

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 668 971**

51 Int. Cl.:

G02F 1/01	(2006.01)
B23K 26/06	(2014.01)
B23K 26/073	(2006.01)
H01S 3/10	(2006.01)
G02B 27/00	(2006.01)
G11B 7/1392	(2012.01)
G02B 5/32	(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

- 86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **27.08.2009 PCT/JP2009/064939**
- 87 Fecha y número de publicación internacional: **04.03.2010 WO10024320**
- 96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **27.08.2009 E 09809970 (8)**
- 97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **28.03.2018 EP 2325689**

54 Título: **Método de corrección de aberraciones**

30 Prioridad:

01.09.2008 JP 2008223582
25.05.2009 JP 2009125759

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
23.05.2018

73 Titular/es:

HAMAMATSU PHOTONICS K.K. (100.0%)
1126-1, Ichino-cho Higashi-ku
Hamamatsu-shi, Shizuoka 435-8558, JP

72 Inventor/es:

ITO, HARUYASU;
MATSUMOTO, NAOYA y
INOUE, TAKASHI

74 Agente/Representante:

VALLEJO LÓPEZ, Juan Pedro

ES 2 668 971 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín Europeo de Patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre Concesión de Patentes Europeas).

DESCRIPCIÓN

Método de corrección de aberraciones

5 Campo técnico

La presente invención se refiere a un método de corrección de aberraciones para corregir una aberración de un dispositivo de irradiación láser, un método de procesamiento láser que usa dicho método de corrección de aberraciones, un método de irradiación láser que usa dicho método de corrección de aberraciones, un dispositivo de corrección de aberraciones y un programa de corrección de aberraciones.

Antecedentes de la invención

El documento EP 1 288 927 A1 se refiere a un cabezal óptico y un elemento de corrección de aberraciones. Un dispositivo de irradiación láser se usa en diversos dispositivos ópticos tales como dispositivos de procesamiento láser y microscopios. Algunos dispositivos de procesamiento láser que usan dicho dispositivo de irradiación láser incluyen un modulador de luz espacial (denominado en lo sucesivo en el presente documento SLM). Las publicaciones de patente 1 a 5 enumeradas a continuación desvelan unos dispositivos de procesamiento láser que incluyen un SLM.

Los dispositivos de procesamiento láser descritos en las publicaciones de patente 1 y 2 controlan una posición de irradiación de haz láser en un blanco de procesamiento, y el dispositivo de procesamiento láser descrito en la publicación de patente 3 controla un haz láser usando un SLM. El dispositivo de procesamiento láser descrito en la publicación de patente 4 incluye un medio para medir la distorsión de frente de onda de un haz láser y corrige la distorsión de frente de onda medida usando un SLM. Sin embargo, este método necesita un medio para medir la distorsión de frente de onda, y el sistema óptico se vuelve de este modo complicado, y este método no puede aplicarse al caso donde la medición de la distorsión de frente de onda es imposible, tal como el procesamiento láser.

La publicación de patente 5 describe el problema de que la aberración se produce cuando un haz láser se enfoca en un medio transparente, y un punto de procesamiento se vuelve más largo en la dirección de profundidad, y el dispositivo de procesamiento láser descrito en la publicación de patente 5 utiliza positivamente una aberración cromática provocada por un medio de dispersión, etc., y un cambio de trayectoria óptica de acuerdo con una longitud de onda en un elemento de difracción, y controla una posición de procesamiento ajustando la intensidad de cada una de las longitudes de onda de fuente de luz.

La publicación de patente 6 describe un método para corregir la aberración aplicando una distribución de fase opuesta a la aberración conocida a la luz incidente mediante un elemento de control de frente de onda tal como un SLM. En este caso, en la publicación no de patente 1, la aberración esférica provocada por la inserción de una placa paralela plana en un sistema óptico se obtiene analíticamente de acuerdo con una aproximación paraxial. El enfoque de un haz láser en un medio transparente es equivalente a la inserción de una placa paralela plana en un sistema óptico, de manera que al manejar los resultados descritos en la publicación no de patente 1 como la aberración conocida en el método de la publicación de patente 6, puede corregirse la aberración esférica provocada enfocando un haz láser en un medio transparente. Sin embargo, en este método, el intervalo de fase de la distribución de fase opuesta a la aberración aumenta con el rendimiento del elemento de control de frente de onda, de manera que el método no puede aplicarse cuando el láser se irradia profundamente en el interior del medio. Además, no puede obtenerse una posición de irradiación láser precisa.

Lista de citas**50 Publicaciones de patente**

[Publicación de patente 1] Solicitud de patente japonesa abierta a inspección pública número de publicación 2006-68762

55 [Publicación de patente 2] Solicitud de patente japonesa abierta a inspección pública número de publicación 2006-119427

[Publicación de patente 3] Solicitud de patente japonesa abierta a inspección pública número de publicación 2002-207202

60 [Publicación de patente 4] Solicitud de patente japonesa abierta a inspección pública número de publicación 2006-113185

65 [Publicación de patente 5] Solicitud de patente japonesa abierta a inspección pública número de publicación 2005-224841

[Publicación de patente 6] WO 2003/036368

Publicaciones no de patente

5 [Publicación no de patente 1] Hiroshi Kubota, "Optics", Iwanami Shoten, Publishers, 1967, págs. 127-128 y 300-301.

Sumario de la invención

10 **Problema técnico**

Se ha pedido que los dispositivos de procesamiento láser realicen un procesamiento más fino. Por ejemplo, en un caso donde se forma una capa modificada tal como una guía de onda óptica, se ha pedido un punto focal lo más pequeño posible. Sin embargo, si la posición de procesamiento es profunda, la región focal se expande por aberración, de manera que se hace difícil mantener un excelente estado de procesamiento.

Por lo tanto, un objetivo de la presente invención es proporcionar un método de corrección de aberraciones capaz de mejorar la concentración de un haz láser enfocado incluso si un láser se irradia profundamente en el interior de un medio, un método de procesamiento láser que usa dicho método de corrección de aberraciones, un método de irradiación láser que usa dicho método de corrección de aberraciones, un dispositivo de corrección de aberraciones y un programa de corrección de aberraciones.

Solución al problema

25 Los inventores de la presente invención realizaron estudios de manera concienzuda y reiterada, y como resultado, descubrieron que, cuando la posición de irradiación láser en un medio se hace profunda, un valor de PV (pico a valle) (un valor de PV es la diferencia entre un valor máximo y un valor mínimo de la aberración de frente de onda, y es equivalente a una cantidad de modulación de fase) de un frente de onda para corregir un haz láser aumenta y supera el rendimiento de un elemento que controla un frente de onda, tal como un modulador de luz espacial o similar, de manera que se hace imposible corregir suficientemente la aberración. Un modulador de luz espacial capaz de controlar el frente de onda es un modulador de luz espacial de tipo modulación de fase que aplica una tensión a un píxel independiente, un espejo deformable que deforma un espejo de membrana mediante un accionador o similar. En general, un intervalo de modulación de fase físicamente aplicable mediante un modulador de luz espacial de tipo modulación de fase que aplica una tensión a un píxel independiente es aproximadamente de 2π a 6π . Este intervalo se denomina intervalo de modulación de fase física. Sin embargo, al usar la técnica de envoltura de fase, el intervalo de modulación de fase eficaz puede ampliarse a varias decenas de longitudes de onda. El intervalo de modulación de fase que es eficaz y se amplía mediante la técnica de envoltura de fase se denomina intervalo de modulación de fase eficaz. La técnica de envoltura de fase es una técnica para envolver una distribución de fase que tiene un valor que supera el intervalo de modulación de fase física usando el hecho de que la fase 0 es igual a $2n\pi$ (n es un número entero). Sin embargo, en un frente de onda para corregir un haz láser, si la diferencia en la cantidad de modulación de fase entre píxeles adyacentes en el modulador de luz espacial supera el intervalo de modulación de fase física, no puede aplicarse la técnica de envoltura de fase. Por lo tanto, si la diferencia en la cantidad de modulación de fase entre píxeles adyacentes en el modulador de luz espacial supera el intervalo de modulación de fase física, el frente de onda para corregir la aberración no puede reproducirse lo suficiente, y la concentración del haz láser enfocado disminuye, y se hace difícil un excelente procesamiento. En otros moduladores de luz espaciales, tales como espejos deformables, el intervalo de modulación de fase física es mayor que en el modulador de luz espacial de tipo modulación de fase que aplica una tensión a un píxel independiente, sin embargo, el intervalo de fase capaz de modularse es limitado, de manera que cuando la posición de irradiación de láser se hace profunda, la aberración no puede corregirse lo suficiente. En el caso de un espejo deformable, solo puede modularse una distribución de fase espacialmente continua, y no puede aplicarse la técnica de envoltura de fase, de manera que el intervalo de modulación de fase física es igual al intervalo de modulación de fase eficaz.

A continuación, los inventores de la presente invención descubrieron que cuando la aberración de un haz láser se corrige de manera que la posición en la dirección del eje óptico del punto focal del haz láser después de corregirse está dentro de un intervalo entre la posición en la dirección del eje óptico del punto focal de un rayo paraxial antes de corregirse y el punto focal del rayo más exterior antes de corregirse, es decir, un intervalo en el que una aberración longitudinal está presente dentro de un medio, se reduce el valor de PV de la modulación de frente de onda suministrada para la corrección de aberraciones. Como resultado de la reducción en el valor de PV de la modulación de frente de onda para la corrección de aberraciones, incluso cuando la posición focal es profunda, se reduce la diferencia en la cantidad de modulación de fase entre píxeles adyacentes en el modulador de luz espacial, y se hace posible aplicar la técnica de envoltura de fase. En lo sucesivo en el presente documento, el patrón de modulación de frente de onda para la corrección de aberraciones antes de que se aplique la envoltura de fase se denominará frente de onda de corrección, y un patrón obtenido aplicando la envoltura de fase al frente de onda de corrección se denominará patrón de fase de corrección de aberraciones.

Un método de corrección de aberraciones de acuerdo con la invención se define en la reivindicación 1. El método de corrección de aberraciones de la presente invención está caracterizado por que, en un método de corrección de aberraciones para un dispositivo de irradiación láser que enfoca un haz láser en el interior de un medio transparente, la aberración de un haz láser se corrige de manera que un punto focal del haz láser se coloca en un intervalo de aberración generado en el interior del medio. En este caso, "un punto focal del haz láser se coloca en un intervalo de aberración generado en el interior del medio" significa que un punto focal se coloca dentro de un intervalo en el que una aberración longitudinal está presente en el interior del medio cuando no se corrige la aberración.

De acuerdo con este método de corrección de aberraciones, la aberración de un haz láser se corrige de manera que el punto focal del haz láser se coloca en un intervalo de aberración generado en el interior del medio, es decir, se coloca dentro de un intervalo en el que la aberración longitudinal está presente en el interior del medio cuando no se corrige la aberración, de manera que puede reducirse el valor de PV del frente de onda. Como resultado, incluso cuando se usa un modulador de luz espacial cuya cantidad de modulación de fase es limitada, reduciendo la cantidad de modulación de fase para la corrección de aberraciones, se reduce la tarea en el modulador de luz espacial y es posible un control de frente de onda preciso. Como resultado, incluso si el láser se irradia profundamente en el interior del medio, puede aumentarse la concentración del haz láser enfocado y puede mantenerse un excelente estado de procesamiento.

El método de irradiación láser descrito anteriormente puede incluir una lente condensadora para enfocar un haz láser en el interior del medio, y un modulador de luz espacial para corregir la aberración de un haz láser, y en el método de corrección de aberraciones descrito anteriormente, una diferencia de fase entre una cantidad de modulación de fase en un píxel arbitrario en el modulador de luz espacial correspondiente a una parte de incidencia de la lente condensadora y una cantidad de modulación de fase en un píxel adyacente a dicho píxel no es más que un intervalo de fase al que puede aplicarse la técnica de envoltura de fase.

Con esta configuración, la diferencia de fase entre píxeles adyacentes se hace más pequeña, de manera que puede realizarse la envoltura de fase en el modulador de luz espacial cuyo intervalo de modulación de fase física es limitado, y es posible un control de frente de onda preciso.

En el método de corrección de aberraciones descrito anteriormente, el punto focal del haz láser puede establecerse de manera que el valor de fase del frente de onda de corrección tenga un punto máximo local y un punto mínimo local.

Al establecer de este modo el punto focal de manera que el valor de fase del frente de onda de corrección tenga un punto máximo local y un punto mínimo local, puede reducirse el valor de PV del frente de onda de corrección.

Efectos ventajosos de la invención

De acuerdo con la presente invención, incluso si un láser se irradia profundamente en el interior de un medio, puede aumentarse la concentración del haz láser enfocado.

Breve descripción de los dibujos

La figura 1 es una vista que muestra una configuración de un dispositivo de procesamiento láser (dispositivo de irradiación láser, dispositivo de enfoque láser) de acuerdo con una primera realización.

La figura 2 es una vista que muestra una trayectoria óptica de un haz láser cuando se inserta un plano paralelo en un sistema óptico de enfoque.

La figura 3 es una vista que muestra una trayectoria óptica de un haz láser cuando un punto focal está dentro del plano paralelo.

La figura 4 es un diagrama que muestra una cantidad de modulación de fase de un frente de onda de corrección en el sistema óptico de enfoque de la figura 3.

La figura 5 es una vista que muestra una trayectoria óptica de un haz láser para describir un método de corrección de aberraciones, un método de procesamiento láser y un método de irradiación láser de acuerdo con la primera realización de la presente invención.

La figura 6 es un diagrama que muestra una cantidad de modulación de fase de un frente de onda de corrección en el sistema óptico de enfoque de la figura 5.

La figura 7 es un diagrama de flujo que muestra las etapas del método de corrección de aberraciones, el método de procesamiento láser y el método de irradiación láser de la primera realización de la presente invención.

Las figuras 8 muestran los resultados de la medición de un estado enfocado en un blanco de procesamiento cuando se usa el método de corrección de aberraciones de la primera realización.

La figura 9 es una vista que muestra una configuración de un dispositivo de procesamiento láser (dispositivo de irradiación láser, dispositivo de enfoque láser) de acuerdo con una segunda realización y un dispositivo de corrección de aberraciones.

La figura 10 es un diagrama que muestra las cantidades de modulación de fase de una pluralidad de frentes de onda de corrección generados por un primer medio de generación de frentes de onda de corrección.

La figura 11 es un diagrama que muestra una pluralidad de segundos polinomios de alto orden obtenidos por un

segundo medio de aproximación polinómica.

La figura 12 es una gráfica de una pluralidad de secuencias de coeficientes que consisten en coeficientes de los mismos términos de orden en la pluralidad de segundos polinomios de alto orden mostrados en la figura 11.

5 La figura 13 es un diagrama que muestra una pluralidad de terceros polinomios de alto orden obtenidos por un tercer medio de aproximación polinómica.

La figura 14 es una vista que muestra un conjunto de datos de coeficientes a almacenar en un medio de almacenamiento, que son los coeficientes de una pluralidad de términos de orden en la pluralidad de terceros polinomios de alto orden mostrados en la figura 13, y una secuencia de coeficientes en el primer polinomio de alto orden.

10 La figura 15 es un diagrama de flujo que muestra un método de corrección de aberraciones de acuerdo con la segunda realización.

La figura 16 es una vista que muestra una configuración de un programa de corrección de aberraciones de acuerdo con una realización, junto con un medio de registro.

15 La figura 17 es una vista que muestra una configuración de hardware de un ordenador para ejecutar un programa almacenado en un medio de registro.

La figura 18 es una vista en perspectiva del ordenador para ejecutar un programa almacenado en un medio de registro.

La figura 19 es una vista que muestra una configuración de un dispositivo de corrección de aberraciones y un dispositivo de procesamiento láser de acuerdo con una variación a modo de ejemplo de la presente invención.

20 La figura 20 es una vista que muestra una configuración del dispositivo de corrección de aberraciones y el dispositivo de procesamiento láser de acuerdo con la variación a modo de ejemplo de la presente invención.

La figura 21 es un diagrama que muestra una cantidad de modulación de fase de un frente de onda de corrección de acuerdo con un método de corrección de aberraciones de la segunda realización.

25 Las figuras 22 son vistas que muestran los resultados de la medición de un estado enfocado en un blanco de procesamiento usando el frente de onda de corrección mostrado en la figura 21.

La figura 23 muestra un resultado de la observación de una superficie de corte de un blanco de procesamiento 60 cortado después de someterse a un procesamiento láser convencional.

30 La figura 24 muestra un resultado de la observación de una superficie de corte de un blanco de procesamiento 60 cortado después de procesarse por láser usando el método de corrección de aberraciones de la primera realización.

La figura 25 muestra un resultado de la observación de una superficie de corte de un blanco de procesamiento 60 cortado después de procesarse por láser usando el método de corrección de aberraciones de la segunda realización.

35 La figura 26 es una vista que muestra un ejemplo de un dispositivo de irradiación de luz que usa un método de corrección de aberraciones de la presente invención.

Descripción de las realizaciones

40 En lo sucesivo en el presente documento, las realizaciones preferidas de la presente invención se describirán en detalle con referencia a los dibujos. Las partes idénticas o equivalentes entre sí en los dibujos se indicarán con el mismo número de referencia.

[Primera realización]

45 En primer lugar, antes de describir un método de corrección de aberraciones, un método de procesamiento láser, y un método de irradiación láser de acuerdo con una primera realización de la presente invención, se mostrará un dispositivo de procesamiento láser (dispositivo de irradiación láser, dispositivo de enfoque láser) que usa este método de corrección de aberraciones.

50 La figura 1 es una vista que muestra una configuración de un dispositivo de procesamiento láser (dispositivo de irradiación láser, dispositivo de enfoque láser) de acuerdo con una primera realización. Un dispositivo de procesamiento láser 1 mostrado en la figura 1 incluye una fuente de luz 10, una lente 20, un espejo 30, un modulador de luz espacial (en lo sucesivo en el presente documento, denominado SLM) 40 y una lente de objetivo (medio de enfoque, lente condensadora) 50. En la figura 1, se muestran un blanco de procesamiento 60 y un sistema de medición 70 para medir un estado enfocado de un haz láser en el blanco de procesamiento 60.

60 La fuente de luz 10 emite un haz láser. La lente 20 es, por ejemplo, una lente de colimación, y colima el haz láser procedente de la fuente de luz 10 en luz paralela. El espejo 30 refleja el haz láser desde la lente 20 hacia el SLM 40, y refleja un haz láser desde el SLM 40 hacia la lente de objetivo 50. El SLM 40 es, por ejemplo, un LCOS-SLM (cristal líquido sobre silicio- modulador de luz espacial) y modula la fase del haz láser del espejo 30. La lente de objetivo 50 enfoca el haz láser desde el espejo 30 y lo hace salir hacia el blanco de procesamiento 60.

En la presente realización, un estado enfocado del haz láser en el blanco de procesamiento 60 puede medirse con el sistema de medición 70. El sistema de medición 70 incluye una cámara CCD y una lente de objetivo.

65 A continuación, se describirá el concepto del método de corrección de aberraciones esféricas convencional.

La figura 2 es una vista que muestra una trayectoria óptica de un haz láser cuando se inserta un plano paralelo en un sistema óptico de enfoque. Como se muestra en la figura 2, cuando se inserta un medio transparente 60 que tiene una forma de plano paralelo en un sistema óptico de enfoque que incluye la lente condensadora 50, el foco se desvía δ de O a O'. Este valor de desviación de foco δ cambia dependiendo de la altura incidente H de la luz incidente que se hace incidente sobre la lente condensadora 50. Debido a un cambio en la posición de punto focal de acuerdo con la luz incidente, se produce una aberración esférica. En este momento, la desviación en la dirección del eje óptico desde la posición focal del rayo paraxial se convierte en una aberración esférica expresada como una aberración longitudinal (aberración esférica longitudinal), y la aberración llega a ser máxima en el rayo más exterior. En este caso, el valor máximo Δs de la aberración longitudinal se expresa mediante la siguiente expresión (1) usando la expresión (14-4) descrita en la sección 14-2 de la publicación no de patente 1.
[Expresión matemática 1]

$$\Delta s = \frac{(n'^2 - n^2)nd'}{2n'^3} \theta_{\text{máx}}^2 \quad \dots(1)$$

n: índice de refracción del medio atmosférico en el sistema óptico de enfoque

n': índice de refracción del medio 60

d': espesor del medio 60

$\theta_{\text{máx}}$: ángulo de incidencia θ del haz láser con respecto al medio 60, y ángulo de incidencia (= arctan (NA)) del rayo más exterior del haz láser.

La aberración longitudinal puede expresarse como una aberración en la dirección longitudinal, una aberración de rayo longitudinal, o un error longitudinal.

La figura 3 es una vista que muestra una trayectoria óptica de un haz láser cuando un punto focal está dentro del plano paralelo. Como se muestra en la figura 3, cuando el foco O formado por la lente condensadora 50 está dentro del medio transparente 60 que tiene una forma de plano paralelo, el foco se desvía δ de O a O'. Esta desviación de foco δ cambia dependiendo de la altura incidente H de la luz hecha incidente en la lente condensadora 50, de manera que se produce una aberración esférica. En este caso, el valor máximo Δs de la aberración longitudinal se expresa mediante la siguiente expresión (2) transformando la expresión (14-3) descrita en la sección 14-2 de la publicación no de patente 1.

$$\Delta s = -\frac{(n'^2 - 1)}{2n'} \tan^2 \theta_{\text{máx}} d \quad \dots(2)$$

n': índice de refracción del medio 60

d: distancia de movimiento de medio

$\theta_{\text{máx}}$: ángulo de incidencia θ del haz láser al medio 60, y ángulo de incidencia del rayo más exterior del haz láser.

En este caso, cuando la longitud focal de la lente condensadora 50 se define como f, de acuerdo con la aberración esférica Δs de la expresión (2) descrita anteriormente, la aberración de frente de onda E(h) se expresa mediante la siguiente expresión (3) usando la expresión (28-6) de la sección 28-1 de la publicación no de patente 1.

$$E(h) = \frac{1}{f^2} \int_0^h (\Delta s) h dh \quad \dots(3)$$

De acuerdo con la publicación de patente 6, con el fin de corregir la aberración esférica Δs de la expresión (2) descrita anteriormente, el frente de onda antes de enfocarse, es decir, el frente de onda que se hace incidente en la lente condensadora 50 se hace opuesto a la aberración de frente de onda E(h) de la expresión (3). En el dispositivo de procesamiento láser 1 de la primera realización, un patrón obtenido aplicando una envoltura de fase a un frente de onda opuesto a la aberración de frente de onda E(h) de la expresión (3) se usa como un patrón de fase de corrección de aberraciones del SLM 40. En este caso, el valor máximo Δs de la aberración longitudinal se expresa por la desviación de la posición focal del rayo paraxial, de manera que el punto focal después de la corrección casi coincide con la posición focal del rayo paraxial antes de la corrección. Sin embargo, la aberración se calcula por aproximación, de manera que no puede obtenerse una posición focal precisa.

Por ejemplo, cuando la longitud focal de la lente 50 es f = 4 mm, el índice de refracción del blanco de procesamiento 60 es n' = 1,49, la apertura numérica es NA = 0,8, la longitud de onda de láser es 660 nm, y la distancia de movimiento de medio es d = 0,9 mm, la profundidad focal después de la corrección se convierte aproximadamente en la distancia de movimiento de medio d x índice de refracción n', y está en la posición de 1,34 mm desde la

superficie de medio. El frente de onda de corrección en este caso se convierte en un patrón de corrección mostrado en la figura 4, y la cantidad de modulación de fase del frente de onda de corrección no es inferior a 600 radianes.

5 Como la posición de procesamiento O' por el dispositivo de procesamiento láser 1 se hace más profunda, la aberración esférica Δs aumenta, de manera que la cantidad de modulación de fase del frente de onda de corrección se hace grande, y la resolución del SLM 40 es insuficiente, y se hace difícil corregir la aberración.

10 Por lo tanto, en la corrección para devolver el punto focal de un rayo con respecto a cada altura incidente a la posición de la distancia de movimiento de medio $d \times$ índice de refracción n' suministrando una distribución de fase opuesta a la aberración de frente de onda de un elemento de control de frente de onda tras calcular analíticamente la aberración de frente de onda, es decir, mediante una corrección para ajustar el punto focal en el lado más cercano al lado de la lente condensadora 50 en un intervalo de aberración longitudinal que se produce dentro del blanco de procesamiento 60, es difícil corregir la aberración.

15 Por lo tanto, en el método de corrección de aberraciones, el método de procesamiento láser, y el método de irradiación láser de acuerdo con la primera realización de la presente invención, la aberración de un haz láser se corrige de manera que el punto focal del haz láser se coloca dentro de un intervalo de aberración que se produce dentro del blanco de procesamiento 60, es decir, dentro de un intervalo en el que la aberración longitudinal está presente dentro del blanco de procesamiento 60 cuando no se corrige la aberración. En otras palabras, la aberración de un haz láser se corrige de manera que un punto focal del haz láser se coloca dentro de un intervalo entre una posición focal en la dirección de profundidad de un rayo en el eje óptico cuando no se corrige la aberración y una posición focal en la dirección de profundidad del rayo más exterior cuando no se corrige la aberración. Por lo tanto, en el método de corrección de aberraciones, el método de procesamiento láser, y el método de irradiación láser de la primera realización, se calcula un frente de onda de corrección a partir de las diferencias de longitud de trayectoria óptica de los rayos. Específicamente, en lugar de suministrar una distribución de fase opuesta a la aberración tras calcular la aberración, como se describe en la publicación de patente 6, suponiendo que todos los rayos a incidir en la lente condensadora 50 se enfoquen en un punto, se calcula un frente de onda de corrección invirtiendo el trazado de rayos. En este caso, estableciendo la distancia de movimiento de medio d en un valor adecuado, el valor de PV del frente de onda de corrección se hace más pequeño, y se hace posible la corrección de aberraciones en una posición profunda mediante un modulador de luz espacial cuyo intervalo de modulación de fase física o eficaz es limitado. Además, puede determinarse una profundidad focal precisa.

35 La figura 5 es una vista que muestra una trayectoria óptica de un haz láser para describir el método de corrección de aberraciones, el método de procesamiento láser, y el método de irradiación láser de acuerdo con la primera realización de la presente invención. Como se muestra en la figura 5, cuando un ángulo de incidencia de un rayo sobre el blanco de procesamiento 60 antes de la corrección de frente de onda se define como θ , un ángulo de incidencia de un rayo sobre el blanco de procesamiento 60 después de la corrección de frente de onda se define como θ_1 , y el ángulo de refracción se define como θ_2 , las alturas de eje óptico h_1 , h_2 y h se expresan mediante las siguientes expresiones (4), (5) y (6). En la figura 5, al realizar la corrección de frente de onda, la trayectoria óptica del haz láser al blanco de procesamiento 60 es diferente de la trayectoria óptica antes de la corrección de frente de onda.

[Expresión matemática 4]

$$h_1 = (f \cos \theta - d) \tan \theta_1 \quad \dots(4)$$

45 [Expresión matemática 5]

$$h_2 = (d + \Delta) \tan \theta_2 \quad \dots(5)$$

[Expresión matemática 6]

$$h = f \sin \theta \quad \dots(6)$$

50 En este caso, θ_1 y θ_2 están relacionados de manera única entre sí de acuerdo con la ley de Snell, y cuando se da θ_1 , puede obtenerse θ_2 , y, por el contrario, cuando se da θ_2 , puede obtenerse θ_1 . Además, los ángulos de incidencia θ , θ_1 y θ_2 están relacionados de manera única entre sí por $h = h_1 + h_2$ y las expresiones (4) a (6). Cuando se da un θ_1 o θ_2 específico, sustituyendo las expresiones (4) y (5) por $h = h_1 + h_2$ y resolviendo la expresión (6), θ puede determinarse fácilmente. Sin embargo, cuando se da un θ específico, es difícil obtener θ_1 y θ_2 analíticamente. Con el fin de obtener θ_1 y θ_2 con respecto a un θ específico, se realiza la búsqueda. Por ejemplo, la búsqueda se realiza cambiando gradualmente el valor de θ_1 o θ_2 , obteniendo θ por cada cambio, y cambiando θ_1 o θ_2 hasta que θ_1 o θ_2 se obtiene con el θ que se desea obtener.

60 Por otro lado, la diferencia de trayectoria óptica OPD (diferencia de trayectoria óptica) provocada por el blanco de procesamiento 60 se expresa mediante la siguiente expresión (7).

[Expresión matemática 7]

$$OPD = \frac{(f \times \cos\theta - d)}{\cos\theta_1} + \frac{n(d + \Delta)}{\cos\theta_2} - f - (n - 1) \times d - \Delta \quad \dots(7)$$

5 “-f-(n-1)xd-Δ” en la expresión (7) es un término constante, y se añade para evitar que el valor de OPD se vuelva demasiado grande.

Al establecer el valor Δ de la desviación de foco después de la corrección de frente de onda en un valor adecuado con el fin de reducir un valor de PV de un frente de onda de corrección obtenido a partir de esta expresión (7), se reduce una cantidad de modulación de fase para corregir la aberración esférica. En este caso, se obtiene un valor adecuado Δ de la desviación de foco mediante, por ejemplo, la búsqueda descrita anteriormente. Es decir, el valor Δ de la desviación de foco se establece en un valor inicial de nxd-d, y se cambia gradualmente, y se obtiene el OPD(θ) para cada cambio, y Δ se cambia gradualmente hasta que el OPD(θ) en el intervalo de θ_{máx} ≥ θ ≥ -θ_{máx} se convierte en una forma deseada. d+Δ es una profundidad focal deseada, y es un valor fijo, de manera que Δ y d se cambian de modo que d+Δ se fija durante la búsqueda. La profundidad focal de d+Δ es un valor fijo, de manera que cuando se determina Δ, la distancia de movimiento de medio d también se determina restando Δ de la profundidad focal. En lo sucesivo en el presente documento, la profundidad focal (posición de procesamiento) de d+Δ que es un valor fijo se denominará D.

20 En detalle, la cantidad de desplazamiento de punto focal Δ y la distancia de movimiento d se determinan de manera que una diferencia de fase entre una cantidad de modulación de fase en un píxel arbitrario en el SLM 40 correspondiente a la parte incidente de la lente condensadora 50 y una cantidad de modulación de fase en un píxel adyacente a dicho píxel no sea superior a la cantidad de modulación de fase física. Una cantidad de desplazamiento de haz láser Δ después de la corrección cumple 0 < Δ < Δs.

25 En consecuencia, la diferencia de fase entre píxeles adyacentes se hace más pequeña, de manera que puede reducirse la tarea en el SLM 40 cuya cantidad de modulación de fase física está limitada.

En consecuencia, cuando el índice de refracción del blanco de procesamiento 60 se define como n, la distancia de movimiento de medio se define como d, y el valor máximo de la aberración longitudinal provocada por el blanco de procesamiento 60 se define como Δs, el punto focal del haz láser está en una posición no inferior a nxd y no superior a nxd+Δs desde el plano de incidencia del medio, es decir, colocado dentro de un intervalo de aberración longitudinal no inferior a nxd y no superior a nxd+Δs.

35 En la descripción anterior, la cantidad de desplazamiento de punto focal Δ se determina de manera que la diferencia de fase entre una cantidad de modulación de fase en un píxel arbitrario en el SLM 40 correspondiente a la parte incidente de la lente condensadora 50 y una cantidad de modulación de fase en un píxel adyacente a dicho píxel no sea superior a una cantidad de modulación de fase física, sin embargo, esta condición de búsqueda es ambigua, y una pluralidad de Δs puede convertirse en una solución. Con el fin de facilitar la determinación del final de la búsqueda, la cantidad de desplazamiento de punto focal Δ puede determinarse basándose en una condición de búsqueda más detallada. Por ejemplo, Δ puede determinarse de manera que el valor de PV del OPD(θ) en el intervalo de θ_{máx} ≥ θ ≥ -θ_{máx} sea mínimo. Como alternativa, el valor absoluto de un valor diferencial del OPD (θ) en el intervalo de θ_{máx} ≥ θ ≥ -θ_{máx} es mínimo. Estas dos condiciones a modo de ejemplo están incluidas o son sustancialmente iguales a la primera condición en la que la diferencia de fase entre una cantidad de modulación de fase en un píxel arbitrario en el SLM 40 y una cantidad de modulación de fase en un píxel adyacente a dicho píxel no es superior a la cantidad de modulación de fase física. Como condición de búsqueda, son posibles otras condiciones diferentes, como “la RMS (media cuadrática) del OPD(θ) es mínima” y “la distancia de movimiento de medio d se expresa mediante una función específica usando la profundidad focal D como variable”, etc.

50 Por ejemplo, cuando la longitud focal de la lente condensadora 50 es f = 4 mm, el índice de refracción del blanco de procesamiento 60 es n = 1,49, la longitud de onda del láser es 660 nm, la apertura numérica es NA = 0,8, y la distancia de movimiento de medio es d = 0,81 mm, Δ es 0,53 mm como resultado de la búsqueda mediante la cual el valor de PV del OPD(θ) se hace mínimo, un frente de onda de corrección se convierte en el patrón de corrección mostrado en la figura 6, y la cantidad de modulación de fase del frente de onda de corrección se reduce a aproximadamente 70 radianes. La profundidad focal en este caso es D = 1,34 mm, y, por lo tanto, aunque se realiza 55 la misma profundidad focal que en el caso que usaba el método convencional, la cantidad de modulación de fase se vuelve más pequeña, de manera que puede corregirse suficientemente la aberración.

Haciendo referencia a la figura 6, el valor de fase de este frente de onda de corrección tiene un punto local máximo en la posición de 0 mm, es decir, en la posición de eje óptico. Además, el valor de fase tiene puntos locales mínimos en las posiciones de 2 mm y -2 mm. Por lo tanto, estableciendo el punto focal de manera que el valor de fase del frente de onda de corrección tenga un punto local máximo y un punto local mínimo, puede reducirse el valor de PV del frente de onda de corrección.

La figura 7 es un diagrama de flujo que muestra las etapas del método de corrección de aberraciones, el método de procesamiento láser, y el método de irradiación láser de la primera realización. En primer lugar, se establece un punto focal en la superficie del blanco de procesamiento 60, y esta posición se define como un origen de procesamiento (etapa S01). A continuación, se establece una posición de procesamiento (profundidad) dentro del blanco de procesamiento 60 (etapa S02).

A continuación, basándose en la condición de búsqueda descrita anteriormente, se establecen la distancia de movimiento d del blanco de procesamiento 60 y la cantidad de desplazamiento de punto focal Δ . En consecuencia, la cantidad de movimiento d del blanco de procesamiento 60 y la cantidad de desplazamiento de punto focal Δ se establecen de manera que la posición de procesamiento se coloca dentro de un intervalo en el que la aberración longitudinal está presente dentro del blanco de procesamiento 60 cuando no se corrige la aberración (un intervalo no inferior a nx_d y no superior a $nx_d + \Delta_s$ desde el plano de incidencia del blanco de procesamiento 60) (etapa S03). La distancia de movimiento d y la cantidad de desplazamiento Δ se establecen con el fin de que no sean superiores a la cantidad de modulación máxima del modulador de luz espacial (intervalo de modulación de fase física del modulador de luz espacial).

A continuación, se calcula un frente de onda de corrección de manera que un haz láser se enfoque en la posición de procesamiento establecida en las etapas S02 y S03, y se visualice en el SLM 40 (etapa S04). A continuación, el blanco de procesamiento 60 se mueve la distancia de movimiento d (etapa S05). A continuación, se irradia un haz láser y se inicia el procesamiento. A continuación, el haz láser se enfoca en la posición de procesamiento establecida por el frente de onda de corrección del SLM 40 (etapa S06).

A continuación, al final del procesamiento, se detiene la irradiación de haz láser (etapa S07). Cuando hay otra posición de procesamiento, el proceso vuelve a la etapa S02, y cuando no hay otra posición de procesamiento, se finaliza el procesamiento de este blanco de procesamiento 60 (etapa S08).

En la etapa S05, se cambia la posición relativa del sistema óptico de enfoque que incluye el SLM 40 y la lente condensadora 50 y el blanco de procesamiento 60, de manera que la lente condensadora 50 puede moverse en lugar de mover el blanco de procesamiento 60, o pueden moverse ambos. En el caso donde se mueve la lente condensadora 50, cuando la pupila de entrada de la lente condensadora 50 y el SLM 40 están en una relación de formación de imágenes, la lente condensadora debe moverse como una unidad del sistema óptico de enfoque, es decir, la lente condensadora debe moverse junto con el SLM 40.

En la etapa S01, enfocando el haz láser de procesamiento sobre la superficie del blanco de procesamiento 60, se determina un origen de procesamiento, sin embargo, la posición relativa de la lente condensadora y el blanco de procesamiento puede determinarse usando otros medios, por ejemplo, un dispositivo de autoenfoque o similar.

En el ejemplo descrito anteriormente, la forma de frente de onda se controla usando un modulador de luz espacial de tipo modulación de fase que aplica una tensión a un píxel independiente, sin embargo, también puede usarse otro modulador de luz espacial, tal como un espejo deformable. Cuando se usa un modulador de luz espacial tal como un espejo deformable cuyo intervalo de modulación de fase no está limitado a un intervalo pequeño tal como 2π , un frente de onda de corrección puede expresarse tal como es, de manera que puede omitirse la envoltura de fase.

De acuerdo con el método de corrección de aberraciones, el método de procesamiento láser, y el método de irradiación láser de acuerdo con la primera realización, la aberración de un haz láser se corrige de manera que el punto focal del haz láser se coloca dentro de un intervalo de la aberración que se produce dentro del medio 60, es decir, colocado dentro de un intervalo de la aberración longitudinal dentro del medio 60 cuando no se corrige la aberración, de manera que puede reducirse el valor de PV del frente de onda. Como resultado, incluso cuando se usa un SLM 40 cuya cantidad de modulación de fase es limitada, reduciendo el valor de PV del frente de onda de corrección, se reduce la tarea en el SLM 40, y se hace posible un control de frente de onda preciso. Como resultado, incluso si se irradia un láser profundamente en el interior del medio 60, puede aumentarse la concentración del haz láser enfocado, de manera que puede mantenerse un excelente estado de procesamiento.

Por lo tanto, la posición focal en el interior del medio (por ejemplo, el blanco de procesamiento, etc.) 60 sobre el que se enfoca un haz láser se mueve a una posición en la que se hace posible la reducción del valor de PV del frente de onda de corrección, de manera que ese control de frente de onda preciso puede realizarse mientras se reduce la tarea en el SLM 40 mediante un método simple.

Además, de acuerdo con el método de corrección de aberraciones, el método de procesamiento láser, y el método de irradiación láser de la primera realización, la diferencia de fase entre una cantidad de modulación de fase en un píxel arbitrario en el SLM 40 correspondiente a la parte incidente de la lente condensadora 50 y una cantidad de modulación de fase en un píxel adyacente a dicho píxel no es superior a un intervalo de fase en el que puede aplicarse la técnica de envoltura de fase. Por lo tanto, se reduce la tarea en el SLM 40, cuyo intervalo de modulación de fase física es limitado, y es posible un control de frente de onda preciso. No puede obtenerse una posición focal precisa calculando la aberración por aproximación como en el caso de la publicación de patente 6, sin embargo, en la presente invención, puede obtenerse una posición focal precisa.

Las figuras 8 muestran los resultados de la medición de un estado enfocado en el blanco de procesamiento 60. La figura 8(a) es el resultado de la medición de un estado enfocado antes de la corrección, y la figura 8(b) es el resultado de la medición de un estado enfocado después de la corrección. Como se muestra en la figura 8, aunque se realiza la misma posición focal (1,34 mm) que en el caso que usa el método convencional, el valor de PV del frente de onda de corrección es pequeño, de manera que se corrige suficientemente la aberración.

La figura 23 y la figura 24 muestran los resultados de la observación de una superficie de corte del blanco de procesamiento 60 cortada después del procesamiento láser. En el procesamiento láser de la figura 23 y la figura 24, se formaron tres capas modificadas 60a, 60b y 60c irradiando un haz láser desde la dirección Z y escaneando el haz láser en la dirección Y en el blanco de procesamiento 60. La figura 23 muestra una superficie de corte cuando el método de corrección de aberraciones de la primera realización de la presente invención no se usa en el procesamiento láser, es decir, una superficie cortada después del procesamiento láser usando un haz láser cuya aberración no está suficientemente corregida como se muestra en la figura 8(a). Por otro lado, la figura 24 muestra una superficie de corte cuando el método de corrección de aberraciones de la primera realización de la presente invención se usa en el procesamiento láser, es decir, una superficie cortada después del procesamiento láser usando un haz láser cuya aberración se ha corregido suficientemente como se muestra en la figura 8(b). Haciendo referencia a la figura 23, la corrección de aberraciones en el procesamiento láser es insuficiente, de manera que las capas modificadas 60a, 60b y 60c no son uniformes, y el procesamiento láser es insuficiente. Por otro lado, haciendo referencia a la figura 24, la corrección de aberraciones en el procesamiento láser se realiza de manera suficiente, de modo que las capas modificadas 60a, 60b y 60c son uniformes, y el procesamiento láser se realiza de manera suficiente.

El método de corrección de aberraciones, el método de procesamiento láser, y el método de irradiación láser de la primera realización pueden aplicarse, preferentemente, al procesamiento interno de una sustancia que tiene una región de longitud de onda con alta transmitancia, tal como vidrio, silicio y sustratos de zafiro. En particular, cuando se forma una capa modificada, tal como una guía de onda óptica, o una generación amorfa o agrietada, incluso si la posición de procesamiento es profunda, la aberración puede corregirse mediante el modulador de luz espacial, y el punto focal puede hacerse más pequeño, y puede mantenerse un excelente estado de procesamiento.

[Segunda realización no parte de la invención]

En el método de corrección de aberraciones, el método de procesamiento láser, y el método de irradiación láser de la primera realización descrita anteriormente, cuando cambia la posición de procesamiento O' mostrada en la figura 5, cambia la aberración esférica Δ_s , de manera que cada vez que cambia la posición de procesamiento O', debe volver a calcularse el frente de onda de corrección de acuerdo con la expresión (7), de manera que el tiempo de cálculo llega a ser largo.

En detalle, como se ha descrito anteriormente, es difícil obtener directamente θ_1 , θ_2 , y Δ en la expresión (7), y estos se obtienen mediante una búsqueda en la que el valor de Δ se cambia gradualmente y el frente de onda de corrección se calcula repetidamente. Además, en cada búsqueda cambiando Δ , el valor de θ o los valores de θ_1 y θ_2 en la expresión (7) deben obtenerse mediante el método de búsqueda descrito anteriormente. Específicamente, es necesaria una doble búsqueda, y puede llevar mucho tiempo de cálculo.

Como resultado, cuando se realiza el procesamiento mientras se cambia la profundidad de procesamiento, la búsqueda durante el procesamiento puede provocar una disminución en la velocidad de procesamiento.

Por lo tanto, los inventores de la presente invención descubrieron un método de corrección de aberraciones que acorta el tiempo obteniendo por adelantado frentes de onda de corrección de aberraciones cuyas cantidades de modulación de fase son pequeñas usando el método de corrección de aberraciones de la primera realización, es decir, la búsqueda descrita anteriormente, y calculando un frente de onda de corrección en una posición de procesamiento arbitraria usando una expresión aproximada de aproximación polinómica de los frentes de onda de corrección de aberraciones obtenidos. En lo sucesivo en el presente documento, se describirá un método de corrección de aberraciones de acuerdo con una segunda realización que acorta el tiempo.

En primer lugar, antes de describir el método de corrección de aberraciones de acuerdo con la segunda realización, se describirá un dispositivo de procesamiento láser (dispositivo de irradiación láser, dispositivo de enfoque láser) que usa este método de corrección de aberraciones.

La figura 9 es una vista que muestra una configuración de un dispositivo de procesamiento láser (dispositivo de irradiación láser, dispositivo de enfoque láser) de acuerdo con la segunda realización. El dispositivo de procesamiento láser 1A mostrado en la figura 9 es diferente del dispositivo de procesamiento láser 1 en una configuración que incluye además una unidad de control 80 y un dispositivo de corrección de aberraciones 90 de acuerdo con una realización de la presente invención en el dispositivo de procesamiento láser 1 de la primera realización. Otros componentes del dispositivo de procesamiento láser 1A son los mismos que en el dispositivo de procesamiento láser 1.

La unidad de control 80 recibe información de frentes de onda de corrección desde el dispositivo de corrección de aberraciones 90 y controla la cantidad de modulación de fase del SLM 40.

5 El dispositivo de corrección de aberraciones 90 es, por ejemplo, un ordenador, y funciona como una primera unidad de generación de frentes de onda de corrección 91, una primera unidad de aproximación polinómica 92, una segunda unidad de aproximación polinómica 93, una tercera unidad de aproximación polinómica 94, una unidad de almacenamiento 95 y una segunda unidad de generación de frentes de onda de corrección 96 ejecutando un programa de corrección de aberraciones que se describirá a continuación.

10 La primera unidad de generación de frentes de onda de corrección 91 recibe una apertura numérica NA y una longitud focal f determinada de acuerdo con la lente de objetivo 50, y un índice de refracción n determinado de acuerdo con un medio del blanco de procesamiento 60. La primera unidad de generación de frentes de onda de corrección 91 recibe un intervalo de profundidad de procesamiento estimado por adelantado en el procesamiento que implica un cambio en la profundidad de procesamiento, y una pluralidad de posiciones de procesamiento (profundidades focales) $D_1, D_2, \dots, D_p, \dots, D_P$ alrededor de este intervalo. El número y el intervalo de estas profundidades focales se establecen para que la aproximación polinómica descrita a continuación pueda realizarse con suficiente precisión. La primera unidad de generación de frentes de onda de corrección 91 obtiene una pluralidad de frentes de onda de corrección y una pluralidad de distancias de movimiento de medio $d_1, d_2, \dots, d_p, \dots, d_P$, correspondientes a la pluralidad de posiciones de procesamiento $D_1, D_2, \dots, D_p, \dots, D_P$ mediante una búsqueda que usa las expresiones (7) y (4) a (6). Específicamente, la primera unidad de generación de frentes de onda de corrección 91 obtiene una pluralidad de frentes de onda de corrección y una pluralidad de distancias de movimiento de medio correspondientes a la pluralidad de posiciones de procesamiento $D_1, D_2, \dots, D_p, \dots, D_P$ de manera que un punto focal de un haz láser se coloca dentro de un intervalo en el que una aberración longitudinal está presente en el interior del medio cuando no se corrige la aberración, y la cantidad de modulación de fase del frente de onda de corrección se vuelve mínima. Como condición de búsqueda, una condición por la que un frente de onda de corrección y una distancia de movimiento de medio se determinan de manera única para una posición de procesamiento, por ejemplo, una condición por la que se aplica el valor de PV del frente de onda de corrección. En la figura 10 se muestran unas cantidades de modulación de fase $\Phi_{1x}, \Phi_{2x}, \dots, \Phi_{px}, \dots, \Phi_{Px}$ de una pluralidad de frentes de onda de corrección obtenidos de esta manera, trazados con respecto a una posición radial x.

30 Mediante la operación descrita anteriormente, se obtienen las distancias de movimiento de medio $d_1, d_2, \dots, d_p, \dots, d_P$ y las distancias $\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_p, \dots, \Delta_P$ desde el punto O a las posiciones de procesamiento $D_1, D_2, \dots, D_p, \dots, D_P$, y los frentes de onda de corrección $\Phi_{1x}, \Phi_{2x}, \dots, \Phi_{px}, \dots, \Phi_{Px}$ correspondientes a la pluralidad de posiciones de procesamiento $D_1, D_2, \dots, D_p, \dots, D_P$.

35 La primera unidad de aproximación polinómica 92 se aproxima a un conjunto de datos de las distancias de movimiento de medio $d_1, d_2, \dots, d_p, \dots, d_P$ mediante un polinomio exponencial de orden M usando una profundidad focal deseada como una variable para obtener un primer polinomio de alto orden (la siguiente expresión (8)). [Expresión matemática 8]

40

$$d = c_1 * D + c_2 * D^2 \quad \cdot \cdot \cdot + c_m * D^m \quad \cdot \cdot \cdot + c_M * D^M \quad \cdot \cdot \cdot (8)$$

En este caso, D es una profundidad focal deseada, y $D = d + \Delta$.

45 La segunda unidad de aproximación polinómica 93 se aproxima a las cantidades de modulación de fase $\Phi_{1x}, \Phi_{2x}, \dots, \Phi_{px}, \dots, \Phi_{Px}$ de la pluralidad de frentes de onda de corrección mostrados en la figura 10 por un polinomio exponencial de orden Q que usa una posición radial x como una variable para obtener una pluralidad de segundos polinomios de alto orden como se muestra en la figura 11. Una pluralidad de secuencias de coeficientes $a_{1p}, a_{2p}, \dots, a_{qp}, \dots, a_{Qp}$ que consisten en coeficientes de los mismos términos de orden en estos segundos polinomios de alto orden, es decir, la secuencia de coeficientes a_{1p} de los términos de primer orden a la secuencia de coeficientes a_{Qp} de los términos de orden Q se representa gráficamente con respecto a la distancia de movimiento de medio d_p y se muestra en la figura 12.

50 La tercera unidad de aproximación polinómica 94 se aproxima a la secuencia de coeficientes a_{1p} de los términos de primer orden a la secuencia de coeficientes a_{Qp} de los términos de orden Q de la pluralidad de segundos polinomios de alto orden mostrados en la figura 12 por un polinomio exponencial de orden K que usa una distancia de movimiento d como variable para obtener una pluralidad de terceros polinomios de alto orden como se muestra en la figura 13.

60 La unidad de almacenamiento 95 almacena los coeficientes de la pluralidad de términos de orden en la pluralidad de terceros polinomios de alto orden mostrados en la figura 13, es decir, los coeficientes b_{11} a b_{1Q}, b_{21} a b_{2Q}, \dots, b_{k1} a b_{kQ}, \dots, b_{K1} a b_{KQ} de la pluralidad de términos de primer orden a orden Q y la secuencia de coeficientes $c_1, c_2, \dots, c_q, \dots, c_Q$ en el primer polinomio de alto orden como un conjunto de datos de coeficientes como se muestra en la figura 14.

Al usar el conjunto de datos de coeficientes almacenados mediante las operaciones descritas anteriormente, puede

generarse un frente de onda de corrección con respecto a una profundidad focal en una posición arbitraria. A continuación, se describirá un método para generar el frente de onda de corrección.

5 La segunda unidad de generación de frentes de onda de corrección 96 obtiene una distancia de movimiento de medio d con respecto a una profundidad focal arbitraria D usando los coeficientes c_1 a c_Q en el conjunto de datos de coeficientes y el primer polinomio y , además, obtiene el coeficiente de término de primer orden A_1 al coeficiente de término de orden Q A_Q del segundo polinomio de alto orden con respecto a la profundidad focal arbitraria D , es decir, obtiene el segundo polinomio de alto orden (la siguiente expresión (9)) de la posición de procesamiento arbitraria D equivalente a la pluralidad de segundos polinomios de alto orden mostrados en la figura 11 usando los coeficientes
 10 b_{11} a b_{1Q} , b_{21} a b_{2Q} ,... b_{k1} a b_{kQ} ,... b_{K1} a b_{KQ} en el conjunto de datos de coeficientes y la pluralidad de terceros polinomios de alto orden mostrados en la figura 13.
 [Expresión matemática 9]

$$\Phi'_{px} = A_1 * x + A_2 * x^2 \quad \cdot \cdot \cdot + A_q * x^q \quad \cdot \cdot \cdot + A_Q * x^Q \quad \cdot \cdot \cdot (9)$$

15 La segunda unidad de generación de frentes de onda de corrección 96 obtiene un frente de onda de corrección en una posición de procesamiento arbitraria $d_n + \Delta$ usando el segundo polinomio de alto orden de la expresión (9) mostrada anteriormente.

20 En la descripción ofrecida anteriormente, los polinomios que consisten en términos exponenciales de primer orden a orden específico se usan como los polinomios primero a tercero, sin embargo, también pueden usarse polinomios que tengan otras constituciones. Por ejemplo, un término exponencial de orden 0 puede añadirse a los polinomios primero a tercero. Como alternativa, un polinomio que consiste en términos exponenciales de orden par puede usarse como el segundo polinomio. Además, también pueden usarse polinomios que incluyen, por ejemplo, un polinomio de Zernike, una función de Gauss y una función de Lorentz, etc., en lugar de funciones exponenciales. En
 25 los polinomios segundo y tercero, la distancia de movimiento de medio d se usa como variable, sin embargo, también puede usarse como variable una profundidad focal (posición de procesamiento) D o una cantidad de desplazamiento de punto focal Δ . Cuando la condición de búsqueda es "la distancia de movimiento de medio d se expresa mediante una función específica usando la profundidad focal D como variable", puede usarse la función en lugar de la expresión (8) y puede omitirse la primera etapa de aproximación polinómica.

30 A continuación, se describirán las operaciones del dispositivo de corrección de aberraciones 90 de la presente realización, y se describirá el método de corrección de aberraciones de acuerdo con la segunda realización. La figura 15 es un diagrama de flujo que muestra un método de corrección de aberraciones de acuerdo con la segunda realización de la presente invención.

35 En primer lugar, cuando se introduce una apertura numérica NA y una longitud focal f determinada de acuerdo con la lente de objetivo 50 y un índice de refracción n determinado de acuerdo con el blanco de procesamiento, y se introduce una pluralidad de posiciones de procesamiento (profundidades focales) $D_1, D_2, \dots, D_p, \dots, D_P$ en y alrededor de un intervalo del intervalo de profundidad de procesamiento estimado por adelantado en el procesamiento que implica un cambio en la profundidad de procesamiento, por la primera unidad de generación de frentes de onda de corrección 91, de acuerdo con el método de corrección de aberraciones de la primera realización, se obtienen una pluralidad de frentes de onda de corrección $\Phi_{1x}, \Phi_{2x}, \dots, \Phi_{px}, \dots, \Phi_{Px}$ y una pluralidad de distancias de movimiento de medio $d_1, d_2, \dots, d_p, \dots, d_P$ correspondientes a la pluralidad de profundidades focales $D_1, D_2, \dots, D_p, \dots, D_P$ mediante una búsqueda que usa las expresiones (7) y (4) a (6) descritas anteriormente. Específicamente, una pluralidad de frentes
 40 de onda de corrección $\Phi_{1x}, \Phi_{2x}, \dots, \Phi_{px}, \dots, \Phi_{Px}$ correspondientes a la pluralidad de profundidades focales $D_1, D_2, \dots, D_p, \dots, D_P$ se obtienen de manera que un punto focal de un haz láser se coloca dentro de un intervalo en el que la aberración longitudinal está presente dentro del medio cuando no se corrige la aberración, y los valores PV de los frentes de onda de corrección se vuelven mínimos (S 11: primera etapa de generación de frentes de onda de corrección).

50 A continuación, la primera unidad de aproximación polinómica 92 realiza una aproximación polinómica exponencial de la pluralidad de distancias de movimiento de medio $d_1, d_2, \dots, d_p, \dots, d_P$, y como se muestra en la expresión (8), se obtiene un primer polinomio de alto orden (S12: primera etapa de aproximación polinómica).

55 A continuación, la segunda unidad de aproximación polinómica 93 realiza una aproximación polinómica exponencial de las cantidades de modulación de fase $\Phi_{1x}, \Phi_{2x}, \dots, \Phi_{px}, \dots, \Phi_{Px}$ de la pluralidad de frentes de onda de corrección mostrados en la figura 10 y, en consecuencia, se obtienen una pluralidad de segundos polinomios de alto orden como se muestra en la figura 11. Se obtienen una pluralidad de secuencias de coeficientes $a_{1p}, a_{2p}, \dots, a_{qp}, \dots, a_{Qp}$ que consisten en coeficientes de los mismos términos de orden en estos segundos polinomios de alto orden, es decir, la secuencia de coeficientes a_{1p} del término de primer orden a la secuencia de coeficientes a_{Qp} del término de orden Q
 60 (S13: segunda etapa de aproximación polinómica).

A continuación, la tercera unidad de aproximación polinómica 94 realiza una aproximación polinómica exponencial de la secuencia de coeficientes a_{1p} de los términos de primer orden a la secuencia de coeficientes a_{Qp} de los

términos de orden Q en la pluralidad de segundos polinomios de alto orden mostrados en la figura 12 y, en consecuencia, como se muestra en la figura 13, se obtienen una pluralidad de terceros polinomios de alto orden que usan la distancia de movimiento d como variable (S14: tercera etapa de aproximación polinómica). Los coeficientes de una pluralidad de términos de orden en estos terceros polinomios de alto orden, es decir, los coeficientes b_{11} a b_{1Q} , b_{21} a b_{2Q} ,... b_{K1} a b_{KQ} ,... b_{K1} a b_{KQ} de los términos de primer orden a orden Q y los coeficientes c_1 , c_2 , ... c_q , ... c_M de los términos primero a M -ésimo del primer polinomio de alto orden se almacenan como un conjunto de datos de coeficientes en la unidad de almacenamiento 95 como se muestra en la figura 14 (S15: etapa de almacenamiento).

Con el fin de calcular un frente de onda de corrección del conjunto de datos de coeficientes almacenados, en la segunda unidad de generación de frentes de onda de corrección 96, después de obtener una distancia de movimiento de medio con respecto a una profundidad focal deseada D y los coeficientes del segundo polinomio, se calcula un frente de onda de corrección. En primer lugar, usando los coeficientes c_1 , c_2 , ... c_q , ... c_M en el conjunto de datos de coeficientes y el primer polinomio, se obtiene una distancia de movimiento de medio d con respecto a una profundidad focal arbitraria D . A continuación, al usar la distancia de movimiento de medio d , los coeficientes b_{1Q} , b_{21} a b_{2Q} ,... b_{K1} a b_{KQ} ,... b_{K1} a b_{KQ} en el conjunto de datos de coeficientes, y la pluralidad de terceros polinomios de alto orden mostrados en la figura 13, se obtiene el coeficiente a_{1p} del término de primer orden al coeficiente a_{Qp} del término de orden Q del segundo polinomio de alto orden de la profundidad focal arbitraria D . Específicamente, se obtiene un segundo polinomio de alto orden de la profundidad focal arbitraria D equivalente a la pluralidad de segundos polinomios de alto orden, mostrados en la figura 11, en forma de la expresión (9). A continuación, usando este segundo polinomio de alto orden en forma de la expresión (9), se obtiene un frente de onda de corrección a la profundidad focal arbitraria D (S16: etapa de generación de frentes de onda de corrección). Con el fin de cambiar la profundidad de procesamiento, se genera un frente de onda de corrección correspondiente a la profundidad modificada realizando la etapa S16.

En la búsqueda en la primera etapa de generación de frente de onda de corrección S11 descrita anteriormente, se usa la condición de que se convierte el valor de PV del frente de onda de corrección, sin embargo, también pueden usarse otras condiciones. Sin embargo, la condición que se use debe establecerse de manera que un frente de onda de corrección y una distancia de movimiento de medio se determinen de manera única para una posición de procesamiento, y la diferencia de fase entre los píxeles adyacentes no sea superior a la cantidad de modulación de fase física.

A continuación, se describirá un programa de corrección de aberraciones para el funcionamiento de un ordenador como el dispositivo de corrección de aberraciones 90. La figura 16 es una vista que muestra una configuración de un programa de corrección de aberraciones de acuerdo con una realización junto con un medio de registro.

Tal como se muestra en la figura 16, el programa de corrección de aberraciones P100 se almacena en un medio de registro 100 y se proporciona. Como medio de registro 100, se usa a modo de ejemplo un medio de registro tal como un disquete, un CD-ROM, un DVD, una ROM o similares, o una memoria semiconductora o similares.

La figura 17 es una vista que muestra una configuración de hardware de un ordenador para ejecutar un programa registrado en un medio de registro, y la figura 18 es una vista en perspectiva del ordenador para ejecutar un programa almacenado en un medio de registro.

Tal como se muestra en la figura 17, el ordenador 200 incluye un dispositivo de lectura 202 tal como una unidad de disquete, una unidad de CD-ROM, y una unidad de DVD, etc., una memoria de trabajo (RAM) 204 en la que reside un sistema operativo, una memoria 206 para almacenar un programa almacenado en el medio de registro 100, un dispositivo de visualización 208 tal como una pantalla, un ratón 210 y un teclado 212 como dispositivos de entrada, un dispositivo de comunicación 214 para transmitir y recibir datos, etc., y una CPU 216 que controla la ejecución de los programas. Cuando el medio de registro 100 se inserta en el dispositivo de lectura 202, el ordenador 202 se vuelve accesible para el programa de corrección de aberraciones P100 almacenado en el medio de registro 100 desde el dispositivo de registro 202, y puede operar como un dispositivo de corrección de aberraciones 90 de acuerdo con el programa de corrección de aberraciones P100.

Tal como se muestra en la figura 18, el programa de corrección de aberraciones P100 puede proporcionarse como una señal de datos informáticos 220 superpuesta sobre una onda portadora a través de una red. En este caso, el ordenador 200 almacena el programa de corrección de aberraciones P100 recibido por el dispositivo de comunicación 214 en la memoria 206, y puede ejecutar el programa de corrección de aberraciones P100.

Tal como se muestra en la figura 16, el programa de corrección de aberraciones P100 incluye un primer módulo de generación de frentes de onda de corrección P10, un primer módulo de aproximación polinómica P20, un segundo módulo de aproximación polinómica P30, un segundo módulo de aproximación polinómica P40, un módulo de almacenamiento P50 y un segundo módulo de generación de frentes de onda de corrección P60.

Las funciones del primer módulo de generación de frentes de onda de corrección P10, el primer módulo de aproximación polinómica P20, el segundo módulo de aproximación polinómica P30, el segundo módulo de aproximación polinómica P40, el módulo de almacenamiento P50 y el segundo módulo de generación de frentes de

onda de corrección P60 que se realizan por el ordenador son las mismas que las de los elementos correspondientes de la primera unidad de generación de frentes de onda de corrección 91, la primera unidad de aproximación polinómica 92, la segunda unidad de aproximación polinómica 93, la segunda unidad de aproximación polinómica 94, la unidad de almacenamiento 95 y la segunda unidad de generación de frentes de onda de corrección 96 descritas anteriormente.

La presente realización muestra una realización en la que un ordenador que funciona como el dispositivo de corrección de aberraciones 90 se proporciona integralmente en el interior del dispositivo de procesamiento láser, sin embargo, también es posible que el ordenador que funciona como el dispositivo de corrección de aberraciones 90 se proporcione por separado fuera del dispositivo de procesamiento láser 1A, y la información de frente de onda de corrección se intercambie entre el ordenador y el dispositivo de procesamiento láser (figura 19).

También es posible que los ordenadores 90A y 90B se proporcionen dentro y fuera del dispositivo de procesamiento láser 1A, y estos dos ordenadores 90A y 90B realicen las funciones del dispositivo de corrección de aberraciones 90. Por ejemplo, es posible que las funciones de la primera unidad de generación de frentes de onda de corrección 91, la primera unidad de aproximación polinómica 92, la segunda unidad de aproximación polinómica 93, la tercera unidad de aproximación polinómica 94 y la unidad de almacenamiento 95 como partes del dispositivo de corrección de aberraciones 90 se realicen por el ordenador externo 90A, y las funciones restantes de la unidad de almacenamiento 95 y la segunda unidad de generación de frentes de onda de corrección 96 se realicen por el ordenador interno 90B. De acuerdo con esto, entre el ordenador externo 90A y el ordenador interno 90B, es decir, el dispositivo de procesamiento láser 1A, el conjunto de datos de coeficientes se intercambie a través de un medio de registro o una ruta de comunicación, y los contenidos en la unidad de almacenamiento 95A del ordenador externo 90A se copien en la unidad de almacenamiento 95B del ordenador interno 90B (figura 20).

Por lo tanto, el método de corrección de aberraciones de la segunda realización y el dispositivo de corrección de aberraciones 90 y el programa de corrección de aberraciones de la presente realización también tienen las mismas ventajas que las del método de corrección de aberraciones de la primera realización. Específicamente, incluso en el método de corrección de aberraciones de la segunda realización y el dispositivo de corrección de aberraciones 90 y el programa de corrección de aberraciones de la presente realización, como se ha descrito anteriormente, los frentes de onda de corrección para corregir la aberración de un haz láser se obtienen por adelantado, de manera que un punto focal del haz láser se coloca dentro de un intervalo de aberración longitudinal en el interior del medio cuando no se corrige la aberración, y usando una expresión aproximada de acuerdo con la aproximación polinómica de alto orden de los frentes de onda de corrección, se obtiene un frente de onda de corrección en una posición de procesamiento arbitraria, de manera que el frente de onda de corrección de la posición de procesamiento arbitraria puede corregir la aberración del haz láser de manera que el punto focal del haz láser se coloque dentro del intervalo de aberración longitudinal en el interior del medio cuando no se corrige la aberración, y puede reducirse el valor de PV del frente de onda. Como resultado, incluso si se usa un modulador de luz espacial cuya cantidad de modulación de fase es limitada, reduciendo la cantidad de modulación de fase para la corrección de aberraciones, se reduce la tarea en el modulador de luz espacial y es posible un control de frente de onda preciso. Como resultado, incluso si se irradia un láser profundamente en el interior de un medio, puede aumentarse la concentración de un haz láser enfocado y puede mantenerse un excelente estado de procesamiento.

Por ejemplo, cuando la apertura numérica de la lente 50 es $NA = 0,55$, la longitud focal es $f = 3,6$ mm, el índice de refracción del blanco de procesamiento 60 es $n = 1,49$, la distancia de movimiento de medio es $d = 0,637$ mm, y la desviación de foco es $\Delta = 0,361$ mm, es decir, la posición focal es $D = 0,998$ mm, un frente de onda de corrección se convierte en un patrón de corrección como se muestra en la figura 21 y la cantidad de modulación de fase del frente de onda de corrección se reduce a aproximadamente 14 radianes.

Los resultados de la medición de un estado enfocado en el blanco de procesamiento 60 usando este patrón de corrección se muestran en las figuras 22. Las figuras 22 muestran los resultados de la observación de una parte de enfoque cuando un haz láser con una longitud de onda de 660 nm se enfoca en el interior de un acrílico. La figura 22(a) muestra el resultado de la medición de un estado enfocado antes de la corrección, y la figura 22(b) muestra el resultado de la medición de un estado enfocado después de la corrección de la segunda realización. Tal como se muestra en la figura 21, debido a la pequeña cantidad de modulación de fase, la aberración se corrige suficientemente como se muestra en la figura 22(b).

La figura 23 y la figura 25 muestran los resultados de la observación de una superficie de corte de un blanco de procesamiento 60 cortada después del procesamiento láser. En el procesamiento láser en la figura 23 y la figura 25, irradiando un haz láser desde la dirección Z y escaneando el haz láser en la dirección Y sobre el blanco de procesamiento 60, se formaron tres capas modificadas 60a, 60b y 60c. La figura 23 muestra una superficie de corte en el caso donde el método de corrección de aberraciones de la segunda realización de la presente invención no se usó en el procesamiento láser, es decir, una superficie cortada después del procesamiento láser usando un haz láser cuya aberración no se ha corregido lo suficiente, como se muestra en la figura 22(a). Por otro lado, la figura 25 muestra una superficie de corte en el caso donde el método de corrección de aberraciones de la segunda realización de la presente invención se usó en el procesamiento láser, es decir, una superficie cortada después del procesamiento láser usando un haz láser cuya aberración se corrigió lo suficiente como se muestra en la figura

- 22(b). Haciendo referencia a la figura 23, como se ha descrito anteriormente, la corrección de aberraciones es insuficiente en el procesamiento láser, de manera que las capas modificadas 60a, 60b y 60c no son uniformes, y el procesamiento láser es insuficiente. Por otro lado, haciendo referencia a la figura 25, la corrección de aberraciones se realizó lo suficiente en el procesamiento láser, de manera que las capas modificadas 60a, 60b y 60c son uniformes, y el procesamiento láser se realiza lo suficiente. Una marca de procesamiento de la figura 25, que es un resultado de la segunda realización, es similar a una marca de procesamiento de la figura 24 que es un resultado de la primera realización, de manera que puede confirmarse que ambas realizaciones tienen efectos equivalentes entre sí.
- Además, de acuerdo con el método de corrección de aberraciones de la segunda realización y el dispositivo de corrección de aberraciones y el programa de corrección de aberraciones de la presente realización se obtienen por adelantado frentes de onda de corrección para una pluralidad de posiciones de procesamiento, y se realiza una aproximación polinómica de alto orden de estos frentes de onda de corrección, de manera que puede obtenerse un frente de onda de corrección adecuado realizando solo una operación aritmética de acuerdo con la expresión aproximada. Como resultado, puede acortarse el tiempo para volver a calcular el frente de onda de corrección al cambiar la profundidad de procesamiento, y puede reducirse la disminución en la velocidad de procesamiento. Además, incluso para una posición de procesamiento arbitraria diferente de las posiciones de procesamiento obtenidas en realidad mediante una búsqueda, puede obtenerse un frente de onda de corrección adecuado.
- La presente invención no se limita a las realizaciones descritas anteriormente, sino que puede variarse de diversas maneras. Por ejemplo, en las realizaciones, se usa un SLM 40 reflexivo de tipo modulación de fase que aplica una tensión a un píxel independiente, sin embargo, incluso cuando se usa un SLM transmisivo de tipo modulación de fase que aplica una tensión a un píxel independiente, pueden obtenerse las mismas ventajas. Incluso cuando se usa un espejo deformable, pueden obtenerse las mismas ventajas.
- Además, también es posible que entre el SLM 40 y la lente de objetivo 50, se disponga un sistema de lentes de retransmisión compuesto por una o dos o más lentes, de manera que la superficie de modulación del SLM 40 y el plano pupilar de entrada de la lente de objetivo 50 están sustancialmente en una relación de formación de imágenes. En consecuencia, el frente de onda modulado por el SLM 40 se propaga a la lente de objetivo 50 sin una difracción de Fresnel, de manera que puede realizarse una corrección de aberraciones excelente. Cuando la superficie de modulación del SLM 40 es más grande que el plano pupilar de la lente de objetivo 50, si el sistema de formación de imágenes sirve habitualmente como un sistema de reducción, la cantidad de luz del haz láser puede usarse eficazmente, y la región eficaz del SLM 40 puede usarse suficientemente.
- En la presente realización, el procesamiento de un solo punto se muestra a modo de ejemplo, sin embargo, el concepto de la presente invención también puede aplicarse a un procesamiento de múltiples puntos para procesar una pluralidad de puntos de procesamiento que están distribuidos tridimensionalmente. Por ejemplo, en el procesamiento de dos puntos, a las fases de dos patrones de lente de Fresnel con diferentes posiciones focales, se añaden las fases de corrección de frentes de onda establecidas considerando las profundidades de procesamiento. Cuando las fases obtenidas de los patrones de los dos puntos se definen como Φ_A y Φ_B , extrayendo solo las fases de $\exp(\Phi_A) + \exp(\Phi_B)$, se obtiene un patrón de holograma del modulador de luz espacial. Por lo tanto, el modulador de luz espacial tiene ventaja en el procesamiento tridimensional. Específicamente, también pueden generarse un gran número de puntos focales en diferentes posiciones en un plano en la dirección de profundidad modulando luz incidental y, en comparación con el procesamiento en el que se repite el procesamiento de punto único, puede mejorarse el rendimiento del procesamiento.
- En este procesamiento de múltiples puntos, como en el caso de la presente realización, para enfocar a diferentes profundidades de procesamiento, también se obtienen los frentes de onda de corrección correspondientes a las posiciones de procesamiento. En este caso, al realizar una búsqueda usando las expresiones (7) y (4) a (6), etc., pueden obtenerse frentes de onda de corrección, de manera que los puntos focales del haz láser se colocan dentro de un intervalo de una aberración longitudinal que se produce en el interior del medio y las cantidades de modulación de fase de los frentes de onda de corrección se vuelven mínimas, sin embargo, esta búsqueda lleva mucho tiempo. Por lo tanto, al aplicar el método de corrección de aberraciones usando el dispositivo de corrección de aberraciones 90 descrito anteriormente para este procesamiento de múltiples puntos, puede acortarse el tiempo que debe emplearse para volver a calcular el frente de onda de corrección cuando se cambia la profundidad de procesamiento, y puede reducirse la disminución de la velocidad de procesamiento.
- En este procesamiento de múltiples puntos, también pueden usarse los patrones de placa zonal de Fresnel (que consisten en dos valores de 0 y π) en lugar de los patrones de lente de Fresnel descritos anteriormente. Cuando se añaden fases de frentes de onda de corrección establecidas al considerar las profundidades de procesamiento de los patrones de lente de Fresnel a las fases de los patrones de lente de Fresnel, por ejemplo, puede añadirse una fase de un patrón de rejilla o un patrón CGH arbitrario para generar múltiples puntos dentro de un plano con una profundidad uniforme a los patrones de lente de Fresnel.
- En la presente realización, se describe un método de corrección de aberraciones en un dispositivo de procesamiento láser, y este método de corrección de aberraciones puede aplicarse a diversos dispositivos de sistema óptico. Por

ejemplo, el método de corrección de aberraciones y el método de irradiación láser de la presente invención también pueden aplicarse a dispositivos de irradiación láser tales como microscopios. Entre los diversos microscopios, la presente invención es especialmente adecuada para un microscopio de barrido láser. En lo sucesivo en el presente documento, se describirá un ejemplo de un microscopio de barrido láser como un dispositivo de irradiación láser y un método de irradiación láser de la presente invención.

Por ejemplo, un microscopio de barrido láser escanea una posición focal de un haz láser no solo en una dirección perpendicular a la dirección del eje óptico sino también en la dirección del eje óptico. Específicamente, el microscopio de barrido láser genera un punto focal no solo en la superficie sino también en el interior de un blanco de medición. En este caso, el punto focal se expande y la intensidad máxima disminuye debido a la aberración, y la resolución y el contraste de imagen son menores. Aplicando el método de corrección de aberraciones y el método de irradiación láser de la presente realización a este microscopio de barrido láser, incluso si se usa un SLM cuya cantidad de modulación de fase es limitada, puede mejorarse la concentración de un haz láser enfocado en el interior del blanco de medición y puede medirse una imagen con alta resolución y alto contraste de imagen incluso en una posición profunda. En un microscopio confocal o un microscopio de barrido láser multifotónico como un tipo de microscopio de barrido láser, si la intensidad máxima en la posición focal de la luz de irradiación disminuye, la intensidad de luz medida disminuye drásticamente, de manera que la corrección de aberraciones es especialmente eficaz. Al igual que el microscopio de barrido láser, en algunos dispositivos de formación de imágenes que obtienen una imagen escaneando un haz de enfoque, se usa una fuente de luz tal como un SLD (diodo superluminiscente) que tiene una banda de longitud de onda estrecha y una alta coherencia espacial como láser, y a tal fuente de luz pueden aplicarse el método de corrección de aberraciones y el método de irradiación láser descritos en el presente documento.

El método de corrección de aberraciones de la presente invención puede aplicarse a diversos microscopios, así como al microscopio de barrido láser descrito anteriormente, y puede aplicarse preferentemente a un dispositivo de formación de imágenes tal como un microscopio que ilumina ampliamente un blanco de medición y detecta el blanco de medición mediante un sensor de imagen. En este tipo de microscopio, la fuente de luz no se limita a un haz láser, y puede usarse luz no coherente. Por lo tanto, el método de corrección de aberraciones de la presente invención también puede aplicarse a un microscopio (dispositivo de irradiación de luz) que usa luz no coherente. En lo sucesivo en el presente documento, como un dispositivo de irradiación de luz relacionado con la presente invención, se mostrará un ejemplo de este tipo de microscopio.

La figura 26 es un dispositivo de irradiación de luz de acuerdo con una realización de la presente invención, que muestra un ejemplo de un microscopio que ilumina ampliamente un blanco de medición y forma imágenes del blanco de medición mediante un sensor de imagen. El microscopio 1B mostrado en la figura 26 incluye una fuente de luz 10B, una lente condensadora 20B, un espejo 22B, una lente de objetivo 50, unas lentes de retransmisión 24B y 26B, un espejo de prisma 30, un modulador de luz espacial 40, una lente de formación de imágenes 28B, y una cámara (sensor de imagen) 70B. En el dispositivo de irradiación de luz de esta realización, como muestra (medio) 60B de un blanco de medición, se toma tejido vivo en un recipiente con agua.

La fuente de luz 10B es, por ejemplo, una iluminación tal como una lámpara incandescente. La luz de la fuente de luz 10B se convierte en luz paralela mediante la lente condensadora 20B, y se refleja mediante el espejo 22B para iluminar ampliamente la muestra 60B. La luz transmitida y dispersada hacia delante desde la muestra 60B se hace incidir en la lente de objetivo 50, y la luz que sale de la lente de objetivo 50 se guía sobre el SLM 40 a través de las lentes de retransmisión 24B y 46B y el espejo de prisma 30. La luz reflejada por el SLM 40 se guía a la cámara 70B a través del espejo de prisma 30 y la lente de formación de imágenes 28B, y forma una imagen de la muestra 60B en la superficie de la cámara 70B. En esta realización, las lentes de retransmisión 24B y 26B están dispuestas entre la lente de objetivo 50 y el SLM 40, de manera que el plano pupilar de entrada de la lente de objetivo 50 y el SLM 40 tienen una relación conjugada. Las lentes 50, 24B, 26B y 28B están dispuestas de manera que la muestra 60B y la superficie de la cámara 70 tengan una relación de formación de imágenes.

En el dispositivo de irradiación de luz de esta realización, la muestra 60B se considera como un grupo de puntos, y cada punto se considera como una fuente de luz secundaria. Específicamente, la muestra 60B se considera como un grupo de fuentes de luz puntuales secundarias. Por lo tanto, entre la muestra 60B que es un grupo de fuentes de luz puntuales secundarias y la cámara 70B, se aplica el método de corrección de aberraciones de la presente invención.

A partir de cada fuente de luz puntual secundaria, se emite una luz de onda esférica, y se convierte en luz de onda sustancialmente plana por la lente de objetivo 50. En este caso, la muestra 60 está en el agua, de manera que la luz emitida desde cada fuente de luz puntual secundaria tiene una aberración esférica debido al desajuste del índice de refracción entre el aire y el agua, y la luz que sale de la lente de objetivo 50 se convierte en una onda plana que incluye la aberración de frente de onda expresada por la expresión (7). Por lo tanto, cuando se forma una imagen en la cámara 70B por la lente de formación de imágenes 28B, la imagen se ve influenciada por la aberración, y se reducen la resolución espacial y el contraste de la imagen.

La luz que sale de la lente de objetivo 50, y la luz de onda plana que incluye la aberración de frente de onda se

transmiten al SLM 40 por las lentes de retransmisión 24B y 26B. En este momento, al aplicar la modulación de fase expresada por la expresión (7) al SLM 40, puede eliminarse la aberración. En consecuencia, la luz que sale del SLM 40 se convierte en luz de una onda plana casi perfecta de la que se ha eliminado la aberración de frente de onda. Como resultado, cuando se forma una imagen en la cámara 70B mediante la lente de formación de imágenes 28B, se forma una imagen sin aberración, y puede mejorarse la resolución y el contraste de la imagen.

En los dispositivos de procesamiento láser de las realizaciones primera y segunda, una fuente de luz está por encima del espejo de prisma 30, y la luz se propaga desde el lado superior al lado inferior, sin embargo, en el dispositivo de irradiación de luz de la presente realización, la dirección de propagación de la luz es inversa a la misma. Una fuente de luz está por debajo de la lente de objetivo 50, y la luz se propaga desde el lado inferior al lado superior. En el ámbito de la óptica clásica, la propagación de la luz es invariable con respecto a la inversión de tiempo, de manera que es evidente que la corrección de aberraciones se realiza independientemente de la dirección de propagación de la luz, siempre que la configuración sea la misma. Sin embargo, en los dispositivos de procesamiento láser de las realizaciones primera y segunda, el punto focal está en el eje óptico, sin embargo, en el dispositivo de irradiación de luz de la presente realización, la fuente de luz 10B no está solo en el eje óptico sino también en otras posiciones, de manera que se tendrá en cuenta esta influencia.

Se consideran dos puntos luminosos en la muestra 60B, es decir, un punto luminoso A en el eje óptico y un punto luminoso B fuera del eje óptico. La luz que se emitirá desde el punto luminoso A solo está influida por la aberración esférica debido a que el punto luminoso A está en el eje óptico, y la aberración se elimina satisfactoriamente mediante la corrección de aberraciones de la presente invención. Por otro lado, la luz que se emitirá desde el punto luminoso B incluye no solo la aberración esférica sino también otras aberraciones debido a que el punto luminoso B está fuera del eje óptico. Sin embargo, en un microscopio normal, el campo de observación es estrecho. Siempre que el punto luminoso B está incluido en el campo de observación, la desviación del eje óptico es pequeña, y las aberraciones distintas a la aberración esférica son suficientemente pequeñas. Por lo tanto, la aberración también se elimina satisfactoriamente de la luz que se emitirá desde el punto luminoso B mediante la corrección de aberraciones de la presente invención.

En el dispositivo de irradiación de luz de esta realización, se muestra transiluminación, sin embargo, el método de corrección de aberraciones de la presente invención también puede aplicarse a la epi-iluminación. Además, en el dispositivo de irradiación de luz de esta realización, se usan las lentes de retransmisión 24B y 26B, sin embargo, estas pueden omitirse. En este caso, es preferible que el SLM 40 y la lente de objetivo 50 estén próximos entre sí. En el dispositivo de irradiación de luz de esta realización, como fuente de luz 10B se usa una lámpara incandescente, sin embargo, como fuente de luz 10B también pueden usarse otras fuentes de luz blanca, láser, SLD y LED, etc. Además, también es posible que la luz cuya banda de longitud de onda está limitada por el uso de un filtro paso banda en la fuente de luz blanca se use como luz de iluminación.

La presente realización se describe usando un ejemplo de un blanco de procesamiento con un índice de refracción espacialmente uniforme, sin embargo, la presente invención también puede aplicarse a un caso donde el índice de refracción puede considerarse sustancialmente uniforme. Por ejemplo, en el caso de un sustrato transparente que tiene una película delgada, tal como una película antirreflexión formada sobre la superficie y la superficie posterior, la capa de película delgada es delgada, y la aberración provocada por la película delgada es pequeña e insignificante. Como alternativa, cuando se usa un blanco de procesamiento formado laminando y uniendo vidrios delgados idénticos, una capa de vidrio y una capa de unión se laminan alternativamente en la dirección de profundidad, y el espesor de la capa de unión es delgado y la diferencia de índice de refracción del vidrio es pequeña, y la aberración que se produce en la capa de unión es pequeña e insignificante. Además, las realizaciones descritas anteriormente se describen usando un caso donde la luz se enfoca en el interior de un blanco de procesamiento, sin embargo, la presente invención también puede aplicarse para enfocar de cerca la superficie posterior. Por ejemplo, en el proceso de fabricación de un panel de cristal líquido, hay un caso donde un patrón de cableado formado en la superficie posterior de un sustrato de vidrio se corta mediante un haz láser incidente desde la superficie, y la presente invención también puede aplicarse a este caso.

Aplicabilidad industrial

La presente invención puede aplicarse a un fin que implica una posición de irradiación láser profunda en un medio y que requiere una alta concentración de una focalización de un haz láser.

Lista de signos de referencia

- 1, 1A: dispositivo de procesamiento láser (dispositivo de irradiación láser, dispositivo de enfoque láser)
- 1B: dispositivo de irradiación de luz (microscopio)
- 10, 10B: fuente de luz
- 20, 20B, 24B, 26B, 28B: lente
- 30, 22B: espejo
- 40: modulador de luz espacial (SLM)
- 50: lente de objetivo (medio de enfoque, lente condensadora)

ES 2 668 971 T3

- 60: blanco de procesamiento (medio)
- 70: sistema de medición
- 70B: cámara (sensor de imagen)
- 80: unidad de control
- 5 90, 90A, 90B: dispositivo de corrección de aberraciones
- 91: primera unidad de generación de frentes de onda de corrección (primer medio de generación de frentes de onda de corrección)
- 92: primera unidad de aproximación polinómica (primer medio de aproximación polinómica)
- 93: segunda unidad de aproximación polinómica (segundo medio de aproximación polinómica)
- 10 94: tercera unidad de aproximación polinómica (tercer medio de aproximación polinómica)
- 95: unidad de almacenamiento (medio de almacenamiento)
- 96: segunda unidad de generación de frentes de onda de corrección (segundo medio de generación de frentes de onda de corrección)
- 100: medio de registro
- 15 200: ordenador
- 202: dispositivo de lectura
- 206: memoria
- 208: dispositivo de visualización
- 210: ratón
- 20 212: teclado
- 214: dispositivo de comunicación
- 220: señal de datos informáticos
- P100: programa de corrección de aberraciones
- P10: primer módulo de generación de frentes de onda de corrección
- 25 P20: primer módulo de aproximación polinómica
- P30: segundo módulo de aproximación polinómica
- P40: tercer módulo de aproximación polinómica
- P50: módulo de almacenamiento
- 30 P60: segundo módulo de generación de frentes de onda de corrección

REIVINDICACIONES

1. Un método de corrección de aberraciones para un dispositivo de irradiación láser, que enfoca un haz láser en el interior de un medio transparente (60),
 5 incluyendo el dispositivo de irradiación láser un modulador de luz espacial (40) para modular la fase del haz láser y un medio de enfoque (50) para enfocar el haz láser desde el modulador de luz espacial (40) en una posición de procesamiento (D) en el interior del medio (60), comprendiendo el método:
 10 definir la posición de procesamiento (D) en el interior del medio (60); establecer una distancia relativa (f menos d) entre el medio (60) y el medio de enfoque (50) de manera que la posición de procesamiento (D) del haz láser se encuentre dentro de un intervalo

$$n \times d < D < n \times d + \Delta s$$

- 15 en el que la aberración longitudinal está presente en el interior del medio (60) cuando no se corrige la aberración; visualizar en el modulador de luz espacial (40) un frente de onda de corrección calculado de manera que el haz láser se enfoque en la posición de procesamiento (D) cuando se sitúa el medio de enfoque (50) a dicha distancia relativa (f menos d) del medio (60); mover relativamente el medio de enfoque (50) y el medio (60) de manera que la distancia entre el medio de enfoque (50) y el medio (60) se convierta en dicha distancia relativa (f menos d); e
 20 irradiar el haz láser sobre la posición de procesamiento (D) en el medio (60), en donde
 f es la longitud focal del medio de enfoque (50);
 d es una profundidad desde un plano de incidencia del medio (60) a la posición de enfoque del medio de enfoque (50) suponiendo que el índice de refracción del medio sea igual al de un medio atmosférico;
 25 n es el índice de refracción del medio (60); y
 Δs es un valor máximo de la aberración longitudinal, definido como

$$\Delta s = -\frac{(n^2 - 1)}{2n} \tan^2 (\theta_{\text{máx}} d)$$

- 30 en donde $\theta_{\text{máx}}$ es el ángulo de incidencia del rayo más exterior del haz láser.
2. El método de corrección de aberraciones de acuerdo con la reivindicación 1, en el que el medio de enfoque (50) es una lente condensadora, y establecer la distancia relativa incluye establecer la posición de procesamiento (D) del haz láser de manera que una
 35 diferencia de fase entre una cantidad de modulación de fase en un píxel arbitrario en el modulador de luz espacial (40) correspondiente a una parte de incidencia de la lente condensadora y una cantidad de modulación de fase en un píxel adyacente a dicho píxel no sea superior a un intervalo de fase al que pueda aplicarse la técnica de envoltura de fase.
- 40 3. El método de corrección de aberraciones de acuerdo con la reivindicación 1, en el que establecer la distancia relativa incluye establecer la posición de procesamiento (D) del haz láser de manera que el valor de fase del frente de onda de corrección tenga un punto máximo local y un punto mínimo local.

Fig.1

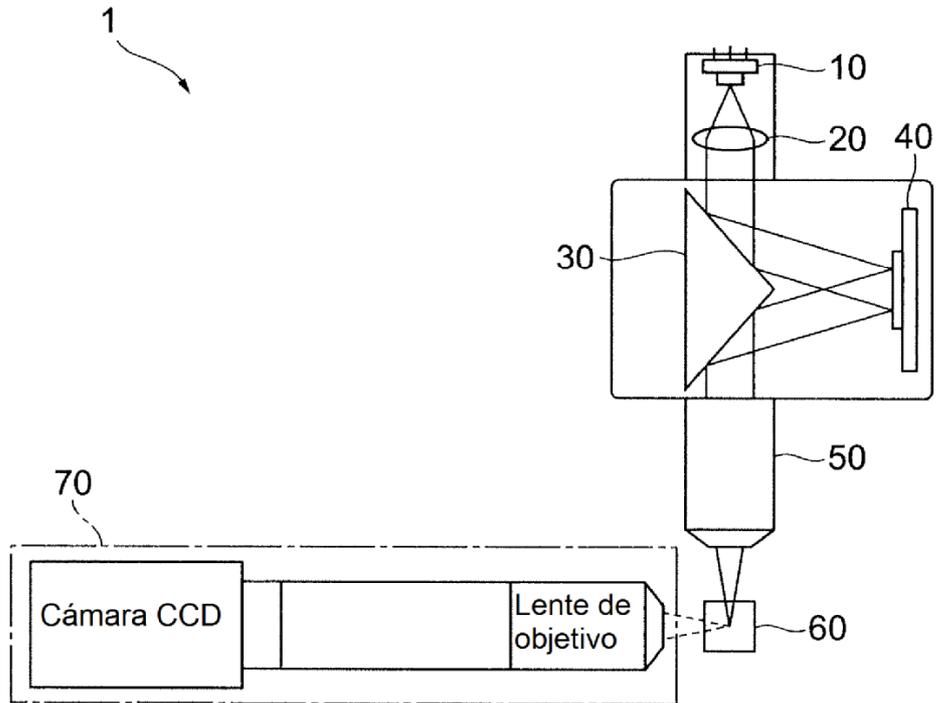


Fig.2

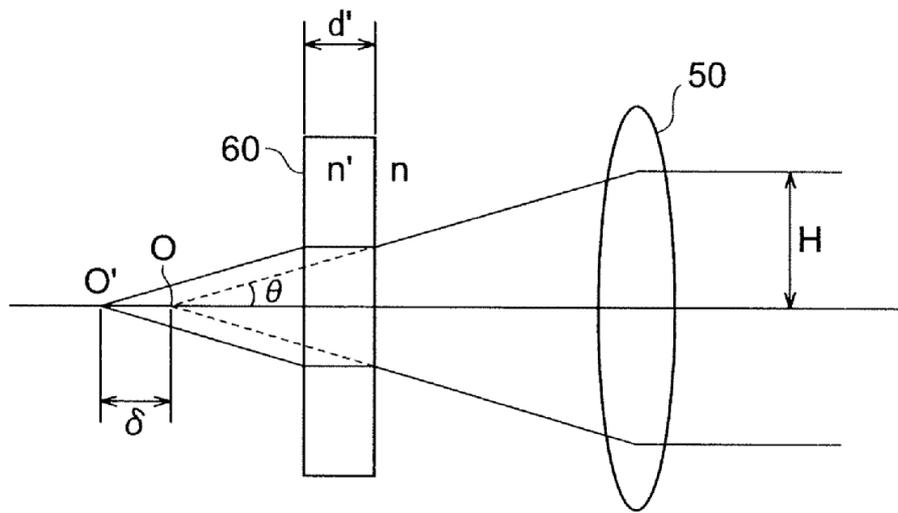


Fig.3

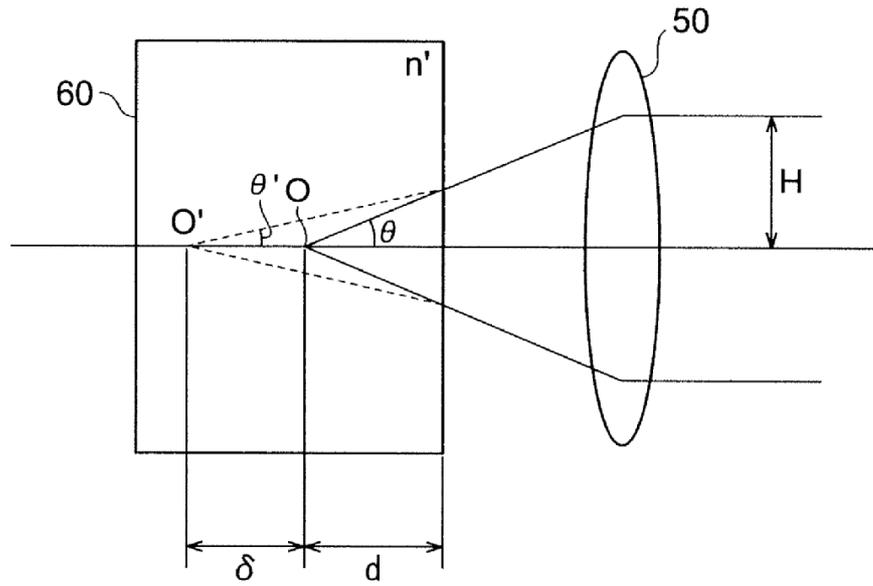


Fig.4

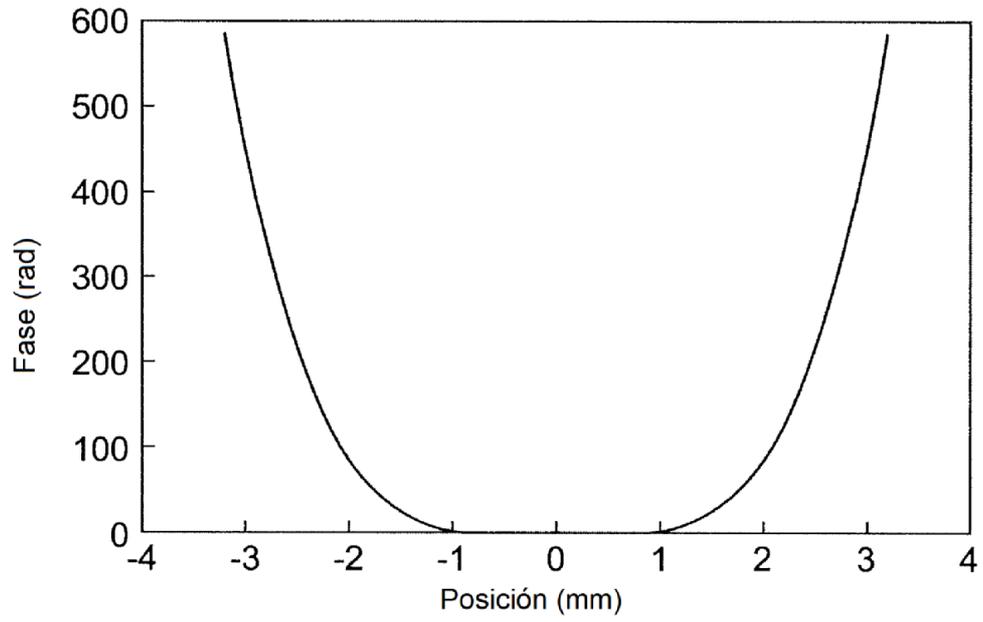


Fig.5

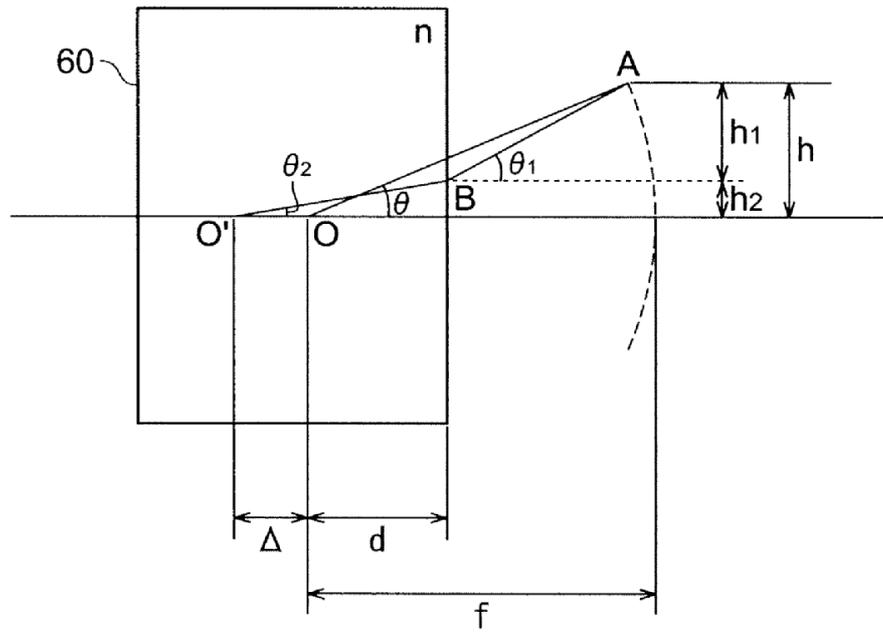


Fig.6

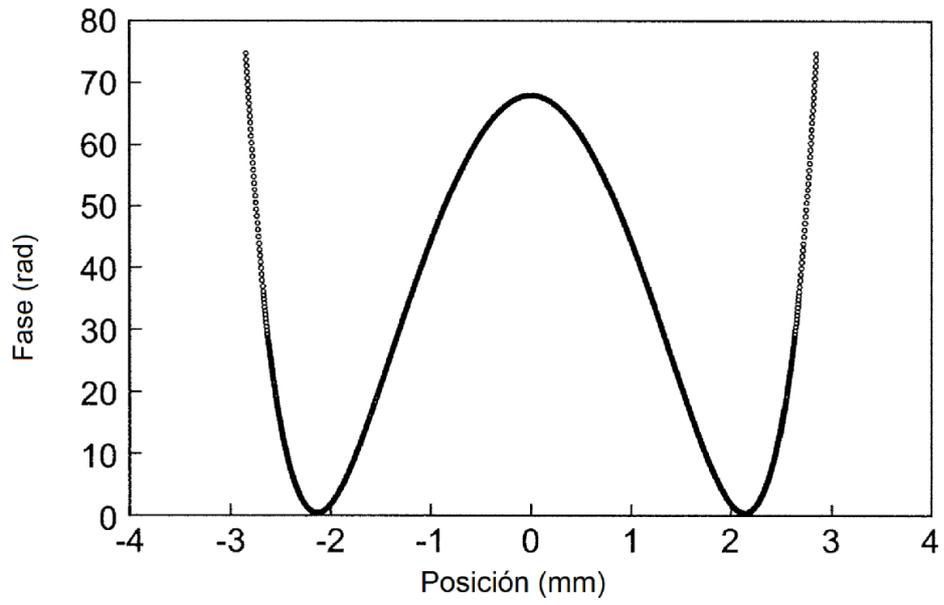


Fig.7

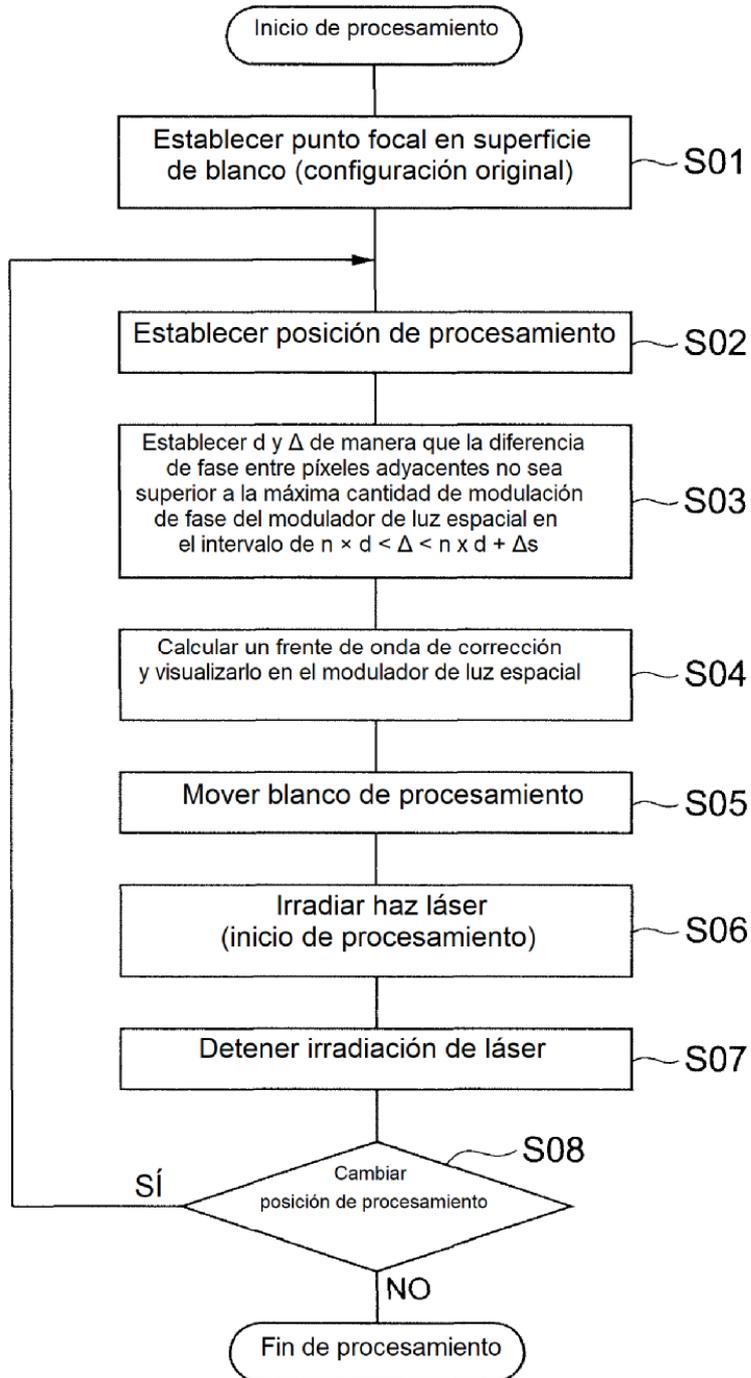
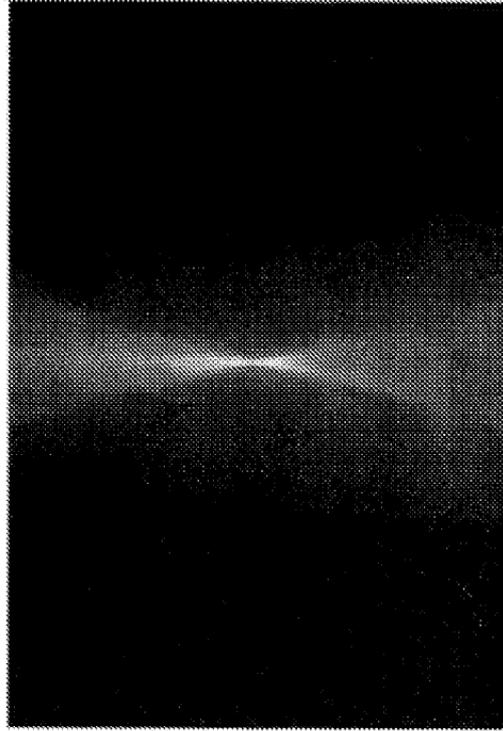
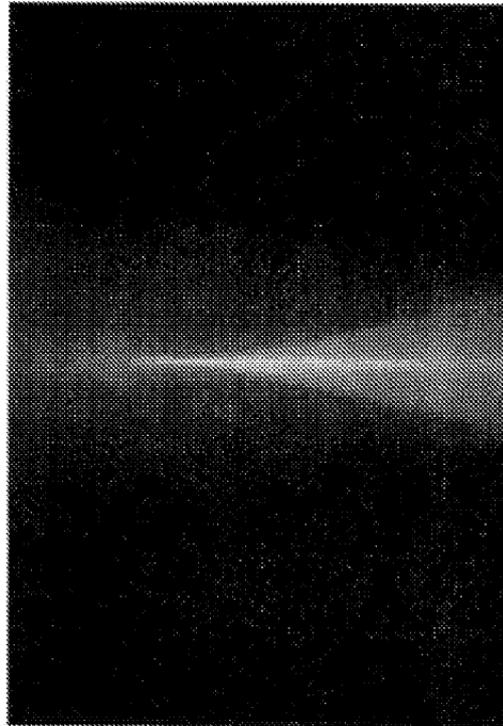


Fig. 8



(b)



(a)

Fig.9

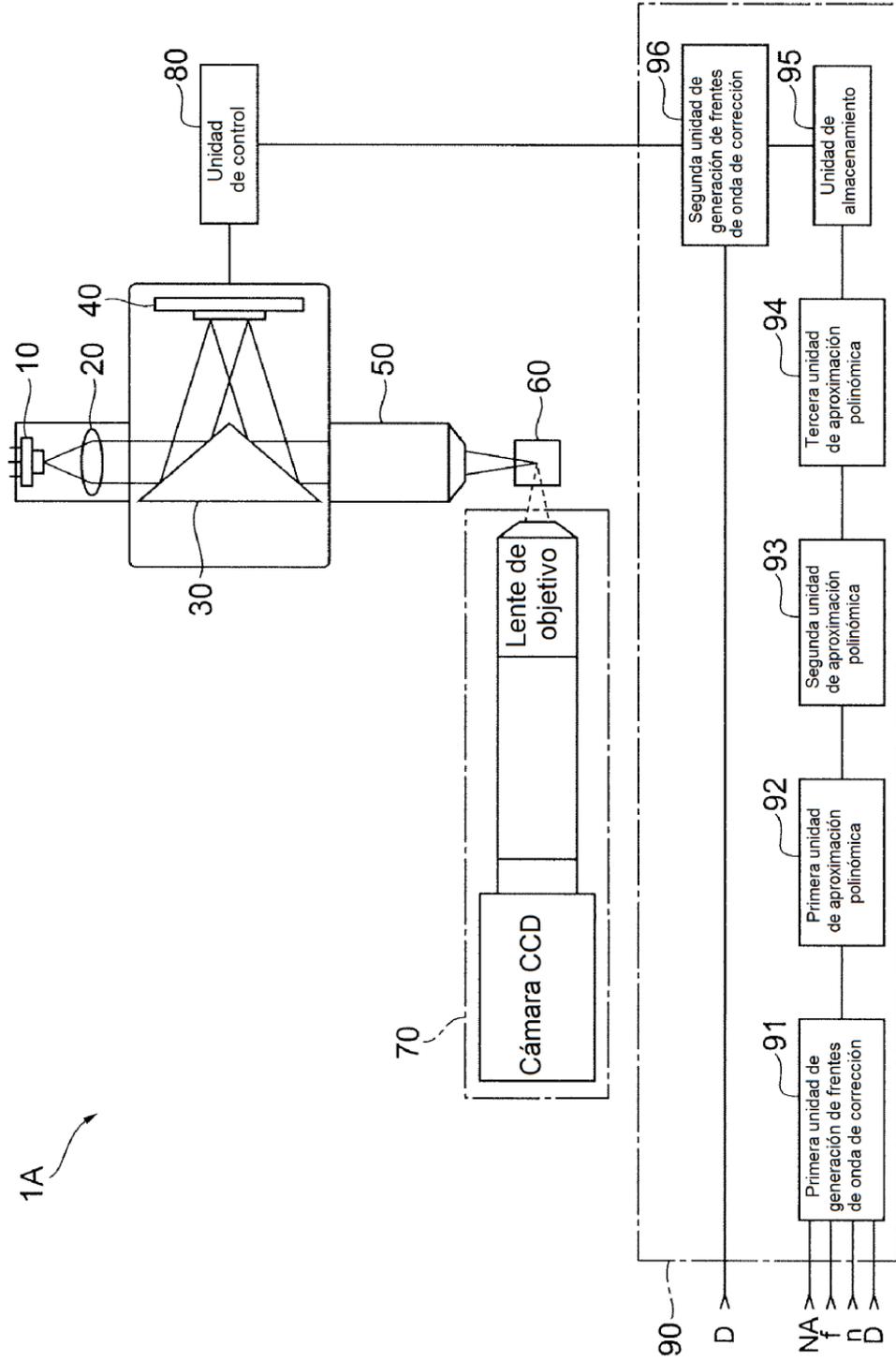


Fig.10

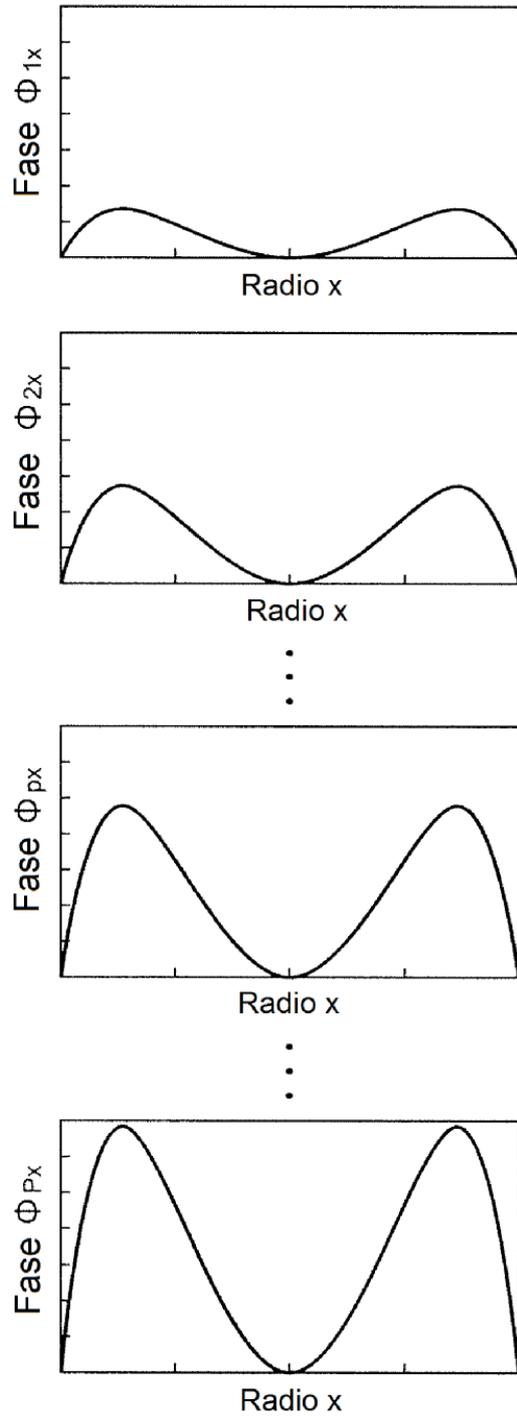


Fig.11

$$\begin{array}{l}
 \Phi'_{1x} = a_{11i} * x + a_{21i} * x^2 \dots + a_{q1} * x^q \dots + a_{Q1} * x^Q \\
 \Phi'_{2x} = a_{12i} * x + a_{22i} * x^2 \dots + a_{q2} * x^q \dots + a_{Q2} * x^Q \\
 \vdots \\
 \Phi'_{px} = a_{1pi} * x + a_{2pi} * x^2 \dots + a_{qpi} * x^q \dots + a_{Qpi} * x^Q \\
 \vdots \\
 \Phi'_{Px} = a_{1Pi} * x + a_{2Pi} * x^2 \dots + a_{qPi} * x^q \dots + a_{QPi} * x^Q
 \end{array}$$

Fig.12

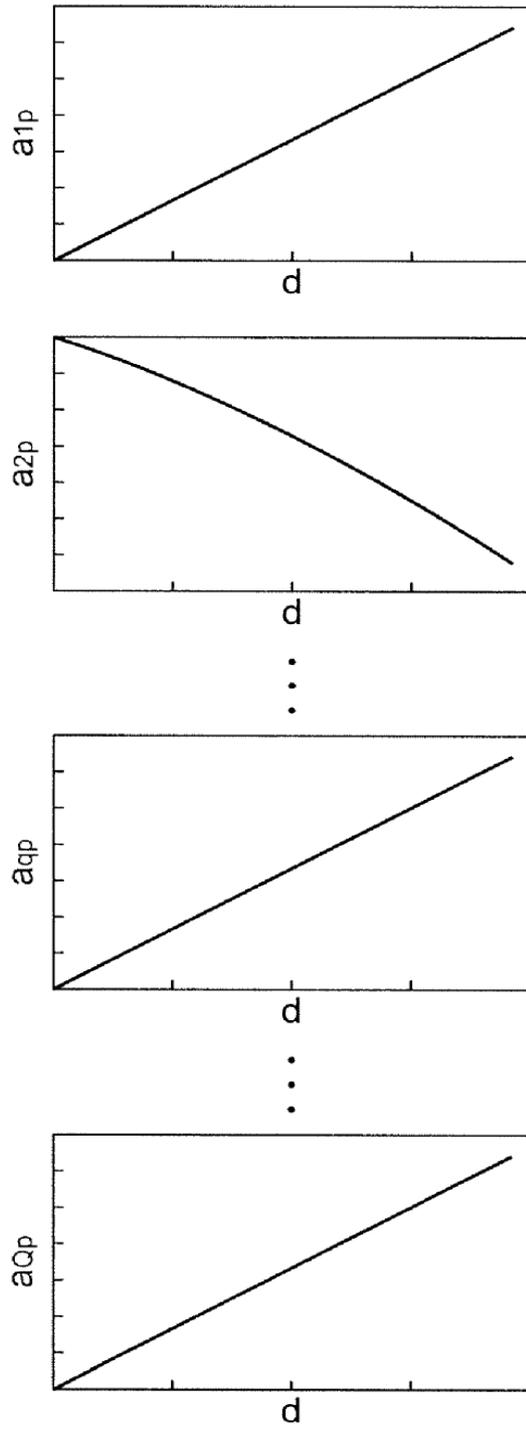


Fig.13

$$\begin{aligned}
 A_1 &= b_{11} * d + b_{21} * d^2 \dots + b_{k1} * d^k \dots + b_{K1} * d^K \\
 A_2 &= b_{12} * d + b_{22} * d^2 \dots + b_{k2} * d^k \dots + b_{K2} * d^K \\
 &\quad \vdots \\
 A_q &= b_{1q} * d + b_{2q} * d^2 \dots + b_{kq} * d^k \dots + b_{Kq} * d^K \\
 &\quad \vdots \\
 A_Q &= b_{1Q} * d + b_{2Q} * d^2 \dots + b_{kQ} * d^k \dots + b_{KQ} * d^K
 \end{aligned}$$

Fig.14

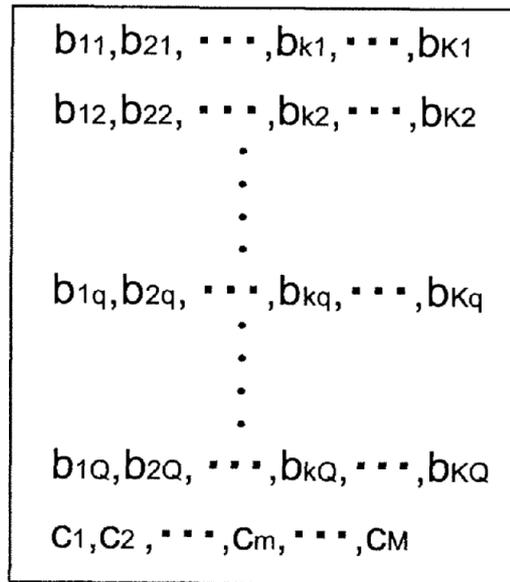


Fig.15

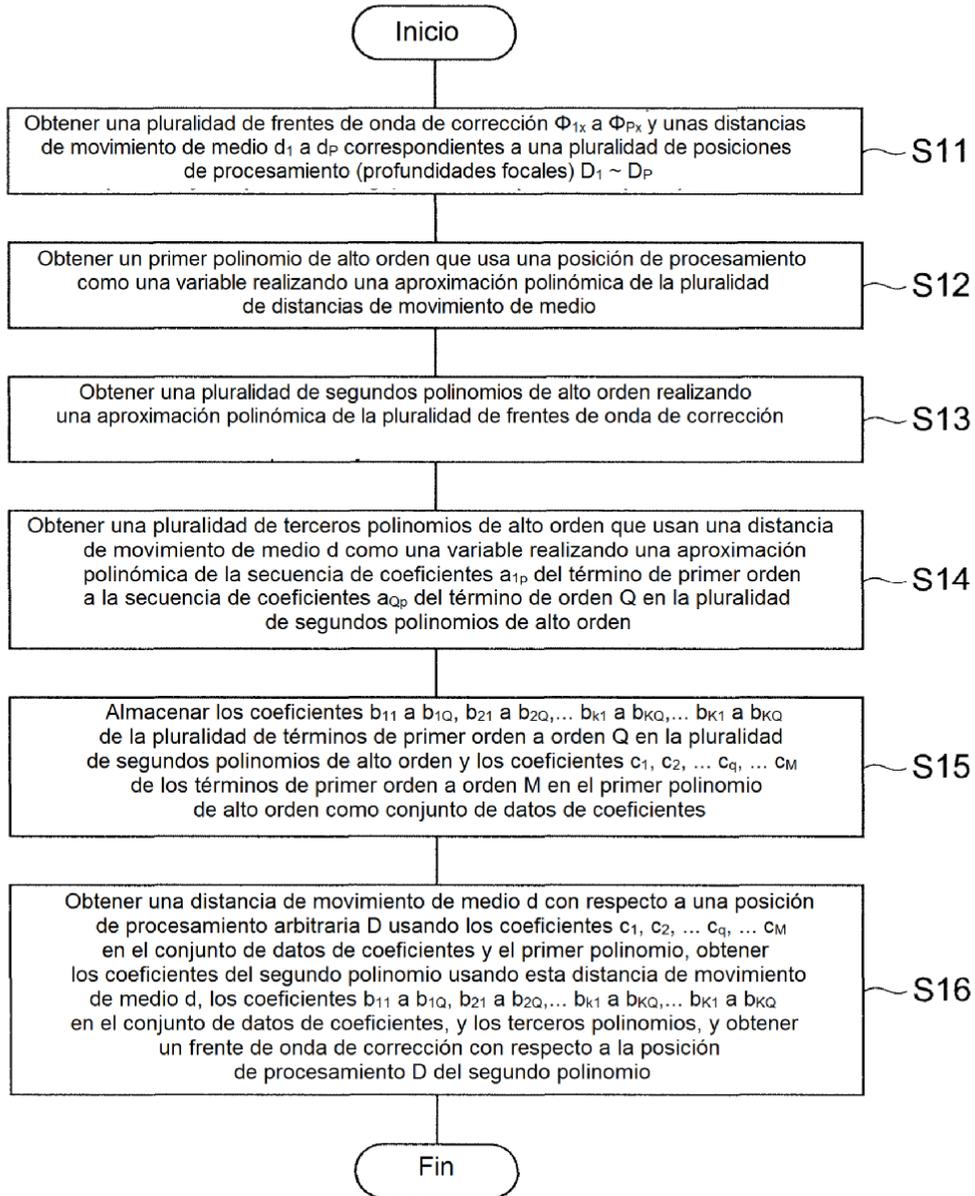


Fig.16

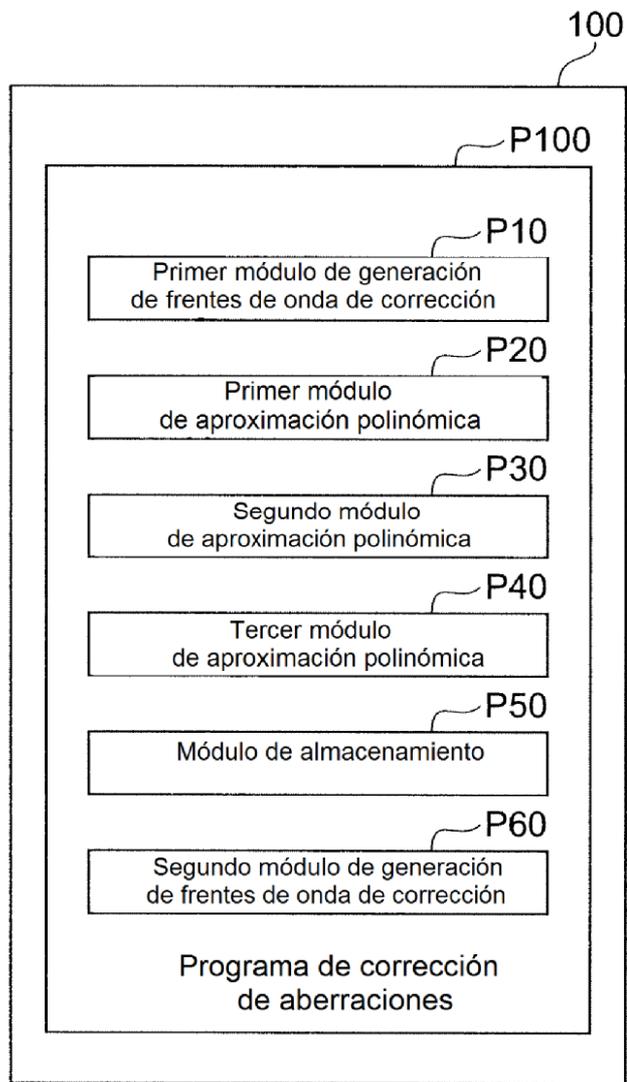


Fig.17

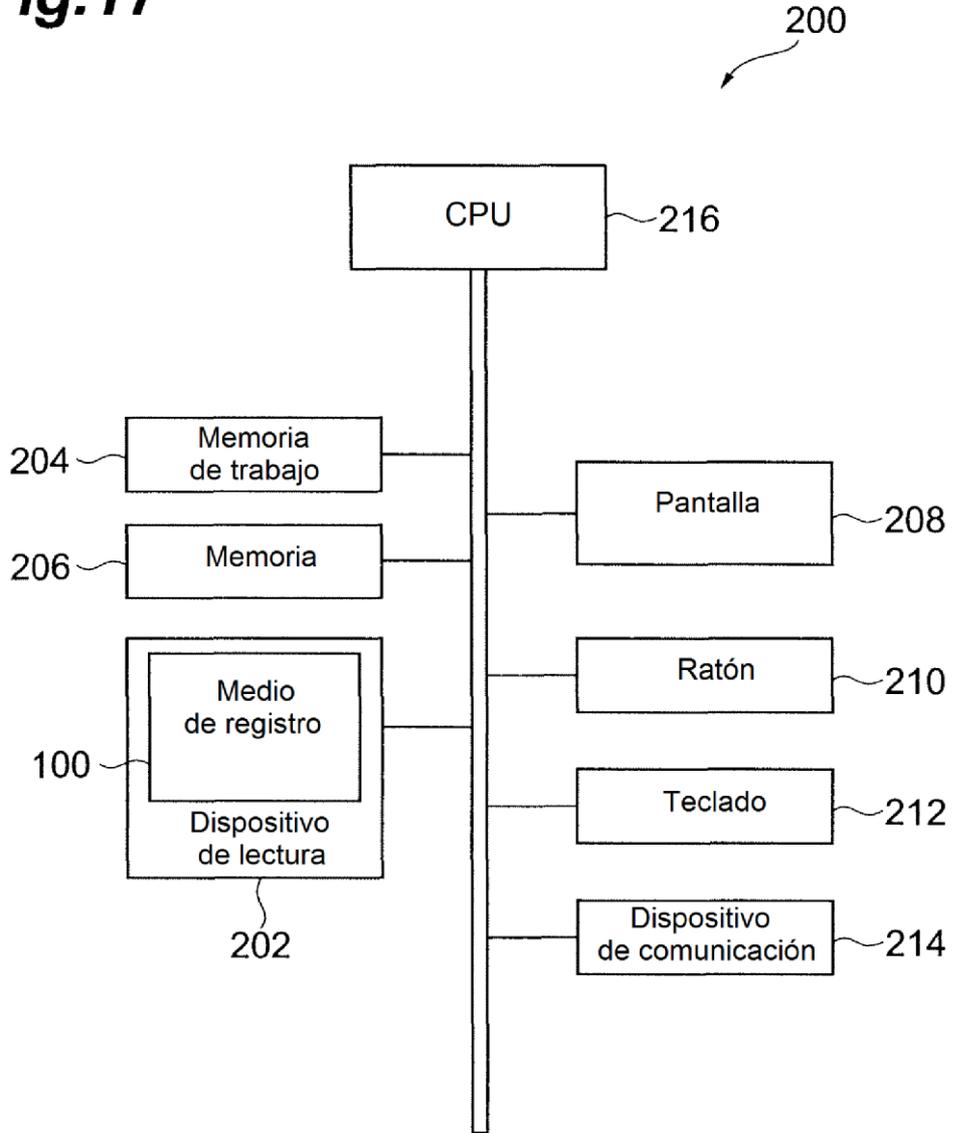


Fig.18

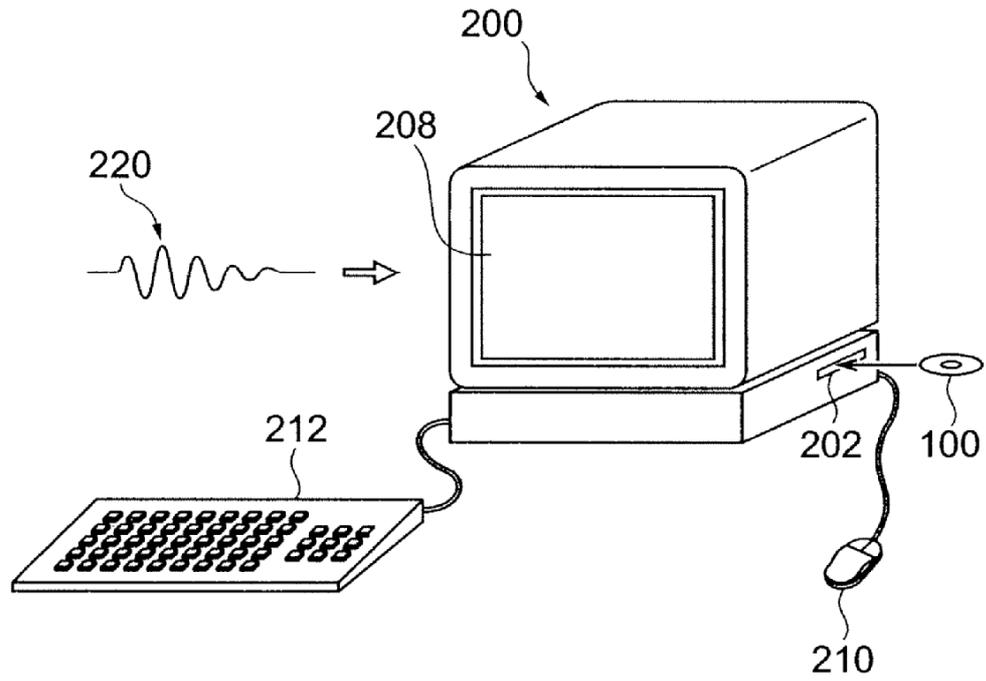


Fig.19

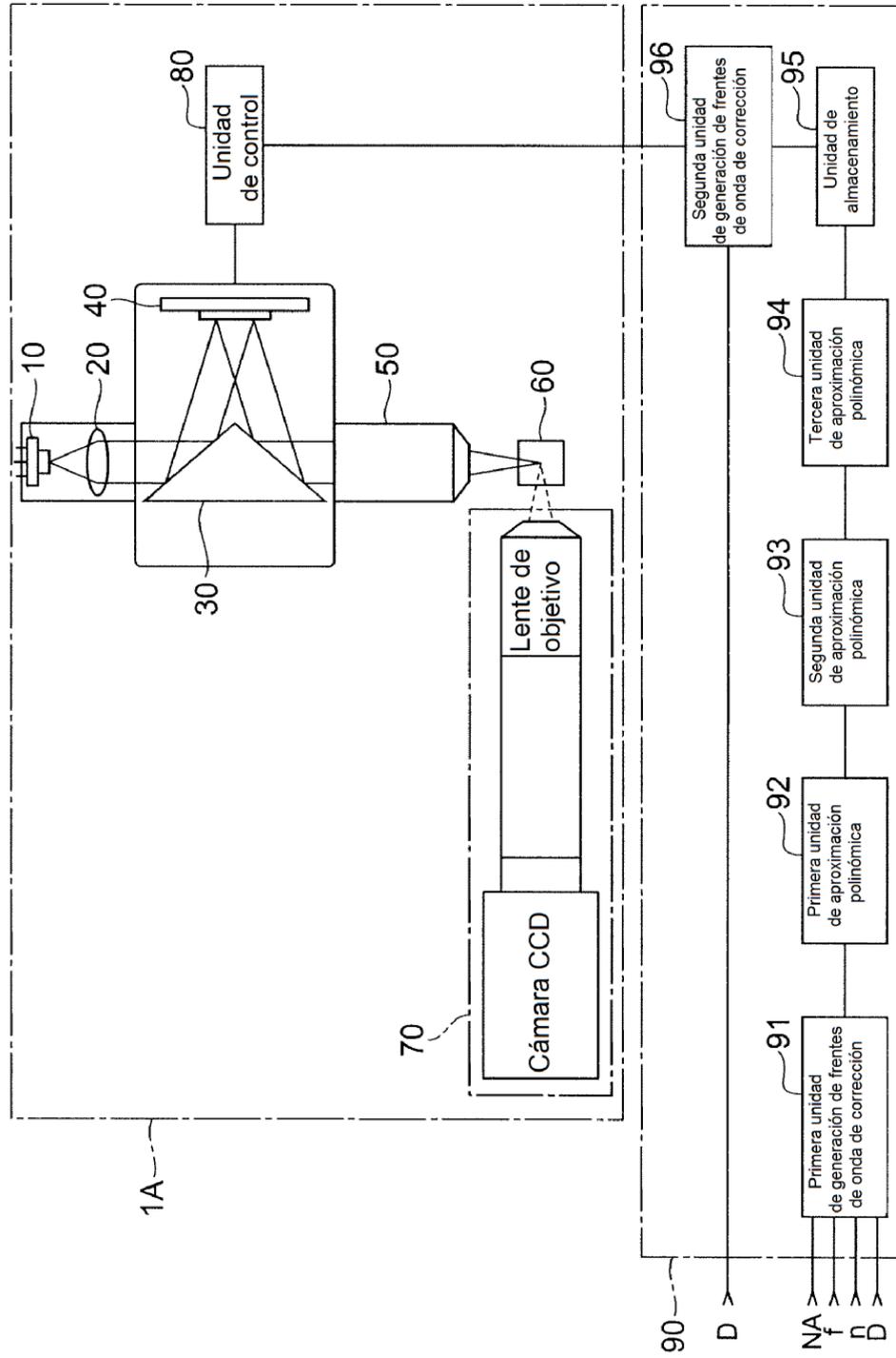


Fig. 20

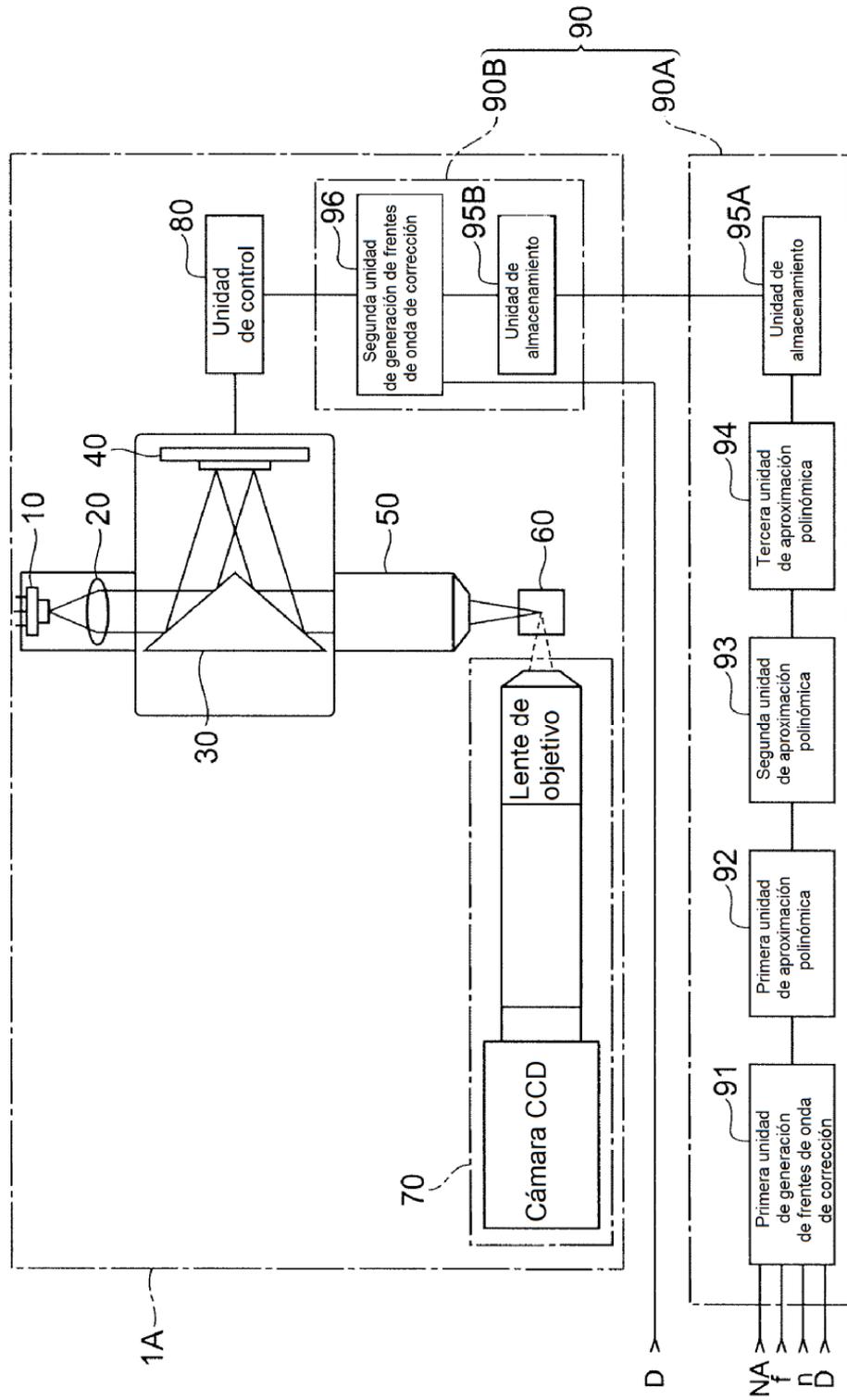


Fig.21

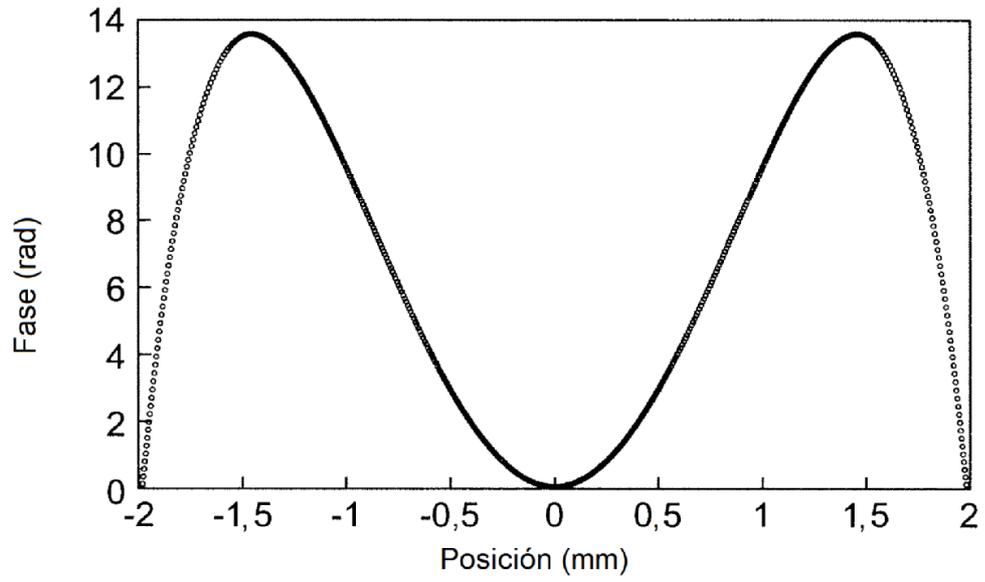
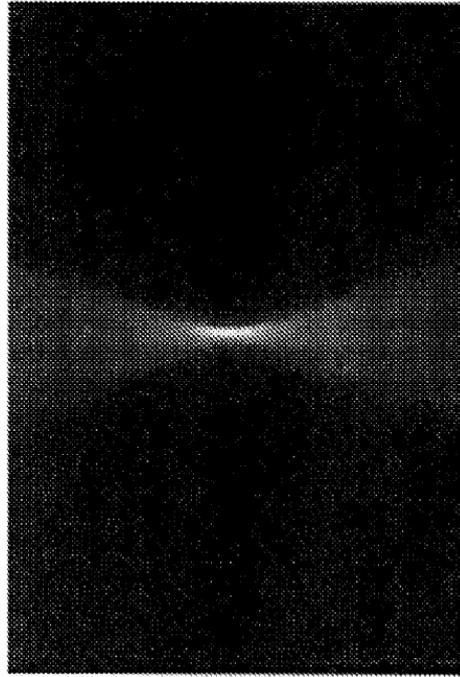
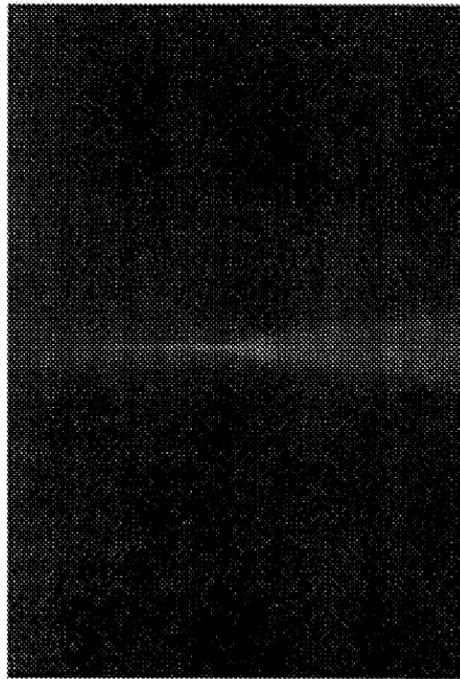


Fig. 22



(b)



(a)

Fig.23

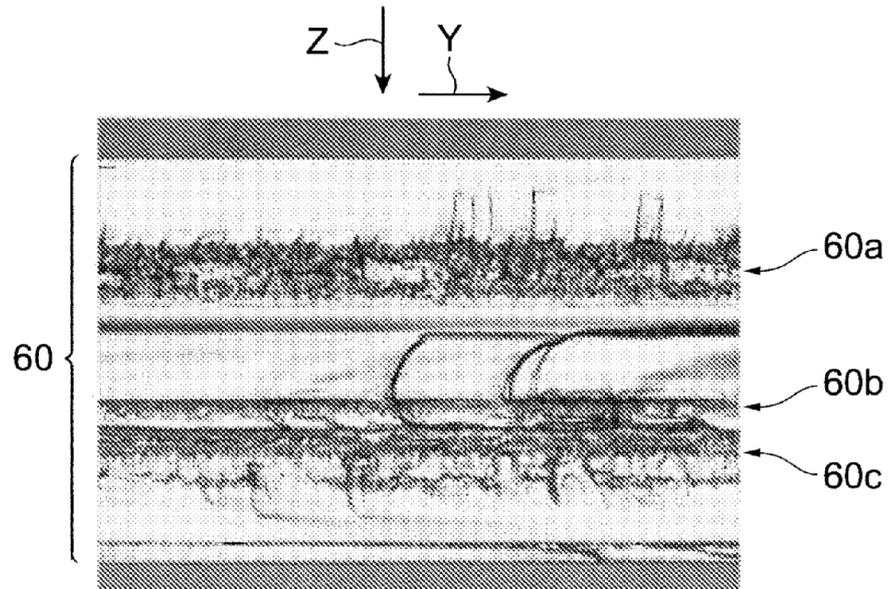


Fig.24

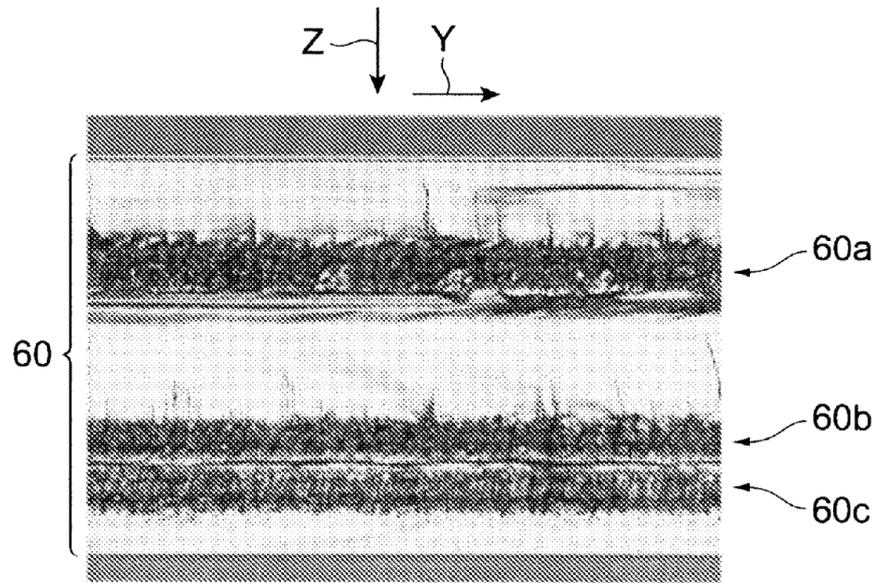


Fig.25

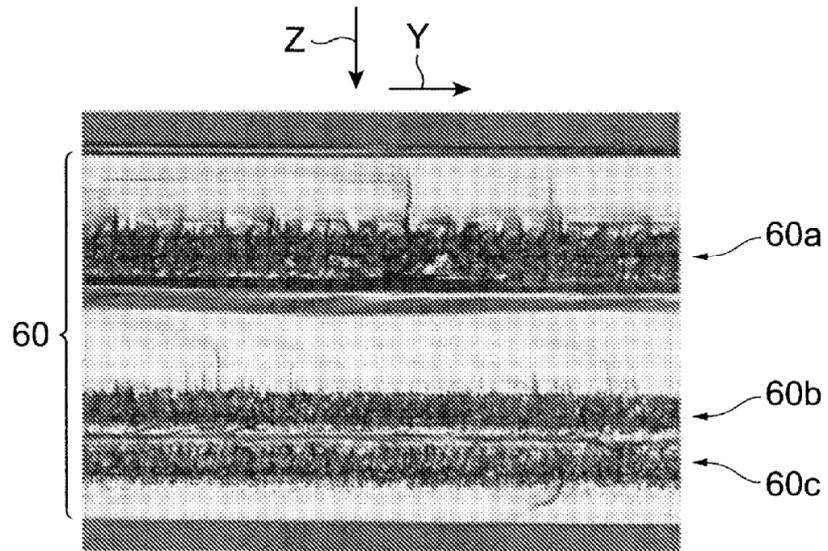


Fig.26

