mantiene constante, es decir,  $\Delta \tau_k$  es básicamente cero. Así, la energía de la secuencia o secuencias de impulsos se puede controlar de impulso a impulso (es decir, para cada impulso único, independientemente de cada uno de los otros impulsos únicos) y la distancia de impulso a impulso (es decir, la temporización del impulso) se puede ajustar particularmente sin influir en la duración del impulso al mismo tiempo.

Esto permite, por ejemplo, generar secuencias de impulsos con un perfil de energía predeterminado (la variación de la energía del impulso en la secuencia de impulsos) en un instante deseado. En particular, la energía de los impulsos de la secuencia de impulsos se puede hacer constante, logrando así particularmente fuentes de impulsos muy estables, independientes de la ganancia, el bombeo u otras fluctuaciones.

Preferentemente, los medios de control controlan los medios de conmutación de tal manera que la energía de los impulsos generados sea mayor que un primer valor específico, es decir, mayor que un nivel mínimo de energía y/o más pequeño que un segundo valor específico, en particular más pequeño que una energía crítica  $E_{crit}$  específica (predeterminada o predeterminable).

Así, por ejemplo, la seguridad de la cirugía láser (en particular, en la cirugía de la córnea del ojo) se puede mejorar de forma sustancial, dado que ya durante la generación del impulso, el nivel de energía del impulso se puede controlar para que no pase de un cierto nivel de seguridad.

Más preferentemente, el sistema de láser puede comprender al menos unos medios de compensación de la dispersión de impulsos para compensar sustancialmente la dispersión del impulso por pasada en la cavidad amplificadora, de modo que la duración de los impulsos en la salida del sistema de láser sea sustancialmente constante.

5 La dispersión por vuelta completa en la cavidad amplificadora, provocada hasta el primer orden por la dispersión de la velocidad de grupo (es decir, el distinto tiempo de propagación de los componentes espectrales en el interior de la cavidad amplificadora, que provoca retardos temporales entre los componentes espectrales individuales), se compensa preferentemente mediante los medios de compensación de la dispersión. De este modo, se puede hacer que la duración del impulso sea independiente de su número de pasadas (vueltas) en la cavidad y se pueden generar en cualquier instante impulsos con una duración sustancialmente constante pero con otros parámetros o propiedades variables, tales como la energía del impulso.

Más preferentemente, el sistema de láser comprende al menos unos medios dispersivos de impulsos

para introducir una cantidad específica de dispersión de impulsos por pasada en la cavidad amplificadora, de manera que la duración del impulso en una salida del sistema de láser sea variable;

15 para introducir una cantidad específica (predeterminada o predeterminable) de dispersión de impulsos por pasada en la cavidad amplificadora, de tal modo que la intensidad máxima de los impulsos en la cavidad amplificadora sea menor que un valor predeterminado; y/o

para generar en la cavidad amplificadora componentes espectrales del impulso divididos espacialmente, de tal manera que al menos un componente espectral del impulso se amplifique de manera selectiva, con lo cual se aumenta preferentemente la amplificación eficaz del ancho de banda del sistema de láser.

20 Los medios dispersivos pueden comprender al menos un espejo modulado en frecuencia o *chirped* que posea una reflexión dispersiva y/o al menos un prisma y/o al menos unos medios difractivos (por ejemplo, una rejilla de difracción).

Existe una relación básica entre el espectro (ancho de banda del impulso y la duración del impulso (es decir, el producto tiempo-ancho de banda), que establece que un impulso corto presenta un espectro amplio. Un dispositivo que, por ejemplo, retarde ciertas frecuencias dentro del espectro del pulso con respecto a otras frecuencias (*chirp*) puede, en principio, cambiar la forma del impulso, es decir, estirar el impulso o comprimir un impulso ya modulado (*chirped*).

Los medios dispersivos también pueden introducir preferentemente una cantidad específica (predeterminada o predeterminable) de dispersión por vuelta en la cavidad (pasada), para que la duración del impulso dependa del número de vueltas que dé el pulso en la cavidad amplificadora. Así, se pueden generar impulsos que posean una duración de impulso variable, que se pueden expresar como:  $\{P_i\} = \{E_i; T_i; \tau_i; P_i(\Delta E_i; \Delta T_i; \Delta \tau_i)\}$ , donde la duración de impulso  $\tau_i$  de cada impulso  $P_i$  se puede cambiar o controlar según una ley específica (predeterminada o predeterminable).

Los medios dispersivos también se pueden usar para estirar el impulso en el tiempo, de modo que la intensidad máxima durante el proceso de amplificación en la cavidad amplificadora (estiramiento sobre la marcha), es decir

$$\hat{P}\left(n \cdot \frac{2L}{c}\right) = \frac{E_n}{\tau_n} \leq \hat{P}_{crit}$$

35 donde  $c$  es la velocidad de la luz,  $L$  es la longitud de la cavidad amplificadora,  $n$  es el número de pasadas en la cavidad,  $E_n$  es la energía del impulso  $n$ -ésimo y  $\hat{P}$  es la intensidad máxima del impulso,  $\hat{P}_{crit}$  es la energía crítica. Así, por ejemplo, se evitan los daños en el medio amplificador.

Tras la amplificación, el impulso, preferentemente, se recomprime hasta alcanzar un valor cercano o aproximado a su duración original.

Los medios dispersivos también se pueden usar para dividir espacialmente los componentes espectrales de un impulso en el medio amplificador, de manera que se pueda llevar a cabo una amplificación selectiva de las diferentes regiones espectrales. La amplificación selectiva de diferentes regiones espectrales/componentes espectrales se puede llevar a cabo empleando un bombeo selectivo del medio amplificador, por ejemplo por medio de una óptica de bombeo que comprenda al menos un modulador espacial de luz (SLM). Así, por ejemplo, es posible incrementar una amplificación general del ancho de banda del sistema de láser, lo que permite la generación de impulsos más cortos en la salida del sistema de láser.

45 La cavidad amplificadora comprende preferentemente una pluralidad de medios amplificadores, con el fin de incrementar el ancho de banda eficaz de amplificación del sistema de láser y/o conseguir una ganancia más alta.

Los medios amplificadores se pueden escoger para que el perfil de amplificación resultante (energía de los impulsos frente a tiempo de circulación/número de pasadas en la cavidad) sea más ancho que los perfiles de amplificación de

cada uno de los medios amplificadores. De este modo, se incrementa el ancho de banda total de amplificación del sistema, lo que permite la generación de impulsos respectivamente más cortos en la salida del sistema de láser.

Más preferentemente, la longitud eficaz de la cavidad amplificadora se puede cambiar o seleccionar de manera que corresponda sustancialmente a la velocidad de funcionamiento de los medios de conmutación y/o los medios de control.

- 5 Al incrementar la longitud de la cavidad amplificadora  $d$ , también se incrementa la diferencia temporal entre dos pasadas completas (vueltas) de la cavidad amplificadora,  $T = \frac{2d}{c}$ , donde  $c$  es la velocidad de la luz. Así, la longitud de la cavidad amplificadora se controla o se establece preferentemente para que se ajuste de manera sustancial al tiempo de respuesta de los medios de conmutación y, en particular, al tiempo de respuesta de los medios de conmutación y/o al tiempo de respuesta de los medios de control.

- 10 El sistema de láser puede comprender preferentemente al menos unos medios de conmutación pasivos cuyo estado no depende de los medios de modulación.

De este modo, las propiedades de la secuencia de impulsos se pueden manipular de forma independiente o solo indirectamente en función del estado de los medios de control. Así, por ejemplo, se puede introducir, emitir y/o retener un impulso, en la cavidad amplificadora y/o se puede influir en una o más propiedades del proceso de amplificación en

- 15 respuesta a la señal procedente de un disparador interno y/o externo.

El sistema de láser puede comprender preferentemente unos medios de modulación de bombeo para cambiar al menos una característica de un proceso de amplificación en la cavidad amplificadora. Por ejemplo, para obtener un proceso de amplificación (predeterminado o predeterminable) específico (es decir, propiedades de amplificación específicas), los medios de bombeo, que bombean al menos un medio amplificador dentro de la cavidad amplificadora, se puede

- 20 modular adecuadamente, por ejemplo, modulando la corriente de bombeo.

Los datos de referencia comprenden datos recibidos de:

un disparador externo;

dispositivo de entrada de ajustes del usuario;

una fuente de impulsos semilla, que emite un impulso semilla dirigido hacia el amplificador de láser;

- 25 unos medios de supervisión, que supervisan el avance de un proceso de aplicación en el que toma parte la secuencia de impulsos emitida desde el sistema de láser; y/o

unos datos previos obtenidos por los medios de detección durante un proceso de amplificación en la cavidad amplificadora;

y en los que los datos de referencia, en particular, se pueden actualizar de forma dinámica o periódica.

- 30 El disparador externo puede controlar los medios de control a fin de introducir y/o emitir y/o retener la señal de la cavidad amplificadora.

Además, los datos externos pueden comprender datos recibidos desde el dispositivo de entrada de ajustes del usuario, lo cual permite, preferentemente, un cambio (dinámico) en las características (propiedades) del impulso y/o las secuencias de impulsos, conforme a los cambios en los ajustes de usuario.

- 35 Aún más preferentemente, los medios de control pueden recibir datos procedentes de la fuente de impulsos semilla, a fin de controlar la conmutación en función de las propiedades del impulso semilla, por ejemplo, la temporización y/o la estabilidad del impulso semilla.

Preferentemente, la secuencia o secuencias y/o la secuencia de impulsos se dirigen hacia un aplicación escogida, unos segundos medios de detección (sensor) detectan al menos una propiedad del proceso de aplicación escogido en el que toman parte el impulso o impulsos generados y envían una señal a los medios de control que incluye información acerca del avance del proceso de aplicación escogido. Los medios de control pueden decidir en función de la información recibida acerca del nuevo avance en el proceso de amplificación y pueden controlar los medios de conmutación a fin de obtener los parámetros deseados del impulso y/o la secuencia de impulsos (denominados de forma abreviada "bucles cerrados"). Además de procesar datos recibidos acerca de los avances de la aplicación, la invención permite la

- 40 sincronización del sistema de láser (propiedades del impulso o impulsos y/o las secuencias de impulsos) con respecto a los procesos de aplicaciones asíncronas, como por ejemplo el seguimiento ocular en la cirugía láser ocular o en accionadores mecánicos, generando de ese modo impulsos sustancialmente en el instante en el que son requeridos por

la aplicación.

Más preferentemente, los medios de control controlan los medios de conmutación de manera que se tengan en cuenta las propiedades (características) del proceso de amplificación detectadas hasta el momento (es decir, los datos obtenidos por los medios de detección durante el proceso de amplificación en la cavidad amplificadora). En particular, los datos externos se pueden actualizar dinámicamente basándose en los datos obtenidos hasta el momento (o, dicho de otro modo, extrapolarlos basándose en los datos previos). Los medios de control se basan en la diferencia o diferencias existentes entre los datos externos y los datos detectados que presentan preferentemente un comportamiento proporcional, diferencial y/o integral y extrapolan el momento en el que se accionan los medios de conmutación en función del proceso de amplificación característico.

- 10 La cavidad amplificadora, definida en general entre dos superficies opuestas, como por ejemplo espejos planos, comprende al menos un medio amplificador bombeado desde los medios de bombeo (o, para abreviar, la bomba) por ejemplo por medios ópticos (por ejemplo, lámparas de destello, láseres de diodo, etc.) o eléctricos. Tras entrar en la cavidad amplificadora, el impulso semilla ejecuta una serie de vueltas o pasadas (circula) en el interior de la cavidad, al tiempo que se amplifica (es decir, se incrementa su energía) cada vez que pasa a través del medio amplificador, que puede ser, por ejemplo, un medio de Ti:zafiro, Nd:YAG, Nd:vidrio; Nd:YLF; Yt:vidrio; Cr:LiSaF o cualquier otro medio amplificador (de ganancia) apropiado. La fuente de impulsos ópticos es preferentemente una fuente láser, por ejemplo, un oscilador de Nd:vidrio, diodo láser, láser de Ti:zafiro, etc., preferentemente capaz de generar impulsos ultracortos (del orden de femto y picosegundos), que se acoplan en la cavidad amplificadora preferentemente a través de unos elementos ópticos de entrada. Indudablemente, la cavidad amplificadora también puede comprender otros elementos ópticos, tales como por ejemplo, espejos, lentes, prismas, rejillas de difracción, moduladores espaciales de luz, etc., formando, por ejemplo, una unidad o medios de control de modo, un grupo de enfoque, etc.

- Los medios de control se pueden realizar en forma de FPGA (matriz de puertas programables in situ) y/o ASIC (circuito integrado de aplicación específica), que se pueden sincronizar con la fuente de impulsos ópticos que actúan como semilla. El ancho de banda de los medios de detección y/o control se debería escoger de manera apropiada, de tal modo que la propiedad (o propiedades) del impulso se pueda analizar en una vuelta completa (o pasada) del impulso en el interior de la cavidad amplificadora. Preferentemente, el ancho de banda de los medios de detección y/o control es aproximadamente 200 MHz o superior. Los medios de conmutación pueden comprender moduladores de luz electro-ópticos (EOM); moduladores de luz acústico-ópticos (AOM); moduladores magneto-ópticos; medios de conmutación basados en el cambio de la longitud de onda, por ejemplo materiales no lineales polarizados periódicamente tales como niobato de litio, KTP para una conversión de frecuencia eficiente junto con un recubrimiento especular/divisor de haz dicróico y/u otros conmutadores ópticos de alta velocidad. La frecuencia de repetición de los medios de conmutación óptica se encuentra preferentemente en el intervalo de 1 a 200 kHz, más preferentemente por encima de los 10 kHz.

- La detección de las propiedades actuales del impulso, por ejemplo la energía del impulso, se puede llevar a cabo, por ejemplo, integrando la señal (datos) emitida por un fotodiodo (tal como un diodo de GaAs) y haciéndola pasar a través de un circuito de muestreo y retención. Debido a que, en el momento actual, el tiempo de latencia de los conmutadores ópticos convencionales está por encima del tiempo necesario para que un impulso dé una vuelta en la cavidad amplificadora, preferentemente los medios de control extrapolan el instante en el que va a ser emitido (descargado o "dumped") el impulso desde la cavidad amplificadora, mediante el uso de modelos teóricos de láser relativos al comportamiento del láser (amplificador) (es decir, modelando el proceso de amplificación). Esto permite dar comienzo a la conmutación óptica en un momento específico, de modo que, más tarde, se emita desde la cavidad amplificadora un impulso con al menos una propiedad específica (predeterminada o predeterminable) y se lleve a la salida del sistema de láser, listo para su uso posterior.

- Según la invención, se proporciona un procedimiento para generar al menos un impulso y/o secuencia o secuencias de impulsos con al menos una propiedad específica (predeterminada o predeterminable) tal como: la energía del impulso, la duración, intensidad máxima, forma del impulso y/o temporización en un sistema de láser, que comprende una cavidad amplificadora y una fuente de impulsos semilla, y dicho procedimiento comprende las siguientes etapas:

supervisión de un procedimiento de amplificación en la cavidad amplificadora y obtención de datos acerca de al menos una propiedad del impulso o impulsos y/o la secuencia de impulsos;

comparación de la propiedad del impulso con los datos de referencia y formación de una señal de salida;

- 50 control de al menos unos medios de conmutación en el interior de la cavidad amplificadora en función de la señal de salida, comprendiendo la etapa de introducción, emisión y/o retención del impulso en la cavidad amplificadora, de tal manera que al menos una propiedad de la secuencia o secuencias de impulsos y/o los impulsos en una salida del sistema de láser posea sustancialmente un valor específico (predeterminado o predeterminable).

Según una forma de realización preferente de la invención, los impulsos en la salida del sistema de láser son impulsos ultracortos, en particular, impulsos del orden del femto o el picosegundo.

Más preferentemente, el procedimiento para generar al menos un impulso y/o una secuencia o secuencias de impulsos se aplica o se lleva a cabo en un amplificador de láser regenerativo.

- 5 Preferentemente, la etapa de control es una etapa en la que al menos una propiedad de la secuencia de impulsos y/o el impulso o impulsos posee en una salida del sistema de láser un valor sustancialmente constante o varía de acuerdo con una ley, en particular, independiente de otra u otras propiedades.

El procedimiento de generación de secuencias de impulsos puede comprender preferentemente la etapa de compensación de la dispersión de los impulsos por pasada en la cavidad amplificadora, de tal modo que la duración de los impulsos generados sea sustancialmente constante.

- 10 Aún más preferentemente, el procedimiento también puede comprender la etapa de introducción de una cantidad de dispersión de impulsos por cavidad amplificadora de tal modo que

la duración del impulso en la salida del sistema de láser sea variable,

- 15 la intensidad máxima de los impulsos en la cavidad amplificadora sea menor que un valor predeterminado o predeterminable; y/o

se generen en la cavidad amplificadora componentes espectrales del impulso divididos espacialmente de manera que al menos un componente espectral del impulso se amplifique selectivamente, incrementando de ese modo el ancho de banda de la amplificación del sistema de láser.

- 20 Preferentemente, el procedimiento comprende una etapa de cambio de la longitud eficaz de la cavidad amplificadora para que se corresponda sustancialmente con la velocidad de funcionamiento de los medios de conmutación y/o los medios de control.

Además, el procedimiento de generación de secuencias de impulsos puede comprender la etapa de influencia sobre las propiedades de la secuencia de impulsos en el interior de la cavidad amplificadora independientemente de la señal de salida o indirectamente en función de esta.

- 25 En el procedimiento de generación de secuencias de impulsos, los datos de referencia comprenden datos recibidos desde

un disparador externo;

la fuente de impulsos semilla, que emite un impulso semilla para el amplificador de láser;

- 30 unos medios de supervisión que supervisan el avance de un proceso de aplicación en el que toma parte la secuencia de impulsos emitida desde el sistema de láser; y/o

unos datos previos obtenidos por los medios de detección durante un proceso de amplificación en la cavidad amplificadora,

en el que los datos de referencia, en particular, se pueden actualizar dinámicamente.

- 35 Además, el procedimiento de generación de secuencias de impulsos puede comprender una etapa de cambio de al menos una característica de un proceso de amplificación en la cavidad amplificadora, en particular, el bombeo de un medio de amplificación en la cavidad amplificadora.

- 40 Según la invención, también se proporciona un programa informático que comprende instrucciones que, una vez cargadas en un ordenador, llevan a cabo el procedimiento de generación de secuencias de impulsos según la invención o una forma de realización de la misma. La invención también está dirigida a un medio de almacenamiento de lectura por ordenador y a una señal que comprende dicho programa informático.

El programa informático se puede realizar preferentemente en forma de FPGA (matriz de puertas programables in situ) y/o ASIC (circuito integrado de aplicación específica).

- 45 La invención descrita más arriba permite simplificar considerablemente los procedimientos y aplicaciones existentes o incluso la realización por vez primera de numerosas aplicaciones importantes en el amplio campo que rodea al procesamiento de materiales con láser y la tecnología láser. En particular, se puede realizar de impulso a impulso una



regulación dinámica de las propiedades de los impulsos únicos, en particular independientemente unas de otras, y/o la sincronización con un proceso o procesos externos. Así, existen numerosas aplicaciones importantes del láser que se pueden mejorar sustancialmente o que se pueden realizar. Por ejemplo, las siguientes aplicaciones son posibles:

- 5           – generación de impulsos de láser ultracortos (del orden del femto y el picosegundo) con propiedades específicas (predeterminadas o predeterminables) independientemente de la duración del impulso, en particular la energía del impulso;
- 10          – ajuste (sincronización) de la temporización del impulso y/o la energía del impulso a procesos extremadamente asíncronos (por ejemplo, a accionadores mecánicos, sistema de seguimiento ocular en la cirugía refractiva de la córnea, etc.). Esto permite una mayor velocidad de procesamiento al tiempo que se mantiene la alta precisión;
- incremento en la seguridad de la cirugía por láser, ya que el nivel de energía puede estar ya predeterminado y controlado preferentemente en el instante de la generación del impulso individual;
- sincronización con procesos físicos que se vayan a examinar, en particular el examen de procesos en los que toman parte impulsos de láser ultracortos (preferentemente del orden del femtosegundo);
- 15          – la temporización del impulso y/o la energía del impulso se pueden usar como señales de control en bucle cerrado con una señal o señales de control externo (por ejemplo, mediante el ajuste fino de precisión de la resistencia o resistencias);
- generación eficiente de los impulsos de láser con una elevada potencia máxima de, por ejemplo, 200 MW;
- 20          – adaptación o ajuste de uno o más parámetros de la secuencia de impulsos, en particular, la temporización del impulso y/o la energía del impulso para la dinámica específica (predeterminada o predeterminable) del proceso de interacción el láser y el material;
- microestructuración compleja de materiales con series de impulsos ultracortos, preferentemente del orden del femtosegundo;
- 25          – generación de series de impulsos con un perfil energético predeterminado, en particular, energía controlada de los impulsos únicos en la serie de impulsos;
- consecución de un flujo de sistema máximo, ya que el sistema de láser no se limita a una frecuencia de repetición fija/establecida;
- incremento en la flexibilidad y la seguridad de la generación de impulsos mediante los impulsos bajo demanda;
- 30          – control o compensación de la variación en la estabilidad del láser, ya que el propio proceso de amplificación se puede supervisar, evaluar y controlar en unos circuitos de bucle cerrado.

Algunos de los conceptos para una plataforma de láser para cirugía de la córnea (por ejemplo, el control asíncrono de los accionadores, el seguimiento ocular; un nivel seguro de energía de cada pulso en un pulso) no se pueden llevar a la práctica fácilmente sin los innovadores cambios del sistema de láser.

- 35 Estos y otros objetos, características y ventajas de la presente invención resultarán más claros tras leer la siguiente descripción de detallada de formas de realización preferentes y dibujos adjuntos. Debe entenderse que, aunque las formas de realización se describan por separado, se pueden combinar características individuales de la misma con otras formas de realización.

#### **BREVE DESCRIPCIÓN DE LAS FIGURAS**

- 40 La fig. 1 es una representación esquemática de una cavidad amplificadora;
- la fig. 2 es una representación esquemática de un sistema de láser para llevar a cabo el procedimiento según una forma de realización preferente de la presente invención;
- la fig. 3 es un diagrama de flujo que ilustra el proceso de control en el sistema de láser;
- la fig. 4A ilustra el proceso de amplificación característico;

la fig. 4B ilustra la solución al problema de reducción de ganancia usando dos medios de amplificación diferentes;

la fig. 5A es una representación esquemática de un módulo terminal de bombeo de la cavidad (CEPM);

la fig. 5B ilustra la combinación de dos módulos terminales de bombeo de la cavidad (CEPM) en un único sistema de láser;

5 la fig. 6 es una representación esquemática de un bombeo selectivo de las regiones del espectro.

## DESCRIPCIÓN DETALLADA DE LAS FORMAS DE REALIZACIÓN PREFERENTES

La fig. 1 representa de manera esquemática una cavidad amplificadora 10.

Las superficies terminales M1 y M2 definen una cavidad amplificadora (también denominada cavidad de láser) 10. Las superficies terminales M1 y M2 son, preferentemente, espejos, que pueden ser planos, cóncavos o de otra forma apropiada. También resulta deseable que las pérdidas en las superficies terminales y a todo lo largo de la cavidad de láser se mantengan al mínimo (es decir, que se emplee una óptica con escasas pérdidas).

La cavidad amplificadora 10 comprende al menos un medio amplificador 11 (también denominado medio de ganancia o varilla de láser). El medio amplificador 11 es bombeado por la bomba 12, que puede ser una lámpara de destellos, un diodo láser u otros medios de bombeo adecuados, preferentemente, mediante una óptica de bombeo.

15 Dentro de la cavidad amplificadora 10 también se encuentran colocados unos medios de conmutación (o, para abreviar, un conmutador) 40.

Preferentemente, la cavidad amplificadora 10 además puede comprender al menos unos medios dispersivos 13 para manipular las características de la dispersión de la luz (es decir, de los impulsos) en el interior de la cavidad amplificadora 10, lo cual se explicará detalladamente más adelante, y unos medios de control de modo 14. Los medios de control de modo pueden comprender cualquier elemento óptico que imponga unas condiciones de contorno al campo electromagnético (el haz de láser) y, así, controle los modos transversal (por ejemplo, la anchura mínima del haz o *beam waist*) y longitudinal en el interior de la cavidad amplificadora 10. Dichos elementos ópticos pueden ser lentes, espejos planos o curvos, prismas, cuñas, aberturas abruptas o suaves, tales como aberturas de orificios diminutos o variaciones de modo en función de la intensidad, elementos difractivos tales como elementos holográficos, rejillas, elementos ópticos adaptativos tales como matrices de microespejos, espejos de membrana flexible, etc. Con unos medios de control de modo 14 adecuados, se puede dar la forma adecuada al modo transversal para optimizar el solapamiento del haz de la bomba y el haz amplificado. Además, la estabilidad, el perfil y la distribución del campo eléctrico en el interior de la cavidad de láser se pueden determinar y controlar.

Los medios de conmutación (conmutador) 40 influyen de manera controlable sobre las propiedades o características físicas de la luz, tales como la dirección de propagación, la longitud de onda, la polarización, etc., para generar de manera controlable 3 estados que corresponden a los 3 estados del impulso:

- Estado P1: semilla. Este estado se caracteriza por las altas pérdidas en la cavidad amplificadora 10 con la posibilidad de acoplar un impulso de luz exterior procedente de una fuente de impulsos externa 50.
- Estado P2: circulación. Este estado se caracteriza por las bajas pérdidas de la cavidad amplificadora 10; el impulso lumínico circula en la cavidad amplificadora 10.
- Estado P3: descarga. Este estado se caracteriza por las altas pérdidas en la cavidad amplificadora 10; con la posibilidad de desacoplar o emitir (por ejemplo, cambiando la dirección de la propagación) uno o más impulsos lumínicos y ponerlos a disposición de una aplicación (o un módulo de aplicación) 60.

Ahora se explicará brevemente el principio de la amplificación de impulsos en la cavidad amplificadora 10. Cuando los medios de conmutación 40 se encuentran en el estado correspondiente a P1, un impulso semilla procedente de una fuente de impulsos ópticos entra en la cavidad amplificadora 10 (semilla). El impulso empieza a circular en el interior de la cavidad amplificadora 10 cuando los medios de conmutación 40 se encuentran en el estado correspondiente a P2, realizando un número específico (predeterminado o predeterminable) variable o controlable de pasadas a través del medio de ganancia (bombeado) 11 y siendo amplificado en el mismo e incrementando su energía (circulación). Cuando los medios de conmutación 40 cambian de estado para pasar al estado correspondiente a P3, el impulso se dirige para que abandone la cavidad (descarga). Los medios de conmutación 40 pueden funcionar, por ejemplo, basándose en el principio de las variaciones de polarización, o en cualquier otra propiedad de los impulsos ópticos.

La fig. 2 muestra una representación esquemática de un sistema de láser para llevar a cabo el procedimiento de la

invención. La fig. 3 muestra, respectivamente, el diagrama de flujo que ilustra el proceso de control en el sistema de láser.

En referencia a las figs. 2 y 3, el sistema de láser comprende también unos medios de detección (sensor) 20, por ejemplo, un fotodiodo, que supervisan la dinámica o detectan una o más propiedades de los impulsos que se encuentran en el estado 2 (P2), en el que el impulso circula en la cavidad de láser 10, y obtienen o generan datos acerca de al menos una propiedad específica (predeterminada o predeterminable) del impulso que se halla en el interior de la cavidad amplificadora 10. El espejo M2 posee la característica de que una parte del impulso que se está amplificando alcanza el sensor 20 a cada vuelta en la cavidad amplificadora 10. Preferentemente, el ancho de banda de los medios de detección 20 es de aproximadamente 200 MHz o superior. La fuente de impulsos ópticos 50 envía, preferentemente a través de una óptica de entrada que no se muestra en las figuras, un impulso semilla, que, según el estado de los medios de conmutación 40, entra en la cavidad amplificadora 10. Los medios de conmutación 40 se controlan mediante los medios de control 30 para cambiar sus estados particularmente en función de la señal procedente de un disparador externo o de los ajustes del usuario 70. El impulso se descarga desde la cavidad amplificadora 10 cuando el conmutador 40 recibe la señal correspondiente desde los medios de control 30 y se pone a disposición de una aplicación (módulo de aplicación) 60. La cavidad amplificadora 10 puede comprender también unos medios de control de la anchura del impulso 15 para controlar la anchura del impulso (por ejemplo, compensando la dispersión de la velocidad de grupo por vuelta en la cavidad amplificadora 10).

En referencia a la fig. 3, que ilustra el proceso de decisión y control, se llevan a cabo las siguientes etapas:

S1: un impulso semilla procedente de la fuente generadora de impulsos ópticos 50 (o una fuente de semillas), por ejemplo un diodo láser, se acopla en el interior de la cavidad de láser 10 (o se dirige hacia la misma y queda atrapado en ella), a través de un conmutador 40, bajo el control de los medios de control 30. El conmutador 40 se encuentra en el estado correspondiente a P1.

Basándose en la señal procedente de los medios de control 30, se da comienzo a la etapa S2 o la etapa S3, es decir, el impulso circula en la cavidad de láser 10 o se descarga desde la misma.

S2: el impulso circula (realiza cierto número de pasadas) en el interior de la cavidad de láser 10. El conmutador 40, controlado por los medios de control 30, se encuentra en el estado correspondiente a P2.

S3: el impulso (amplificado) abandona la cavidad de láser 10 (es descargado desde la misma), el conmutador controlado por los medios de control 30 se encuentra en el estado correspondiente a P3.

Mientras el impulso circula en la cavidad de láser 10, se producen los siguientes pasos:

S4: los medios de detección 20 supervisan el avance de la amplificación en la cavidad de láser, es decir, obtienen datos acerca de al menos una propiedad del impulso y/o secuencia de impulsos, tales como: la energía del impulso, su duración, intensidad máxima, forma del impulso y/o temporización.

S5: los medios de control 30 reciben una señal de los medios de detección 20 basada en los datos detectados.

S6: los medios de control 30 comparan la señal recibida procedente de los medios de detección con unos datos externos (predeterminados o predeterminables) y controlan los estados de los medios de conmutación, en particular los medios de conmutación 40, para dar comienzo a la etapa S2 o S3. Además, puede enviar preferentemente una señal a los medios de modulación de la bomba para modular las características de bombeo o ganancia y/o a otros medios, capaces de cambiar las propiedades del proceso de amplificación (etapa S7).

Los datos externos pueden comprender, por ejemplo, datos de ajustes de usuario o de disparador externo (etapa S11).

Más preferentemente, los datos externos pueden comprender datos que indiquen el avance del procesamiento en la aplicación de destino 60 detectado por los medios de detección (sensor) 61 (etapa S10), de tal manera que el control de la secuencia de impulsos se sincronice con el avance (el efecto logrado) de la aplicación de destino o se la haga depender del mismo (bucle cerrado). Aún más preferentemente, los datos externos pueden comprender una señal procedente de la fuente de impulsos 50 (etapa S9), a fin de sincronizar los medios de conmutación con la fuente de impulsos.

Los datos externos también pueden comprender unos datos previos obtenidos por los medios de detección 20 durante un proceso de amplificación en la cavidad amplificadora 10, de manera que el momento en que los medios de conmutación 40 llevan a cabo la conmutación se pueda extrapolar a partir del proceso de amplificación (hasta este instante). Más preferentemente, los medios de control 30 controlan los medios de conmutación 40 de modo que se tengan en cuenta las propiedades (características) del proceso de amplificación detectadas hasta el momento (es decir, los datos obtenidos por los medios de detección 20 durante el proceso de amplificación en la cavidad amplificadora 10).

En particular, los datos externos, que se pueden almacenar adecuadamente en una memoria o base de datos (que no se muestra), se pueden actualizar de manera dinámica o periódica basándose preferentemente en los datos obtenidos hasta el momento o, dicho de otro modo, se pueden extrapolar basándose en los datos previos. Los medios de control 30 actúan en función de la diferencia entre los datos externos y los datos detectados que muestran preferentemente un comportamiento proporcional, diferencial y/o integral y extrapolan el instante correcto de la conmutación (de los medios de conmutación 40) a partir del proceso de amplificación característico, de manera que se emitan impulsos con las propiedades deseadas desde el sistema de láser.

Más preferentemente, los medios de control 30 pueden decidir acerca de la modulación de la bomba óptica 12 y enviar respectivamente una señal a una bomba o medios de modulación de ganancia para modular la bomba óptica (S7).

10 Los medios de conmutación 40 pueden comprender también al menos un elemento de conmutación pasivo, cuyo estado no dependa de (la señal procedente de) los medios de control 30 o solo lo haga de manera indirecta. Esta secuencia de control se puede llevar a la práctica preferentemente como un programa informático grabado adecuadamente en un producto informático o como una señal en una portadora de la señal. El producto informático puede llevarse a la práctica en o como una FPGA (matriz de puertas programables in situ) y/o un ASIC (circuito integrado de aplicación específica).

15 La fig. 4A es un gráfico que ilustra el proceso de amplificación característico en el estado P2, es decir, cuando el impulso circula en la cavidad de láser 10. La abscisa de este gráfico representa el tiempo T durante el que el impulso circula en la cavidad de láser 10 (es decir, el número de pasadas), y la ordenada muestra la energía del impulso E.

El proceso de aplicación característico en el estado P2 se puede dividir en 2 fases:

- 20 – en el intervalo  $T_0...T_1$ : fase de amplificación, caracterizada por el aumento exponencial para una pequeña amplificación de señal, después un incremento de energía hasta la energía de saturación  $E_s$ . En esta fase, se puede dar a la amplificación una forma ventajosa mediante, por ejemplo, una modulación adecuada del bombeo óptico (o modulación de ganancia).
- 25 – En el intervalo  $T_1...T_\infty$ : fase de pérdida, caracterizada por la pérdida exponencial de energía del impulso ocasionada por las pérdidas en la cavidad de láser 10, tales como las pérdidas por reflexión o dispersión, etc.

Un aspecto del proceso de amplificación característico es la reducción iterativa del espectro del impulso, provocada por el ancho de banda finito del medio de amplificación 11. Debido a la reducción del espectro del impulso, tras la amplificación, la duración del impulso original (o impulso semilla) no se puede recuperar completamente y, en consecuencia, el impulso amplificado se alarga en el tiempo. Este problema se puede aliviar combinando 30 preferentemente dos o más medios amplificadores, que, a un ancho de banda comparable de los perfiles de amplificación, poseen unos máximos de amplificación desplazados entre sí una distancia adecuada, de tal manera que el perfil de amplificación resultante de la cavidad amplificadora 10 posea un ancho de banda aumentado, tal como se muestra en la fig. 4B, que ilustra el cambio de la ganancia G (ordenada) frente a la longitud de onda  $\lambda$  (en unidades absolutas) del impulso que circula en la cavidad amplificadora 10 (abscisa). La línea en forma de cadena de la fig. 4B 35 ilustra el perfil de ganancia de un primer medio de ganancia, la línea de puntos ilustra el perfil de ganancia del segundo medio de ganancia, la línea discontinua en forma de cadena ilustra el perfil de ganancia resultante. Usando dicha combinación de medios amplificadores, tal como se muestra en la fig. 4B, se puede incrementar el ancho de banda resultante del perfil del medio de ganancia y los impulsos (impulsos semilla) se pueden amplificar hasta alcanzar potencias máximas más elevadas.

40 El instante en el que se origina el impulso en una secuencia de impulsos y la energía del impulso se deberían poder seleccionar libremente. El sensor (o medios de detección 20) y la electrónica analógica que se requiere para lograrlo deberían ser apropiadamente rápidos, preferentemente, hasta tal punto que permita analizar las propiedades del impulso (por ejemplo, la energía del impulso) dentro de una pasada inversa de la cavidad amplificadora 10. Los medios de detección 20 deberían tener, preferentemente, un ancho de banda de aproximadamente 200 MHz o superior.

45 El medio de amplificación 11 puede ser, por ejemplo, un medio de Ti:zafiro, Nd:YAG (granate de itrio y aluminio contaminado con neodimio), Nd:vidrio; Nd:YLF (fluoruro de itrio y litio contaminado con neodimio); Yt:vidrio, Cr:LiSaF u otro medio amplificador (de ganancia) apropiado, en particular, un medio de ganancia adecuado para la amplificación de impulsos ultracortos (del orden del femto y picosegundo). La fuente de impulsos ópticos es preferentemente una fuente de láser, por ejemplo, un oscilador de Nd:vidrio, diodo de láser, láser de Ti:zafiro, etc., preferentemente capaz de 50 generar impulsos ultracortos (del orden del femto y el picosegundo), que se acopla a la cavidad amplificadora 10, preferentemente, a través de una óptica de entrada. Como es natural, la cavidad amplificadora 10 también puede comprender otros elementos ópticos, tales como, por ejemplo, espejos, lentes, prismas, rejillas de difracción, moduladores espaciales de luz, etc., formando, por ejemplo, una unidad de control de modo, un mecanismo de enfoque,

etc.

Los medios de control 30 se pueden llevar a la práctica como una FPGA (matriz de puertas programables in situ) o ASIC (circuito integrado de aplicación específica), que se puede sincronizar con la fuente de impulsos semilla ópticos. Preferentemente, el ancho de banda de los medios de detección 20 y/o medios de control 30 es aproximadamente de 5 200 MHz o superior. Los medios de conmutación pueden comprender moduladores de luz electro-ópticos (EOM); moduladores de luz acústico-ópticos (AOM); moduladores magneto-ópticos; medios de conmutación basados en el cambio en la longitud de onda, por ejemplo materiales no lineales polarizados periódicamente tales como el niobato de litio, KTP para una conversión de frecuencia eficiente junto con un recubrimiento especular/divisor de haz dicróico y/u otros conmutadores ópticos de alta velocidad. La frecuencia de repetición de los medios de conmutación óptica se 10 encuentra preferentemente en el intervalo de 1 a 200 kHz, más preferentemente por encima de los 10 kHz.

La detección de la energía actual del impulso se puede llevar a cabo, por ejemplo, integrando la señal o los datos procedentes del fotodiodo (tal como un diodo de GaAs) acerca de una o más propiedades del impulso que circula en la cavidad amplificadora y haciéndolos pasar a través de un circuito de muestreo y retención. Debido a que, en el presente, el tiempo de latencia de los conmutadores ópticos convencionales está por encima del tiempo necesario para 15 que un impulso dé una vuelta en la cavidad amplificadora 10, preferentemente los medios de control 30 extrapolan el instante en el que va a ser emitido (descargado) el impulso desde la cavidad amplificadora 10, mediante el uso de modelos teóricos de láser del comportamiento del láser (amplificador) (es decir, modelando el proceso de amplificación). Esto permite dar comienzo a la conmutación óptica mediante los medios de conmutación 40 en el instante específico, de modo que, más tarde, se emita desde la cavidad amplificadora 10 un impulso con al menos una propiedad específica 20 (predeterminada o predeterminable) y ponerlo a disposición de, por ejemplo, el módulo de aplicación 60 en la salida del sistema de láser para su uso posterior.

Otro aspecto del proceso de amplificación es el retardo temporal variable (diferente tiempo de propagación) de los diferentes componentes espectrales en el interior de la cavidad amplificadora 10, que requiere, preferentemente, una compensación de la dispersión de la velocidad de grupo, para evitar un desfase, especialmente de impulsos cortos. La 25 dispersión de todos los elementos en el interior de la cavidad de láser 10 se puede compensar con la ayuda de unos medios de compensación de la dispersión 15 (medios de control de la anchura del impulso) que comprenden unos elementos respectivos, por ejemplo, rejillas de difracción, prismas o una combinación de ellos, de manera que, preferentemente, la dispersión efectiva sea sustancialmente cero. De este modo, se puede asegurar que la forma del impulso original y, en particular, la duración del impulso se conserva en cada instante posterior.

30 La dispersión de todos los elementos en el interior de la cavidad de láser 10 se puede compensar mediante unos medios de compensación de la dispersión 15 que comprenden, por ejemplo, una rejilla de difracción o un prisma, o un conjunto de múltiples elementos (por ejemplo, un conjunto de múltiples prismas), de manera que, en total, no se produzca dispersión. Esto garantiza que en cualquier instante del futuro, la forma del impulso original, en particular la duración del impulso, se pueda mantener sustancialmente constante.

35 Otra posibilidad consiste en usar ventajosamente la cantidad de dispersión por pasada (o vuelta) en la cavidad amplificadora para generar impulsos con diferente duración o para estirar los impulsos en el tiempo sucesivamente de manera que la energía máxima del impulso durante el proceso de amplificación se pueda mantener siempre por debajo de un valor crítico  $E_{crit}$ , por ejemplo más pequeño que el umbral de deterioro del medio amplificador 11. Preferentemente, la cavidad amplificadora 10 comprende también unos medios dispersivos 13 en el interior de la 40 cavidad amplificadora 10, de modo que se introduce una cantidad específica de la dispersión por pasada (o vuelta) en la cavidad amplificadora, para que se logre una variación deseada de la duración del impulso y/o la restricción de la energía máxima. La dispersión acumulada (por ejemplo, la dispersión de la velocidad de grupo) se puede compensar en unos medios de compensación externos, que comprendan, por ejemplo, al menos una rejilla o un material a granel dispersivo que resulte adecuado.

45 Además, preferentemente, los medios dispersivos 13 (por ejemplo, un conjunto de prismas tal como se muestra en la fig. 6) se pueden usar preferentemente para amplificar selectivamente zonas o bandas espectrales específicas para impedir el estrechamiento de la ganancia descrito más arriba. Tal como se muestra en la fig. 6, los medios dispersivos 13, en este caso una combinación de dos prismas 106 y 107 generan una separación espacial de los componentes espectrales del impulso en el medio amplificador 111, que después se amplifican selectivamente. Tal como se muestra 50 en la fig. 6, la amplificación selectiva se puede llevar a cabo, por ejemplo, mediante el uso de una bomba óptica que comprende al menos un modulador espacial de luz (SLM) 108 para dirigir la luz de la bomba hacia una región de amplificación específica con el fin de amplificar selectivamente regímenes individuales de longitud de onda (por ejemplo, las regiones del azul o el rojo) dentro del perfil de amplificación del medio amplificador 111. Así se alivia el efecto del estrechamiento de ganancia descrito más arriba.

Al aumentar la distancia  $d = \overline{M_1 M_2}$  entre las superficies terminales (espejos terminales) de la cavidad de láser c, la distancia temporal  $T = 2d/c$  entre dos pasadas (o vueltas) del impulso en la cavidad se puede ajustar de tal manera que se obtenga un tiempo de conmutación de los medios de conmutación 40 que sea técnicamente realizable. Se debe seleccionar la longitud de la cavidad amplificadora 10 más larga posible, para permitir un tiempo de respuesta (reacción) de los medios de conmutación 40 y los medios de control 30 que sea técnicamente realizable.

Las figs. 5A y 5B muestran una realización ventajosa de un mecanismo de bomba para un sistema de láser capaz de generar secuencias de impulsos con una alta frecuencia de repetición/temporización del impulso. La realización del mecanismo de bomba también denominada módulo terminal de bomba de cavidad (para abreviar, CEPM) 100 se muestra en la parte superior de la fig. 5A, y su representación esquemática en la parte inferior izquierda de la fig. 5A. Se pueden combinar dos CEPM 100 con un conmutador electro-óptico (por ejemplo, una célula Pockels) 141 y un polarizador 142 (por ejemplo, un polarizador de película fina) en un láser de amplificación, tal como se muestra en la fig. 5B. En referencia a las figs. 5A y 5B, este sistema se caracteriza por el multiplexado del mecanismo de bomba, es decir, tal como se muestra en las figuras, la luz de dos pares de diodos de láser 101, 102 que están dispuestos generalmente en el lado izquierdo y en el derecho del medio amplificador 111 se combina mediante el divisor de haz 103 y se dirige a través de la óptica de bombeo 104 al medio amplificador 111. El medio amplificador 111 puede tener una forma sustancialmente simétrica, o ser tal como se muestra en la fig., 5A, asimétrico con una superficie plana (que también puede ser una superficie especular) y al menos una parte de la segunda superficie cortada preferentemente a un ángulo de Brewster. Además, el CEPM comprende un prisma 105 que compensa la asimetría, de manera que con sustancialmente la misma disposición de los diodos de láser 101, 102, se pueden usar respectivamente unas ópticas de bombeo en el lado izquierdo y en el derecho del medio amplificador 111, con lo que se reduce, por ejemplo, la complejidad del sistema. Además, el CEPM 100 comprende un conjunto de espejos M11, M12, M13, M14. La luz bombeada por el primer par de diodos de láser 101, 102 entra en el medio amplificador 111 a través del espejo M11. Los espejos M13 y M14 forman en conjunto un mecanismo de ajuste de foco 106. La fig. 5B muestra una combinación de dos CEPM en un único sistema de amplificación de láser (es decir, combinados para formar una única cavidad amplificadora 10) con la ayuda de un polarizador de película fina 141 y una célula Pockels 142, que forman en conjunto unos medios de conmutación 40 para la entrada/salida del pulso de la cavidad amplificadora 10. El sistema también comprende una lámina de onda de  $\lambda/2$  143, en la que  $\lambda$  es la longitud de onda del impulso, y los espejos M15, M16 y M17.

Se puede construir una fuente de láser con la secuencia de impulsos arbitrarios e impulsos bajo demanda como un módulo separado o se puede integrar en un sistema más grande escogido para una aplicación específica, con lo que se utiliza de forma eficaz la energía lumínica restringida en el tiempo y el espacio (impulso de luz). Para diseñar un sistema entero para una aplicación particular, la fuente de láser se puede integrar con, por ejemplo, una unidad/módulo de aplicación, software de control, hardware/elementos electrónicos de control, piezas mecánicas y una carcasa.

#### LISTA DE REFERENCIAS

35	10	Cavidad amplificadora/cavidad de láser
	M*	Espejos d
	11, 111	Medio amplificador
	12	Bomba
	13	Medio dispersivo
40	14	Medios de control de modo
	15	Medios de compensación de la dispersión
	20	Medios de detección
	30	Medios de control
	40	Medios de conmutación
45	50	Fuente de impulsos
	60	Módulo de aplicación
	61	Medios de detección del avance de la aplicación

70	Disparador externo / ajustes de usuario
100	CEPM (módulo terminal de bomba de cavidad)
101, 102	Diodos de láser
103	Divisor de haz
5 104	Módulo de óptica de bombeo
105 a 107	Prisma
108	SLM
111	Medio de ganancia
141	Polarizador de película fina
10 142	Célula Pockels
143	Placa de onda

**REIVINDICACIONES**

1. Procedimiento de generación de al menos un impulso y/o al menos una secuencia de impulsos con al menos una propiedad del impulso específica tal como: la energía del impulso, la duración, intensidad máxima, forma del impulso y/o temporización en un sistema de láser, que comprende una cavidad amplificadora (10) y una fuente de 5 impulsos semilla (50), y dicho procedimiento comprende las siguientes etapas:
    - supervisión de un procedimiento de amplificación en la cavidad amplificadora (10) y obtención de datos acerca de al menos una propiedad del impulso de al menos un impulso y/o la al menos una secuencia de impulsos;
    - comparación de la propiedad del impulso con los datos de referencia y formación de una señal de salida;
  - 10 control de al menos unos medios de conmutación (40) en el interior de la cavidad amplificadora (10) en función de la señal de salida, comprendiendo la etapa de introducción, emisión y/o retención de al menos un impulso en la cavidad amplificadora (10), de tal manera que la al menos una propiedad de la al menos una secuencia de impulsos y/o el al menos un impulso en una salida del sistema de láser posea sustancialmente un valor específico, caracterizado porque
  - 15 los datos de referencia comprenden datos recibidos procedentes de
    - un disparador externo (70);
    - dispositivo de entrada de ajustes de usuario;
    - la fuente de impulsos semilla (50), que emite un impulso semilla dirigido hacia el amplificador de láser;
  - 20 unos medios de supervisión (61), que supervisan el avance de un proceso de una aplicación en el que toma parte el al menos un impulso y/o la al menos una secuencia de impulsos; y/o
    - unos datos previos obtenidos por los medios de detección (20) durante un proceso de amplificación en la cavidad amplificadora (10),
- y en el que los datos de referencia se pueden actualizar, particularmente de forma dinámica.
2. Procedimiento de generación de secuencias de impulsos según la reivindicación 1, en el que los impulsos 25 en la salida del sistema de láser son impulsos ultracortos, en particular, impulsos del orden del femto o el picosegundo.
  3. Programa informático que comprende instrucciones que, una vez cargadas en un ordenador, llevan a cabo el procedimiento de generación de secuencias de impulsos según las reivindicaciones 1 o 2.



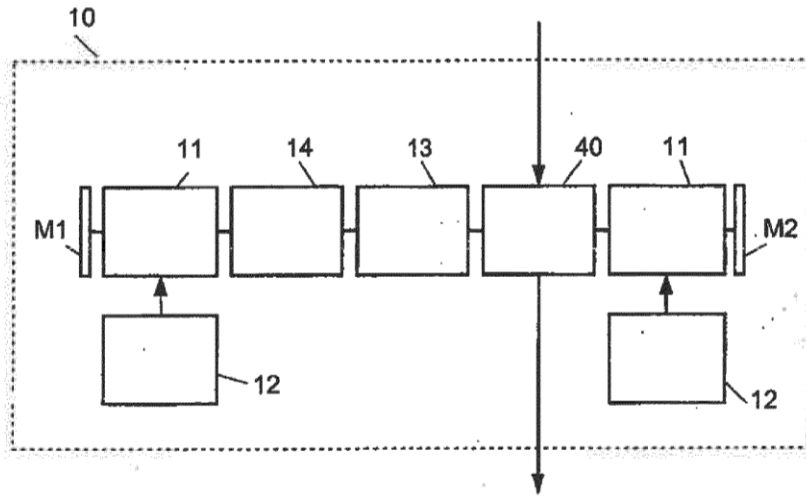


Fig. 1

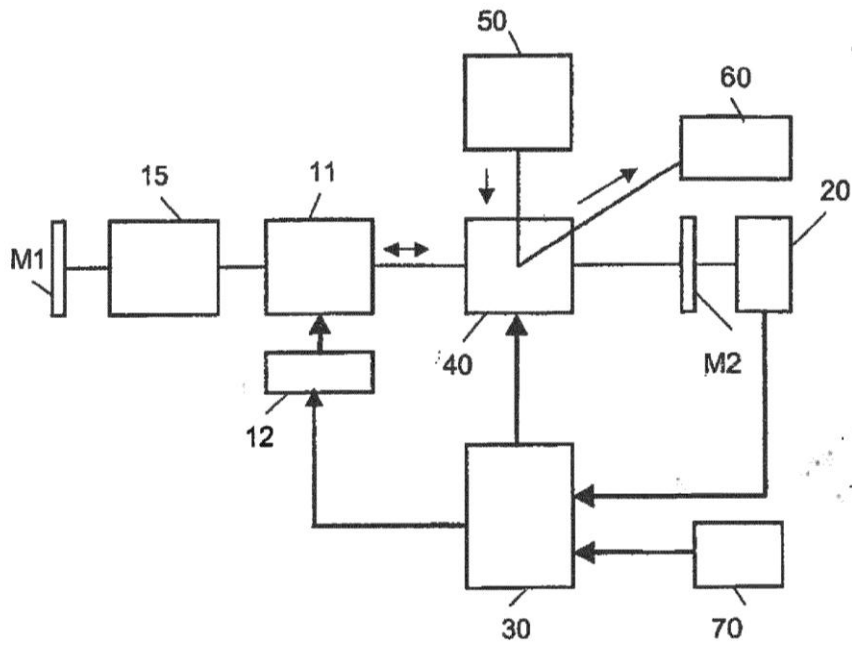


Fig. 2

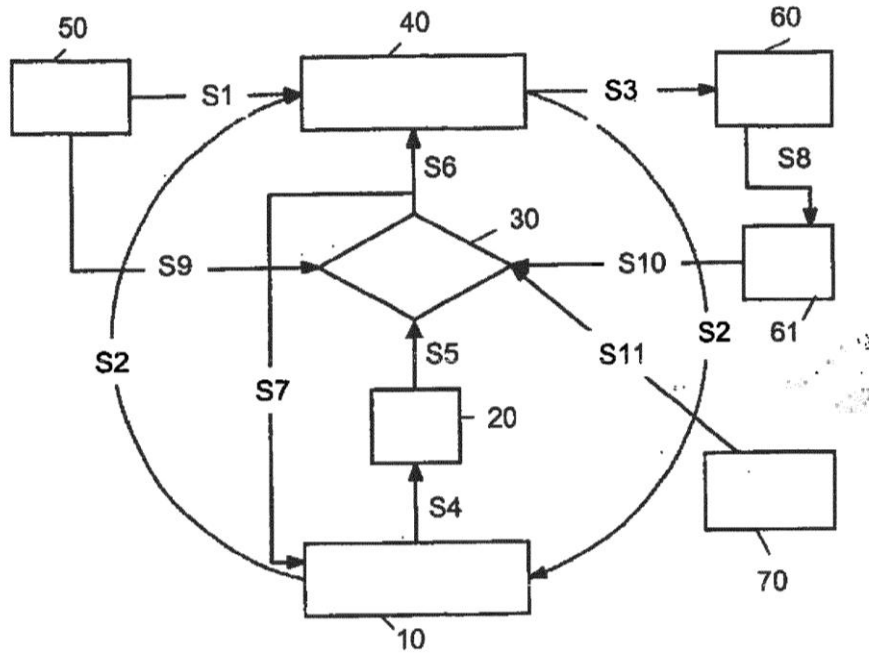


Fig. 3

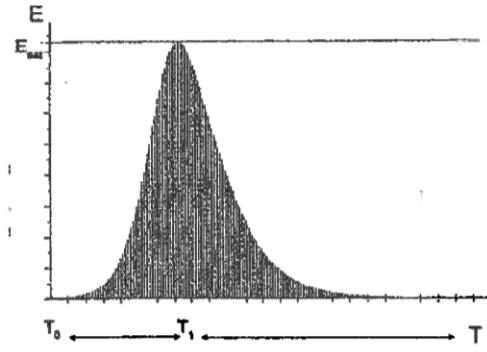


Fig. 4A

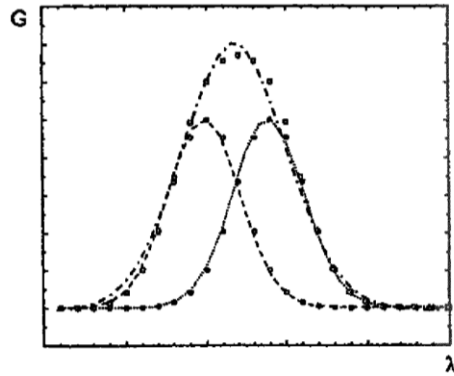


Fig. 4B

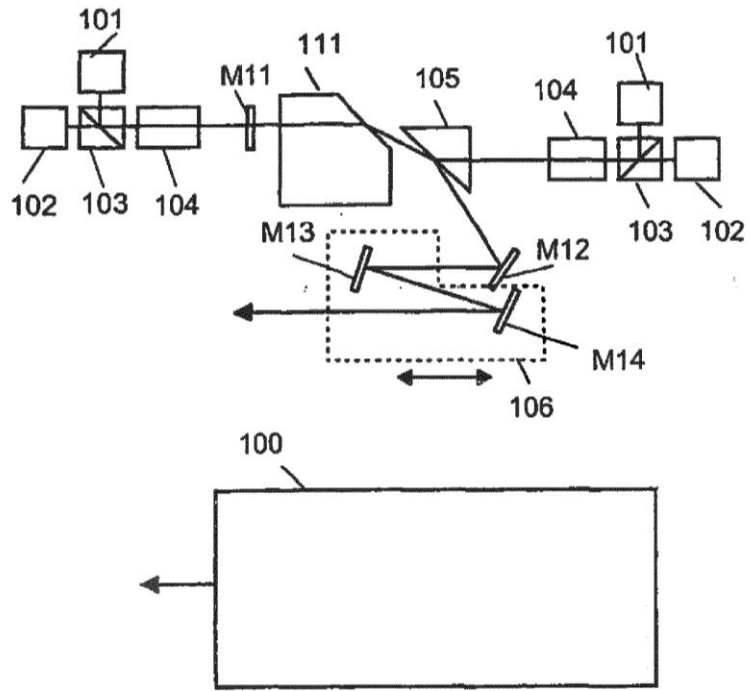


Fig. 5A

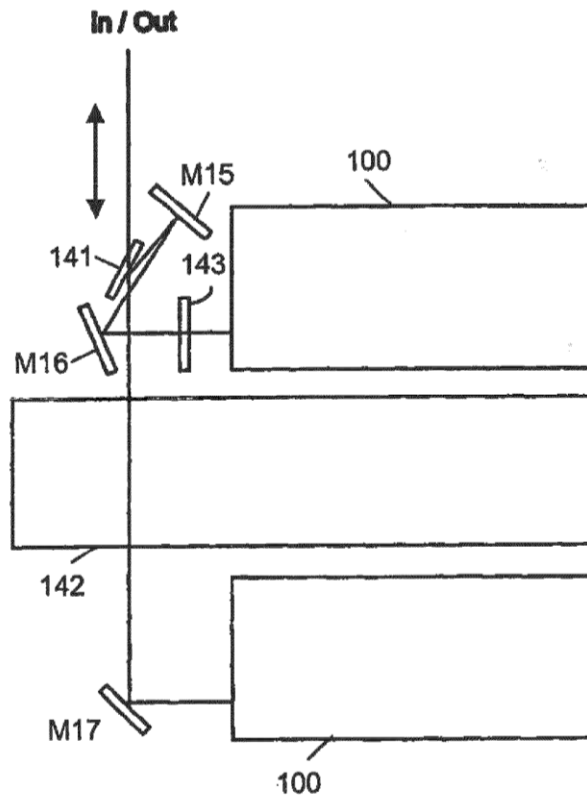
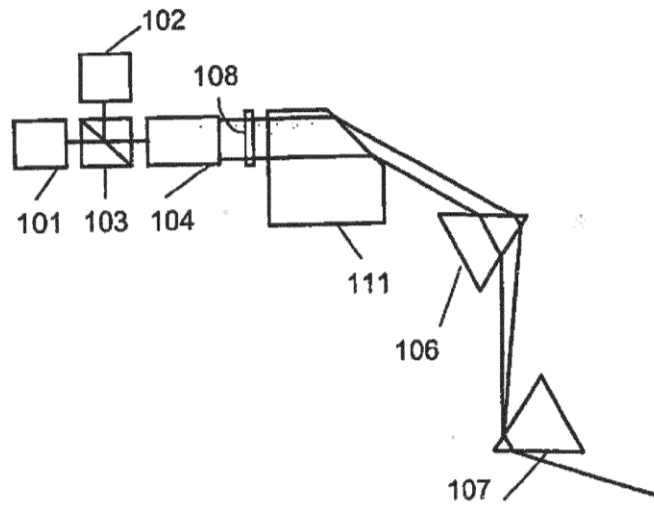


Fig. 5B



**Fig. 6**