

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 800 048**

51 Int. Cl.:

G02B 26/06 (2006.01)

G02B 27/00 (2006.01)

G02B 27/09 (2006.01)

G01J 9/02 (2006.01)

G21K 1/00 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **13.09.2012 PCT/GB2012/052270**

87 Fecha y número de publicación internacional: **21.03.2013 WO13038193**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **13.09.2012 E 12773354 (1)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **06.05.2020 EP 2756349**

54 Título: **Control de transmisión de luz a través de un medio**

30 Prioridad:

13.09.2011 GB 201115807

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

23.12.2020

73 Titular/es:

**UNIVERSITY COURT OF THE UNIVERSITY OF ST ANDREWS (100.0%)
College Gate, North Street
St Andrews Fife KY16 9AJ, GB**

72 Inventor/es:

**DHOLAKIA, KISHAN y
CIZMAR, TOMAS**

74 Agente/Representante:

VALLEJO LÓPEZ, Juan Pedro

ES 2 800 048 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

Control de transmisión de luz a través de un medio

5 **Campo de la invención**

La presente invención se refiere a un método de uso para controlar la transmisión de luz a través de un medio y, en particular, aunque no exclusivamente, de uso para controlar la amplitud, fase y/o polarización de la luz a través de un medio tal como una fibra óptica multimodo.

10

Antecedentes de la invención

"Hologram transmission through multi-mode optical fibers", Optical Express 19, 247-254 (2011), R. D. Leonardo y S. Bianchi divulgan un enfoque para concentrar la salida de luz de una fibra multimodo (MMF) en uno o varios puntos utilizando un método de búsqueda directa o a ciegas. Tal método se basa en un análisis solo de fase de la entrada del campo óptico al MMF. Sin embargo, esto puede conducir a la pérdida de potencia óptica y/o la generación de ruido al crear uno o varios puntos en la salida del MMF.

15

20

25

30

35

40

Nature Photonics, 4, 388-394 (2010), T. Cizmar, M. Mazilu y K. Dholakia divulga un método para controlar la transmisión de la luz dentro de un medio altamente dispersante y difusivo, pero esencialmente de preservación de la polarización y, en particular, dentro de tejido biológico. El método comprende caracterizar un sistema óptico que incluye el tejido biológico tanto en términos de amplitud como de fase de un campo óptico detectado que usa una sonda de intensidad única. Posteriormente, se utiliza una transformación de campo compleja para controlar un campo óptico de entrada según las amplitudes y fases determinadas del campo óptico para proporcionar una intensidad deseada dentro del tejido biológico. Tal método puede conducir a la pérdida de potencia óptica y/o la generación de ruido al crear uno o varios puntos dentro del medio. Tal método también se basa en el uso de una trayectoria de referencia definida internamente dentro del tejido biológico. El uso de una trayectoria de referencia interna de este tipo puede causar varios problemas al controlar la transmisión de luz dentro de un medio. Por ejemplo, el uso de una trayectoria de referencia interna puede conducir a imprecisiones durante la caracterización del sistema óptico y contribuir a una pérdida de potencia óptica al crear uno o más puntos de intensidad. El uso de una trayectoria de referencia interna puede, en algunas circunstancias, conducir incluso al fracaso del método por completo. Un campo óptico de referencia generado como consecuencia de la transmisión de luz a lo largo de una trayectoria de referencia interna puede exhibir un carácter moteado con una distribución exponencial de intensidad, de modo que algunas partes del campo óptico de referencia tengan intensidades muy altas, mientras que otras pueden tener intensidades extremadamente bajas, los denominados "puntos ciegos", que no pueden utilizarse en la caracterización del sistema óptico. Puede ser necesario un detector de intensidad que tenga un rango dinámico muy grande y una alta resolución para detectar la intensidad del campo óptico de referencia y/o de cualquier campo de interferencia óptico generado entre la luz transmitida a lo largo de la trayectoria de referencia interna y la luz transmitida a lo largo de una trayectoria de medición que se extiende a través del medio.

Sumario de la invención

Según un aspecto de la presente invención, se proporciona un método de uso para controlar la transmisión de luz a través de un medio, comprendiendo el método las etapas siguientes:

45

(i) transmitir luz correspondiente a una parte espacial seleccionada de un campo óptico de entrada y un estado de polarización de entrada seleccionado a través del medio para crear un campo óptico de salida correspondiente;

50

(ii) superponer el campo óptico de salida correspondiente con un campo óptico de referencia para crear un campo de interferencia óptica correspondiente;

(iii) detectar una intensidad de una parte espacial de un componente de polarización seleccionado del campo de interferencia óptica correspondiente;

55

(iv) usar la intensidad detectada para determinar un valor de una amplitud de campo óptico y un valor de una fase de campo óptico correspondiente a la parte espacial seleccionada del campo óptico de entrada y el estado de polarización de entrada seleccionado; y

(v) repetir las etapas (i) a (iv) para cada parte espacial seleccionada de una pluralidad de partes espaciales del campo óptico de entrada y para cada estado de polarización de entrada seleccionado del primer y segundo estado de polarización de entrada ortogonal,

60

en el que cada iteración de las etapas (i) a (iii) se realiza secuencialmente de modo que cada iteración de las etapas (i) a (iii) proporcione la intensidad detectada correspondiente a una seleccionada de la pluralidad de partes espaciales del campo óptico de entrada en combinación con un correspondiente seleccionado del primer y segundo estado de polarización de entrada ortogonal,

65

en el que la etapa (iii) comprende detectar una variación en la intensidad de la parte espacial del componente de polarización seleccionado del campo de interferencia óptica correspondiente para la parte espacial seleccionada del campo óptico de entrada y para el estado de polarización de entrada seleccionado mientras se varía una fase

- 5 aplicada a la parte espacial seleccionada del campo óptico de entrada, y en el que la etapa (iv) comprende determinar el valor de amplitud del campo óptico y el valor de fase del campo óptico para la parte espacial seleccionada del campo óptico de entrada y para el estado de polarización de entrada seleccionado a partir de la variación detectada en la intensidad de la parte espacial del componente de polarización seleccionado del campo de interferencia óptico correspondiente en función de la fase aplicada a la parte espacial seleccionada del campo óptico de entrada.
- 10 El método puede usarse para caracterizar un sistema óptico que comprende un medio que es aleatorio en al menos uno de la amplitud, fase y polarización de la luz transmitida a través del medio.
- 15 Una vez que se caracteriza el sistema óptico, el campo óptico de entrada puede seleccionarse para controlar la transmisión de luz a través del medio. El método puede usarse para controlar la amplitud, fase y/o polarización de una parte espacial de un campo óptico de salida controlando solo un campo óptico de entrada en un lado de entrada del medio. Una vez que se adquiere la transformación del sistema óptico, el campo óptico de salida puede controlarse a voluntad dentro de cualquier limitación física impuesta por el sistema óptico utilizado para implementar el método.
- 20 La transformación del sistema óptico puede usarse para controlar sustancialmente toda la potencia óptica transmitida por el sistema.
- 25 Los valores de amplitud de campo óptico determinados y los valores de fase de campo óptico determinados se requieren para cada una de la pluralidad de partes espaciales del campo óptico de entrada y para cada uno del primer y segundo estado de polarización de entrada para representar con precisión la transmisión de luz a través de un medio que aleatoriza al menos la fase y polarización. Si los valores de amplitud del campo óptico no se determinan para cada una de la pluralidad de partes espaciales del campo óptico de entrada y para cada uno del primer y segundo estado de polarización de entrada, esto puede conducir a una pérdida de potencia óptica y/o a la generación de ruido. Tal método puede ser particularmente ventajoso para controlar la transmisión de luz a través de un medio que es aleatoriza la fase y la polarización, tal como un medio que comprende una fibra multimodo.
- 30 El medio puede aleatorizar al menos uno de la amplitud, fase y polarización de la luz en la transmisión a través del medio.
- El medio puede transmitir, reflejar, absorber, refractar, difractar, dispersar y/o guiar la luz.
- 35 El medio puede comprender una guía de onda óptica que soporta uno o más modos guiados.
- Los modos guiados pueden tener diferentes estados de polarización.
- 40 El medio puede transmitir, reflejar, absorber, refractar, difractar, dispersar y/o guiar diferentes modos guiados a diferentes grados en la transmisión del modo guiado a través del medio.
- El medio puede introducir retrasos de fase aleatorios entre diferentes modos guiados en la transmisión de los modos guiados a través del medio.
- 45 El medio puede aleatorizar la amplitud, fase y/o polarización de diferentes modos guiados en la transmisión de los modos guiados a través del medio.
- El medio puede acoplar o transferir aleatoriamente energía óptica entre diferentes modos guiados en la transmisión de los modos guiados a través del medio.
- 50 El medio puede comprender una fibra óptica.
- El medio puede comprender una fibra óptica multimodo.
- 55 El medio puede comprender una fibra que mantiene la polarización.
- El medio puede comprender una fibra fotónica de banda prohibida, una fibra de cristal fotónico, una fibra Bragg o similar.
- 60 El medio puede comprender tejido biológico.
- El medio puede comprender una o más suspensiones coloidales.
- El medio puede comprender un difusor.
- 65 El método puede comprender controlar el estado de polarización de la luz transmitida que entra al medio entre el

primer y segundo estado de polarización de entrada.

5 El método puede comprender definir el primer y/o segundo estado de polarización de entrada para que tenga un estado de polarización determinista. El método puede comprender definir el primer y/o segundo estado de polarización de entrada para que sean estados de polarización lineal, circular y/o elíptica.

10 El método puede comprender definir el primer y/o segundo estado de polarización de entrada que usa un controlador de polarización. Por ejemplo, el método puede comprender definir el primer y/o segundo estado de polarización de entrada que usa al menos uno de un polarizador, una placa de media onda, una placa de cuarto de onda, un desplazador de haz de polarización, un divisor de haz de polarización y similares.

15 El método puede comprender controlar el estado de polarización de la luz transmitida que entra al medio controlando el estado de polarización de la luz transmitida en una ubicación desplazada desde un extremo de entrada del medio en una dirección opuesta a una dirección de propagación.

20 El método puede comprender controlar el estado de polarización de la luz transmitida que entra al medio dirigiendo selectivamente la luz transmitida a lo largo de una primera o una segunda trayectoria óptica, cada una de las cuales se extiende desde una parte espacial seleccionada del campo óptico de entrada al medio. La primera trayectoria óptica puede extenderse a través de un controlador de polarización que funciona para proporcionar a la luz que entra al medio el primer estado de polarización de entrada. La segunda trayectoria óptica puede desviar el controlador de polarización y puede entrar al medio con el segundo estado de polarización de entrada.

25 Al menos algunas de las etapas (i) a (v) del método pueden realizarse en cualquier orden. Al menos algunas de las etapas (i) a (v) del método pueden realizarse secuencialmente o pueden solaparse al menos parcialmente.

El método puede comprender controlar el estado de polarización de la luz transmitida desde una parte espacial dada del campo óptico de entrada entre el primer y segundo estado de polarización de entrada antes de transmitir luz desde la siguiente parte espacial del campo óptico de entrada.

30 El método puede comprender:

35 transmitir luz desde cada una de la pluralidad de partes espaciales del campo óptico de entrada de modo que la luz transmitida entre al medio con el primer estado de polarización de entrada; y después transmitir luz desde cada una de la pluralidad de partes espaciales del campo óptico de entrada para que la luz transmitida entre al medio con el segundo estado de polarización de entrada.

El método puede comprender:

40 detectar una intensidad de la parte espacial del componente de polarización del campo de interferencia óptico para cada una de la pluralidad de partes espaciales del campo óptico de entrada y para cada uno del primer y segundo estado de polarización de entrada de la luz transmitida que entra al medio; y después usar la intensidad detectada para determinar un valor de amplitud de campo óptico y un valor de fase de campo óptico.

45 Cada parte espacial del campo óptico de entrada puede ser contigua con una o más partes espaciales adyacentes del campo óptico de entrada.

50 Cada parte espacial del campo óptico de entrada puede no solaparse con una o más partes espaciales adyacentes del campo óptico de entrada.

La pluralidad de partes espaciales de las partes de campo óptico de entrada pueden constituir conjuntamente una pluralidad de modos de entrada ortogonales que conjuntamente proporcionan una base establecida para la representación del campo óptico de entrada para cualquiera del primer y segundo estado de polarización de entrada.

55 Cualquier campo óptico de entrada arbitrario puede expresarse como una superposición compleja de tal pluralidad de partes espaciales del campo óptico de entrada.

60 El número de partes espaciales del campo óptico de entrada puede ser mayor o igual a un número de modos ópticos soportados por el sistema óptico que comprende el medio.

El campo óptico de entrada puede extenderse lateralmente en relación con una dirección de propagación.

El campo óptico de entrada puede extenderse a través de un plano.

65 El campo óptico de entrada puede extenderse a través de un plano perpendicular a una dirección de propagación.

El campo óptico de entrada puede estar ubicado en un lado de entrada del medio.

El campo óptico de entrada puede desplazarse desde un extremo de entrada del medio en una dirección opuesta a una dirección de propagación.

5 El campo óptico de entrada puede estar ubicado en un extremo de entrada del medio.

El método puede comprender seleccionar un componente de polarización del campo de interferencia óptico.

10 El componente de polarización del campo de interferencia óptico puede tener un estado de polarización lineal, circular o elíptica.

El método puede comprender seleccionar el componente de polarización del campo de interferencia óptico que usa un aparato de control de polarización. Por ejemplo, el método puede comprender seleccionar el componente de polarización del campo de interferencia óptico utilizando al menos uno de un polarizador, una placa de media onda, una placa de cuarto de onda, un desplazador de haz de polarización, un divisor de haz de polarización y similares.

15 El método puede comprender recibir una parte espacial del campo óptico de salida y una parte espacial del campo óptico de referencia en el mismo receptor. En otras palabras, la parte espacial del campo de interferencia óptico puede considerarse como la superposición de una parte espacial del campo óptico de salida con una parte espacial correspondiente del campo óptico de referencia.

20 La parte espacial del campo óptico de salida puede seleccionarse de una pluralidad de partes espaciales del campo óptico de salida que conjuntamente definen el campo óptico de salida.

25 La parte espacial del campo óptico de salida puede ser contigua con una o más partes espaciales adyacentes del campo óptico de salida.

30 La parte espacial del campo óptico de salida puede no solaparse con una o más partes espaciales adyacentes del campo óptico de salida.

35 La pluralidad de partes espaciales del campo óptico de salida puede constituir una pluralidad de modos de salida que conjuntamente proporcionen una base establecida para la representación del componente de polarización del campo óptico de salida.

La pluralidad de partes espaciales del campo óptico de salida puede constituir una pluralidad de modos de salida ortogonales que en conjunto proporcionan una base establecida para la representación del componente de polarización del campo óptico de salida.

40 Cada parte espacial del campo óptico de salida puede tener una distribución de intensidad y/o fase que está indicada por las limitaciones físicas impuestas por un sistema óptico utilizado para implementar el método. Por ejemplo, cada parte espacial del campo óptico de salida puede tener un perfil de disco de Airy que está indicado por las propiedades ópticas, tal como la apertura numérica del sistema óptico.

45 El campo óptico de salida puede expresarse como una superposición compleja de la pluralidad de partes espaciales del campo óptico de salida.

50 El número de partes espaciales del campo óptico de salida puede ser mayor o igual a un número de modos ópticos soportados por el sistema óptico que comprende el medio. Si el número de partes espaciales del campo óptico de entrada y el número de partes espaciales del campo óptico de salida son iguales al número de modos ópticos admitidos por el sistema óptico, esto puede garantizar que la transformación del sistema óptico sea unitaria. Tal transformación puede usarse para controlar sustancialmente toda la potencia óptica transmitida por el sistema.

55 El campo óptico de salida puede extenderse lateralmente en relación con una dirección de propagación.

El campo óptico de salida puede extenderse a través de un plano.

El campo óptico de salida puede extenderse a través de un plano perpendicular a una dirección de propagación.

60 El campo óptico de salida puede desplazarse desde un extremo de salida del medio en la dirección de propagación.

El campo óptico de salida puede estar ubicado en un extremo de salida del medio.

65 El método puede comprender determinar el valor de amplitud del campo óptico para la parte espacial seleccionada del campo óptico de entrada y el estado de polarización de entrada seleccionado a partir de la amplitud de la variación detectada en la intensidad de la parte espacial del componente de polarización del campo de interferencia

óptico correspondiente en función de la fase aplicada a la parte espacial seleccionada del campo óptico de entrada. El valor de amplitud del campo óptico determinado puede ser la amplitud de la variación detectada en la intensidad de la parte espacial del componente de polarización del campo de interferencia óptico correspondiente en función de la fase aplicada a la parte espacial seleccionada del campo óptico de entrada.

5 El método puede comprender determinar el valor de fase del campo óptico para la parte espacial seleccionada del campo óptico de entrada y el estado de polarización de entrada seleccionada a partir del valor de la fase aplicada a la parte espacial seleccionada del campo óptico de entrada que corresponde a una característica distinguible en la variación detectada en la intensidad de la parte espacial del componente de polarización del campo de interferencia
10 óptico correspondiente en función de la fase aplicada a la parte espacial seleccionada del campo óptico de entrada.

El valor de fase del campo óptico determinado puede ser el valor de la fase aplicada a la parte espacial seleccionada del campo óptico de entrada que corresponde a la característica distinguible en la variación detectada en la intensidad de la parte espacial del componente de polarización del campo de interferencia óptica correspondiente en
15 función de la fase aplicada a la parte espacial seleccionada del campo óptico de entrada.

El método puede comprender transmitir una parte espacial del campo óptico de entrada a lo largo de una trayectoria de referencia para formar el campo óptico de referencia.

20 La trayectoria de referencia puede ser externa al medio.

La trayectoria de referencia puede ser no aleatoria con respecto a la amplitud, fase y/o polarización.

25 Cuando la trayectoria de referencia aleatoriza la amplitud, fase y/o polarización, esto puede conducir a variaciones espaciales y/o temporales en la amplitud, fase y/o polarización del campo óptico de referencia. Tal variación, a su vez, también puede conducir a imprecisiones en la amplitud del campo óptico y los valores de fase determinados. Además, para el caso de una trayectoria de referencia que pasa a través de un medio que aleatoriza la fase y/o la polarización, tal como una fibra multimodo, el campo óptico de referencia puede presentar un patrón moteado que
30 tiene partes tanto relativamente brillantes como relativamente oscuras. La detección del campo de interferencia óptico formado a partir de tal campo óptico de referencia y el campo óptico de salida puede requerir un detector óptico de alto rango dinámico que sea capaz, en particular, de detectar aquellas partes del campo de interferencia óptico que corresponden a las partes oscuras del campo óptico de referencia. Esto puede ser indeseable o difícil en la práctica. Por el contrario, el uso de una trayectoria de referencia que no es aleatoria o determinista con respecto a
35 la amplitud, fase y/o polarización puede superar tales limitaciones asociadas con una trayectoria de referencia aleatoria.

La trayectoria de referencia puede extenderse a través del medio. Tal método puede usarse cuando no es posible o no es práctico proporcionar una trayectoria de referencia externa al medio.

40 El método puede comprender estabilizar la trayectoria de referencia.

El método puede comprender estabilizar la fase de la trayectoria de referencia.

45 El método puede comprender estabilizar una longitud y/o un índice de refracción de la trayectoria de referencia.

El método puede comprender controlar el entorno de la trayectoria de referencia. Por ejemplo, el método puede comprender fijar la trayectoria de referencia y/o aislar la trayectoria de referencia de vibraciones, corrientes de aire y similares. El método puede comprender controlar la temperatura de la trayectoria de referencia.

50 El método puede comprender medir cualquier cambio de fase inducido en la trayectoria de referencia.

El método puede comprender el uso de cualquier cambio de fase de trayectoria de referencia medido para corregir los valores de la amplitud y/o fase determinadas del componente de polarización de la parte del campo óptico de salida.

55 La trayectoria de referencia puede extenderse a través de un medio de referencia.

La trayectoria de referencia puede extenderse a través de una guía de onda óptica.

60 La trayectoria de referencia puede extenderse a través de una guía de onda óptica monomodo.

El uso de una trayectoria de referencia de guía de onda óptica monomodo puede servir para reducir o al menos eliminar sustancialmente los cambios de fase aleatorios que pueden ocurrir de otra manera en una trayectoria de referencia de guía de onda óptica multimodo debido al acoplamiento de modo.

65 La trayectoria de referencia puede extenderse a través de una fibra óptica.

La trayectoria de referencia puede extenderse a través de una fibra óptica monomodo.

La trayectoria de referencia puede extenderse a través de una fibra que mantiene la polarización.

5 La trayectoria de referencia puede extenderse a través de una fibra fotónica de banda prohibida, una fibra de cristal fotónico, una fibra Bragg o similar.

10 El método puede comprender determinar una primera transformación compleja a partir de los valores de amplitud de campo óptico determinados y los valores de fase de campo óptico determinados para cada una de las partes espaciales del campo óptico de entrada y el primer estado de polarización de entrada.

15 El método puede comprender determinar una segunda transformación compleja a partir de los valores de amplitud de campo óptico determinados y los valores de fase de campo óptico determinados para cada una de las partes espaciales del campo óptico de entrada y el segundo estado de polarización de entrada.

20 El método puede comprender determinar una función de modulación compleja para el componente de polarización del campo óptico de salida realizando una superposición compleja de la primera y segunda transformaciones complejas determinadas para cada una de las partes espaciales del campo óptico de entrada.

25 El método puede comprender aplicar un cambio de fase a cada una de las partes espaciales del campo óptico de entrada y seleccionar el estado de polarización de entrada de cada una de las partes espaciales del campo óptico de entrada según la función de modulación compleja para crear una parte espacial de un componente de polarización de un campo óptico de salida que coincide con una parte espacial de un campo óptico de salida objetivo que tiene una amplitud objetivo, una fase objetivo y un estado de polarización objetivo.

30 El método puede comprender aplicar una atenuación a cada una de las partes espaciales del campo óptico de entrada según la función de modulación compleja para crear una parte espacial de un componente de polarización de un campo óptico de salida que coincide con una parte espacial de un campo óptico de salida objetivo que tiene una amplitud objetivo, una fase objetivo y un estado de polarización objetivo.

35 El método puede comprender detectar una intensidad de cada una de una pluralidad de partes espaciales del componente de polarización del campo de interferencia óptico correspondiente para cada una de la pluralidad de partes espaciales del campo óptico de entrada y para cada uno del primer y segundo estado de polarización de entrada.

40 El método puede comprender el uso de las intensidades detectadas para determinar un valor de una amplitud de campo óptico y un valor de una fase de campo óptico para cada una de la pluralidad de partes espaciales del componente de polarización del campo de interferencia óptico correspondiente, para cada una de la pluralidad de partes espaciales del campo óptico de entrada y para cada uno del primer y segundo estado de polarización de entrada.

45 El método puede comprender usar los valores de amplitud del campo óptico determinados y los valores de fase del campo óptico determinados para cada una de la pluralidad de partes espaciales del componente de polarización del campo de interferencia óptico correspondiente, para cada una de la pluralidad de partes espaciales del campo óptico de entrada y para cada uno del primer y segundo estado de polarización de entrada para crear un campo óptico de salida que coincide con un campo óptico de salida objetivo que tenga una distribución espacial objetivo de amplitudes, una distribución espacial objetivo de fases y una distribución espacial objetivo de estados de polarización.

50 Tal método puede usarse para crear una parte de campo óptico de salida que tenga cualquier estado de polarización de salida deseado y cualquier amplitud y/o fase deseada dentro de cualquier limitación física impuesta por un aparato usado para implementar el método. Como tal, el método puede usarse para proporcionar un control total de la amplitud, fase y/o polarización de la luz transmitida a través de un medio que aleatoriza la amplitud, fase y/o polarización de la luz en la transmisión a través del medio.

55 El método puede comprender aplicar un algoritmo de optimización para mejorar una coincidencia entre una distribución de intensidad del campo óptico de salida creado y una distribución de intensidad del campo óptico de salida objetivo.

60 El método puede comprender la aplicación de un algoritmo Gerchberg-Saxton (GS) para mejorar la coincidencia entre la distribución de intensidad del campo óptico de salida creado y la distribución de intensidad del campo óptico de salida objetivo.

65 El uso del algoritmo GS puede optimizar matemáticamente una precisión de la coincidencia entre la distribución de intensidad del campo óptico de salida creado y una distribución de intensidad óptica de salida objetivo. El uso del

algoritmo GS de esta manera no requiere la implementación en el *hardware* de ninguna retroalimentación física.

El método puede comprender dar forma a un campo óptico.

- 5 El método puede comprender transformar un campo óptico de entrada en un lado de entrada de un medio en un campo óptico de salida en un lado de salida del medio.

10 El método puede comprender detectar una variación en la intensidad de una parte espacial del componente de polarización del campo de interferencia óptico correspondiente y una parte espacial de un componente de polarización adicional del campo de interferencia óptico correspondiente para una parte espacial seleccionada del campo óptico de entrada y para un estado de polarización de entrada seleccionado mientras se varía una fase aplicada a la parte espacial seleccionada del campo óptico de entrada, en el que el componente de polarización del campo de interferencia óptico correspondiente y el componente de polarización adicional del campo de interferencia óptico correspondiente tienen estados de polarización ortogonales.

15 El método puede comprender determinar un valor de amplitud del campo óptico y un valor de fase de campo óptico para la parte espacial seleccionada del campo óptico de entrada y el estado de polarización de entrada seleccionado a partir de la variación detectada en la intensidad de la parte espacial del componente de polarización del campo de interferencia óptico correspondiente y la parte espacial del componente de polarización adicional del campo de interferencia óptico correspondiente en función de la fase aplicada a la parte espacial seleccionada del campo óptico de entrada.

20 El método puede comprender el uso de los valores de amplitud de campo óptico determinados y los valores de fase del campo óptico determinados para cada parte espacial del campo óptico de entrada, para cada uno del primer y segundo estado de polarización de entrada y para cada componente de polarización y el componente de polarización adicional del campo de interferencia óptico correspondiente para crear una parte espacial del campo óptico de salida que coincida con una parte espacial de un campo óptico de salida objetivo que tenga una amplitud objetivo, una fase objetivo y un estado de polarización objetivo.

25 El método puede comprender detectar una intensidad de cada una de una pluralidad de partes espaciales del componente de polarización del campo de interferencia óptico correspondiente y de cada una de una pluralidad de partes espaciales del componente de polarización adicional del campo de interferencia óptico correspondiente, para cada una de la pluralidad de partes espaciales del campo óptico de entrada y para cada uno del primer y segundo estado de polarización de entrada.

30 El método puede comprender el uso de las intensidades detectadas para determinar un valor de una amplitud de campo óptico y un valor de una fase de campo óptico para cada una de la pluralidad de partes espaciales del componente de polarización del campo de interferencia óptico correspondiente y cada una de la pluralidad de partes espaciales del componente de polarización adicional del campo de interferencia óptico correspondiente, para cada una de la pluralidad de partes espaciales del campo óptico de entrada y para cada uno del primer y segundo estado de polarización de entrada.

35 El método puede comprender usar los valores de amplitud de campo óptico determinados y los valores de fase de campo óptico determinados para cada una de la pluralidad de partes espaciales del campo óptico de entrada, para cada uno del primer y segundo estado de polarización de entrada y para cada una de la pluralidad de partes espaciales del componente de polarización y el componente de polarización adicional del campo de interferencia óptico correspondiente para crear un campo óptico de salida que coincida con un campo óptico de salida objetivo que tenga una distribución espacial objetivo de amplitudes, una distribución espacial objetivo de fases y una distribución espacial objetivo de estados de polarización.

40 El método puede comprender aplicar un algoritmo de optimización para mejorar una coincidencia entre una distribución de intensidad del campo óptico de salida creado y una distribución de intensidad del campo óptico de salida objetivo.

45 El método puede comprender la aplicación de un algoritmo Gerchberg-Saxton (GS) para mejorar la coincidencia entre la distribución de intensidad del campo óptico de salida creado y la distribución de intensidad del campo óptico de salida objetivo.

50 El método puede comprender dar forma a un campo óptico.

55 El método puede comprender transformar un campo óptico de entrada en un lado de entrada de un medio en un campo óptico de salida en un lado de salida del medio.

60 El método puede comprender producir una imagen en un lado del medio de un objeto ubicado en un lado opuesto del medio.

65

El método puede comprender producir una imagen en un lado de una fibra multimodo de un objeto ubicado en un lado opuesto de la fibra multimodo.

5 El método puede comprender atrapar ópticamente una partícula suspendida en un medio líquido.

El método puede comprender:

10 determinar un campo óptico de salida objetivo requerido para atrapar ópticamente la partícula en el medio; y usar los valores de amplitud de campo óptico determinados y los valores de fase de campo óptico determinados para cada una de la pluralidad de partes espaciales del campo óptico de entrada, para cada uno del primer y segundo estado de polarización de entrada y para cada parte espacial del componente de polarización del campo de interferencia óptico para crear un campo óptico de salida que coincida con el campo óptico de salida objetivo.

15 El método puede comprender:

20 determinar un campo óptico de salida objetivo requerido para atrapar ópticamente la partícula en el medio; y usar los valores de amplitud de campo óptico determinados y los valores de fase de campo óptico determinados para cada una de la pluralidad de partes espaciales del campo óptico de entrada, para cada uno del primer y segundo estado de polarización de entrada y para cada parte espacial del componente de polarización y el componente de polarización adicional del campo de interferencia óptico para crear un campo óptico de salida que coincida con el campo óptico de salida objetivo.

25 El método puede comprender manipular ópticamente una partícula suspendida en un medio líquido.

El método puede comprender:

30 determinar un campo óptico de salida objetivo móvil requerido para manipular ópticamente la partícula en el medio; y usar los valores de amplitud de campo óptico determinados y los valores de fase de campo óptico determinados para cada una de la pluralidad de partes espaciales del campo óptico de entrada, para cada uno del primer y segundo estado de polarización de entrada y para cada parte espacial del componente de polarización del campo de interferencia óptico para crear un campo óptico de salida móvil que coincida con el campo óptico de salida objetivo móvil.

35 El método puede comprender:

40 determinar un campo óptico de salida objetivo móvil requerido para manipular ópticamente la partícula en el medio; y usar los valores de amplitud de campo óptico determinados y los valores de fase de campo óptico determinados para cada una de la pluralidad de partes espaciales del campo óptico de entrada, para cada uno del primer y segundo estado de polarización de entrada y para cada parte espacial del componente de polarización y el componente de polarización adicional del campo de interferencia óptico para crear un campo óptico de salida móvil que coincida con el campo óptico de salida objetivo móvil.

45 El método puede comprender nanocirugía.

El método puede comprender lisar ópticamente una pluralidad de células en un medio líquido.

El método puede comprender transfectar ópticamente una pluralidad de células en un medio líquido.

50 Según un aspecto de la presente divulgación, se proporciona un método de uso para controlar la transmisión de luz a través de un medio que comprende las etapas siguientes:

- 55 (i) transmitir luz desde una única parte espacial de un campo óptico de entrada a través del medio para crear un campo óptico de salida;
- (ii) transmitir luz desde la única parte espacial del campo óptico de entrada a lo largo de una trayectoria de referencia externa al medio para crear un campo óptico de referencia;
- (iii) superponer el campo óptico de salida con el campo óptico de referencia para crear un campo de interferencia óptico;
- 60 (iv) detectar una intensidad de una parte espacial de un componente de polarización del campo de interferencia óptico;
- (v) usar la intensidad detectada para determinar un valor de una amplitud de campo óptico y un valor de una fase de campo óptico; y (vi) repetir las etapas (i) a (v) para cada una de una pluralidad de partes espaciales del campo óptico de entrada.

65

El método puede comprender realizar las etapas (i) y (ii) simultáneamente.

Tal método puede usarse para caracterizar un sistema óptico que comprende un medio que se aleatoriza con respecto a la amplitud y fase pero que no se aleatoriza con respecto a la polarización.

5 Tal método puede usarse para controlar la amplitud y/o fase de una parte de un campo óptico de salida controlando solo un campo óptico de entrada en un lado de entrada del medio.

10 El método puede usarse, en particular, para controlar la transmisión a través de un medio de aleatorización que aleatoriza la amplitud y/o fase pero no la polarización de la luz en la transmisión a través del medio.

La trayectoria de referencia externa puede configurarse para proporcionar un cambio no aleatorio o determinista en amplitud, fase y/o polarización.

15 Una trayectoria de referencia externa no aleatoria o determinista puede eliminar o suprimir sustancialmente las variaciones aleatorias en amplitud, fase y/o polarización que, de lo contrario, pueden ocurrir en la trayectoria de referencia para eliminar o suprimir sustancialmente inexactitudes en los valores de amplitud y fase del campo óptico determinado. Una trayectoria de referencia externa no aleatoria o determinista también puede eliminar cualquier requisito para un detector óptico de alto rango dinámico que de otro modo podría ser necesario para las mediciones de un campo de interferencia óptico creado al interferir el campo óptico de salida con un campo óptico de referencia creado en la transmisión de luz a lo largo de una trayectoria de referencia que se aleatoriza en amplitud, fase y/o polarización.

20 Tal método puede usarse para proporcionar una parte espacial de un campo óptico de salida objetivo que tenga cualquier amplitud y/o fase deseada dentro de cualquier limitación física impuesta por un aparato usado para implementar el método cuando el medio no se aleatoriza con respecto a la polarización.

El método puede comprender repetir las etapas (i) a (v) para cada uno del primer y segundo estados de polarización de entrada ortogonales de la luz transmitida que entra al medio.

30 Tal método puede usarse para controlar la transmisión de luz a través de un medio de aleatorización que aleatoriza la amplitud, fase y/o polarización de la luz transmitida a través del medio.

35 Una o más de las características opcionales asociadas con cualquier aspecto de la presente invención o de la presente divulgación pueden aplicarse solas o en cualquier combinación en relación con cualquier otro aspecto de la presente invención o de la presente divulgación.

Según un aspecto de la presente divulgación, se proporciona un método de uso para controlar la transmisión de luz a través de un medio que comprende:

- 40
- (i) transmitir luz desde una única parte espacial de un campo óptico de entrada a través del medio para crear un campo óptico de salida;
 - (ii) superponer el campo óptico de salida con un campo óptico de referencia para crear un campo de interferencia óptico;
 - 45 (iii) detectar una intensidad de una parte espacial de un componente de polarización del campo de interferencia óptico;
 - (iv) usar la intensidad detectada para determinar un valor de una amplitud de campo óptico y un valor de una fase de campo óptico; y (v) repetir las etapas (i) a (iv) para cada una de una pluralidad de partes espaciales del campo óptico de entrada y para cada una de una pluralidad de partes espaciales de un componente de polarización del campo de interferencia óptico.
- 50

Tal método puede usarse en la caracterización de un sistema óptico que comprende el medio.

55 Tal método puede usarse para controlar la amplitud y/o fase de un campo óptico de salida controlando solo un campo óptico de entrada en un lado de entrada del medio.

El método puede usarse, en particular, para controlar la transmisión a través de un medio de aleatorización que aleatoriza la amplitud y/o fase pero no la polarización de la luz en la transmisión a través del medio.

60 El método puede comprender el uso de los valores de amplitud de campo óptico determinados y los valores de fase de campo óptico determinados para crear un campo óptico de salida que coincida con un campo óptico de salida objetivo. Tal método puede usarse para generar un campo óptico de salida objetivo deseado que tenga una mayor extensión espacial a los campos ópticos de salida objetivo que pueden generarse usando métodos de uso conocidos para controlar la transmisión de luz a través de un medio.

65

Una o más de las características opcionales asociadas con cualquier aspecto de la presente invención o de la presente divulgación pueden aplicarse solas o en cualquier combinación en relación con cualquier otro aspecto de la presente invención o de la presente divulgación.

5 Según un aspecto de la presente invención, se proporciona un aparato de uso para controlar la transmisión de luz a través de un medio que comprende:

un modulador de luz espacial configurado para transmitir secuencialmente la luz correspondiente a cada una de una pluralidad de partes espaciales de un campo óptico de entrada incidente en el modulador de luz espacial;
 10 una disposición de control de polarización de entrada configurada para definir secuencialmente el primer y segundo estado de polarización de entrada ortogonal de la luz transmitida por el modulador de luz espacial;
 una disposición de combinación de haz configurada para superponer un campo óptico de salida y un campo óptico de referencia para crear un campo de interferencia óptica;
 15 una disposición de control de polarización de salida configurada para seleccionar un componente de polarización del campo de interferencia óptica;
 un detector óptico configurado para detectar una parte espacial del componente de polarización seleccionado del campo de interferencia óptica; y
 un controlador configurado para que:

- 20 (i) el modulador de luz espacial y la disposición de control de polarización de entrada transmitan luz a través del medio para crear el campo óptico de salida correspondiente, la luz transmitida correspondiente a una parte espacial seleccionada del campo óptico de entrada y un estado de polarización de entrada seleccionado;
- 25 (ii) la disposición de combinación de haz superponga el campo óptico de salida correspondiente con el campo óptico de referencia para crear el campo de interferencia óptica correspondiente;
- (iii) el detector óptico detecte una intensidad de una parte espacial del componente de polarización seleccionado del campo de interferencia óptica correspondiente;
- 30 (iv) el controlador usa la intensidad detectada para determinar un valor de una amplitud de campo óptico y un valor de una fase de campo óptico correspondiente a la parte espacial seleccionada del campo óptico de entrada y el estado de polarización de entrada seleccionado; y
- (v) se repiten las etapas (i) a (iv) para cada parte espacial seleccionada de una pluralidad de partes espaciales del campo óptico de entrada y para cada estado de polarización de entrada seleccionado del primer y segundo estado de polarización de entrada ortogonal,

35 en el que cada iteración de las etapas (i) a (iii) se realiza secuencialmente de modo que cada iteración de las etapas (i) a (iii) proporcione la intensidad detectada correspondiente a una seleccionada de la pluralidad de partes espaciales del campo óptico de entrada en combinación con un correspondiente seleccionado del primer y segundo estado de polarización de entrada ortogonal,
 en el que la etapa (iii) comprende el detector óptico que detecta una variación en la intensidad de la parte espacial del componente de polarización seleccionado del campo de interferencia óptica correspondiente para la parte espacial seleccionada del campo óptico de entrada y para el estado de polarización de entrada seleccionado mientras varía un fase aplicada a la parte espacial seleccionada del campo óptico de entrada, y
 40 en el que la etapa (iv) comprende el controlador que usa la intensidad detectada para determinar el valor de amplitud del campo óptico y el valor de fase del campo óptico para la parte espacial seleccionada del campo óptico de entrada y para el estado de polarización de entrada seleccionado a partir de la variación detectada en la intensidad de la parte espacial del componente de polarización seleccionado del campo de interferencia óptica correspondiente en función de la fase aplicada a la parte espacial seleccionada del campo óptico de entrada.

50 El aparato puede usarse para caracterizar un sistema óptico que comprende un medio. Por ejemplo, el aparato puede usarse para caracterizar un sistema óptico definido entre el modulador de luz espacial y el campo óptico de salida.

El aparato se puede usar para controlar la amplitud, fase y/o polarización de una parte espacial de un campo óptico de salida controlando solo un campo óptico de entrada en un lado de entrada del medio.

55 El detector óptico puede comprender un fotodetector, un fotodiodo y/o un sensor de imagen tal como un dispositivo de carga acoplada (CCD) o un sensor de imagen de semiconductor de óxido de metal (CMOS) complementario o similar.

60 El controlador puede comprender un procesador tal como un microprocesador, un ordenador o similar.

La disposición de control de polarización de entrada puede comprender al menos uno de un polarizador, una placa de media onda, una placa de cuarto de onda, un desplazador de haz de polarización, un divisor de haz de polarización y similares. La disposición de control de polarización de entrada puede comprender un controlador de polarización, un escáner de polarización y/o similares.

- La disposición de control de polarización de entrada puede comprender el modulador de luz espacial. Por ejemplo, la disposición de control de polarización de entrada puede comprender el modulador de luz espacial en combinación con una placa de media onda, en el que el modulador de luz espacial está configurado para dirigir selectivamente la luz a través de la placa de media onda para controlar la polarización.
- 5 El modulador de luz espacial puede configurarse para dividir un haz de luz inicial en un haz de medición que define el campo óptico de entrada y un haz de referencia que define un campo óptico de referencia.
- 10 El haz de luz inicial, el haz de luz de medición y/o el haz de luz de referencia pueden comprender ondas planas.
- El haz de luz inicial, el haz de luz de medición y/o el haz de luz de referencia pueden tener una extensión espacial definida en un plano lateral a una dirección de propagación.
- 15 El aparato puede configurarse para interferir el campo óptico de salida con el campo óptico de referencia para generar un campo de interferencia en el detector óptico.
- El modulador de luz espacial puede configurarse para transmitir el haz de referencia a lo largo de una trayectoria de referencia.
- 20 La trayectoria de referencia puede ser no aleatoria con respecto a la amplitud, fase y/o polarización.
- La trayectoria de referencia puede ser externa al medio.
- La trayectoria de referencia puede comprender una guía de onda óptica.
- 25 La trayectoria de referencia puede comprender una guía de onda óptica monomodo.
- La trayectoria de referencia puede comprender una fibra óptica.
- 30 La trayectoria de referencia puede comprender una fibra óptica monomodo.
- La disposición de control de polarización de salida puede configurarse para seleccionar un componente de polarización adicional del campo de interferencia óptico, en el que el componente de polarización adicional del campo de interferencia óptico correspondiente tiene un estado de polarización que es ortogonal al estado de polarización del componente de polarización del campo de interferencia óptico.
- 35 La disposición de control de polarización de salida puede configurarse para separar espacialmente la parte del campo óptico de salida en el componente de polarización y el componente de polarización adicional.
- 40 El controlador puede configurarse para controlar el modulador de luz espacial según la amplitud del campo óptico y los valores de fase determinados para la parte espacial del componente de polarización del campo de interferencia óptico correspondiente y/o para la parte espacial del componente de polarización adicional del campo de interferencia óptico correspondiente para crear una parte espacial de un campo óptico de salida que coincida con una parte espacial de un campo óptico de salida objetivo.
- 45 La disposición de control de polarización de salida puede comprender al menos uno de un polarizador, una media placa de onda, un cuarto de placa de onda, un desplazador de haz de polarización, un divisor de haz de polarización y similares. La disposición de control de polarización de salida puede comprender un controlador de polarización, un escáner de polarización y/o similares.
- 50 El detector óptico puede estar configurado para medir una intensidad del campo de interferencia.
- El aparato puede configurarse para medir una variación en la intensidad de la parte espacial del componente de polarización del campo de interferencia óptico correspondiente y/o una variación en la intensidad de la parte espacial del componente de polarización adicional del campo de interferencia óptico correspondiente usando el detector óptico a medida que la fase aplicada a cada parte espacial del campo óptico de entrada es variada secuencialmente por el modulador de luz espacial para cada uno del primer y segundo estado de polarización de entrada.
- 55 El aparato puede configurarse para determinar la amplitud del campo óptico y los valores de fase para la parte espacial del componente de polarización del campo de interferencia óptico correspondiente y/o para la parte espacial del componente de polarización adicional del campo de interferencia óptico correspondiente a partir de la variación en la intensidad del campo de interferencia óptico medida usando el detector óptico a medida que la fase aplicada a cada parte espacial del campo óptico de entrada es variada secuencialmente por el modulador de luz espacial para cada uno del primer y segundo estado de polarización de entrada.
- 60 La trayectoria de referencia puede extenderse a través del medio.
- 65

La trayectoria de referencia puede ser interna al medio.

5 La trayectoria de referencia puede estabilizarse. El aparato puede configurarse para controlar el entorno de la trayectoria de referencia. Por ejemplo, el aparato puede configurarse para fijar la trayectoria de referencia y/o aislar la trayectoria de referencia de vibraciones, corrientes de aire y similares. El aparato se puede configurar para controlar la temperatura de la trayectoria de referencia.

10 El aparato puede configurarse para medir cualquier amplitud y/o los cambios de fase inducidos en la trayectoria de referencia. Por ejemplo, el aparato puede configurarse para transmitir simultáneamente dos partes diferentes del haz de luz de referencia a lo largo de la trayectoria de referencia usando el SLM mientras se interrumpe la transmisión de un haz de medición de luz a través del medio. Operar el aparato de esta manera puede generar un campo de interferencia de referencia en el detector óptico.

15 El aparato se puede configurar para determinar repetidamente la amplitud y la fase del campo de interferencia de referencia para permitir que se determine cualquier cambio de amplitud y/o fase asociados con la trayectoria de referencia. Por ejemplo, el aparato puede configurarse para determinar la amplitud y la fase del campo de interferencia de referencia para permitir que cualquier amplitud y/o cambio de fase asociados con la trayectoria de referencia se determinen antes, después y/o entre mediciones del campo de interferencia de salida generado cuando la luz se transmite a través del medio. El controlador puede configurarse para usar cualquier amplitud determinada y/o cambios de fase asociados con la trayectoria de referencia para ajustar o corregir la amplitud y fase del componente de polarización de la parte del campo óptico de salida determinada a partir del campo de interferencia de salida generado cuando la luz se transmite a través del medio.

25 El aparato puede comprender una fuente de luz. El aparato puede comprender una fuente de luz coherente tal como un diodo emisor de luz, un láser o similar. La fuente de luz puede tener un ancho de línea que esté vinculado con la longitud de la fibra multimodo utilizada. Se puede requerir un ancho de línea más pequeño para una mayor longitud de fibra. La fuente de luz puede ser de longitud de onda estabilizada. La fuente de luz puede estabilizarse en temperatura para estabilizar la longitud de onda. La fuente de luz puede generar luz que tenga un estado de polarización definido tal como un estado de polarización lineal, circular o elíptica.

30 El aparato puede comprender uno o más elementos ópticos para gestionar la propagación de la luz entre la fuente de luz, el medio, la disposición de control de polarización de entrada, la disposición de control de polarización de salida, el modulador de luz espacial y/o el detector óptico. Por ejemplo, el aparato puede comprender una o más lentes, espejos y/o divisores de haz tales como uno o más divisores de haz polarizadores o no polarizadores.

35 Una o más de las características opcionales asociadas con cualquier aspecto de la presente invención o de la presente divulgación pueden aplicarse solas o en cualquier combinación en relación con cualquier otro aspecto de la presente invención o de la presente divulgación.

40 Según un aspecto de la presente divulgación, se proporciona un aparato de uso para controlar la transmisión de luz a través de un medio que comprende:

45 un modulador de luz espacial configurado para transmitir simultáneamente luz desde una parte espacial de un campo óptico de entrada incidente en el modulador de luz espacial a través del medio para crear un campo óptico de salida y transmitir luz desde la parte espacial del campo óptico de entrada a lo largo de una trayectoria de referencia que es externa al medio para crear un campo óptico de referencia, secuencialmente para cada una de una pluralidad de partes espaciales del campo óptico de entrada;

50 una disposición de combinación de haz configurada para superponer el campo óptico de salida y el campo óptico de referencia para crear un campo de interferencia óptico;

una disposición de control de polarización de salida configurada para seleccionar un componente de polarización del campo de interferencia óptica;

un detector óptico configurado para recibir una parte espacial del componente de polarización del campo de interferencia óptico; y un controlador configurado:

55 para controlar el modulador de luz espacial de modo que el modulador de luz espacial transmita secuencialmente luz desde cada una de la pluralidad de partes espaciales del campo óptico de entrada a través del medio;

60 para recibir intensidades detectadas del detector; y usar las intensidades detectadas para determinar un valor de amplitud de campo óptico y un valor de fase de campo óptico.

El aparato puede usarse para caracterizar un sistema óptico que comprenda el medio. Por ejemplo, el aparato puede usarse para caracterizar un sistema óptico definido entre el modulador de luz espacial y el campo óptico de salida.

65 Tal aparato puede usarse para controlar la amplitud y/o fase de una parte de un campo óptico de salida controlando

solo un campo óptico de entrada en un lado de entrada del medio.

La trayectoria de referencia externa puede configurarse para proporcionar un cambio no aleatorio o determinista en amplitud, fase y/o polarización.

5 Una trayectoria de referencia externa no aleatoria o determinista puede eliminar o suprimir sustancialmente las variaciones aleatorias en amplitud, fase y/o polarización que de otro modo pueden ocurrir en la trayectoria de referencia para eliminar o suprimir sustancialmente imprecisiones en la amplitud y fase determinadas de la parte del campo óptico de salida porque la amplitud y la fase del campo óptico de salida se determinan en relación con la amplitud y la fase del campo óptico de referencia. Una trayectoria de referencia externa no aleatoria o determinista también puede eliminar cualquier requisito para un detector óptico de alto rango dinámico que de otro modo podría ser necesario para las mediciones de un campo de interferencia óptico creado al interferir la parte del campo óptico de salida con el campo óptico de referencia para una trayectoria de referencia que se aleatoriza en amplitud, fase y/o polarización.

15 El aparato puede usarse para proporcionar una parte de campo óptico de salida que tenga cualquier amplitud y/o fase deseada dentro de cualquier limitación física impuesta por un aparato usado para implementar el método cuando el medio no es aleatorio con respecto a la polarización.

20 El aparato puede comprender una disposición de control de polarización de entrada configurada para definir secuencialmente el primer y segundo estado de polarización de entrada de luz que entra al medio desde cada una de la pluralidad de partes espaciales del campo óptico de entrada.

25 El control puede configurarse para controlar la disposición de control de polarización de entrada para definir secuencialmente el primer y segundo estado de polarización de entrada.

30 Una o más de las características opcionales asociadas con cualquier aspecto de la presente invención o de la presente divulgación pueden aplicarse solas o en cualquier combinación en relación con cualquier otro aspecto de la presente invención o de la presente divulgación.

Según un aspecto de la presente divulgación, se proporciona un aparato de uso para controlar la transmisión de luz a través de un medio que comprende:

35 un modulador de luz espacial configurado para transmitir secuencialmente luz desde cada una de una pluralidad de partes espaciales de un campo óptico de entrada incidente en el modulador de luz espacial a través del medio para crear un campo óptico de salida;
una disposición de combinación de haz configurada para superponer el campo óptico de salida y un campo óptico de referencia para crear un campo de interferencia óptico;
40 una disposición de control de polarización de salida configurada para seleccionar un componente de polarización del campo de interferencia óptica;
un detector óptico configurado para recibir una pluralidad de partes espaciales de un componente de polarización del campo de interferencia óptico; y un controlador configurado:

45 para controlar el modulador de luz espacial de modo que el modulador de luz espacial transmita secuencialmente luz desde cada una de la pluralidad de partes espaciales del campo óptico de entrada a través del medio;
para recibir intensidades detectadas del detector; y para usar las intensidades detectadas para determinar los valores de amplitud del campo óptico y los valores de fase del campo óptico.

50 El detector óptico puede comprender una matriz de elementos sensores, píxeles o similares.

Tal aparato puede usarse en la caracterización de un sistema óptico que comprenda el medio. Por ejemplo, el aparato puede usarse para caracterizar un sistema óptico definido entre el modulador de luz espacial y el campo óptico de salida.

Tal aparato puede usarse para controlar la amplitud y/o fase de un campo óptico de salida controlando solo un campo óptico de entrada en un lado de entrada del medio.

60 El aparato puede, en particular, usarse para controlar la transmisión a través de un medio de aleatorización que aleatoriza la amplitud y/o fase pero no la polarización de la luz en la transmisión a través del medio.

65 El aparato se puede usar para determinar las amplitudes y fases de cada una de una pluralidad de partes del campo óptico de entrada para crear un campo óptico de salida que coincida con un campo óptico de salida objetivo. Tal aparato puede usarse para generar un campo óptico de salida objetivo deseado que tiene una mayor extensión espacial a los campos ópticos de salida objetivo que pueden generarse usando un aparato de uso conocido para

controlar la transmisión de luz a través de un medio.

5 El aparato puede comprender una disposición de control de polarización de entrada configurada para definir secuencialmente el primer y segundo estado de polarización de entrada de luz que entra al medio desde cada una de la pluralidad de partes espaciales del campo óptico de entrada.

El controlador puede configurarse para controlar la disposición de control de polarización de entrada para definir secuencialmente el primer y segundo estado de polarización de entrada.

10 Una o más de las características opcionales asociadas con cualquiera de los aspectos de la presente invención o de la presente divulgación pueden aplicarse solas o en cualquier combinación en relación con cualquier otro aspecto de la presente invención o de la presente divulgación.

15 Según un aspecto de la presente divulgación, se proporciona un método de uso para controlar la transmisión de luz a través de un medio que comprende:
 determinar secuencialmente una amplitud y una fase de un componente de polarización de una parte de un campo óptico de salida en un lado de salida del medio para cada una de una pluralidad de partes de un campo óptico de entrada en un lado de entrada del medio y para cada uno del primer y segundo estado de polarización de entrada ortogonales de las partes del campo óptico de entrada. La pluralidad de partes del campo óptico de entrada puede definir el campo óptico de entrada.

25 Una o más de las características opcionales asociadas con cualquier aspecto de la presente invención o de la presente divulgación pueden aplicarse solas o en cualquier combinación en relación con cualquier otro aspecto de la presente invención o de la presente divulgación.

Según un aspecto de la presente divulgación, se proporciona un aparato de uso para controlar la transmisión de luz a través de un medio que comprende:

30 un modulador de luz espacial configurado para definir un campo óptico de entrada en un lado de entrada del medio;
 una disposición de control de polarización de entrada configurada para definir secuencialmente el primer y segundo estado de polarización de entrada del campo óptico de entrada;
 un detector óptico configurado para recibir un componente de polarización de una parte de un campo óptico de salida en un lado de salida del medio; y
 35 un controlador configurado para determinar una amplitud y una fase del componente de polarización de la parte del campo óptico de salida a partir de mediciones realizadas por el detector óptico a medida que cada una de la pluralidad de partes de campo óptico de entrada se transmite secuencialmente a través del medio por el modulador de luz espacial para cada uno del primer y segundo estado de polarización de entrada.

40 Una o más de las características opcionales asociadas con cualquier aspecto de la presente invención o de la presente divulgación pueden aplicarse solas o en cualquier combinación en relación con cualquier otro aspecto de la presente invención o de la presente divulgación.

Breve descripción de los dibujos

45 La presente invención se describirá ahora adicionalmente a modo de ejemplo no limitativo solo con referencia a los dibujos adjuntos, de los cuales:

50 la figura 1 es un esquema de un aparato de uso para controlar la transmisión de luz a través de un medio;

la figura 2(a) ilustra esquemáticamente diferentes rejillas de difracción aplicadas en un modulador de luz espacial de uso para controlar la transmisión de luz a través del medio;

55 la figura 2(b) muestra las distribuciones de intensidad en el espacio de Fourier para las diferentes rejillas de difracción que se muestran en la figura 2(a);

la figura 2(c) muestra distribuciones de intensidad simuladas en un sensor CCD que resulta de la interferencia entre la luz transmitida a través de un medio de fibra multimodo y la luz transmitida a lo largo de una trayectoria de referencia para las diferentes rejillas de difracción mostradas en la figura 2(a);

60 la figura 3(a) ilustra esquemáticamente un ejemplo de una función de transformación de sistema compleja determinada para un modo de salida único y un componente de polarización de salida s-polarizado para un campo óptico de entrada s-polarizado;

65 la figura 3(b) ilustra esquemáticamente un ejemplo de una función compleja de transformación del sistema determinada para el mismo modo de salida y el mismo componente de polarización de salida s-polarizado que

para la figura 3(a) pero para un campo óptico de entrada p-polarizado;

5 la figura 4 es una representación gráfica de la construcción de una función de modulación compleja para un modulador de luz espacial determinado para un modo de salida único y un componente de polarización de salida s-polarizado;

la figura 5(a) muestra una imagen experimental de un componente de polarización s-polarizado de un modo de salida;

10 la figura 5(b) muestra una imagen experimental de un componente de polarización p-polarizado correspondiente al componente de polarización s-polarizado mostrado en la figura 5(a);

15 la figura 5(c) muestra una imagen experimental de un ajuste óptico del modo de salida correspondiente al componente de polarización s-polarizado mostrado en la figura 5(a);

20 la figura 6 muestra imágenes experimentales de intensidades del campo óptico de salida para un número variable de modos de salida generados simultáneamente antes y después de la aplicación de un algoritmo de Gerchberg-Saxton y los gráficos correspondientes de la potencia total y la potencia promedio por modo de salida en función del número de modos de salida;

25 la figura 7 muestra una distribución de intensidad de salida objetivo y una serie de imágenes experimentales que muestran la evolución de la distribución de intensidad del campo óptico de salida para diferentes números de iteraciones del algoritmo Gerchberg-Saxton que demuestran una mejora secuencial de la precisión de la coincidencia entre la distribución de intensidad del campo óptico de salida y la distribución de intensidad de la salida objetivo con iteraciones crecientes;

la figura 8 muestra resultados experimentales que ilustran la manipulación óptica en 2-D de 16 partículas de poliestireno, cada una de 3 μm de diámetro;

30 la figura 9(a) muestra una serie de imágenes experimentales y los histogramas de intensidad correspondientes de un campo óptico de salida generado para diferentes componentes de polarización de salida cuando se usa una trayectoria de referencia interna a un medio de fibra multimodo;

35 la figura 9(b) muestra una serie de imágenes experimentales y los histogramas de intensidad correspondientes de un campo óptico de salida generado para diferentes componentes de polarización de salida cuando se utiliza una trayectoria de referencia externa a un medio de fibra multimodo;

40 la figura 10 es un gráfico que muestra resultados simulados para la distribución de potencia entre dos modos de salida para el caso de superposición de fase solo de polarizaciones de entrada: líneas continuas - superposición de modos de salida de fase única, líneas discontinuas - superposición compleja de modos de salida;

45 la figura 11(a) es un gráfico que muestra resultados experimentales para la distribución de potencia entre dos modos de salida para el caso de un estado de polarización de entrada s-polarizado y superposición de modos de salida de fase única cuando se usa la modulación de fase única en un modulador de luz espacial;

la figura 11(b) es un gráfico que muestra resultados experimentales para la distribución de potencia entre dos modos de salida para el caso de la superposición de polarizaciones de entrada de fase única y la superposición de modos de salida de fase única cuando se usa modulación de fase única en un modulador de luz espacial;

50 la figura 11(c) es un gráfico que muestra resultados experimentales para la distribución de potencia entre dos modos de salida para el caso de superposición compleja de polarizaciones de entrada y superposición de modos de salida de fase única cuando se usa la modulación de fase única en un modulador de luz espacial; y

55 la figura 11(d) es un gráfico que muestra resultados simulados para la distribución de potencia entre dos modos de salida para el caso de superposición compleja de polarizaciones de entrada y superposición compleja de modos de salida cuando se usa la modulación de fase y amplitud en un modulador de luz espacial.

Descripción detallada de los dibujos

60 Haciendo referencia inicialmente a la figura 1, se proporciona un aparato de uso generalmente indicado con 10 para controlar la transmisión de luz a través de un medio que comprende una fibra multimodo (MMF) 12 que tiene un diámetro de núcleo de 50 μm y un diámetro de revestimiento de 125 μm , con NA de 0,22. El aparato 10 comprende una fuente de luz láser 14 configurada para proporcionar luz de polarización lineal de infrarrojo cercano de frecuencia única a una longitud de onda de 1064 nm, un modulador de luz espacial (SLM) 16 que tiene una resolución de 512x512 píxeles y una alta frecuencia de actualización superior a 100 Hz, una disposición de control de polarización de entrada que comprende una placa de media onda 18, una disposición de control de polarización

de salida que comprende un desplazador de haz de polarización (PBD) 20 y un detector óptico en forma de un sensor de imagen 22 del dispositivo acoplado a carga (CCD).

5 El MMF 12 permite aproximadamente 400 modos de propagación. La longitud del MMF 12 utilizado es de 1 m. Un experto en la técnica debería comprender que, aparte de los requisitos de rendimiento del láser (ancho de banda estrecho de <100 kHz y estabilidad de longitud de onda), no existe una desventaja fundamental asociada con el uso de longitudes MMF más largas.

10 El aparato comprende un medio de referencia en forma de una fibra monomodo (SMF) 24.

El aparato comprende además varios elementos de gestión del haz en forma de lentes L1 a L8, espejos M1 a M5, un divisor de haz polarizador (PBS), un divisor de haz no polarizador (NPBS) y objetivos de microscopio MO1 (20x, 0,42 NA) y MO2 (20x, 0,40 NA).

15 En uso, la luz polarizada linealmente de la fuente de luz láser 14 se expande mediante un telescopio (L1 = 150 mm y L2 = 300 mm) y se dirige a un área activa del SLM 16. El SLM 16 está configurado para transmitir cualquier incidente de luz sobre el mismo a lo largo de una primera trayectoria 26, una segunda trayectoria 28 o una trayectoria de referencia 30. Las trayectorias 26, 28 y 30 están separadas en el plano de Fourier de la lente L3 (f = 400 mm) por los espejos M1 y M3. La polarización de la luz en la primera trayectoria 26 gira 90° mediante la placa de media onda 18 y se fusiona con la luz en la segunda trayectoria 28 mediante el divisor de haz polarizador PBS. La luz que viaja a lo largo de la primera trayectoria 26 o la segunda trayectoria 28 captura una imagen de una faceta de entrada 32 del MMF 12 mediante un telescopio formado por la lente L4 (f = 200 mm) y el objetivo del microscopio MO1.

25 El objetivo del microscopio MO2 y una lente tubular L5 (f = 200 mm) capturan una imagen de la faceta de salida 34 del MMF 12 en el sensor CCD 22. La luz en la trayectoria de referencia 30 está separada del plano de Fourier por el espejo M2 y acoplada a una entrada 36 del SMF 24 por las lentes L6 (f = 200 mm) y L7 (asférica f = 15 mm, NA = 0,5). Un haz en una salida 38 del SMF 24 es colimado por la lente L8 (asférica, f = 8 mm) y se fusiona con la luz del MMF 12 en el divisor de haz no polarizador NPBS para formar un haz fusionado 40. La salida de luz del SMF 24 tiene la forma de un haz gaussiano colimado con una distribución de intensidad muy uniforme sobre un área que excede una imagen de la salida SMF 38 y tiene un frente de onda plano. Antes de que el haz fusionado 40 alcance el sensor CCD 22, el primer y segundo componentes de polarización de salida ortogonales del haz fusionado 40 están separados por PBD 20 creando dos imágenes de salida en dos regiones separadas del sensor CCD 22. El SLM 16 es configurable para transmitir una parte de luz a lo largo de la trayectoria de referencia 30 al mismo tiempo que transmite una parte de luz a lo largo de la primera trayectoria 26 o la segunda trayectoria 28 para crear un campo de interferencia óptico en cada una de las regiones separadas del sensor CCD 22.

40 El aparato 10 comprende una placa de media onda 50 adicional en la trayectoria de referencia 30 entre la salida 38 del SMF 24 y el divisor de haz no polarizador NPBS. La placa de media onda 50 adicional se ajusta para garantizar que el PBD 20 divida la luz que se ha transmitido a lo largo de la trayectoria de referencia a través del SMF 24 de manera uniforme entre las dos regiones separadas del sensor CCD 22.

45 El sensor CCD 22 está calibrado para identificar los píxeles correspondientes de las dos imágenes de salida en el sensor CCD 22. En la práctica, esto comprende ajustar la placa de media onda 18 para asegurar que un campo óptico en la salida 34 del MMF 12 tenga un primer y segundo componentes de polarización de salida ortogonales que están separados por el PBD 20 para crear las dos imágenes de salida en las dos regiones separadas del sensor CCD 22. Las dos imágenes CCD se comparan entonces para identificar los píxeles correspondientes y esta información se utiliza en toda la caracterización del sistema y los procedimientos de optimización del campo óptico de salida se describen a continuación.

50 El área activa del SLM se divide en subdominios de 64x64 cada uno de 8x8 píxeles. Cualquier subdominio del SLM 16 puede configurarse independientemente para enviar luz a lo largo de la primera trayectoria 26, la segunda trayectoria 28 o la trayectoria de referencia 30 aplicando una rejilla de fase difractante apropiada a través del subdominio. Por ejemplo, la figura 2(a) ilustra esquemáticamente el uso de un único subdominio difractado para dirigir la luz incidente sobre el mismo a lo largo de la primera trayectoria 26. Los otros subdominios se difractan todos con una orientación diferente para dirigir la incidencia de luz de los mismos a lo largo de la trayectoria de referencia 30. La figura 2(b) muestra las distribuciones de intensidad en el espacio de Fourier para las rejillas de difracción aplicadas a través de un único subdominio para dirigir la luz desde el único subdominio a lo largo de la primera trayectoria 26 (véase la distribución de intensidad etiquetada como "entrada S") y la segunda trayectoria 28 (véase la distribución de intensidad etiquetada "entrada P"). En la figura 2(b) también se muestra la distribución de intensidad en el espacio de Fourier para la luz dirigida a lo largo de la trayectoria de referencia 30 desde los subdominios restantes y la luz que viaja en el orden 0 desde el SLM 16. El SLM 16 está configurado de tal manera que una fase aplicada en cada subdominio del SLM 16 pueda variar independientemente. Un experto en la técnica apreciará que es posible configurar un SLM para la modulación de la amplitud del campo óptico en cada subdominio del SLM. Sin embargo, como se describe a continuación con más detalle, el SLM 16 del aparato 10 mostrado en la figura 1 está configurado para la modulación de fase única.

Un método para controlar la transmisión de luz a través del MMF 12 comprende caracterizar un sistema óptico desde un plano de entrada del SLM 16 al sensor CCD 22 descomponiendo el campo óptico de entrada incidente en el SLM 16 en una pluralidad de partes espaciales, cada una correspondiente a un subdominio diferente del SLM 16. Para cada parte espacial del campo óptico de entrada, la luz se transfiere secuencialmente desde su ubicación original en el área de orden 0 del plano de Fourier al área S de primer orden o al área P de primer orden como se muestra en la figura 2(b) modulando secuencialmente el subdominio apropiado con una rejilla de fase difractante apropiada. La luz se transmite desde un subdominio dado del SLM al área S de primer orden desde la cual se captura una imagen de la luz en la cara de entrada 32 del MMF 12 a través de la placa de media onda 18. La luz se transmite después desde el subdominio dado del SLM al área P de primer orden desde la que se captura una imagen en la faceta de entrada 32 del MMF 12 sin pasar a través de la placa de media onda 18. Por lo tanto, la luz se transmite desde el subdominio apropiado del SLM 16 al MMF 12 con un primer estado de polarización de entrada y luego un segundo estado de polarización de entrada ortogonal al primer estado de polarización.

La luz transmitida a través del MMF 12 se combina con la luz transmitida a través del SMF 24. El PBD 20 separa el haz combinado para generar dos imágenes separadas espacialmente en el sensor CCD 22. Cada imagen representa un componente de polarización diferente de un campo de interferencia óptico generado al interferir un campo óptico de salida creado por la luz transmitida a través del MMF 12 y un campo óptico de referencia generado por la luz transmitida a través del SMF 24. La figura 2(c) muestra ejemplos de distribuciones de intensidad simuladas en el sensor CCD 22 para el primer estado de polarización de entrada y el segundo estado de polarización de entrada correspondiente al mismo subdominio del SLM 16.

Cada subdominio del SLM 16 se controla secuencialmente para transmitir una parte espacial correspondiente del campo óptico de entrada uno a la vez a lo largo de la primera trayectoria 26 y después la segunda trayectoria 28. Para cada parte espacial del campo óptico de entrada y para cada estado de polarización de entrada, se varía la fase del subdominio apropiado del SLM 16. El sensor CCD 22 captura la distribución de intensidad de ambos componentes de polarización del campo de interferencia óptico para cada parte espacial del campo óptico de entrada y para cada estado de polarización de entrada a medida que varía la fase aplicada por el subdominio apropiado del SLM 16. A partir de las distribuciones de intensidad detectadas, la evolución de la intensidad detectada por un píxel dado del sensor CCD 22 se determina para un único subdominio del SLM 16 mientras se altera la fase aplicada en el subdominio. Al alterar la fase aplicada en el subdominio de manera uniforme a una velocidad constante de u , la evolución de la intensidad detectada en un píxel del sensor CCD 22 $I(t)$ sigue la relación:

$$I(t) \propto |E_t|^2 + |E_r|^2 + 2|E_t||E_r|\cos(\psi_t - \psi_r + ut), \quad (1)$$

donde E_t y E_r son los campos ópticos de salida del MMF 12 y el SMF 24, respectivamente. El término armónico en la Ecuación 1 lleva tanto la amplitud relativa como la fase relativa de una parte espacial del campo óptico de salida para el estado de polarización de entrada apropiado. El valor de la amplitud del campo de interferencia óptico $2|E_t||E_r|$ se almacena en la memoria de un controlador del sistema (no mostrado). La fase aplicada en el subdominio que corresponde a una característica distinguible tal como un pico en las oscilaciones detectadas en la intensidad del campo de interferencia óptico también se almacena en la memoria. Este procedimiento se repite para cada una de las partes espaciales del campo óptico de entrada alterando la fase aplicada en los subdominios correspondientes del SLM 16 y para cada uno del primer y segundo estado de polarización de entrada.

Para mejorar la precisión de la caracterización del sistema óptico entre el SLM 16 y el sensor CCD 22, la fase asociada con la transmisión de luz a través del SMF 24 en relación con la trayectoria del MMF 12 se determina como parte de un procedimiento de calibración realizado entre mediciones para las diferentes partes espaciales del campo óptico de entrada de la siguiente manera.

Se aplica una difracción apropiada a un subdominio de "referencia interna" seleccionado del SLM 16 para dirigir la luz a lo largo de la trayectoria S 26 (alternativamente, se podría usar una luz desviadora del subdominio a lo largo de la trayectoria P 28 pero la selección debe mantenerse para todo el procedimiento de calibración). Se aplica una difracción apropiada a los subdominios restantes del SLM 16 para dirigir la luz a lo largo de la trayectoria de "referencia externa" 30. El campo de interferencia observado en el sensor CCD 22 es invariable en el tiempo siempre que la diferencia entre las longitudes de los dos, se mantienen las trayectorias ópticas de referencia internas y externas. Cualquier deriva térmica o mecánica que sea perjudicial para el procedimiento de calibración se manifiesta por sí misma como una modificación o cambio en el patrón de interferencia observado. La fase de la señal de referencia externa se altera para corregir los cambios en la diferencia entre las longitudes de las vías ópticas externas e internas al comparar los registros CCD reales del campo de interferencia resultante con uno obtenido cuando se inició el procedimiento de calibración.

Alternativamente, se toma una galería de campos de interferencia para varias diferencias de fase diferentes entre las trayectorias de referencia interna y externa al comienzo del procedimiento de calibración y durante el ciclo de

calibración entre las mediciones de las partes espaciales del campo óptico de entrada, pudiendo el registro actual del campo de interferencia compararse con cada uno de los marcos de la galería. El marco de mejor coincidencia muestra el valor del cambio de fase que debe agregarse a la referencia externa en el SLM 16 para corregir la deriva térmica/mecánica de la geometría. El valor actualizado de la fase de referencia externa se usa en la medición de la siguiente parte espacial del campo óptico de entrada en el ciclo del procedimiento de calibración.

Esta etapa intermedia en el procedimiento de calibración puede corregir cualquier deriva mecánica y/o térmica de la configuración para mantener una relación de fase estacionaria entre la trayectoria de referencia 30 a través del SMF 24 y la primera y segunda trayectorias de medición óptica 26, 28 a través del MMF 12.

El procedimiento de caracterización anterior se aplica a la caracterización del sistema óptico entre el plano de entrada del SLM 16 y el sensor CCD 22 para un único píxel en el sensor CCD 22. Para caracterizar toda la imagen en la faceta de salida del MMF 34, se aplica el mismo procedimiento de caracterización para cada uno de los píxeles en el sensor CCD 22. La serie completa de amplitudes del campo de interferencia óptico y valores de fase de subdominio aplicados para cada píxel CCD representa una transformación sistemática entre el campo óptico de entrada en el plano SLM y el campo óptico de salida en el sensor CCD 22. Dado que las correlaciones entre los estados de polarización de los campos ópticos de entrada y salida son a priori desconocidas, la caracterización del sistema se realiza por separado para ambos componentes de polarización del campo óptico de salida para capturar el espacio de parámetros completo de una transformación óptica del sistema.

Debido a la alta velocidad de actualización de SLM, la caracterización de todas las partes espaciales del campo óptico de entrada para ambos estados de polarización de entrada, incluida la calibración de la trayectoria de referencia 30, puede llevar menos de una hora en la práctica. Si el sensor CCD 22 está sincronizado con el SLM 16, el tiempo de optimización puede reducirse en un 50 %.

Debe entenderse que sin el control de polarización de entrada solo es posible emplear el 50 % de la potencia óptica disponible ya que la luz restante se distribuye aleatoriamente sobre el área de la faceta de salida MMF 34.

El procedimiento de caracterización anterior se usa para determinar una transformación del sistema óptico entre el campo óptico de entrada en el plano de entrada del SLM 16 y el campo óptico de salida en el sensor CCD 22. El campo óptico de entrada se define por una pluralidad de partes espaciales no superpuestas según lo definido por los subdominios SLM. La pluralidad de partes espaciales del campo óptico de entrada constituyen conjuntamente una pluralidad de modos de entrada ortogonales que proporcionan conjuntamente una base establecida para la representación del campo óptico de entrada.

El campo de salida está definido por una pluralidad de partes espaciales según lo definido por los píxeles CCD. El número de píxeles CCD es mayor que el número de modos ópticos admitidos por el sistema óptico, de modo que el sistema óptico se muestrea en exceso y la transformación del sistema óptico no es unitaria. Sin embargo, un experto en la técnica apreciará que el número de píxeles CCD puede ser igual al número de modos ópticos soportados por el sistema óptico de modo que la transformación del sistema óptico sea unitaria. Un experto en la técnica también apreciará que, en la práctica, un modo en la faceta de salida de MMF 34 tal como se captura una imagen en el sensor del CCD 22 tiene una distribución de campo que está dictada por las propiedades ópticas del sistema óptico que se usa para implementar el método. Más específicamente, como se explica a continuación en relación con la figura 5, cada modo de salida en la salida 34 del MMF 12 comprende una distribución de intensidad de disco de Airy que tiene una extensión espacial lateral que se extiende más allá de una extensión espacial lateral de un único píxel CCD. Como se describe a continuación, la transformación del sistema óptico se puede usar para controlar la amplitud, fase y polarización de un campo óptico en la salida 34 del MMF 12.

La transformación del sistema óptico viene dada por cuatro funciones de modulación (fase y amplitud para cada estado de polarización de entrada) de todos los subdominios SLM de 64x64 para cada píxel CCD. Durante el procedimiento de caracterización, la señal de intensidad se analiza a partir de 120x120 píxeles CCD para cada uno de los dos componentes de polarización de salida. Matemáticamente, la transformación se expresa utilizando seis índices como $T_{k,l,m}^{u,v,w}$ donde k y l son los índices de posición de los subdominios SLM con posibles valores entre 1 y 64, m es la polarización de la parte espacial del campo óptico de entrada con dos valores de S y P, u y v son los índices de posición de los píxeles CCD con valores entre 1 y 120 y w es el estado de polarización del campo óptico de salida también con dos valores de S y P. La transformación es compleja y puede representarse como $T_{k,l,m}^{u,v,w} = A_{k,l,m}^{u,v,w} \cdot \exp[i \cdot P_{k,l,m}^{u,v,w}]$ donde la amplitud $A_{k,l,m}^{u,v,w}$ es el valor de la amplitud del campo de interferencia óptico que se determina y almacena en la memoria del controlador del sistema (no mostrado) durante la calibración y la fase $P_{k,l,m}^{u,v,w}$ es el valor de fase que se determina y almacena en la memoria del controlador del sistema (no mostrado) durante la calibración. $A_{k,l,m}^{u,v,w}$ es una matriz positiva real y $P_{k,l,m}^{u,v,w}$ tiene valores reales del intervalo $\langle -\pi, \pi \rangle$. En las figuras 3(a) y 3(b) se muestra un ejemplo de la transformación del sistema para un modo de salida único $(u,v,w) = (30;30;s)$.

Después de la caracterización, el método para controlar la transmisión de luz a través del MMF 12 puede comprender generar un campo óptico de salida que tenga cualquier amplitud, fase y/o polarización arbitraria dentro de las limitaciones físicas impuestas por el sistema óptico. Además, el método puede comprender generar una

pluralidad de modos de salida y combinarlos para generar un campo óptico de salida objetivo que tenga cualquier amplitud, fase y/o polarización arbitraria dentro de las limitaciones físicas impuestas por el sistema óptico. En el caso ideal, se generaría un modo de salida único de manera óptima (que contiene el 100 % de la potencia óptica disponible) cuando todos los modos de entrada analizados se acoplan al MMF 12 con la amplitud, fase y polarización apropiadas. Durante el procedimiento de caracterización, el campo en el plano SLM de entrada tiene solo una única polarización y el control de polarización de los modos de entrada se logra aplicando diferentes rejillas difractantes G_s y G_p dentro de un subdominio. Estos factores de fase de rejilla difractante también deben aplicarse al diseñar la función de modulación del SLM $M_{k,l}^{u,v,w}$ que se utiliza para configurar el SLM 16 para crear el campo óptico de salida deseado:

$$M_{k,l}^{u,v,w} = A_{k,l,s}^{u,v,w} \cdot \exp[i \cdot (P_{k,l,s}^{u,v,w} + G_s)] + A_{k,l,p}^{u,v,w} \cdot \exp[i \cdot (P_{k,l,p}^{u,v,w} + G_p)] \quad (2)$$

Para una mejor comprensión, la modulación para el modo de salida correspondiente a $(u;v;w) = (30;30;s)$ se puede demostrar en forma de imagen (selección de solo 16x16 modos de entrada) como se muestra en la figura 4. En el siguiente texto, esto se denominará una "superposición compleja de polarizaciones de entrada". Para cada modo de salida, la modulación SLM requerida tiene tanto distribuciones de fase como de amplitud. Como se ha explicado anteriormente, el SLM 16 está configurado para la modulación de fase única. En otras palabras, el SLM 16 se usa para modular solo la fase de un campo óptico de entrada incidente sobre el SLM 16 según $\arg[M_{k,l}^{u,v,w}]$. Cada subdominio del SLM 16 puede configurarse para distribuir la potencia óptica incidente sobre el mismo entre la primera y segunda trayectorias 26, 28 según los términos de amplitud $A_{k,l,s}^{u,v,w}$ y $A_{k,l,p}^{u,v,w}$ de la Ecuación 2 y para aplicar la fase de la luz en cada trayectoria según $\arg[M_{k,l}^{u,v,w}]$.

Al diseñar las modulaciones SLM, la transformación de fase $P_{k,l,m}^{u,v,w}$ es esencial y cuando falta, la salida de luz es completamente aleatoria.

Si faltara la información de polarización de entrada, es decir, los modos de entrada solo se acoplan en un estado de polarización y:

$$M_{k,l}^{u,v,w} = A_{k,l,s}^{u,v,w} \cdot \exp[i \cdot (P_{k,l,s}^{u,v,w} + G_s)] \quad (3)$$

entonces, en promedio, el control se perdería más del 50 % de la potencia disponible (solo el 50 % de los modos ópticos de entrada interferirían de manera constructiva en el punto seleccionado, reduciendo la intensidad al 25 %, pero el 50 % de los modos usados transportan toda la potencia disponible, es decir, su intensidad se duplica). La potencia restante se distribuye aleatoriamente entre otros modos de salida. Este es el caso de algunos métodos de la técnica anterior.

Si los términos de amplitud $A_{k,l,s}^{u,v,w}$ y $A_{k,l,p}^{u,v,w}$ no se usan y todos los modos de entrada están acoplados a la fibra con una amplitud constante:

$$M_{k,l}^{u,v,w} = \exp[i \cdot (P_{k,l,s}^{u,v,w} + G_s)] + \exp[i \cdot (P_{k,l,p}^{u,v,w} + G_p)] \quad (4)$$

La ecuación 4 se conoce como la "superposición de fase única de polarizaciones de entrada" y, como se demuestra en el Apéndice A y B, esta tiene una eficiencia considerablemente menor en comparación con la "superposición compleja de polarizaciones de entrada" (Ecuación 2) descrita anteriormente. Se puede mostrar que para una gran cantidad de modos que se propagan en el sistema, la eficiencia de potencia cae a un valor de $\pi/4$, es decir, aproximadamente 78,5 % con el aproximadamente 21,5 % restante de potencia distribuida aleatoriamente en otros modos de salida. Como el número de modos permitidos para propagarse dentro del MMF 12 se limita a aproximadamente 400, pueden esperarse variaciones de la eficiencia alrededor del valor de $\pi/4$ con una desviación estándar del 2 %.

La figura 5 muestra un ejemplo de un campo óptico de salida generado usando la superposición compleja de polarizaciones de entrada (Ecuación 2) y cuando se usa la modulación de fase única en el SLM 16. Los datos de la imagen se obtuvieron fusionando varios marcos CCD tomados en diversos tiempos de exposición para mejorar un rango dinámico de las medidas. Los datos medidos se ajustaron para 100 modos de salida diferentes con un perfil de disco de Airy esperado (función de 5 parámetros: centro x, centro y, amplitud, diámetro central del núcleo y desplazamiento). Se determinó que los modos de salida transportan en promedio el 83 % de la potencia total transmitida por el MMF 12 con una desviación estándar del 3 %. Esto está en un buen acuerdo con el valor de $\pi/4$,

(aproximadamente 78,5 %) explicado anteriormente. La diferencia probablemente se deba a una respuesta ligeramente no lineal del sensor CCD 22 a diferentes tiempos de exposición. El radio del punto ajustado corresponde al valor de apertura numérica igual a $NA = 0,18$, que es aproximadamente un 20 % más pequeño en comparación con el valor 0,22 dado por el fabricante de la fibra. Esto puede ser causado por la iluminación gaussiana del SLM 16, reduciendo de este modo la intensidad de los modos de salida con coordenadas radiales más altas.

El Apéndice A (figuras 9(a) y (b)) presenta las estadísticas generales de la generación de un modo de salida particular usando todos los enfoques explicados cuando se usa la modulación de fase única en el SLM 16. Las figuras 9(a) y (b) demuestran que, con el uso de la trayectoria de referencia externa 30 que incluye el SMF 24, el problema problemático de los "puntos ciegos" asociados con una referencia interna como se usa en los métodos de la técnica anterior puede eliminarse. Además, con el uso de ambas polarizaciones de entrada, las intensidades del campo óptico de salida pueden duplicarse para la misma potencia óptica en el sistema y la relación señal/ruido puede mejorarse por un factor mayor que 6. Las figuras 9(a) y (b) también muestran que la superposición compleja de polarizaciones de entrada puede permitir la generación de un modo de salida que tiene más del 20 % de intensidad más alta que la superposición de polarizaciones de entrada de fase única.

Una persona experta entendería el modo en que construir o sintetizar un campo de salida arbitrario que tenga cualquier amplitud, fase y/o polarización arbitrarias dentro de las limitaciones físicas impuestas por el sistema óptico a partir de una superposición compleja de la pluralidad de modos de salida. En la práctica, esto comprende determinar los términos de amplitud y fase de la función de modulación $M_{k,l}^{u,v,w}$ para cada uno de la pluralidad de modos de salida requeridos para proporcionar un campo de salida objetivo.

El método puede comprender dividir la potencia disponible para concentrar la intensidad de salida óptica en una pluralidad de picos o puntos de intensidad discretos, es decir, generar simultáneamente un número requerido de modos de salida. Como en el caso de combinar polarizaciones, se utiliza una superposición compleja de modulaciones obtenidas de la Ecuación 2 correspondiente a modos individuales:

$$M_{k,l}^N = \sum_{q=1}^N \sqrt{a_q} \cdot M_{k,l}^{u_q, v_q, w_q} \quad (5)$$

donde N es el número de modos de salida. Los modos de salida requeridos están indexados por la variable q . Los términos a_q son las contribuciones de intensidad requeridas de la composición de modos de salida. Alternativamente, se puede utilizar la superposición de modos de salida de fase única:

$$M_{k,l}^N = \sum_{q=1}^N \sqrt{a_q} \cdot \exp[i \cdot \arg(M_{k,l}^{u_q, v_q, w_q})] \quad (6)$$

En el Apéndice B se proporciona una comparación de resultados experimentales para la superposición compleja de modos de salida y la superposición de modos de salida de fase única. Estos resultados demuestran que cuando se usa la superposición compleja de modos de salida, no hay pérdidas de potencia y la intensidad se distribuye entre los puntos individuales según sea necesario.

El método comprende dividir la potencia en un mayor número de modos de salida como se demuestra en la figura 6 combinando modos de salida individuales mediante la superposición compleja y aplicando un algoritmo Gerchberg-Saxton (GS). Esto combina modos de salida individuales con fases, de modo que la modulación SLM resultante tenga la distribución de amplitud más uniforme. El algoritmo GS es un procedimiento puramente matemático y no se requiere retroalimentación de *hardware* para optimizar los resultados. A medida que se genera un mayor número de modos de salida, cubren una fracción significativa del área de la salida de MMF 34 y la parte de luz no utilizada que se extiende aleatoriamente comienza a contribuir a la intensidad de los modos individuales que se manifestarán como intensidades más altas. Los datos mostrados en la figura 6 se corrigieron eliminando las contribuciones aleatorias de intensidad de señales. Como se puede ver en la figura 6, el uso del algoritmo GS da como resultado una mayor eficiencia (9 % en promedio), una distribución más uniforme de potencia entre los modos de salida individuales y una eficiencia de potencia superior al 90 %.

El MMF 12 utilizado para generar los resultados experimentales divulgados en el presente documento admite aproximadamente 400 modos de propagación. Los modos de entrada $2x64x64$ y salida $2x120x120$ se utilizan para describir la transformación del sistema. Por lo tanto, la transformación es altamente sobre-muestreada y no unitaria. Este no es un problema en ninguna de las aplicaciones divulgadas en el presente documento, pero a los efectos de una conformación de haz más avanzada (por ejemplo, generación de un vórtice óptico), el problema de la ortogonalidad entre los modos de entrada individuales y, lo más importante, tendrían que abordarse los modos de salida. Cuando los modos de salida se generan muy cerca uno del otro, comienzan a influenciarse por efectos de

interferencia no deseados. Sin embargo, el algoritmo GS es muy útil en estos casos, ya que estos efectos de interferencia se suprimen fuertemente y se pueden generar distribuciones arbitrarias de intensidad en la salida MMF 34 con una calidad muy alta como se demuestra en la figura 7.

5 El método puede usarse para la manipulación óptica. Como apreciará un experto en la técnica, debido a que los modos de salida forman una serie de haces de luz enfocados de manera óptima, atraerán objetos de alto índice de refracción colocados en un medio de índice de refracción más bajo, desde su proximidad a través de la fuerza del gradiente. Por ejemplo, el método puede usarse para la manipulación en 2D, donde las partículas atrapadas están confinadas y posicionadas en la interfaz de un medio de muestra líquido y un cubreobjetos de vidrio. En un ejemplo, 10 la muestra líquida comprende micropartículas de polímero que contienen agua desionizada, cada una de 3 μm de diámetro. Para proporcionar iluminación de partículas, la luz blanca se acopla al MMF 12 usando un espejo dicróico (no mostrado) colocado entre la lente L4 y el objetivo del microscopio MO1 (véase la figura 1). El procedimiento de caracterización se repite con el plano de imagen del objetivo de observación MO2 movido 15 μm lejos de la faceta de salida 34 del MMF 12 para permitir suficiente espacio para el acceso de partículas y manipulación. La faceta de salida 34 se inmoviliza y se sumerge en la muestra líquida (no mostrada). La luz láser está bloqueada por un filtro dicróico colocado antes del sensor CCD 22, lo que permite la transmisión de la señal de luz blanca. En el ejemplo 15 mostrado en la figura 8, las partículas están confinadas en el patrón de intensidad estática formado por la superposición compleja de los modos de salida y se mueven secuencialmente aplicando máscaras de modulación SLM calculadas previamente correspondientes a diferentes disposiciones de los modos de salida.

20 Un experto en la técnica apreciará que pueden ser posibles modificaciones del aparato y método descritos anteriormente sin apartarse del alcance de la presente invención. Por ejemplo, en lugar de comprender una fuente de luz láser 14, el aparato 10 puede comprender una fuente coherente alternativa tal como un diodo emisor de luz o similar. Alternativamente, el aparato puede no comprender una fuente de luz en absoluto. En cambio, se puede 25 proporcionar luz al aparato desde una fuente de luz remota.

En algunas realizaciones, el SMF 24 puede reemplazarse por una fibra que mantiene la polarización, una fibra de cristal fotónico o similar.

30 Si el SLM estuviera iluminado y configurado de manera uniforme para realizar una modulación de amplitud además de la modulación de fase (esto puede ser posible usando el SLM 16 en ciertas configuraciones), las pérdidas de potencia serían muchas veces mayores que las que ocurren cuando se usa la modulación de fase única en el SLM, debido a que las modulaciones de amplitud (véase la figura 3) tienen una naturaleza moteada y sería necesario sacrificar una gran cantidad de modos de entrada que producen potencia con baja amplitud para poder producir 35 modos de alta intensidad, reduciendo de este modo la eficiencia de potencia general a solo un pequeño por ciento cuando se utiliza la modulación de amplitud además de la modulación de fase en el SLM. Sin embargo, debe entenderse que si la reducción adicional de la señal de fondo aleatoria es esencial, el uso simultáneo de la modulación de amplitud y la modulación de fase en el SLM traerá mejores resultados.

40 El algoritmo GS se usa con frecuencia en los sistemas de Fourier para generar distribuciones arbitrarias de intensidades con modulación holográfica de fase única y, si bien emplea métodos rápidos de transformación de Fourier, esto puede ser muy rápido y eficiente. Si la transformación no es ni Fourier ni unitaria, el algoritmo GS todavía puede usarse en una forma conocida como algoritmo Yang-Gu (G. Z. Yang, B. Z. Dong, B. Y. Gu, J. Y. Zhuang y O. K. Ersoy, "Gerchberg-saxton and yang-gu algorithms for phase retrieval in a nonunitary transform 45 system: a comparison", Appl. Opt. 33, 209-218 (1994)). Este procedimiento matemático se presenta a continuación utilizando una notación coherente con la utilizada en toda la descripción anterior. El procedimiento comienza con la superposición compleja de modos de salida como se muestra en la Ecuación 5 para la iteración inicial. En cada iteración siguiente (indexada por t), la amplitud de la modulación SLM se cambia para que sea uniforme:

$${}^t\bar{M}_{k,l}^N = \exp\left[i \cdot \arg\left({}^{t-1}M_{k,l}^N\right)\right] \quad (7)$$

los coeficientes de constitución complejos de los modos de salida requeridos $t_{a,q}$ se calculan como un producto escalar:

$${}^tC_q = \sum_{k,l} {}^t\bar{M}_{k,l}^N \cdot M_{k,l}^{t_{a,q}, v_q, w_q^*} \quad (8)$$

las amplitudes se vuelven a equilibrar

$${}^t\bar{c}_q = \sqrt{a_q} \cdot \exp[i \cdot \arg({}^t c_q)] \quad (9)$$

y se genera una nueva modulación SLM:

$${}^t M_{k,l}^N = \sum_{q=1}^N {}^t\bar{c}_q \cdot M_{k,l}^{u_q, v_q, w_q} \quad (10)$$

5

Un experto en la técnica apreciará que otros algoritmos tales como los algoritmos GS ponderados (R. Di Leonardo, F. Ianni y G. Ruocco, "Computer generation of optimal holograms for optical trap arrays", *Opt. Express* 15, 1913-1922 (2007)) pueden brindar mayor eficiencia y uniformidad para los campos de salida.

10

La apertura numérica de los modos de salida en la salida del MMF 12 para el aparato 10 de la figura 1 es demasiado baja para permitir el confinamiento 3-D estable de objetos de tamaño micrón mediante pinzas ópticas porque la fuerza del gradiente axial no puede contrarrestar la presión de radiación. Sin embargo, se ha demostrado que las fibras ópticas microestructuradas son capaces de atrapar ópticamente 3-D (C. Liberale, P. Minzioni, F. Bragheri, F. De Angelis, E. Di Fabrizio e I. Cristiani, "Miniaturized all-fibre probe for three-dimensional optical trapping and manipulation", *Nat Photon* 1, 723-727 (2007)). La disponibilidad de fibras de cristal fotónicas multimodo de alta NA (NA > 0.9) puede permitir nuevas geometrías basadas en fibra para pinzas ópticas holográficas múltiples 3D que emplean los algoritmos divulgados anteriormente (W. Wadsworth, R. Percival, G. Bouwmans, J. Knight, T. Birks, T. Hedley y P. Russell, "Very high numerical aperture fibers" *Photonics Technology Letters*, IEEE 16, 843-845 (2004)).

20

En sistemas de baja NA, el confinamiento en 3-D se puede lograr mediante la introducción de un par de modos de salida de contrapropagación para cada captura óptica (A. Ashkin, "Acceleration and trapping of particles by radiation pressure", *Phys. Rev. Lett.* 24, 156-159 (1970), P. J. Rodrigo, V. R. Daria y J. Gluckstad, "Real-time three-dimensional optical micromanipulation of multiple particles and living cells", *Opt. Lett.* 29, 2270-2272 (2004), y T. Cizmar, O. Brzobohaty, K. Dholakia, y P. Zemanek, "The holographic optical micro-manipulation system based on counter-propagating beams", *Laser Physics Letters* 8, 50-56 (2011)). El uso de la caracterización de fibras multimodo para el control de la transmisión de luz en una geometría contrapropagante representaría un avance importante para esta geometría de captura de fibra muy popular (A. Constable y J. Kim, "Demonstration of a fiber-optical light-force trap", *Opt. Lett.* 18, 1867-1869 (1993) y J. Guck, R. Ananthakrishnan, H. Mahmood, T. Moon, C. Cunningham y J. Kas, "The optical stretcher: A novel laser tool to micromanipulate cells", *Biophys. J.* 81, 767-784 (2001)). La captura en 3-D también se puede lograr en geometría de fibra única introduciendo pares de haces en dos planos axiales distintos y reflejándolos uno contra el otro por un espejo (M. Pitzek, R. Steiger, G. Thalhammer, S. Bernet y M. Ritsch-Marte, "Optical mirror trap with a large field of view", *Opt. Express* 17, 19414-19423 (2009)).

25

30

35 APÉNDICE A

Las figuras 9(a) y (b) demuestran las estadísticas generales de las intensidades de pico correspondientes a los modos de salida individuales cuando se usa una referencia interna y cuando se usa una referencia externa en forma de SMF 24 respectivamente. Todos los modos de salida de 120x120 fueron generados uno por uno y sus intensidades de pico fueron registradas por el sensor CCD 22. Los datos se presentan en forma de un mapa de bits donde cada punto representa la intensidad de pico de un modo de salida particular (u; v), así como histogramas de los valores medidos a continuación. El valor promedio de la relación entre la intensidad de modo particular y el nivel de ruido de intensidad circundante $\langle I_{u,v} / I_{bgr} \rangle$ se calculó según un método divulgado en I. M. Vellekoop y A. P. Mosk, "Focusing coherent light through opaque strongly scattering media", *Opt. Lett.* 32, 2309-2311 (2007). Los datos resultantes se presentan en las figuras 9(a) y 9(b). Los datos solo se muestran para una polarización de salida única (w = S), pero los resultados para la segunda polarización de salida son muy similares. Las primeras dos columnas en las figuras 9(a) y 9(b) muestran los resultados cuando solo se utilizaron polarizaciones de entrada única (Ecuación 3). La tercera columna en las figuras 9(a) y 9(b) muestra las intensidades del modo de salida para la modulación SLM calculada por la superposición de fase única de polarizaciones de entrada (Ecuación 4). Finalmente, la última columna muestra resultados para la superposición compleja de polarizaciones de entrada (Ecuación 1).

40

45

50

55

Una comparación de las figuras 9(a) y 9(b) también demuestra la importancia de la referencia externa. Los resultados de la figura 9(a) se obtuvieron utilizando una referencia interna y los "puntos ciegos" son claramente visibles. Los resultados de la figura 9(b) se obtuvieron utilizando la referencia externa SMF 24 y no muestran puntos ciegos apreciables. Todos los datos fueron tomados para la misma potencia láser y la misma configuración para el sensor CCD 22.

APÉNDICE B

- 5 Cuando se generan múltiples modos de salida simultáneamente sin la disponibilidad de los términos de amplitud para los modos individuales de la Ecuación 4, la relación de potencia resultante entre los modos difiere significativamente de la prevista y el resultado se acompaña de pérdidas de potencia de hasta un 20 %. Esto se demuestra mediante los resultados de la simulación numérica mostrados en la figura 10 para el caso de superposición compleja de modos de entrada (líneas discontinuas) y para el caso de superposición de fase única de modos de entrada (líneas continuas) cuando se utiliza la modulación de fase única en el SLM.
- 10
- 15 Las figuras 11(a) - 11(c) muestran resultados experimentales para la distribución de potencia óptica entre dos modos de salida. La figura 11(a) corresponde al caso de un estado de polarización de entrada s-polarizado y superposición de fase única de modos de salida cuando se usa la modulación de fase única en el modulador de luz espacial. La figura 11(b) corresponde al caso de superposición de fase única de polarizaciones de entrada y superposición de fase única de modos de salida cuando se usa la modulación de fase única en el modulador de luz espacial. Los resultados experimentales de la figura 11(b) corresponden a los resultados simulados de la figura 10 (línea continua). La figura 11(c) corresponde al caso de superposición compleja de polarizaciones de entrada y superposición de fase única de modos de salida cuando se usa la modulación de fase única en el modulador de luz espacial. La figura 11(d) es un gráfico que muestra resultados simulados para la distribución de potencia entre dos modos de salida para el caso de superposición compleja de polarizaciones de entrada y superposición compleja de modos de salida cuando se utilizan la modulación de fase y amplitud en el modulador de luz espacial.
- 20

REIVINDICACIONES

1. Un método de uso para controlar la transmisión de luz a través de un medio, comprendiendo el método las etapas siguientes:

- 5 (i) transmitir luz correspondiente a una parte espacial seleccionada de un campo óptico de entrada y un estado de polarización de entrada seleccionado a través del medio para crear un campo óptico de salida correspondiente;
- 10 (ii) superponer el campo óptico de salida correspondiente con un campo óptico de referencia para crear un campo de interferencia óptica correspondiente;
- (iii) detectar una intensidad de una parte espacial de un componente de polarización seleccionado del campo de interferencia óptica correspondiente;
- 15 (iv) usar la intensidad detectada para determinar un valor de una amplitud de campo óptico y un valor de una fase de campo óptico correspondiente a la parte espacial seleccionada del campo óptico de entrada y el estado de polarización de entrada seleccionado; y
- (v) repetir las etapas (i) a (iv) para cada parte espacial seleccionada de una pluralidad de partes espaciales del campo óptico de entrada y para cada estado de polarización de entrada seleccionado del primer y del segundo estados de polarización de entrada ortogonal,
- 20 en donde cada iteración de las etapas (i) a (iii) se realiza secuencialmente de modo que cada iteración de las etapas (i) a (iii) proporcione la intensidad detectada correspondiente a una seleccionada de la pluralidad de partes espaciales del campo óptico de entrada en combinación con un correspondiente seleccionado del primer y del segundo estados de polarización de entrada ortogonal,
- 25 en donde la etapa (iii) comprende detectar una variación en la intensidad de la parte espacial del componente de polarización seleccionado del campo de interferencia óptica correspondiente para la parte espacial seleccionada del campo óptico de entrada y para el estado de polarización de entrada seleccionado mientras se varía una fase aplicada a la parte espacial seleccionada del campo óptico de entrada, y
- en donde la etapa (iv) comprende determinar el valor de amplitud del campo óptico y el valor de fase del campo óptico para la parte espacial seleccionada del campo óptico de entrada y para el estado de polarización de entrada seleccionado a partir de la variación detectada en la intensidad de la parte espacial del componente de polarización seleccionado del campo de interferencia óptica correspondiente en función de la fase aplicada a la parte espacial seleccionada del campo óptico de entrada.

2. Un método según la reivindicación 1, que comprende:
35 controlar el estado de polarización de la luz transmitida que entra al medio entre el primer y el segundo estados de polarización de entrada.

3. Un método según la reivindicación 2, que comprende:
40 controlar el estado de polarización de la luz transmitida que entra al medio controlando el estado de polarización de la luz transmitida en una ubicación desplazada desde un extremo de entrada del medio en una dirección opuesta a una dirección de propagación.

4. Un método según las reivindicaciones 2 o 3, que comprende:
45 controlar el estado de polarización de la luz transmitida que entra al medio dirigiendo selectivamente la luz transmitida a lo largo de una primera o una segunda trayectoria óptica, cada una de las cuales se extiende desde una parte espacial dada del campo óptico de entrada al medio, en donde la primera trayectoria óptica se extiende a través de un controlador de polarización que funciona para proporcionar la luz que entra al medio con el primer estado de polarización de entrada y la segunda trayectoria óptica desvía el controlador de polarización y entra al medio con el segundo estado de polarización de entrada.

50 5. Un método según cualquier reivindicación anterior, que comprende:
detectar la intensidad de la parte espacial del componente de polarización seleccionado del campo de interferencia óptica secuencialmente para cada parte espacial del campo óptico de entrada y para cada uno del primer y del segundo estados de polarización de entrada ortogonal; y después
55 usar la intensidad detectada para determinar el valor de amplitud del campo óptico de salida y el valor de fase del campo óptico correspondiente a la parte espacial del componente de polarización seleccionado del campo de interferencia óptica para cada parte espacial del campo óptico de entrada y para cada uno del primer y del segundo estados de polarización de entrada ortogonal.

60 6. Un método según cualquier reivindicación anterior, que comprende:
transmitir una parte espacial del campo óptico de entrada a lo largo de una trayectoria de referencia para formar el campo óptico de referencia.

65 7. Un método según la reivindicación 6, en el que la trayectoria de referencia es externa al medio, opcionalmente en donde la trayectoria de referencia no es aleatoria con respecto a al menos uno de la amplitud, la fase y la polarización, y opcionalmente en donde la trayectoria de referencia se extiende a través de un guía de onda óptica, y

opcionalmente en donde la trayectoria de referencia se extiende a través de una guía de onda óptica de modo único, y opcionalmente en donde la trayectoria de referencia se extiende a través de una fibra óptica de modo único, y opcionalmente en donde el método comprende además estabilizar la fase de la trayectoria de referencia.

5 8. Un método según las reivindicaciones 6 o 7, que comprende:

medir cualquier cambio de fase que ocurra en la trayectoria de referencia; y
usar cualquier cambio de fase de trayectoria de referencia medido para corregir los valores de amplitud de campo óptico determinados y/o los valores de fase de campo óptico determinados.

10

9. Un método según cualquier reivindicación anterior, que comprende:

determinar una primera transformación compleja a partir de los valores de amplitud del campo óptico determinados y los valores de fase del campo óptico determinados para cada una de las partes espaciales del campo óptico de entrada y el primer estado de polarización de entrada;

15

determinar una segunda transformación compleja a partir de los valores de amplitud del campo óptico determinados y los valores de fase del campo óptico determinados para cada una de las partes espaciales del campo óptico de entrada y el segundo estado de polarización de entrada;

20

determinar una función de modulación compleja correspondiente a la parte espacial del componente de polarización seleccionado del campo interferencia óptico realizando una superposición compleja de la primera y de la segunda transformaciones complejas determinadas para cada una de las partes espaciales del campo óptico de entrada; y

25

aplicar un cambio de fase a cada una de las partes espaciales del campo óptico de entrada y seleccionar el estado de polarización de entrada de cada una de las partes espaciales del campo óptico de entrada según la función de modulación compleja para crear una parte espacial del campo óptico de salida que coincide con una parte espacial de un campo óptico de salida objetivo que tiene una amplitud objetivo, una fase objetivo y un estado de polarización objetivo.

10. Un método según la reivindicación 9, que comprende:

30

aplicar una atenuación a cada una de las partes espaciales del campo óptico de entrada según la función de modulación compleja para crear una parte espacial del campo óptico de salida que coincida con una parte espacial del campo óptico de salida objetivo que tiene una amplitud objetivo, una fase objetivo y un estado de polarización objetivo.

35

11. Un método según la reivindicación 10, que comprende:

aplicar un algoritmo de optimización para mejorar una coincidencia entre una distribución de intensidad del campo óptico de salida creado y una distribución de intensidad del campo óptico de salida objetivo.

40

12. Un método de generación de imágenes que comprende el método según cualquiera de las reivindicaciones 9 a 11 y que comprende, además: producir una imagen en un lado del medio de un objeto ubicado en un lado opuesto del medio.

45

13. Un método para confinar y/o manipular ópticamente una partícula suspendida en un medio líquido, que comprende el método según cualquier reivindicación anterior y que comprende, además:

50

determinar un campo óptico de salida objetivo requerido para atrapar ópticamente la partícula en el medio; y
usar los valores de amplitud de campo óptico determinados y los valores de fase de campo óptico determinados para cada una de la pluralidad de partes espaciales del campo óptico de entrada, para cada uno del primer y del segundo estados de polarización de entrada y para cada parte espacial del componente de polarización del campo de interferencia óptica para crear un campo óptico de salida que coincida con el campo óptico de salida objetivo.

14. Un aparato de uso para controlar la transmisión de luz a través de un medio, que comprende:

55

un modulador de luz espacial configurado para transmitir secuencialmente la luz correspondiente a cada una de una pluralidad de partes espaciales de un campo óptico de entrada incidente en el modulador de luz espacial;
una disposición de control de polarización de entrada configurada para definir secuencialmente el primer y el segundo estados de polarización de entrada ortogonal de la luz transmitida por el modulador de luz espacial;
una disposición de combinación de haz configurada para superponer un campo óptico de salida y un campo óptico de referencia para crear un campo de interferencia óptica;

60

una disposición de control de polarización de salida configurada para seleccionar un componente de polarización del campo de interferencia óptica;

65

un detector óptico configurado para detectar una parte espacial del componente de polarización seleccionado del campo de interferencia óptica; y
un controlador configurado para que:

- (i) el modulador de luz espacial y la disposición de control de polarización de entrada transmitan luz a través del medio para crear el campo óptico de salida correspondiente, la luz transmitida correspondiente a una parte espacial seleccionada del campo óptico de entrada y un estado de polarización de entrada seleccionado;
- 5 (ii) la disposición de combinación de haz superponga el campo óptico de salida correspondiente con el campo óptico de referencia para crear el campo de interferencia óptica correspondiente;
- (iii) el detector óptico detecte una intensidad de una parte espacial del componente de polarización seleccionado del campo de interferencia óptica correspondiente;
- 10 (iv) el controlador usa la intensidad detectada para determinar un valor de una amplitud de campo óptico y un valor de una fase de campo óptico correspondiente a la parte espacial seleccionada del campo óptico de entrada y el estado de polarización de entrada seleccionado; y
- (v) se repiten las etapas (i) a (iv) para cada parte espacial seleccionada de una pluralidad de partes espaciales del campo óptico de entrada y para cada estado de polarización de entrada seleccionado del primer y del segundo estados de polarización de entrada ortogonal,
- 15 en donde cada iteración de las etapas (i) a (iii) se realiza secuencialmente de modo que cada iteración de las etapas (i) a (iii) proporcione la intensidad detectada correspondiente a una seleccionada de la pluralidad de partes espaciales del campo óptico de entrada en combinación con un correspondiente seleccionado del primer y del segundo estados de polarización de entrada ortogonal,
- 20 en donde la etapa (iii) comprende el detector óptico que detecta una variación en la intensidad de la parte espacial del componente de polarización seleccionado del campo de interferencia óptica correspondiente para la parte espacial seleccionada del campo óptico de entrada y para el estado de polarización de entrada seleccionado mientras varía una fase aplicada a la parte espacial seleccionada del campo óptico de entrada,
- y
- 25 en donde la etapa (iv) comprende el controlador que usa la intensidad detectada para determinar el valor de amplitud del campo óptico y el valor de fase del campo óptico para la parte espacial seleccionada del campo óptico de entrada y para el estado de polarización de entrada seleccionado a partir de la variación detectada en la intensidad de la parte espacial del componente de polarización seleccionado del campo de interferencia óptica correspondiente en función de la fase aplicada a la parte espacial seleccionada del campo óptico de entrada.
- 30

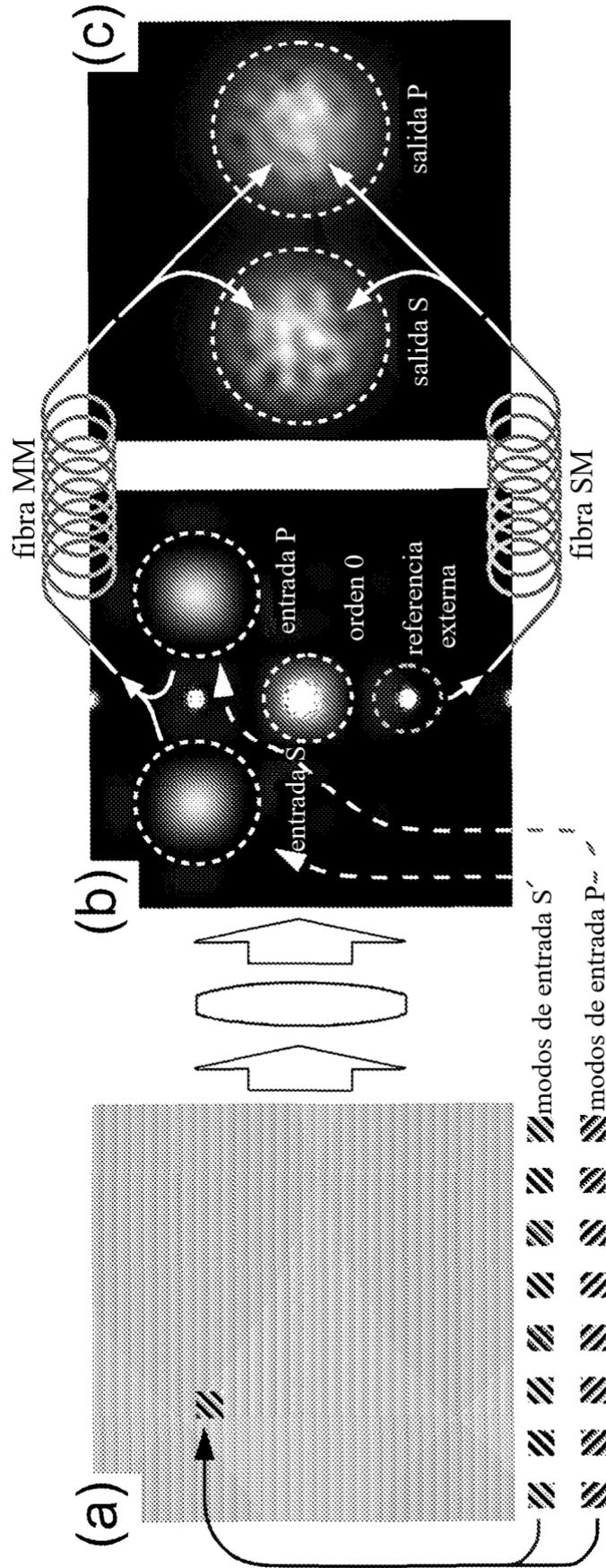


Figura 2

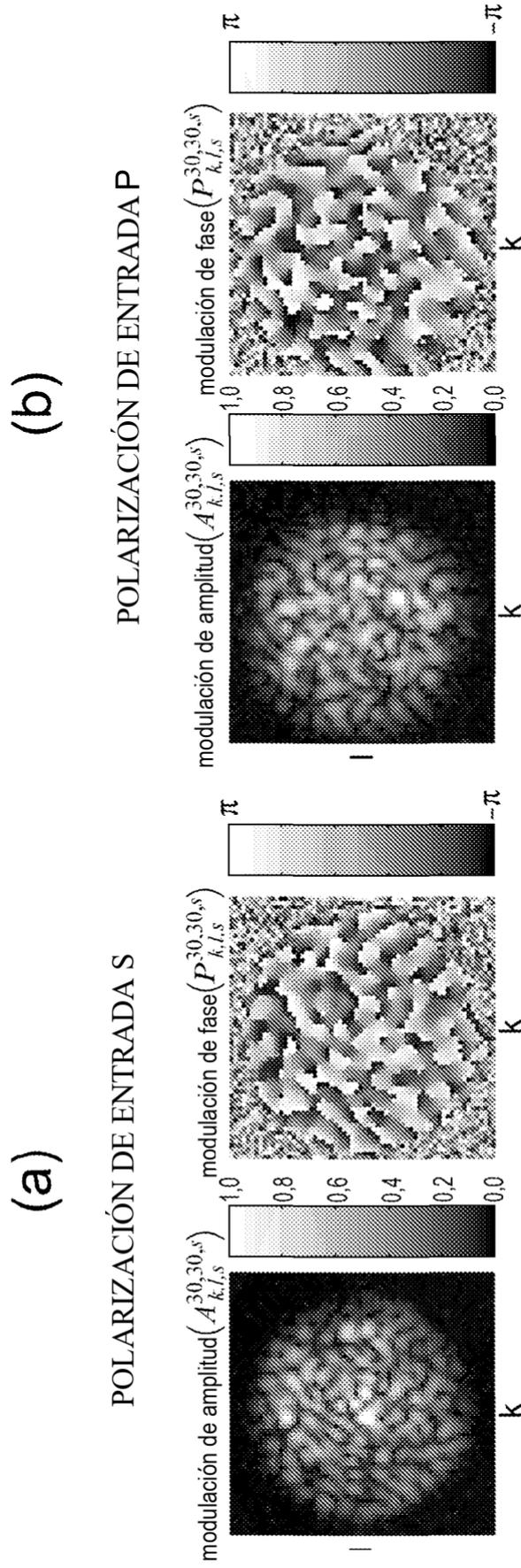


Figura 3

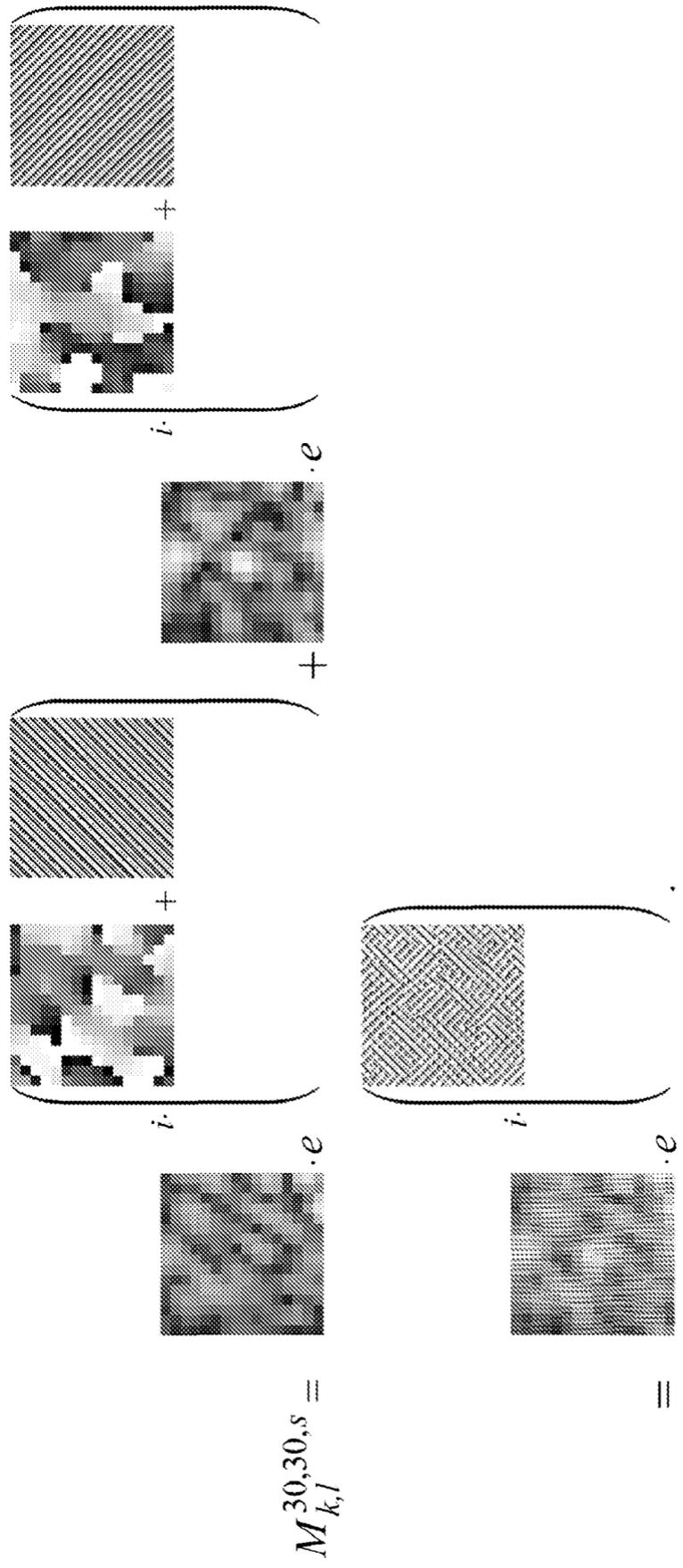


Figura 4

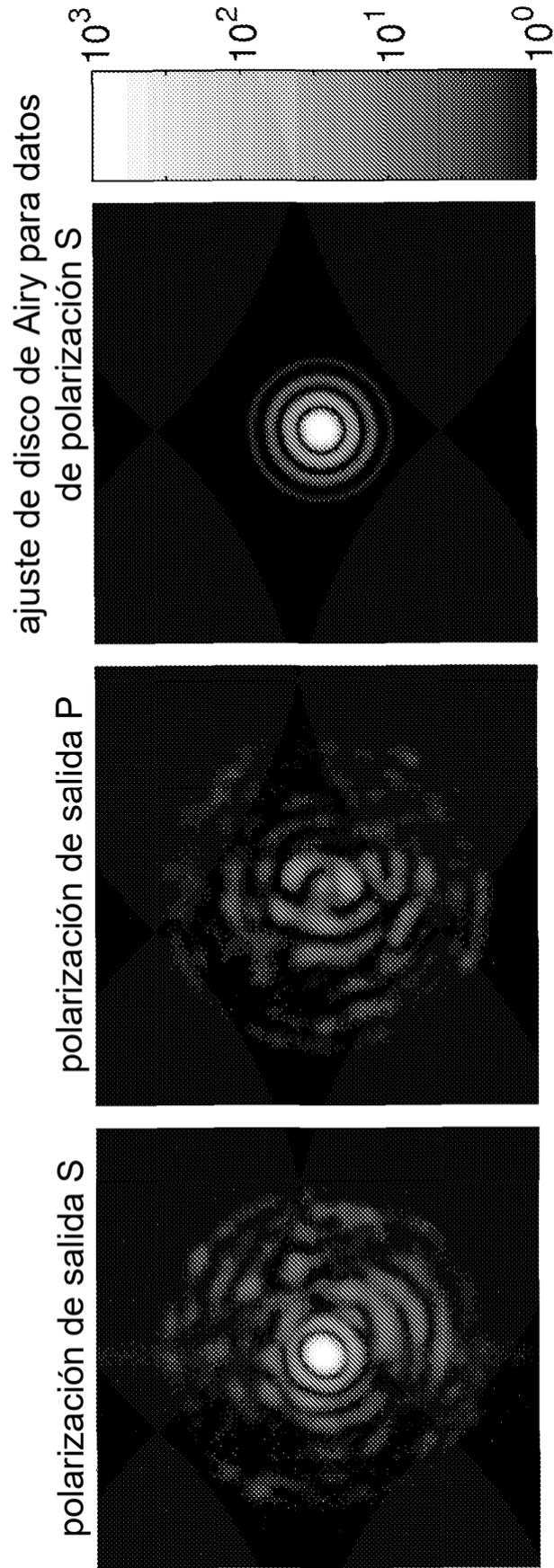


Figura 5

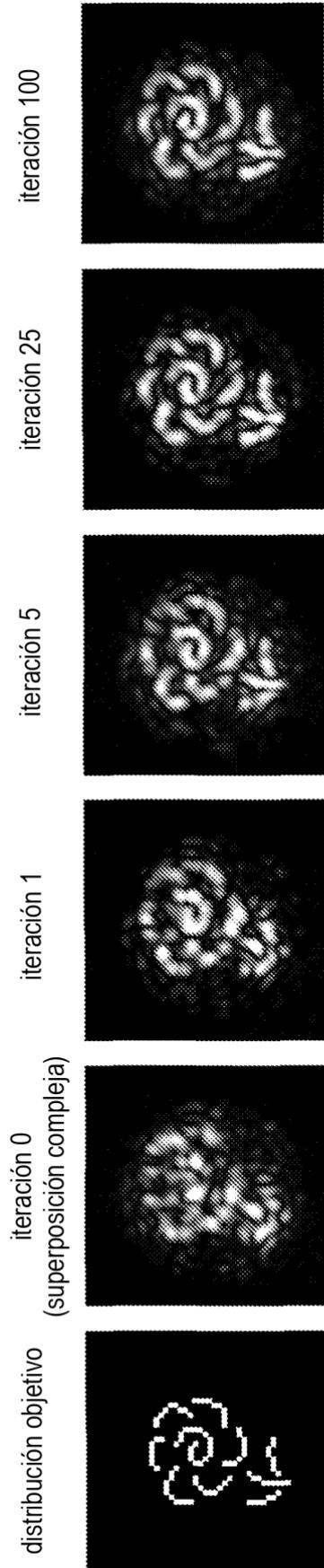


Figura 7

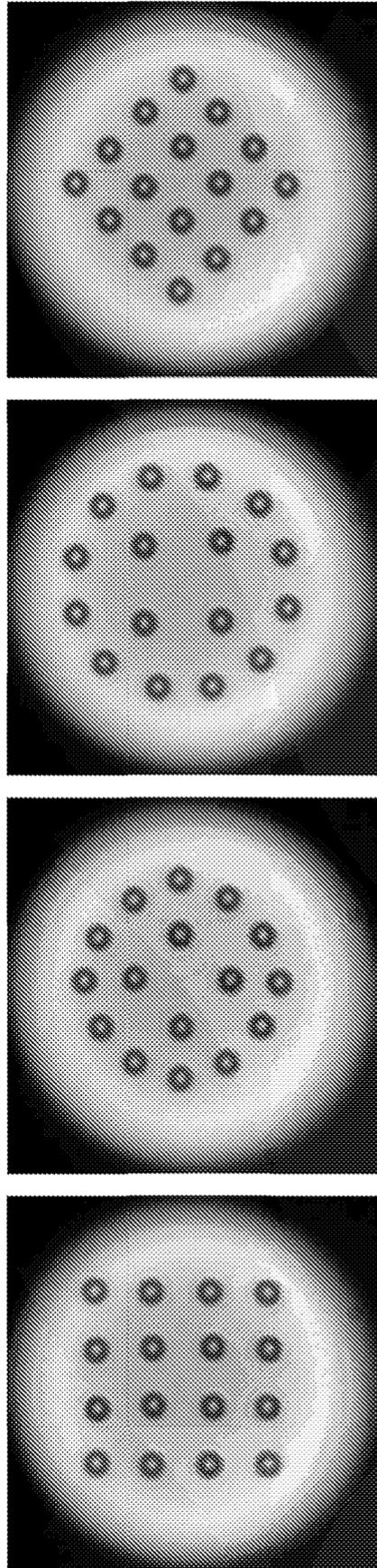


Figura 8

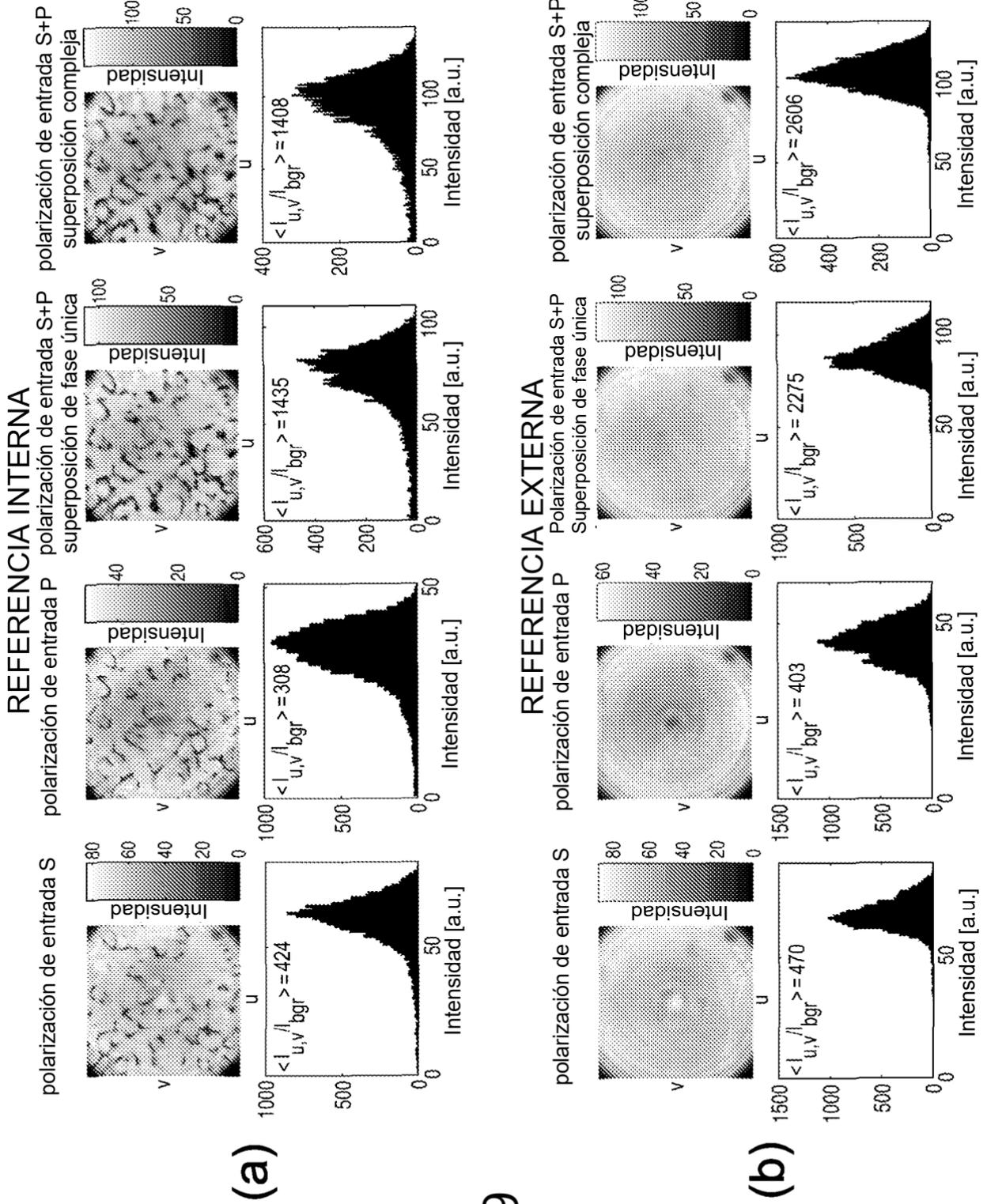


Figura 9

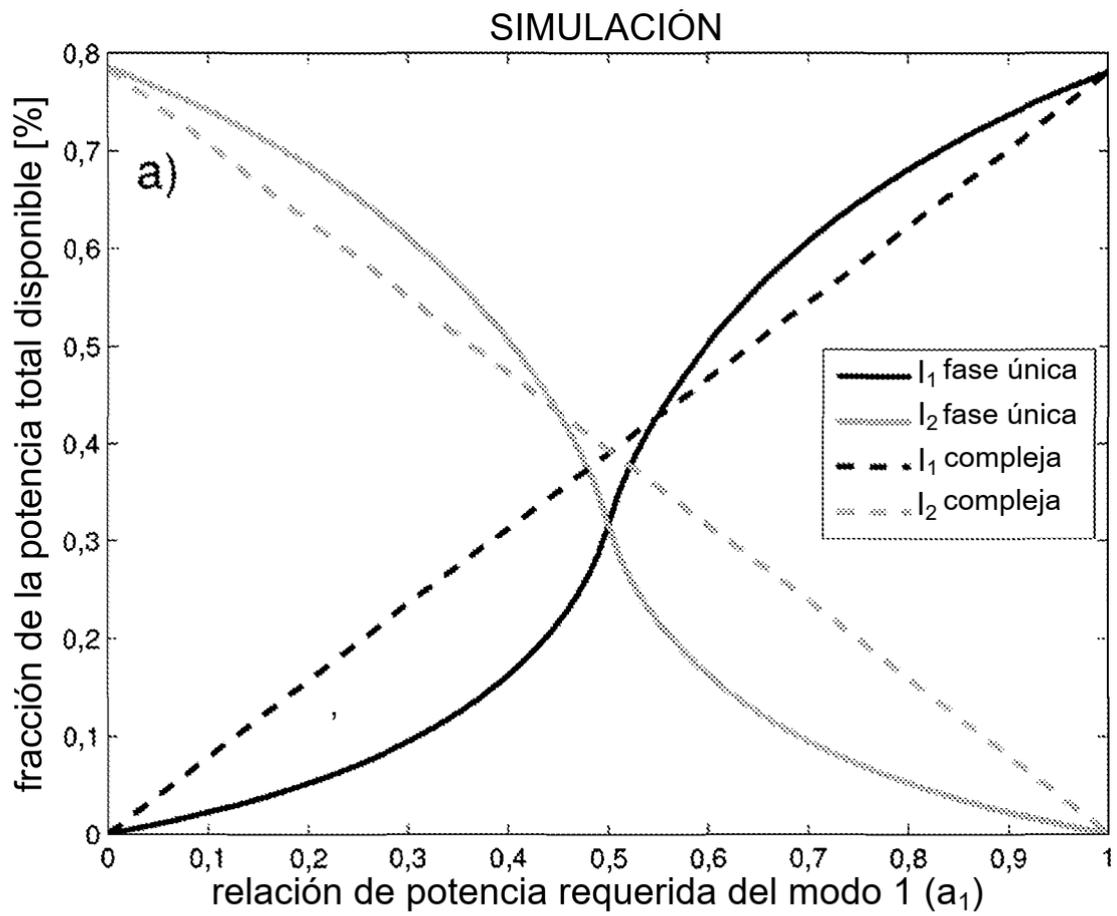


Figura 10

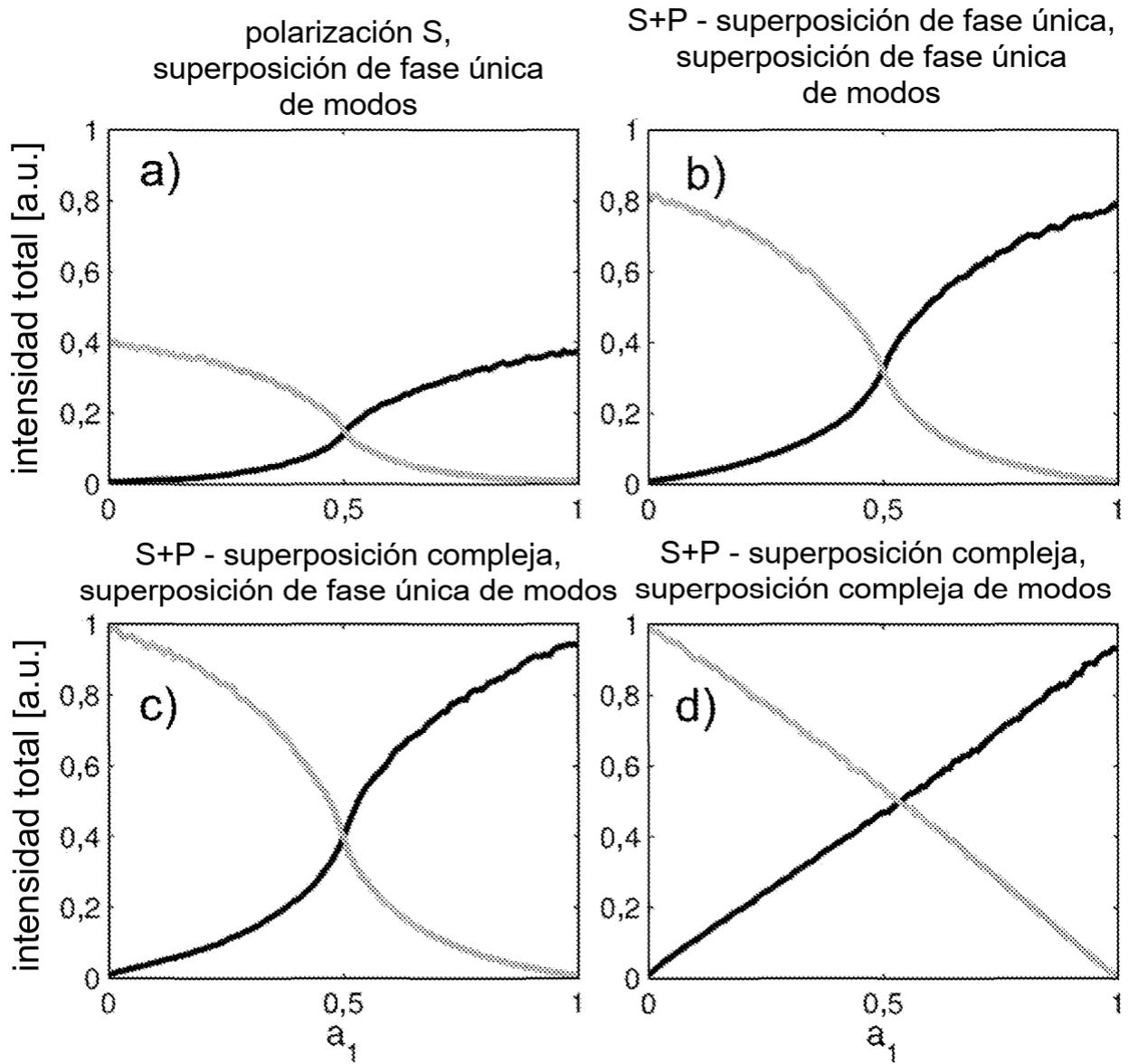


Figura 11