

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 373 005**

51 Int. Cl.:
G02B 27/09 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

- 96 Número de solicitud europea: **08843084 .8**
96 Fecha de presentación: **10.10.2008**
97 Número de publicación de la solicitud: **2203779**
97 Fecha de publicación de la solicitud: **07.07.2010**

54 Título: **HOMOGENEIZADOR QUE INCLUYE UN LAMINADO DE FASE.**

30 Prioridad:
12.10.2007 FR 0758288

45 Fecha de publicación de la mención BOPI:
30.01.2012

45 Fecha de la publicación del folleto de la patente:
30.01.2012

73 Titular/es:
**ECOLE POLYTECHNIQUE
ROUTE DE SACLAY
91128 PALAISEAU CEDEX, FR y
SILIOS TECHNOLOGIES**

72 Inventor/es:
**CANOVA, Federico;
CHAMBARET, Jean-Paul;
TISSERAND, Stéphane y
REVERSAT, Fabien**

74 Agente: **Díaz Nuñez, Joaquín**

ES 2 373 005 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

Homogeneizador que incluye un laminado de fase.

5 **[0001]** La presente invención se refiere a un sistema para homogeneizar un impulso láser emitido por una fuente láser con el fin de iluminar de modo homogéneo un objetivo.

10 **[0002]** Dicha invención tiene una aplicación particularmente interesante en el campo del bombeo por láser de medios amplificadores sólidos femtosegundo intensos.

15 **[0003]** Efectivamente, la homogeneidad del bombeo por láser de los amplificadores femtosegundo basados particularmente en la tecnología Ti: Saphir es un parámetro esencial debido a la dificultad de bombear los amplificadores de modo eficaz (desde el punto de vista de la extracción de energía), y robusto (desde el punto de vista del deterioro del material láser). El umbral de deterioro de Ti: Saphir, en régimen de nanosegundo, se estima o entre 5 y 10 J/cm². Este valor no procede de un estudio sistemático sino más bien de una estimación basada en la experiencia. La indeterminación sobre el valor del umbral obliga a los "laseristas", a preservar los cristales de los riesgos de deterioro, a aspirar los materiales activos un poco más allá de la fluencia de saturación, es decir, en 1 J/cm², con una extracción de energía poco eficaz (20 %).

20 **[0004]** Por ejemplo, en el caso de un bombeo a 4 J/cm², la eficacia sería tres veces más grande (60 %). En tal caso, el umbral de deterioro del material estaría muy próximo a la fluencia de bombeo necesaria para una buena extracción de energía en los amplificadores de potencia, y cualquier falta de homogeneidad del láser de bombeo se traduciría en un riesgo de deterioro superior, y por lo tanto en una fuerte reducción de la fiabilidad o por una degradación de las prestaciones que conllevarían un coste suplementario importante.

25 **[0005]** Esta falta de homogeneidad está causada por los perfiles de bombeo que nunca han sido completamente dominados por las técnicas de diagnóstico por imagen utilizadas actualmente. Estos perfiles presentan modulaciones o lugares turbulentos a menudo importantes y provocan a veces la destrucción de los cristales láser que además son excesivamente caros; su precio alcanza varias decenas de miles de euros para los más grandes, y tarda hasta un año en dar beneficios: . Considerando que entre 60 % y el 70 % del precio de un amplificador láser se debe a los láseres por bombeo, es evidente que se identifica en el control de la calidad espacial de los haces láser de bombeo, un parámetro superior para el desarrollo de sistemas más perfectos.

35 **[0006]** Para limitar las modulaciones en los perfiles de bombeo, podemos considerar el hecho de que, cuando el haz se propaga algunos metros, sin salir de la zona de Rayleigh, las modulaciones son mínimas. Por ejemplo, si consideramos un láser de bombeo que expide 1 J/cm² (a 532 nm y a 10 Hz) sobre un haz gaussiano de 10 mm de diámetro, la zona de Rayleigh tendrá una extensión de 140 m. Pero, en realidad, los perfiles típicos de los láseres de bombeo están más próximos a un perfil "top-hat" (superGaussiano) que a un gaussiano porque esta forma está impuesta para optimizar la conversión en frecuencia y las prestaciones de la fuente en términos de energía útil. En el caso de un perfil superGaussiano, junto con las otras características del ejemplo considerado más arriba, tras sólo cuatro metros de propagación aparecen unas modulaciones que pueden volverse peligrosas para las ópticas y los cristales láser, aunque la zona de Rayleigh sea bastante más larga. Debido a estas modulaciones, es difícil utilizar en la práctica una distancia de propagación superior a 3 - 4 metros. La aproximación de la propagación en la zona de Rayleigh implica pues unas tensiones muy fuertes sobre la configuración de los amplificadores, a causa de las pequeñas distancias sobre las cuales el haz conserva efectivamente su homogeneidad.

45 **[0007]** De otro modo, para limitar las modulaciones en los perfiles de bombeo, podemos utilizar también la técnica que consiste en transportar el campo próximo (supuestamente homogéneo) del haz láser de bombeo, por imagen sobre el cristal amplificador. Pero esta técnica no protege para nada a este último con respecto a cualquier variación de intensidad eventual que pudiera aparecer con el tiempo sobre el láser de bombeo utilizado.

50 **[0008]** Sabemos hoy que, para limitar efectivamente estas modulaciones en los perfiles de bombeo, hay que homogeneizar la fuente, lo que implica el dominio completo del transporte de energía, a partir de los láseres de bombeo hacia el material activo. Gracias a este dominio, sería posible bombear los láseres a regímenes de alto rendimiento de extracción, pero próximos al umbral de deterioro y evitar así las súper intensidades susceptibles de dañar los cristales amplificadores. De manera general, el fin de un homogeneizador es asegurar una distribución de energía homogénea sobre el cristal amplificador cualesquiera que sean las distribuciones espaciales iniciales de los haces incidentes.

60 **[0009]** En este ámbito, se conoce un homogeneizador refractivo de matrices de microlentes. Dicho homogeneizador de subpupilas refractivo está compuesto por dos partes: un elemento óptico matricial compuesto por un conjunto de microlentes y un componente focalizador. Cada microlente representa una subpupila. Las microlentes separan el haz incidente en varios segmentos, y el componente focalizador superpone la proyección de cada subpupila sobre el plano focal. Esta técnica se apoya en la débil coherencia espacial del haz láser a la entrada para obtener un efecto de promedio (suma en intensidad) de las contribuciones de los distintos subelementos repartidos sobre toda la zona que hay que bombear.

65

- 5 [0010] Esta técnica ha mostrado unas buenas prestaciones sobre los sistemas de bombeo con una coherencia espacial débil. Sin embargo, sobre los sistemas de bombeo casi perfectamente coherentes espacialmente, la matriz de microlentes ha inducido modulaciones del 100 %. Incluso en el caso de los haces con débil coherencia espacial las mejores prestaciones de homogeneización se obtienen fuera del plano focal, ya que éste está modulado por los efectos de difracción de las estructuras periódicas, llamado efecto Talbot. En otras palabras, este efecto Talbot impide utilizar la distribución de energía en el plano focal y necesita utilizar planos donde la distribución de energía esté poco modulada pero menos próxima al "tophat" ideal.
- 10 [0011] Sabemos que el documento US4521075 describe un sistema para hacer incoherente espacialmente un haz láser dirigido hacia un objetivo. Este sistema incluye entre la fuente láser y el objetivo:
- Un componente óptico para introducir una incoherencia espacial entre varias partes del haz láser, y
 - Una lente de enfoque para dirigir el haz láser sobre el objetivo. Se produce entonces una perturbación que limita las interferencias a nivel del objetivo.
- 15 [0012] Sin embargo, la experiencia ha demostrado que este sistema no permitía homogeneizar una fuente distinta de un láser muy incoherente, por ejemplo diodos láser y láseres de excímeros.
- 20 [0013] El documento US2005/00 23478 se refiere a una lámina de fase con forma de elemento holográfico que permite modificar el perfil de un haz láser.
- 25 [0014] La presente invención tiene como objetivo remediar los inconvenientes anteriormente expuestos proponiendo un sistema de homogeneización que elimine los efectos de interferencia y de difracción.
- [0015] Otro fin de la invención es proponer un sistema capaz de garantizar una configuración de bombeo robusta y fiable para los amplificadores de gran potencia media en los sistemas láser femtosegundo, aplicado en un número creciente de instalaciones y destinado, por ejemplo, a alcanzar potencias de cresta superiores al Petawatt.
- 30 [0016] La presente invención también tiene por objeto un sistema eficaz desde el punto de vista de la extracción de energía, que permite controlar la intensidad del haz láser sobre el objetivo.
- [0017] Se alcanza por lo tanto por lo menos uno de los objetivos mencionados anteriormente gracias a un sistema para homogeneizar un impulso láser emitido por una fuente láser con el fin de iluminar de modo homogéneo un objetivo, al comprender este sistema las características especificadas en la primera reivindicación.
- 35 [0018] Según la invención, las subpupilas y los medios de enfoque son adaptados para que dichos haces láseres retardados se superpongan sobre el objetivo en una mancha homogénea. La lámina de fase puede estar constituida por una matriz de elementos ópticos que aplican cada uno un retraso sobre cada haz elemental que lo atraviesa. Este elemento óptico, llamado subpupila, genera un haz elemental orientado hacia una dirección determinada. La disposición en matriz y la orientación de las subpupilas se determinan de manera experimental o por cálculos. Los medios de enfoque se sitúan para que los haces elementales procedentes de las subpupilas se superpongan los unos sobre otros. Hay por lo tanto un recubrimiento completo de los haces elementales. Por el contrario, en el sistema descrito en el documento US4521075, los haces se solapan pero no se superponen. De hecho, con el sistema de la presente invención, sumamos en intensidad las distintas partes del haz sobre el conjunto de la zona a iluminar. Se realiza por lo tanto una verdadera homogeneización y no una simple incoherencia espacial.
- 40 [0019] Según la invención, la lámina de fase contiene N subpupilas tales como: N es sensiblemente igual a $1/\Gamma^2$, r siendo el contraste de la mancha homogéneo. De hecho, N es un número entero lo más próximo posible al valor $1/\Gamma^2$.
- 45 [0020] El contraste puede ser definido como una medida estadística de la homogeneidad del perfil espacial de un haz láser. Está definido como la relación entre la distancia tipo y la media, es $\frac{\sigma}{\langle I \rangle}$, siendo σ la intensidad. La razón de una caracterización estadística de homogeneidad de un haz procede del fuerte acoplamiento espacio-temporal presente en los impulsos láser, a causa del acoplamiento de los modos debido a la coherencia parcial espacial y temporal. La estadística que gobierna el contraste está descrita por el modelo matemático de las figuras con mancha ("speckle"). El teorema de ergodicidad es válido y la estadística que describe una realización instantánea es también válida para describir la evolución en el tiempo.
- 50 [0021] La presente invención permite establecer la relación entre la intensidad de la mancha homogénea, caracterizada aquí por su contraste, y el número de subpupilas engendradas por la lámina de fase. Esto es particularmente beneficioso para sistemas de bombeo láser de alta energía para las cadenas CPA-Ti:Saphir que están basadas en el Nd:YAG y Nd: cristal, en configuraciones de fuerte coherencia espacial. Se desacopla la fuente láser del objetivo con una especie desprotección óptica.
- 55 [0022] La presente invención también tiene por objeto un sistema eficaz desde el punto de vista de la extracción de energía, que permite controlar la intensidad del haz láser sobre el objetivo.
- 60 [0023] Se alcanza por lo tanto por lo menos uno de los objetivos mencionados anteriormente gracias a un sistema para homogeneizar un impulso láser emitido por una fuente láser con el fin de iluminar de modo homogéneo un objetivo, al comprender este sistema las características especificadas en la primera reivindicación.
- 65 [0024] Según la invención, las subpupilas y los medios de enfoque son adaptados para que dichos haces láseres retardados se superpongan sobre el objetivo en una mancha homogénea. La lámina de fase puede estar constituida por una matriz de elementos ópticos que aplican cada uno un retraso sobre cada haz elemental que lo atraviesa. Este elemento óptico, llamado subpupila, genera un haz elemental orientado hacia una dirección determinada. La disposición en matriz y la orientación de las subpupilas se determinan de manera experimental o por cálculos. Los medios de enfoque se sitúan para que los haces elementales procedentes de las subpupilas se superpongan los unos sobre otros. Hay por lo tanto un recubrimiento completo de los haces elementales. Por el contrario, en el sistema descrito en el documento US4521075, los haces se solapan pero no se superponen. De hecho, con el sistema de la presente invención, sumamos en intensidad las distintas partes del haz sobre el conjunto de la zona a iluminar. Se realiza por lo tanto una verdadera homogeneización y no una simple incoherencia espacial.

- 5 [0022] El sistema de la invención utiliza un homogeneizador difractivo que permite desplazar las contribuciones de las distintas subpupilas. Los haces procedentes de cada subpupila recorren un camino diferente. Puesto que estas diferencias de trayecto son más grandes que la duración de coherencia temporal, las contribuciones de las subpupilas serán incoherentes, y se añadirán entonces en intensidad.
- 10 [0023] La lámina de fase tiene una estructura con una débil periodicidad. La lámina no está compuesta por un motivo recurrente, ya que cada subpupila presenta un dibujo diferente. Gracias a esta característica la distribución de energía en el plano focal no está modulada por el efecto Talbot. Por lo tanto, se podrá trabajar sin desenfoque y con un "top hat" de buena calidad. La lámina de fase permite destruir la coherencia del haz de bombeo para obtener el bombeo más incoherente posible sobre el material láser.
- 15 [0024] El sistema óptico de homogeneización según la presente invención permite garantizar una repetitividad del perfil espacial en intensidad sobre el cristal. Esto permite obtener amplificadores de potencia más robustos. La robustez está vinculada al dominio de la distribución de energía, que garantiza el poder trabajar sin modulaciones y el no dañar los componentes ópticos.
- 20 [0025] Según la invención, los medios de enfoque pueden incluir una lente convergente, llamada lente de campo, dispuesta de tal modo que el objetivo se encuentra en la distancia de enfoque de esta lente convergente. Dicha lente convergente permite, en particular, conseguir el campo lejano (la transformada de Fourier) del producto entre el perfil del haz incidente y la función de transferencia óptica de la lámina de fase.
- 25 [0026] Según una característica ventajosa de la invención, se graba una información de la fase en cada subpupila de manera que la mancha homogénea presente una forma definida por la información de la fase. Esta configuración consiste a la vez en una forma geométrica de la mancha homogénea y en la forma "top-hat" en intensidad de esta misma mancha homogénea.
- 30 [0027] Preferentemente, esta información de fase se calculará a partir de la transformada de Fourier inversa a la forma de la mancha.
- 35 [0028] Prácticamente, la lámina de fase está constituida por una matriz de elementos ópticos que introducen un retraso de fase diferente con respecto a los elementos vecinos. Cada elemento óptico constituye una subpupila que proyecta un haz elemental hacia el objetivo. Las subpupilas definen la distribución de la energía en el plano focal de la lente de campo, y el "promedio" de la intensidad es proporcional al número total de subpupilas superpuestas.
- 40 [0029] La presente invención permite por lo tanto definir un componente elemental (subpupila) responsable de la distribución de energía según la forma deseada. Esta definición puede realizarse gracias al algoritmo de *Gerchberg-Saxton* y puede validarse mediante simulación.
- 45 [0030] Según una característica ventajosa de la invención, la diferencia de recorrido Δd es la siguiente: $\Delta d = T_c \cdot c$, siendo "c" la velocidad de la luz en el medio entre la lente y el objetivo.
- 50 [0031] Ventajosamente, la dimensión transversa de la lámina de fase es superior al diámetro del haz láser que constituye el impulso láser. Asimismo, la relación entre la dimensión transversa de cada subpupila y el diámetro del haz láser es proporcional al contraste r ; esto permite inmovilizar la geometría de la lámina de fase. De hecho, se supone que la amplitud del haz láser en la entrada de la lámina de fase es uniforme en cada subpupila. Gracias a esta hipótesis, el perfil en el plano focal es la superposición de las manchas de difracción de cada subpupila. Si el haz láser no es efectivamente uniforme sobre cada subpupila, la distancia con esta uniformidad se promediará mediante la superposición de las distintas manchas de difracción. Se prevé por lo tanto que la relación entre el tamaño del haz y el de cada subpupila sea lo suficientemente grande (> 10) como para que estas distancias de homogeneidad en el perfil del haz se igualen en el plano focal.
- 55 [0032] Según la invención, para una medida determinada de haz, la prestación de un homogeneizador dependerá de un compromiso entre el tamaño de las subpupilas, que define los efectos provocados por la difracción y la coherencia, y el número de subpupilas.
- 60 [0033] Según la invención, la lente puede quedar integrada en la lámina de fase. Esto es una aproximación llamada lente de Fresnel.
- [0034] Preferentemente, la fuente láser es un láser de bombeo y el objetivo es un medio amplificador sólido. El objetivo puede ser un cristal de zafiro dopado con titanio. La fuente láser puede ser un láser doblado en frecuencia y escogido entre los láseres siguientes: Nd:YAG; Nd:cristal, Nd:YLF, Yb:cristal, Yb:YAG.
- 65 [0035] Según otro aspecto de la invención, se propone una aplicación del sistema para el bombeo de medios amplificadores en una cadena láser C PA-Ti: Saphir.

[0036] Otras ventajas y características de la invención aparecerán en el examen de la descripción detallada de una realización no limitativa, y los dibujos adjuntos, en los que:

- 5 La figura 1 es una vista esquemática del sistema de homogeneización según la presente invención,
 La figura 2 es una vista esquemática del efecto de una lámina de fase según la invención en la distribución de energía de un haz láser;
 La figura 3 es una vista esquemática que ilustra el desfase provocado por la diferencia de recorrido en haces elementales de dos subpupilas adyacentes;
 La figura 4a es una vista esquemática de una lámina de fase según la invención con dos subpupilas en detalle;
 10 La figura 4b es una vista esquemática de un mosaico de subpupilas que constituyen una lámina de fase; y
 La figura 5a es una vista con más detalle de una subpupila y la figura 5b es una vista de la mancha homogénea sobre el objetivo.

15 **[0037]** Aunque la invención no se limita a lo anterior, vamos a describir a continuación la homogeneización de un haz láser de bombeo para un amplificador de potencia Ti:Saphir. El material amplificador Ti:Saphir tiene su máximo de absorción en unos 500 nm. La práctica totalidad de los sistemas de bombeo para los amplificadores de potencia están basados en el ión Neodimio situado ya sea en una malla cristalina YAG o YLF, como en una malla vítrea. La elección de este material y su utilización en régimen activo están dictadas por reflexiones económicas y tecnológicas. Estos sistemas de Neodimio son tensados mediante una lámpara flash con una tasa de repetición de
 20 varios Hz y emiten a 1 μm , y posteriormente son doblados en frecuencia para alcanzar las longitudes de onda de absorción del Ti:Saphir.

25 **[0038]** En lo que respecta a la figura 1 se aprecia un láser de bombeo Nd:YAG 1 que contiene en su salida un cristal doblador 2 después de haber realizado la amplificación. Este láser de bombeo 1 emite un impulso láser 3 a aproximadamente 500 nm hacia una lámina de fase 4. Esta última está representada de modo esquemático y muestra todos los pasos realizados. Esta lámina de fase 4 es un componente óptico difractivo constituido por una matriz de N elementos ópticos que redirigen el haz sobre el objetivo realizando un recorrido de longitud diferente para cada rayo. Cada elemento óptico constituye una subpupila. Dichos pasos permiten representar la diferencia de camino óptico entre dos haces elementales 5 y 6 precedentes de dos subpupilas diferentes. La lente de Fourier o la
 30 lente de campo 7 permite hacer converger el conjunto de haces elementales 5, 6 sobre una cara del amplificador 8. Estos N haces elementales 5, 6 se superponen sobre esta superficie creando una mancha homogénea 9.

35 **[0039]** La experiencia ha mostrado muy buenos resultados para un impulso láser cuya longitud de coherencia es ampliamente inferior a la duración del impulso y del orden de algunos picosegundos.

40 **[0040]** El efecto de la lámina de fase según la invención en la redistribución de la energía de un impulso láser puede ser simplificado tal y como se representa sobre la figura 2. El esquema representado muestra el principio de desviación del haz con lámina de fase 4 y la lente de Fourier 7 de la focal f. La lámina de fase 4 crea una imagen fuera del eje con un perfil homogéneo y "superGaussiano". La posibilidad de sumar las contribuciones de N subpupilas en intensidad y no en amplitud procede del recorrido óptico distinto de los N haces elementales. En cuanto al esquema de la figura 2, podemos imponer una condición, derivada del conocimiento de la coherencia temporal del haz láser, sobre la diferencia de recorrido entre los rayos de dos subpupilas adyacentes. Si la coherencia temporal de un impulso láser se define por T_c , la diferencia de recorrido entre subpupilas Δd necesaria para obtener una superposición incoherente de las partes del haz es:

45

$$\Delta d = \Delta q - \Delta p \geq T_c \cdot c$$

50 siendo c la velocidad de la luz, y Δq y Δp los recorridos de los rayos que proceden de dos subpupilas adyacentes. En la práctica, T_c se calcula a partir de la curva del impulso láser, y deducimos Δd .

55 **[0041]** Los puntos A y B representan los márgenes de la mancha homogénea 9 sobre la cual se redistribuye la energía al plano focal. La lámina de fase 4 y la lente 7 funcionan como una red que desplaza la mancha homogénea 9 fuera del eje óptico, en el orden de -1. Esta diferencia se representa por la cantidad ΔO . Los Δd de las subpupilas se representan por Δd . Δp , Δq , Δr y Δs representan los recorridos ópticos de los rayos de las diferentes subpupilas. La mancha homogénea está a una distancia f que corresponde a la focal de la lente de Fourier 7.

60 **[0042]** En la figura 3 se repite una parte del esquema de la figura 2. Se distinguen solamente dos haces elementales atrasados respectivamente de Δq y Δp . Esta figura 3 ilustra la relación entre la diferencia causada por los distintos recorridos de los rayos que proceden de dos subpupilas adyacentes y la coherencia temporal del haz. Se puede esquematizar el haz incidente en forma de sobre por debajo del cual están presentes distintos modos longitudinales, todos con una duración de coherencia temporal T_c .

[0043] Asimismo, se puede caracterizar el sistema según la invención, definiendo el nivel de intensidad de la mancha homogénea, es decir, la concentración resultante de los haces elementales sobre la cara del amplificador.

La invención es particularmente notable por el hecho de que, para una concentración r deseada sobre la mancha homogénea 9, se determina un número N de subpupilas que se suman todas en intensidad sobre el plano focal, de manera incoherente y gracias a la diferencia temporal, de tal modo que:

$$N = 1/\Gamma^2.$$

5 [0044] Asimismo, se puede caracterizar el sistema según la invención, definiendo la forma de la mancha homogénea 9, es decir su forma geométrica (círculo, cuadrado, estrella) y el perfil de su intensidad (« top hat »).

10 [0045] La configuración para conseguir perfiles "top-hat" en un campo lejano consiste en grabar una información de fase sobre la lámina de fase de sílice fundido. Los distintos subelementos (subpupilas) se juntan formando un mosaico. El principio del homogeneizador difractivo es el de propagación de los haces elementales en una dirección inducida por un sistema difractivo, de tipo red de difracción o lente de Fresnel. La lente de campo (integrada eventualmente en la lámina) permite superponer en el plano de Fourier los distintos haces elementales.

15 [0046] En la figura 4a se ven dos ejemplos de subpupilas de configuración 10 y 11. La figura 4b ilustra la estructura 12 en matriz de la lámina de fase utilizada para la homogeneización. A partir de una lámina compuesta por dos subelementos 10 y 11, calculados con condiciones iniciales diferentes, se podrá realizar una matriz de 576 elementos (24 x 24). La lámina sitúa el plano homogéneo fuera del eje.

20 [0047] En la figura 5a vemos un poco más detalladamente la subpupila 10. La forma obtenida en el plano de Fourier gracias al perfil grabado en dicha subpupila A se representa en la figura 5b. La configuración en el plano focal de la lente ha sido calculada como la transformada de Fourier numérica del perfil grabado. En la figura 5b, se ven dos perfiles "top-hat" del orden de 0, que corresponden al orden -1 y al orden +1. En el componente final 12, estructurado en la matriz, se graba una red para optimizar la redirección de energía en uno de los dos órdenes.

25 [0048] El problema de la reconstrucción de la fase a partir de medidas de intensidad ha dado origen a varias técnicas y algoritmos de cálculo. Entre las diferentes técnicas desarrolladas en el curso de los veinte últimos años, las técnicas más difundidas son las de Gerchberg-Saxon, para sistemas donde la aproximación paraxial es válida, y la de Yang-Gu, que generaliza la solución del método anterior a cualquier sistema óptico. Una aproximación equivalente es la de Dixit, que ha servido para optimizar las láminas de fase de los sistemas del NIF (National Ignition Facility).

30 [0049] La información directamente medible de manera experimental en un sistema óptico es el perfil de intensidad. Para reconstruir un perfil espacial definido y poder predecir un comportamiento en el momento de la propagación se debe también obtener una información sobre la fase espacial. Esta información puede ser recuperada a partir de instrumentos específicos o con algoritmos iterativos que utilizan la información de intensidad de dos perfiles espaciales conectados por una relación de transformada de Fourier. La consecuencia del desarrollo de estos algoritmos de cálculo permite disponer de un instrumento para definir la fase necesaria para obtener un plano conjugado donde las aportaciones de los diferentes subelementos están superpuestas. Esta técnica se utiliza para calcular los subelementos del homogeneizador y de la lente de Fourier que permite obtener el campo lejano.

35 [0050] Desde el punto de vista práctico, el procedimiento consiste en definir una configuración para el haz en el plano focal como perfil inicial y registrar el perfil experimental de la fuente láser de bombeo como una segunda fuente de datos. Una serie de ecuaciones permitirá calcular el perfil de fase que hay que grabar en la máscara para obtener el resultado deseado.

40 [0051] A título de ejemplo, vamos a describir a continuación el cálculo de la fase a partir del algoritmo de Gerchberg-Saxon.

45 [0052] P1 representa una parte del perfil espacial del láser de bombeo, con sus fluctuaciones típicas, y P2 representa la distribución deseada en el plano focal. Las dos funciones de onda en los planos P1 y P2 se representan por U1 y U2, y están definidas como:

$$U_1(\bar{X}_1) = \rho_1(\bar{X}_1) \exp[i\phi_1(\bar{X}_1)]$$

$$U_2(\bar{X}_2) = \rho_2(\bar{X}_2) \exp[i\phi_2(\bar{X}_2)]$$

[0053] El eje z se escoge paralelamente al eje de propagación del láser y los puntos de coordenadas transversas se describen por las matrices $X_1 = (x_1, y_1)$ y $X_2 = (x_2, y_2)$. La relación entre los dos planos se determina mediante una relación de transformación lineal $G(X_2, X_1)$ de tipo

$$U_2(\overline{X}_2) = \int G(\overline{X}_2, \overline{X}_1) U_1(\overline{X}_1) d\overline{X}_1 = \hat{G} U_1(\overline{X}_1)$$

5

[0054] En los sistemas ópticos donde la aproximación paraxial es válida, \hat{G} es un operador unitario (en el marco del algoritmo de Yang-Gu, válido fuera de la hipótesis de la aproximación paraxial, \hat{G} es un operador de Hermite). Se evalúa la eficacia con la que el perfil obtenido con la transformada del plano inicial $GU_1(X_1)$ se acerca al perfil deseado $GU_2(X_2)$ definiendo una norma D igual a una "distancia cuadrática", como por ejemplo:

10

$$D(\rho_1, \phi_1, \rho_2, \phi_2) = \|U_2 - \hat{G}U_1\| = \left[\int dx_2 |U_2(x_2) - \hat{G}U_1|^2 \right]^{1/2}$$

15

[0055] Sin perder generalidad en la solución del problema, podemos imponer a esta norma que sea igual a 0. Si $D = 0$ entonces se impone que $U_2 = \hat{G} U_1$, es decir, que el perfil deseado y el perfil obtenido deben ser exactamente iguales. Matemáticamente, esta condición se traduce en un problema de búsqueda de los extremos de la función D con arreglo a las variables $\rho_1, \Phi_1, \rho_2, \Phi_2$.

20

[0056] Podemos definir este problema con variables discretas para poder resolverlo numéricamente con ayuda de algoritmos. La condición que hay que respetar es que la preparación de muestras de las variables, del operador G y de los planos P1 y P2 respete el teorema de Nyquist-Shannon. Si esta condición es respetada, la información de fase puede ser recuperada.

25

[0057] Las ecuaciones utilizadas en el algoritmo de reconstrucción, escritas en forma matricial, son:

$$\phi_2(x_2) = \arg[\hat{G}\rho_1 \exp(i\phi_1)]$$

$$\phi_1(x_1) = \arg[\hat{A}_D^{-1} [\hat{G}\rho_2 \exp(i\phi_2) - \hat{A}_{ND}\rho_1 \exp(i\phi_1)]]$$

30

donde $\hat{A}_D = \hat{I}$ y $\hat{A}_{ND} = 0$ si \hat{G} es un operador unitario (condición del algoritmo Gerchberg-Saxon). La búsqueda de las soluciones pasa por un método iterativo que se apoya en hipótesis arbitrarias de salida relativas a las fases del principio de la iteración en el *plano inicial* $\phi_1^{(0,0)}$ y *final* $\phi_2^{(0,0)}$.

35

[0058] La salida del bucle de iteración se realiza cuando dos pasos sucesivos (m y m+1) cambian la fase en menos de la cantidad ϵ_1 , definida de modo arbitrario. La condición matemática de salida de las iteraciones es:

$$\int dx_1 |\phi_1^{(0,m)} - \phi_1^{(0,m+1)}| \leq \epsilon_1$$

40

[0059] Donde $\phi_1^{(0,m)}$ representa la fase inicial.

[0060] Este algoritmo permite definir un perfil de fase que hay que grabar en la lámina para obtener el perfil deseado sobre el plano focal.

45

[0061] Por supuesto, la invención no está limitada a los ejemplos que han sido descritos y numerosas prestaciones pueden ser aportadas a estos ejemplos sin salir del marco de la invención.

REIVINDICACIONES

- 5 1. Sistema para homogeneizar un impulso láser emitido por una fuente láser con el fin de iluminar de modo homogéneo un objetivo; dicho sistema incluye entre la fuente láser y el objetivo:
- 10 - Una lámina de fase constituida por una pluralidad de subpupilas aptas para generar una pluralidad de haces láseres retrasados hacia el objetivo, siendo la diferencia de recorrido Δd entre dos haces láseres retrasados adyacentes superior o igual a la longitud de la coherencia temporal $T_c \cdot C$ del impulso láser, con C como velocidad de la luz en el medio considerado, y unos
- 15 - Medios de enfoque; las subpupilas y los medios de enfoque se adaptan para que dichos haces de láseres retrasados se superpongan sobre el objetivo en una mancha homogénea, **caracterizado porque** se graba una información de fase en cada subpupila de modo que la mancha homogénea presenta una forma definida para la información de fase.
- 20 2. Sistema según la reivindicación 1, **caracterizado porque** la lámina de fase contiene N subpupilas: N es sensiblemente igual a $1/\Gamma^2$, siendo r el contraste de la mancha homogénea y estando definido particularmente como la relación entre la desviación tipo y la media, es decir $\Gamma = \sigma(I)/\langle I \rangle$, siendo I la intensidad.
- 25 3. Sistema según la reivindicación 1 ó 2, **caracterizado porque** el objetivo está dispuesto sobre el plano de Fourier del medio de enfoque, estando calculada la información de fase a partir de la transformada de Fourier inversa de la forma de la mancha.
- 30 4. Sistema según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado porque** los medios de enfoque incluyen una lente convergente dispuesta de tal modo que el objetivo se encuentra a la distancia de enfoque de dicha lente convergente.
- 35 5. Sistema según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado porque** la diferencia de recorrido Δd es: $\Delta d = T_c \cdot c$, siendo "c" la velocidad de la luz en el medio considerado.
- 40 6. Sistema según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado porque** la dimensión transversa de la lámina de fase es superior al diámetro del haz láser que constituye el impulso láser.
- 45 7. Sistema según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado porque** la relación entre la dimensión transversa de cada subpupila y el diámetro del haz láser que constituye el impulso láser es proporcional al contraste de la mancha homogénea Γ : Γ estando particularmente definido como la relación entre la separación tipo y la media, es decir $\Gamma = \sigma(I)/\langle I \rangle$, siendo I la intensidad.
- 50 8. Sistema según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado porque** la lente está integrada en la lámina de fase.
9. Sistema según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado porque** la fuente láser es un láser de bombeo y el objetivo es un medio sólido amplificador.
10. Sistema según la reivindicación 9, **caracterizado porque** el objetivo es un cristal de zafiro dopado con titanio.
11. Sistema según la reivindicación 9 ó 10, **caracterizado porque** la fuente láser es un láser doblado en frecuencia escogido entre los láseres siguientes: Nd:YAG; Nd:cristal, Nd:YLF, Yb:cristal, Yb:YAG.
12. Aplicación del sistema según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, para el bombeo de medios amplificadores en una cadena láser CPA-Ti:Saphir.

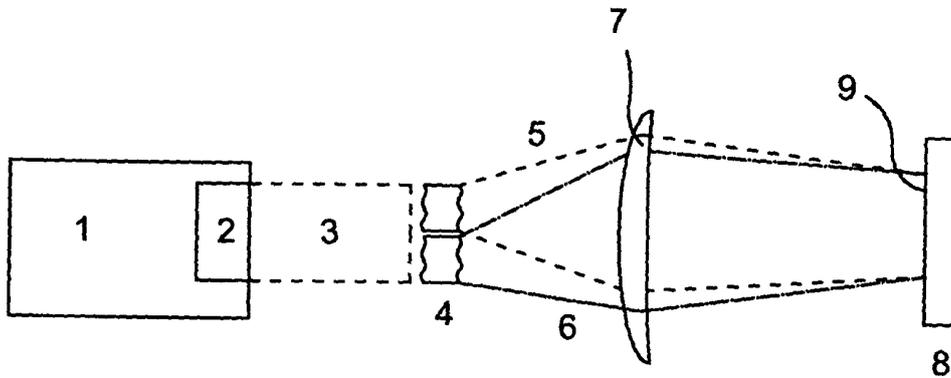


FIG. 1

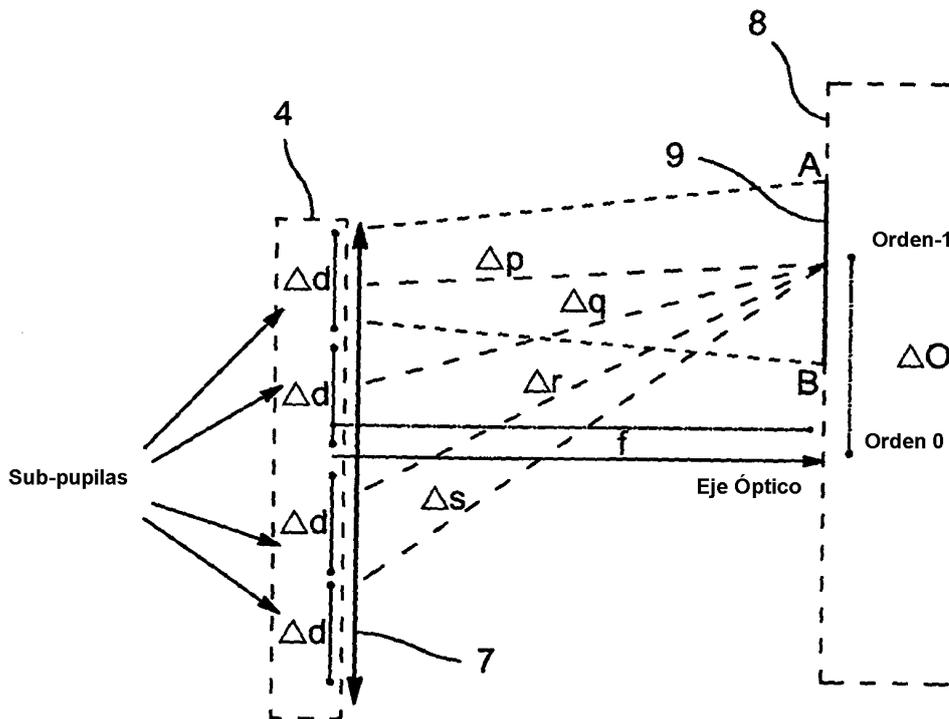


FIG. 2

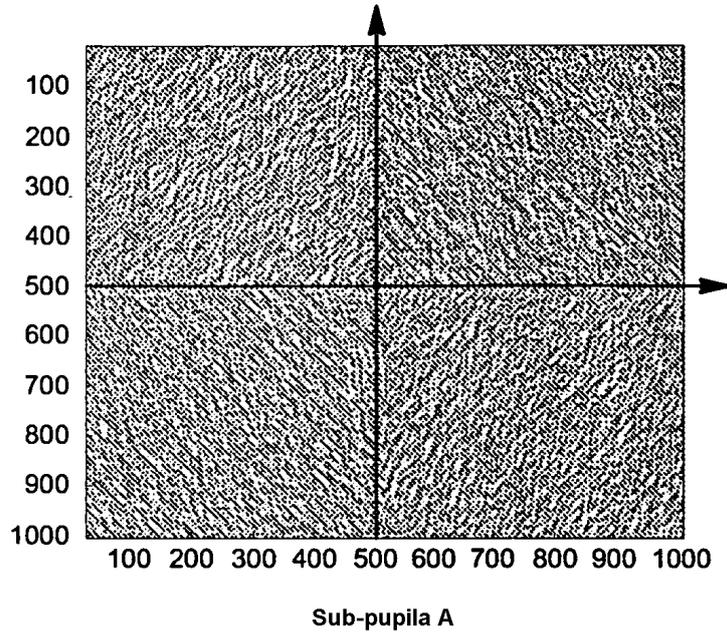


FIG. 5A

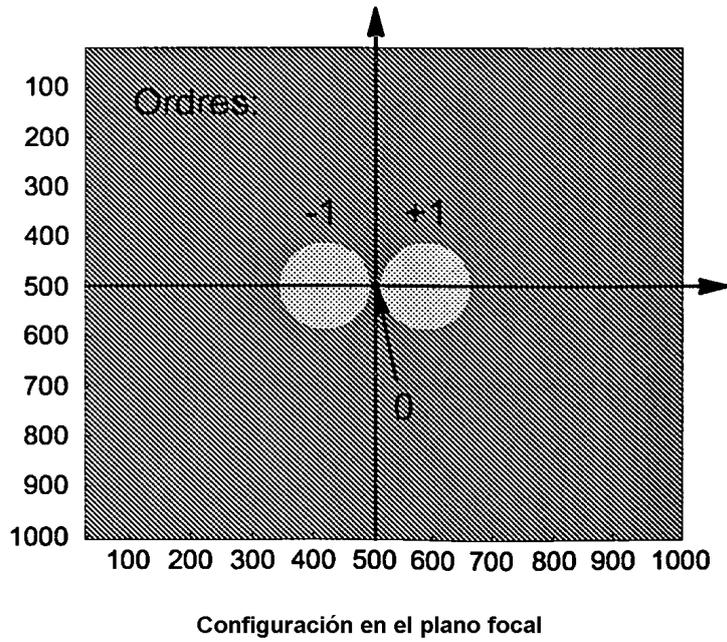


FIG. 5B