

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 704 111**

51 Int. Cl.:

H01S 3/23 (2006.01)

G02B 6/42 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **26.05.2015 PCT/EP2015/061524**

87 Fecha y número de publicación internacional: **03.12.2015 WO15181130**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **26.05.2015 E 15725588 (6)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **10.10.2018 EP 3149813**

54 Título: **Sistema de puesta en fase de un gran número de fuentes láser**

30 Prioridad:

28.05.2014 FR 1401222

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

14.03.2019

73 Titular/es:

**THALES (100.0%)
Tour Carpe Diem, Place des Corolles, Esplanade
Nord
92400 Courbevoie, FR**

72 Inventor/es:

**BOURDERIONNET, JÉRÔME y
BRIGNON, ARNAUD**

74 Agente/Representante:

CARPINTERO LÓPEZ, Mario

ES 2 704 111 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

Sistema de puesta en fase de un gran número de fuentes láser

El dominio de la invención es el de la combinación coherente de un gran número de fuentes láser elementales.

5 La recombinación coherente de fuentes láser se aplica en particular a la realización de fuentes láser de gran potencia y/o de fuerte energía en el caso de fuentes de impulsos ultracortas, por ejemplo, de anchura de impulso inferior al picosegundo.

10 La obtención de fuentes láser de altas potencias (o energías) y de grandes luminancias está hoy limitada por la resistencia al flujo de los materiales de ganancia. Una solución a este problema es repartir la amplificación sobre varios medios de ganancia en paralelo. Esto requiere que los haces láser de salida de cada medio de ganancia estén en fase de manera que se asegure una recombinación coherente óptima del conjunto de haces láser. Por lo tanto, se deben compensar de manera dinámica los retrasos introducidos sobre un gran número M de haces láser por la propagación a través de un conjunto de medios de ganancia (amplificadores de fibra, por ejemplo) puestos en paralelo. Una vez bloqueados en la fase, los M haces láser emergentes interfieren y constituyen de esta manera una fuente de luminancia M veces superior a la de un amplificador elemental, a la vez que mantienen su calidad de haz (limitada por difracción en el caso de fibras monomodos, por ejemplo). Por lo tanto, se trata de configurar tanto bucles de bloqueo de fase como emisores.

Las arquitecturas de puesta en fase de fuentes láser pueden clasificarse según varios criterios. El primero es la manera en que los haces se recombinan espacialmente, o se superponen. Se distinguen 2 familias:

- 20 - Recombinación de campo lejano ("tiled aperture" en inglés): los M haces láser están colimados y tienen direcciones de propagación paralelas. Este modo de recombinación es el equivalente óptico de la antena de formación de haz del radar. El campo lejano presenta entonces un lóbulo central intenso, y unos lóbulos secundarios parásitos.
- 25 - Recombinación en campo cercano ("filled aperture" en inglés): los M haces están superpuestos en campo cercano, utilizando polarizadores o un elemento óptico difractivo (o "DOE", acrónimo de la expresión en inglés Diffractive Optical Element). La ventaja del procedimiento de recombinación de campo cercano es su eficacia, ya que en este caso no hay lóbulos secundarios en el campo lejano (véanse, por ejemplo, los documentos US20090185590, US649351 y US20090185176).

30 A continuación, viene la naturaleza de la señal de error y el tratamiento que permitirá reaccionar de forma contraria en las fases entre fuentes láser y optimizar su adición coherente. Se distinguen esencialmente 4 procedimientos de recombinación coherente de haces láser, clasificados según la cantidad de información contenida en la señal de contrarreacción:

- 35 - El procedimiento llamado de "hill climbing" (en inglés): la señal de error consiste simplemente en la toma de muestra de una fracción de la energía recombinada, que se maximiza jugando en las fases de los M canales (haces) que se deben recombinar. Esta técnica se basa en un algoritmo de optimización por gradiente con M-1 dimensiones. La complejidad reside aquí en el algoritmo de tratamiento, la señal de error, una señal escalar, que es extremadamente simple, y de bajo coste. El inconveniente de este procedimiento es el ancho de banda del bucle, que evoluciona en 1/M. Por lo tanto, este procedimiento se presta a un pequeño número de haces recombinados típicamente inferior a 10.
- 40 - El procedimiento llamado "OHD" acrónimo de la expresión en inglés "Optical Heterodyne Detection". Para este procedimiento, la señal de error que consiste en la medición de la fase de cada emisor con respecto a un haz de referencia, es una señal vectorial; se utiliza un detector por canal. Las M mediciones están hechas en paralelo por mezcla heterodina y desmodulación. Los inconvenientes de este procedimiento son
 - 45 ○ la utilización de componentes RF, lo que penaliza el coste por canal,
 - el recurso a un haz de referencia,
 - la señal de error que se mide antes de la recombinación y que no garantiza una calidad de recombinación óptima: no permite compensar las fluctuaciones de fase entre el plano de medición de las fases y el plano de recombinación. Entonces se requiere una calibración del sistema.
- 50 - El procedimiento denominado "LOCSET", o "Synchronous Multi-Dither". Como para el "hill climbing", este procedimiento utiliza una fracción de la energía recombinada como señal de error, pero en este caso, las contribuciones de los diferentes canales se identifican "marcando" en frecuencia cada canal por una modulación RF con una frecuencia que le es propia. La señal de error para cada haz se obtiene entonces por una mezcla heterodina con un haz de referencia. Este procedimiento es atractivo ya que solo requiere un detector único, y la disponibilidad de moduladores de fase rápidos permite prever un gran número de canales. En cambio, requiere un gran número de componentes RF en el bucle de contrarreacción (mezcladores, moduladores,...), lo que aumenta considerablemente el coste por canal del sistema. Se obtiene una señal similar modulando secuencialmente en el tiempo cada uno de los haces, esta vez a la misma frecuencia, pero en detrimento del ancho de banda del sistema.
- 55 - El procedimiento de medición directa de las fases entre emisores, para el cual la señal de error es una

5 cartografía de las fases extraídas del interferograma de los haces que se deben recombinar interfiriendo o bien entre ellos, o bien con un haz de referencia. Este procedimiento de medición interferométrica directa es colectivo: el conjunto de las fases se obtiene por el registro de una única imagen por un sensor de matriz y, por lo tanto, se presta a un gran número de emisores. El coste del procesador de imágenes utilizado se debe dividir por el número de canales y, por lo tanto, no es determinante. Sin embargo, el ancho de banda del sistema puede estar limitado por el sensor utilizado, especialmente, en el infrarrojo. No obstante, no es un límite fundamental. Finalmente, como para el procedimiento "OHD", la medición de fase se realiza antes de la recombinación; no permite compensar las fluctuaciones de fase entre el plano de medición de las fases y el plano de recombinación y no garantiza por lo tanto una calidad de recombinación óptima. Entonces se requiere una calibración del sistema.

10 La tabla a continuación resume el estado de las técnicas de recombinación coherente. Los recuadros grisáceos indican los puntos negativos de cada procedimiento.

Naturaleza de la señal de error	Escalar	Vectorial		
		procedimiento	"Hill Climbing"	"LOCSET"
N.º de detectores (para M fuentes)	1	1	M	>2M
Ancho de banda	Evoluciona en 1/M	>10kHz	>10kHz	Limitado por cámara (potencialmente >1-10kHz)
Calibración requerida	No	No	Sí	Sí
Necesidad electrónica RF (impacta en el coste)	No	Sí	Sí	No
Necesidad de una referencia óptica	No	No	Sí	No necesariamente (QWLSI in [11])
Tipo de recombinación el mejor adaptado	Campo cercano	Campo cercano	Campo lejano	Campo lejano

15 Por lo tanto, es necesario tener una arquitectura de recombinación coherente de haces láser que satisfaga a la vez las condiciones de un ancho de banda de bucle >1kHz, de un número de haces potencialmente de 100, 1000 incluso más, de un funcionamiento sin calibración (señal de error en el plano de recombinación), y un bajo coste.

20 Como ya se ha indicado anteriormente, existe un sistema en el que los haces láser se recombinan espacialmente con la ayuda de un elemento óptico difractivo (DOE). Un sistema de este tipo puede también permitir, además de asegurar la recombinación espacial de los haces, generar una señal de error que permita compensar las diferencias de fase entre las fuentes láser. Esta señal de error se calcula a partir de las intensidades difractadas del elemento difractivo de recombinación (véanse los documentos US20090185590 y US20090185176). El marco de la invención es el de un sistema de este tipo según la reivindicación 1.

25 Se obtiene bien una señal de error vectorial (de tamaño dado por el número de órdenes de difracción superiores medidas) pero sin tener que utilizar componentes RF. Además, el sistema en principio no requiere calibración, ya que la optimización no tiene como objetivo el bloqueo de las fases (consúltese técnicas "OHD" y "medición interferométrica directa"), pero bien directamente la intensidad recombinada (minimizando la intensidad de los órdenes superiores).

Se reagrupan por lo tanto las ventajas siguientes:

- Como para los procedimientos "LOCSET" y "hill climbing", la señal de error se genera en el plano de recombinación, por lo que no se requiere calibración.
- La señal de error consiste en un conjunto de mediciones no redundantes que permiten mediante un tratamiento simple generar la señal de contrarreacción.
- El coste del sistema por canal (haz) es relativamente bajo ya que no interviene ningún elemento RF, y que es necesario un único detector por canal.
- El sistema es compatible con un gran número de canales y con un ancho de banda >1 kHz.

Según el marco de la invención, los medios de cálculo de la señal de contrarreacción comprenden medios de cálculo del producto de la distribución de las intensidades detectadas en el plano de la matriz de los detectores por la inversa de una matriz de dimensión $(2M-1) \times (2M-1)$ si M es impar, y $2M \times 2M$ si M es par, definida por coeficientes obtenidos por el desarrollo en serie de Fourier de la fase del elemento óptico difractivo de recombinación tomada en un periodo.

Normalmente, tenemos $M > 100$.

Preferentemente, las fuentes se disponen según una configuración espacial en una o dos dimensiones.

Según un modo de realización preferente de la invención, los haces procedentes de las fuentes láser tienen un mismo plano de salida, y el sistema comprende entonces otra lente de Fourier que tiene un plano objeto en el que se encuentra el plano de salida de las fuentes láser y un plano de imagen en el que se encuentra el elemento óptico difractivo de recombinación.

Otras características y ventajas de la invención resultarán evidentes tras la lectura de la descripción detallada que sigue, realizada a título de ejemplo no limitativo y en referencia a los dibujos adjuntos en los que:

la figura 1 ilustra esquemáticamente la utilización de un elemento óptico difractivo como medio de recombinación de haces de "M hacia 1" (5 hacia 1 en el ejemplo de la figura),
 la figura 2 representa esquemáticamente un ejemplo de puesta en fase,
 las figuras 3 muestran esquemáticamente un perfil de intensidad para un elemento óptico difractivo utilizado en el separador de 1 hacia M (de 1 hacia 5 en el ejemplo de la figura) (figura 3a), o utilizado en el medio de recombinación de haces de M hacia 1 (de 5 hacia 1 en el ejemplo de la figura) con la distribución de las intensidades difractadas por el elemento óptico difractivo.

De una figura a otra, los mismos elementos se localizan por las mismas referencias.

El marco de la invención según la reivindicación 1 es el de un sistema que reposa primero en la utilización de un elemento óptico difractivo 1 (o DOE) como medio de recombinación de diferentes haces láser 10, como se representa en el ejemplo de la figura 1. Los haces láser 10 son incidentes en el DOE 1 según un ángulo definido por el periodo espacial del DOE. Cuando los haces se bloquean en la fase, y con la distribución de fase óptima (impuesta por el DOE), entonces todos los haces interfieren constructivamente en el orden 0 (= orden principal) del DOE 11b, y destructivamente en los órdenes superiores 11a.

El principio es utilizar la distribución de intensidad 11a difractada en los órdenes superiores del DOE como señal de error para optimizar la recombinación, como se representa en el ejemplo de la figura 2. En nuestro enfoque, como para las técnicas de LOCSET y de "hill climbing", la señal de error se mide al final de la cadena (es decir, después del DOE), lo que permite tener en cuenta el conjunto de las perturbaciones sufridas por los haces. Cabe señalar que si el ejemplo de la figura 2 representa una disposición en línea de los haces láser, y por lo tanto, un DOE con 1 dimensión, la solución propuesta se aplica, no obstante, de manera equivalente a un acondicionamiento 2D de los haces láser y un DOE de 2 dimensiones.

Se describe un sistema de puesta en fase de M fuentes láser relacionadas con la figura 2. Las M fuentes láser tienen la misma longitud de onda centrada alrededor de λ_0 . Estas fuentes láser pueden ser fuentes de impulso; la anchura del impulso puede también ser inferior a 10^{-12} s.

El sistema incluye:

- M moduladores de fase: un modulador 4 en la salida de cada fuente láser.
- Un DOE 1 de recombinación con red de fase de período espacial predeterminado, situado en el plano de imagen de una lente de Fourier 14:
 los M haces procedentes de los moduladores se dirigen en el DOE 1 por esta lente de Fourier 14. Cada haz llega al DOE con un ángulo de incidencia específica definido por el período espacial del DOE.
- Unos medios de toma de muestra de una fracción 12 de los haces recombinados 11, que pueden ser un espejo de alta reflectividad 5 (con una toma de muestra del 1 % por ejemplo) o un cubo separador de polarización. Se elige preferentemente una toma de muestra $< 1/M$. La otra fracción de haces recombinados constituye el haz de salida 13 del sistema.
- Una segunda lente de Fourier 6 en cuyo plano objeto está situado el DOE de recombinación 1.
- Una matriz de detectores 7 en el plano imagen (= plano B) de la segunda lente de Fourier 6, apta para detectar las distribuciones de intensidad 11b, 11a de la fracción de los órdenes de difracción de los haces recombinados por el DOE 1.
- Unos medios 8 de cálculo de la señal de contrarreacción a partir de estas distribuciones en el plano de la matriz de detectores. Estos medios de cálculo 8 están unidos a los M moduladores de fase 4 para controlarlos.

Los M haces pueden dirigirse en el DOE 1 de distintas maneras. El sistema incluye por ejemplo corriente arriba del DOE:

- un mismo oscilador maestro 2 unido a un acoplador 3 "1 hacia M" para generar las M fuentes láser,
- eventualmente M amplificadores 9 unidos respectivamente a los moduladores de fase 4.

El plano de salida (= plano A) de los M haces láser (procedentes de los amplificadores o de los moduladores) se sitúa en el plano objeto de la lente de Fourier 14, según una configuración espacial periódica de paso P como se muestra en la figura 2.

Según una alternativa, las M fuentes láser tienen una lente de colimación asociada a cada fuente y se posicionan directamente según una configuración espacial y angular periódica, de modo que los haces llegan al DOE de recombinación con un ángulo de incidencia específico definido por el período espacial del DOE.

Se consideran ahora los medios 8 de cálculo de la señal de contrarreacción según la invención. Por lo tanto, el problema a resolver por estos medios de cálculo se plantea de esta manera:

- La variable del problema es la distribución espacial del campo electromagnético que consiste en la superposición de los campos electromagnéticos procedentes de cada una de las fuentes láser.
- Las distribuciones de intensidad del campo electromagnético están superpuestas conocidas en 2 planos distintos: una distribución I_A uniforme (o medida) en el plano de salida de las fuentes (plano A en la figura 2) y una distribución I_B medida después de la recombinación por el DOE (en el plano B en la figura 2).

Se quieren calcular las distribuciones de fases φ_A y φ_B en los planos A y B de modo que el campo electromagnético

$$\sqrt{I_A} e^{j\varphi_A} \text{ propagado numéricamente de A y B de } \sqrt{I_B} e^{j\varphi_B}.$$

Este problema es similar al de la medición de las aberraciones de fase a partir de distorsiones de imágenes de intensidad que se encuentran por ejemplo en astronomía. Unos ejemplos de procedimientos de resolución de este problema pueden encontrarse en la literatura. Se pueden citar las siguientes publicaciones: R. G. Paxman y J. R. Fienup, "Optical misalignment sensing and image reconstruction using phase diversity," J. Opt. Soc. Am. A 5, 914-923 (1988), o J. N. Cederquist, J. R. Fienup, C. C. Wackerman, S. R. Robinson, y D. Kryskowski, "Wave-front phase estimation from Fourier intensity measurements," J. Opt. Soc. Am. A 6, 1020-1026 (1989), o R.G. Paxman, T.J. Schulz, J.R. Fienup, "Joint estimation of object and aberrations by using phase diversity," J. Opt. Soc. Am. A 9, 1072-1085 (1992).

Un inconveniente importante de este tipo de procedimientos es que utilizan transformadas de Fourier numéricas (para los cálculos de tipo de propagación óptica de A hacia B en la búsqueda de la solución) lo que implica un tiempo de cálculo que puede ser largo (típicamente muy superior a 1 s). Se puede citar igualmente la publicación: J. Bourderionnet y col., "Collective coherent phase combining of 64 fibers" Optics Express, vol. 19, n.º 18, páginas 17053 - 17058, 29.08.2011.

En el sistema según la invención, una simplificación importante para el cálculo de fase proviene del hecho que el cálculo de la distribución de campo electromagnético en el plano B a partir de la del plano A se realiza por un simple producto por una matriz conocida.

En efecto, para M haces láser considerados en A, la distribución de campo eléctrico en A puede escribirse, según la paridad de M:

$$E_A(x) = e^{-\left(\frac{x}{\omega}\right)^2} * \left(\sum_{k=-N}^{+N} e^{i\varphi_k} \delta(x - kP) \right)$$

si $M=2N+1$, o:

$$E_A(x) = e^{-\left(\frac{x}{\omega}\right)^2} * \left(\sum_{k=-N+1}^{+N} e^{i\varphi_k} \delta(x - kP) \right)$$

si $M=2N$.

O bien también:

$$E_A(x) = e^{-\left(\frac{x}{\omega}\right)^2} * \left(\sum_{k=-\infty}^{+\infty} \alpha_k e^{i\varphi_k} \delta(x - kP) \right)$$

Con:

- ω el tamaño ("waist" en inglés) de los haces (supuestos gaussianos) en el plano A,
 - P el período de las posiciones de los haces en el plano A,
 - α_k el coeficiente de ponderación en amplitud del haz k (por ejemplo aquí, $\alpha_k=1$ para k comprendido entre -N y +N para $M=2N+1$ y k comprendido entre -N+1 y +N para $M=2N$, y $\alpha_k=0$ de lo contrario)
- 5
- φ_k la fase óptica del haz k,
 - δ la función de Dirac y * el operario de convolución.

El campo en el plano del DOE se obtiene por la transformada de Fourier de $E_A(x)$ y multiplicación por la función de transmisión en fase del DOE, $e^{i\varphi_{DOE}(u)}$:

$$E_{DOE}(u) = \frac{1}{P} e^{-\frac{\pi u \omega^2}{P}} \times e^{i\varphi_{DOE}(u)} \times \left(\sum_{k=-\infty}^{+\infty} \alpha_k e^{i\varphi_k} e^{-2i\pi u k P} \right)$$

- 10 El campo propagado hasta el plano de medición (plano B) se obtiene de nuevo por la transformada de Fourier de $E_{DOE}(u)$:

$$E_B(x) = \left[e^{-\frac{x^2}{\omega^2}} * \mathcal{F}(e^{i\varphi_{DOE}(u)}) \right] * \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \alpha_k e^{i\varphi_k} \delta(x + kP)$$

Además, la fase del DOE siendo por construcción una función periódica, de período 1/P (u se considera en el campo lejano), se puede escribir $e^{i\varphi_{DOE}(u)}$ en la forma de su serie de Fourier:

$$e^{i\varphi_{DOE}(u)} = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} c_k e^{2i\pi u k P}$$

- 15 Y por lo tanto:

$$\begin{aligned} E_B(x) &= e^{-\frac{x^2}{\omega^2}} * \left[\sum_{h=-\infty}^{+\infty} \alpha_h e^{i\varphi_h} \delta(x + hP) * \sum_{k=-\infty}^{+\infty} c_k \delta(x - kP) \right] \\ &= e^{-\frac{x^2}{\omega^2}} * \left[\sum_{h=-\infty}^{+\infty} \alpha_h e^{i\varphi_h} \times \sum_{k=-\infty}^{+\infty} c_k \delta(x - (k - h)P) \right] \\ &= e^{-\frac{x^2}{\omega^2}} * \left[\sum_{k=-\infty}^{+\infty} \left(\sum_{h=-\infty}^{+\infty} c_{k+h} \alpha_h e^{i\varphi_h} \right) \times \delta(x - kP) \right] \\ &= \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \left(\sum_{h=-\infty}^{+\infty} c_{k+h} \alpha_h e^{i\varphi_h} \right) \times e^{-\frac{(x-kP)^2}{\omega^2}} \end{aligned}$$

- 20 Un DOE de combinación se calcula para combinar M haces hacia 1. A la inversa, 1 haz único difractado por el mismo DOE producirá esencialmente M haces (denominados principales) de intensidad del mismo orden ($\approx I_1$), y una infinidad de órdenes superiores de intensidad I_2 menor ($I_2 \ll I_1$). En otras palabras, esto implica las relaciones siguientes para los coeficientes c_k :

$$\begin{aligned} |c_k|^2 &\approx 1/M \text{ para } k \text{ comprendido entre } -N \text{ y } +N \text{ para } M=2N+1 \text{ y } k \text{ comprendido entre } -N+1 \text{ y } +N \text{ para } M=2N, \\ |c_k|^2 &\ll 1/M \text{ de lo contrario.} \end{aligned}$$

Los términos $c_{k+h}\alpha_h$ de la expresión de $E_B(x)$ anterior podrán por lo tanto tener valores significativos para:

- 25 $[-N \leq k + h \leq +N] \cup [-N \leq h \leq +N]$ para $M=2N+1$ o

o

$$[-N + 1 \leq k + h \leq +N] \cup [-N + 1 \leq h \leq +N] \text{ para } M=2N.$$

O bien:

$$k \in \{-2N, \dots, +2N\} \text{ para } M=2N+1 \text{ o}$$

o

$k \in \{-2N + 1, \dots, +2N\}$ para $M=2N$.

De una manera general, la expresión de $E_B(x)$ se podrá considerar por lo tanto como exacta para los índices k y h truncados de $-2N$ a $+2N$ para $M=2N+1$:

5

$$E_B(x) = \sum_{k=-2N}^{+2N} \left(\sum_{h=-2N}^{+2N} c_{k+h} \alpha_h e^{i\varphi h} \right) \times e^{-\left(\frac{x-kP}{\omega}\right)^2}$$

o de $-2N+1$ a $+2N$ para $M=2N$:

$$E_B(x) = \sum_{k=-2N+1}^{+2N} \left(\sum_{h=-2N+1}^{+2N} c_{k+h} \alpha_h e^{i\varphi h} \right) \times e^{-\left(\frac{x-kP}{\omega}\right)^2}$$

Se reconoce entonces la expresión de un producto de matriz, como se describe a continuación para el caso $M=2N+1$:

10

$$\begin{matrix} E_{B,-2N} \\ \vdots \\ E_{B,0} \\ \vdots \\ E_{B,+2N} \end{matrix} \Bigg| = \begin{pmatrix} c_{-4N} & \cdots & c_{-2N} & \cdots & c_0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{-2N} & \cdots & c_0 & \cdots & c_{2N} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_0 & \cdots & c_{2N} & \cdots & c_{4N} \end{pmatrix} \times \begin{matrix} \alpha_{-2N} e^{i\varphi_{-2N}} \\ \vdots \\ \alpha_0 e^{i\varphi_0} \\ \vdots \\ \alpha_{+2N} e^{i\varphi_{+2N}} \end{matrix}$$

O bien:

$$\begin{matrix} E_{B,-2N} \\ \vdots \\ E_{B,0} \\ \vdots \\ E_{B,+2N} \end{matrix} \Bigg| = H_{DOE} \times \begin{matrix} E_{A,-2N} \\ \vdots \\ E_{A,0} \\ \vdots \\ E_{A,+2N} \end{matrix}$$

Con $E_{A,k}$ (y respectivamente $E_{B,k}$) los coeficientes de ponderación complejos del campo $E_A(x)$ (y respectivamente $E_B(x)$) de modo que, en las proximidades de $x = kP$:

15

$$E_A(x) = E_{A,k} \times e^{-\left(\frac{x-kP}{\omega}\right)^2}$$

$$E_B(x) = E_{B,k} \times e^{-\left(\frac{x-kP}{\omega}\right)^2}$$

20 H_{DOE} es la matriz definida por los coeficientes c_k del desarrollo en la serie de Fourier de la fase del DOE tomada en un período. Por lo tanto, esta matriz se conoce a priori por construcción del DOE. Como se vio anteriormente, en la práctica, con un DOE calculado para combinar M haces láser, con M impar igual a $2N+1$, $2M-1$ coeficientes en la serie de Fourier para asegurar la igualdad:

$$e^{i\varphi_{DOE}(u)} = \sum_{k=-2N}^{+2N} c_k e^{2i\pi u k P}$$

Para M par igual a $2N$, $2M$ coeficientes son por lo tanto necesarios para tener:

$$e^{i\varphi_{DOE}(u)} = \sum_{k=-2N+1}^{+2N} c_k e^{2i\pi ukP}$$

Esta elección, no restrictiva, de $2M-1$ coeficientes en el caso $M=2N+1$ está igualmente ilustrado en las figuras 3a y 3b por el hecho de que solo los órdenes difractados de orden $-2N$ a $+2N$ (sea en el plano B de la proximidad de $x=kP$ para $k \in \{-2N, \dots, 2N\}$) tienen una intensidad significativa para el cálculo.

- 5 La propagación óptica de M haces del plano A hacia el plano B se calcula por lo tanto por el simple producto de una matriz de dimensión $(2M-1) \times (2M-1)$ para M impar, y $2M \times 2M$ para M par (la matriz H_{DOE}) por el vector E_A . Se han sustituido las transformaciones de Fourier utilizadas en los procedimientos habituales por esta matriz H_{DOE} . Por lo tanto, el cálculo de la distribución de campo electromagnético en el plano A a partir de la detectada en el plano B por la matriz de fotodetectores, se realiza por un simple producto de la inversa de esta matriz H_{DOE} por esta distribución de intensidad detectada en el plano B.

- 10 A partir de la distribución de campo electromagnético calculada de este modo en el plano A, se calcula la fase de manera tradicional. Este cálculo simplifica la distribución de campo electromagnético en el plano A, acelera considerablemente los algoritmos de cálculo de fase (= cálculo de la señal de contrarreacción), por ejemplo, de tipo de búsqueda de máximo o iterativos, y permite una implementación en tiempo real de estos medios de cálculo de la señal de contrarreacción, incluso para un número de haces de varios miles. Como ejemplo de cálculo de fase por iteraciones, se pueden citar los cálculos descritos en las publicaciones:

- J. Markham y J.A. Conchello, "Parametric blind deconvolution: a robust method for the simultaneous estimation of image and blur," J.Opt.Soc.Am.A 16(10), 2377-2391 (1999),
- J.R. Fienup, "Phase retrieval algorithms: a comparison," Appl. Opt. 21(15), 2758-2769(1982).

- 20 En los ejemplos, el DOE de combinación funciona en transmisión, pero el sistema según la invención permanece válido utilizando un DOE en reflexión.

REIVINDICACIONES

1. Sistema de puesta en fase de M fuentes láser con la misma longitud de onda centrada alrededor de λ_0 , que presenta una configuración espacial periódica, siendo M un número entero >2 , que comprende:

- 5 - unos medios para colimar y dirigir los M haces procedentes de las fuentes en un elemento óptico difractivo de recombinación (1) con una red de fase periódica, con un ángulo de incidencia θ_{2k} diferente de un haz al otro, estando determinados estos ángulos de incidencia en función del período de la red, y
- unos medios de control de las fases de dichas fuentes a partir de una señal de contrarreacción procedente de los haces recombinados,
- 10 - unos medios (5) de toma de muestra de una fracción (12) de los haces recombinados,
- en la trayectoria de esta fracción de los haces recombinados, una lente de Fourier (6) que tiene un plano objeto y un plano imagen, con el elemento óptico difractivo de recombinación (1) en su plano objeto,
- una matriz de detectores (7) en el plano imagen de la lente de Fourier (6), apta para detectar distribuciones de intensidad de la fracción de los haces recombinados,

caracterizado porque comprende:

- 15 - unos medios (8) de cálculo de la señal de contrarreacción a partir de estas distribuciones de intensidad que comprenden unos medios de cálculo del producto de la distribución de las intensidades detectadas en el plano de la matriz de los detectores por la inversa de una matriz de dimensión $(2M-1) \times (2M-1)$ para M impar y $2M \times 2M$ para M par, definida por coeficientes obtenidos por el desarrollo en serie de Fourier de la fase del elemento óptico difractivo de recombinación tomada en un periodo.
- 20 2. Sistema de puesta en fase de fuentes láser según una de las reivindicaciones precedentes, **caracterizado porque** las fuentes láser son de impulsos.
- 3. Sistema de puesta en fase de fuentes láser según la reivindicación precedente, **caracterizado porque** la amplitud de impulso es inferior a 10^{-12} s.
- 25 4. Sistema de puesta en fase de fuentes láser según una de las reivindicaciones precedentes, **caracterizado porque** $M > 100$.
- 5. Sistema de puesta en fase de fuentes láser según una de las reivindicaciones precedentes, **caracterizado porque** la fracción tomada de muestra es $< 1/M$.
- 6. Sistema de puesta en fase de fuentes láser según una de las reivindicaciones precedentes, **caracterizado porque** las fuentes están dispuestas según una configuración espacial de una o dos dimensiones.
- 30 7. Sistema de puesta en fase de fuentes láser según una de las reivindicaciones precedentes, **caracterizado porque** los haces procedentes de las fuentes láser tienen un mismo plano de salida, comprende otra lente de Fourier (14) que tiene un plano objeto en el que se sitúa el plano de salida de las fuentes láser y un plano imagen en el que se sitúa el elemento óptico difractivo de recombinación (1).

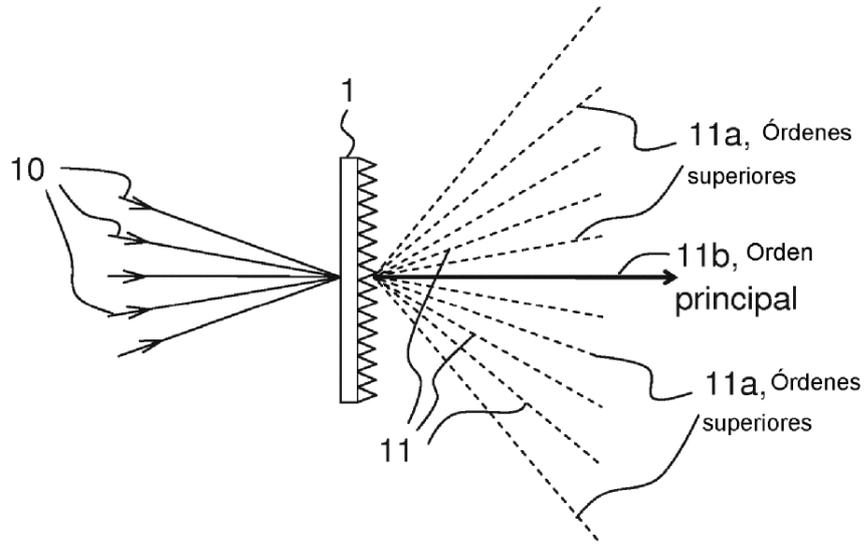


FIG.1

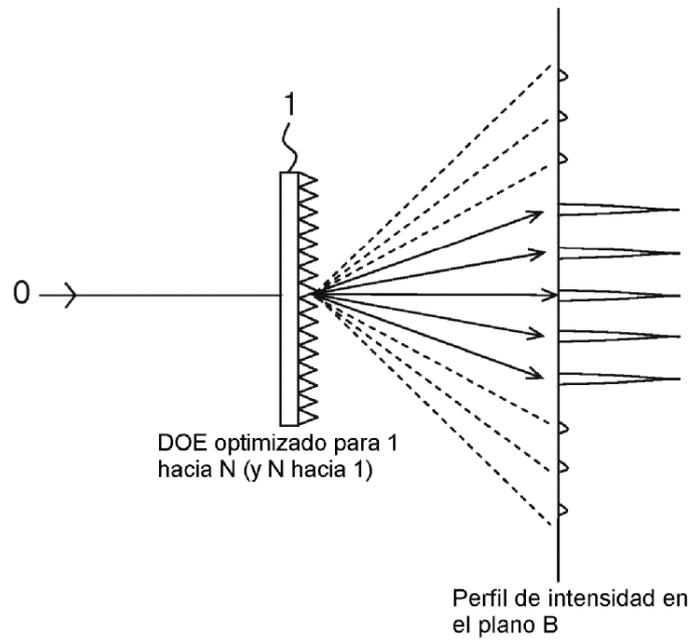


FIG.3a

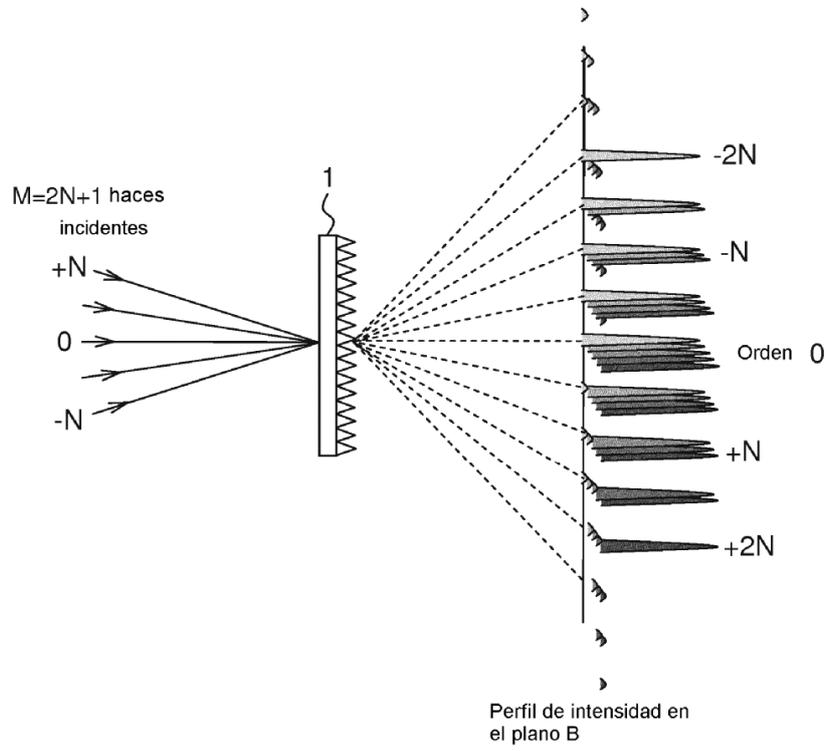


FIG.3b

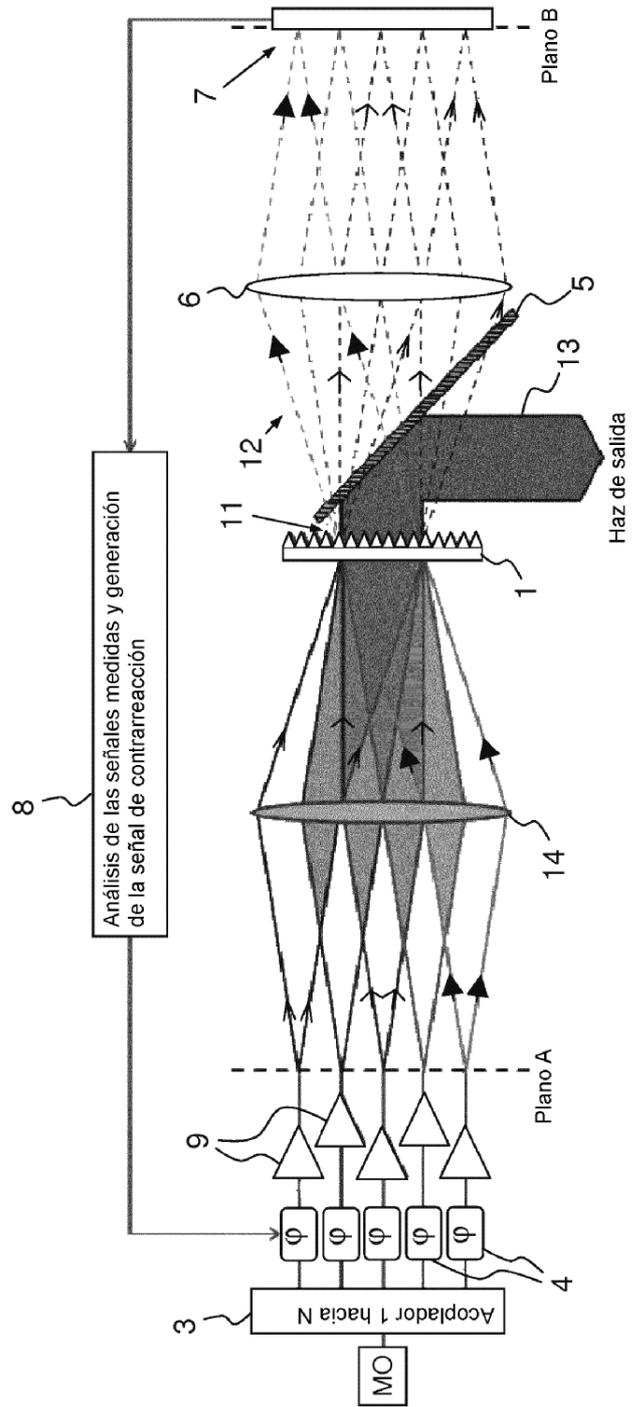


FIG.2