

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 805 336**

51 Int. Cl.:

| | |
|-------------------|-----------|
| G02F 1/01 | (2006.01) |
| G02F 1/13 | (2006.01) |
| G02F 1/133 | (2006.01) |
| G05B 15/02 | (2006.01) |
| G06F 17/14 | (2006.01) |
| H01S 3/00 | (2006.01) |

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

- 86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **11.05.2016 PCT/JP2016/064041**
- 87 Fecha y número de publicación internacional: **24.11.2016 WO16185979**
- 96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **11.05.2016 E 16796372 (7)**
- 97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **03.06.2020 EP 3296804**

54 Título: **Dispositivo de cálculo de patrón de modulación, dispositivo de control de luz, método de cálculo de patrón de modulación, programa de cálculo de patrón de modulación y medio de almacenamiento**

30 Prioridad:

15.05.2015 JP 2015100087

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
11.02.2021

73 Titular/es:

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

72 Inventor/es:

**WATANABE, KOYO;
INOUE, TAKASHI y
TAKAHASHI, KOJI**

74 Agente/Representante:

VALLEJO LÓPEZ, Juan Pedro

ES 2 805 336 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

Dispositivo de cálculo de patrón de modulación, dispositivo de control de luz, método de cálculo de patrón de modulación, programa de cálculo de patrón de modulación y medio de almacenamiento

5

Campo técnico

Un aspecto de la presente invención se refiere a un aparato de cálculo de patrón de modulación, un aparato de control de luz, un método de cálculo de patrón de modulación, un programa de cálculo de patrón de modulación, y un medio legible por ordenador.

10

Antecedentes de la técnica

El documento no de patente 1 desvela tecnología para modular un espectro de fase usando un modulador de luz espacial (SLM) para conformar un pulso de luz. En este documento, se calcula un espectro de fase para obtener una forma de onda de pulso de luz deseada usando un método de Fourier iterativo (algoritmo de transformada de Fourier iterativo: IFTA). Además, el Documento no de Patente 2 desvela un método de Fourier iterativo modificado para evitar que una solución conduzca a una solución local, en modulación de espectro de fase para conformar un pulso de luz

15

El Documento 2 de la bibliografía no de patente describe un enfoque adaptativo para exploración uniforme en microscopía de múltiples fotones multifocal con un modulador de luz espacial.

20

El documento D1 de bibliografía de patente desvela un aparato de detección de fluorescencia para detectar fluorescencia generada por modulación de la luz de excitación "L1" y enfoque de luz modulada "L2". El aparato incluye una fuente de luz de excitación, un modulador de luz espacial, una unidad de control, una unidad de corrección, un sistema óptico de enfoque y un detector de fluorescencia. El modulador de luz espacial es de un tipo de modulación de fase/intensidad, y está configurado para introducir la luz de excitación L1 desde la fuente de luz de excitación y emitir la luz de fase modulada L2 resultante de la modulación de fase de la luz de excitación L1. El modulador de luz espacial implementa la modulación de fase de la luz de excitación L1 con uso de un holograma para modular la fase de la luz de excitación L1 en cada uno de una pluralidad de píxeles en matrices de dos dimensiones, y emite la luz de fase modulada L2 después de la modulación de fase. El holograma usado en este modulador de luz espacial es un Holograma Generado por Ordenador (CGH) obtenido por cálculo numérico, por ejemplo, mediante la transformada de Fourier. La unidad de control permite la modulación de la luz de excitación L1, mediante el CGH, en cada uno de los dos píxeles en matrices de dos dimensiones y que permite el enfoque del sistema óptico para enfocar la luz modulada L2 en una pluralidad de posiciones de enfoque.

25

30

35

Lista de citas

Bibliografía no de patente

Documento no de patente 1: M. Hacker, G Stobrawa, T. Feurer, "Iterative Fourier transform algorithm for phase-only pulse shaping", Optics Express, Vol. 9, N.º 4, págs. 191-199, 13 de agosto de 2001

Documento no de patente 2: Olivier Ripoll, Ville Kettunen, Hans Peter Herzig, "Review of iterative Fourier-transform algorithms for beam shaping applications", Optical Engineering, Vol. 43, N.º 11, págs. 2549-2556, noviembre de 2004

40

45

Documento de bibliografía no de patente 2: Naoya Matsumoto ET AL: "An adaptive approach for uniform scanning in multifocal multiphoton microscopy with a spatial light modulator", Optics Express, vol. 22, n.º 1, 13 de enero de 2014 (13-01-2014), páginas 633-645

50

Bibliografía de patente

Documento de bibliografía de patente D1: Documento WO 2014/136784 A1 (HAMAMATSU PHOTONICS KK [JP]) 12 de septiembre de 2014

55

Compendio de la invención

Problema técnico

Por ejemplo, como tecnología para control de una forma de onda temporal de diversas luces tales como luz de pulso ultracorto, es conocida la tecnología para modular un espectro de fase y un espectro de intensidad de un pulso de luz por el SLM. En esta tecnología, se presenta un patrón de modulación para proporcionar, a la luz, un espectro de fase y un espectro de intensidad (o uno de ellos) para proporcionar la forma de onda temporal de la luz cerca de una forma de onda deseada en el SLM. En este caso, para realizar fácilmente una forma de onda temporal arbitraria, es deseable obtener estos espectros mediante cálculo.

60

65

Cuando se obtienen estos espectros mediante el cálculo, se usa el método de Fourier iterativo como se describe en

el Documento no de patente 1, por ejemplo. Sin embargo, en el método de Fourier iterativo, existe un problema en que la solución puede conducir a una solución local, y no se obtiene necesariamente una solución óptima.

5 En vista del problema, en el Documento de no patente 2, a una diferencia entre una forma de onda deseada y una forma de onda después de que se multiplica una transformada de Fourier por un coeficiente predeterminado, se añade un resultado a la forma de onda deseada, y se realiza una operación de Fourier iterativa. Sin embargo, incluso en este método, por ejemplo, cuando la forma de onda deseada y la forma de onda después de la transformada de Fourier son enormemente diferentes entre sí, la solución puede conducir a la solución local.

10 Un objetivo de un aspecto de la presente invención es proporcionar un aparato de cálculo de patrón de modulación, un aparato de control de luz, un método de cálculo de patrón de modulación, un programa de cálculo de patrón de modulación, y un medio legible por ordenador que pueden evitar que una solución conduzca a una solución local durante una operación de Fourier iterativa y calcular de manera precisa un espectro de intensidad o un espectro de fase para proporcionar una forma de onda temporal de luz cerca de una forma de onda deseada.

15 **Solución al problema**

Para resolver el problema anterior, un aparato de cálculo de patrón de modulación de acuerdo con un aspecto de la presente invención es un aparato para calcular un patrón de modulación presentado en un modulador de luz espacial para modular al menos uno de un espectro de intensidad y un espectro de fase de luz de entrada para proporcionar una forma de onda de intensidad temporal de luz cerca de una forma de onda deseada, y el aparato incluye una unidad de transformada de Fourier iterativa para realizar una transformada de Fourier en una función de forma de onda en un dominio de frecuencia que incluye una función de espectro de intensidad y una función de espectro de fase, realizar una primera sustitución de una función de forma de onda de intensidad temporal basándose en la forma de onda deseada en un dominio de tiempo después de la transformada de Fourier y a continuación realizar una transformada de Fourier inversa, y realizar una segunda sustitución para restringir una función de espectro de la función de espectro de intensidad y la función de espectro de fase en el dominio de la frecuencia después de la transformada de Fourier inversa, y una unidad de cálculo de patrón de modulación para calcular el patrón de modulación basándose en la otra salida de función de espectro de la unidad de transformada de Fourier iterativa. La unidad de transformada de Fourier iterativa realiza la primera sustitución usando un resultado de multiplicación de una función que representa la forma de onda deseada por un coeficiente. El coeficiente tiene un valor en el que una diferencia entre la función después de la multiplicación y la función de forma de onda de intensidad temporal después de la transformada de Fourier es menor que una diferencia antes de la multiplicación del coeficiente.

35 Además, un método de cálculo de patrón de modulación de acuerdo con un aspecto de la presente invención es un método para calcular un patrón de modulación presentado en un modulador de luz espacial para modular al menos uno de un espectro de intensidad y un espectro de fase de luz de entrada para proporcionar una forma de onda de intensidad temporal de luz cerca de una forma de onda deseada, y el método incluye una etapa (etapa de transformada de Fourier) de realización de una transformada de Fourier en una función de forma de onda en un dominio de frecuencia que incluye una función de espectro de intensidad y una función de espectro de fase, una etapa (etapa de transformada de Fourier inversa) de realización de una primera sustitución de una función de forma de onda de intensidad temporal basándose en la forma de onda deseada en un dominio de tiempo después de la transformada de Fourier y a continuación realizar una transformada de Fourier inversa, una etapa (etapa de sustitución) de realización de una segunda sustitución para restringir una función de espectro de la función de espectro de intensidad y la función de espectro de fase en el dominio de la frecuencia después de la transformada de Fourier inversa, y una etapa (etapa de cálculo de patrón de modulación) de cálculo del patrón de modulación basándose en la otra salida de función de espectro en la etapa de realización de la segunda sustitución. En la etapa de realización de la transformada de Fourier inversa, la primera sustitución se realiza usando un resultado de multiplicación de una función que representa la forma de onda deseada por un coeficiente. El coeficiente tiene un valor en el que una diferencia entre la función después de la multiplicación y la función de forma de onda de intensidad temporal después de la transformada de Fourier es menor que una diferencia antes de la multiplicación del coeficiente

Además, un programa de cálculo de patrón de modulación de acuerdo con un aspecto de la presente invención es un programa para hacer que un ordenador calcule un patrón de modulación presentado en un modulador de luz espacial para modular al menos uno de un espectro de intensidad y un espectro de fase de luz de entrada para proporcionar una forma de onda de intensidad temporal de luz cerca de una forma de onda deseada, y el programa hace que el ordenador ejecute una etapa (etapa de transformada de Fourier) de realización de una transformada de Fourier en una función de forma de onda en un dominio de frecuencia que incluye una función de espectro de intensidad y una función de espectro de fase, una etapa (etapa de transformada de Fourier inversa) de realización de una primera sustitución de una función de forma de onda de intensidad temporal basándose en la forma de onda deseada en un dominio de tiempo después de la transformada de Fourier y a continuación realizar una transformada de Fourier inversa, una etapa (etapa de sustitución) de realización de una segunda sustitución para restringir una función de espectro de la función de espectro de intensidad y la función de espectro de fase en el dominio de la frecuencia después de la transformada de Fourier inversa, y una etapa (etapa de cálculo de patrón de modulación) de cálculo del patrón de modulación basándose en la otra salida de función de espectro en la etapa de realización de la segunda sustitución. En la etapa de realización de la transformada de Fourier inversa, la primera sustitución se realiza usando

un resultado de multiplicación de una función que representa la forma de onda deseada por un coeficiente. El coeficiente tiene un valor en el que una diferencia entre la función después de la multiplicación y la función de forma de onda de intensidad temporal después de la transformada de Fourier es menor que una diferencia antes de la multiplicación del coeficiente.

5 En el aparato, el método, y el programa anteriores, se calcula el espectro de intensidad o el espectro de fase para proporcionar la forma de onda de intensidad temporal de la luz cerca de la forma de onda deseada en la unidad de transformada de Fourier iterativa o en la etapa de sustitución. En ese momento, como se ha descrito anteriormente, en un método de Fourier iterativo normal, una solución puede conducir a una solución local y no se obtiene necesariamente una solución óptima. Por lo tanto, en el aparato y el método anteriores, cuando se realiza la sustitución basándose en la forma de onda deseada en la función de forma de onda de intensidad temporal en el dominio del tiempo obtenida por la transformada de Fourier, se usa el resultado de multiplicación de la función que representa la forma de onda deseada por el coeficiente. El coeficiente tiene el valor en el que la diferencia entre la función después de la multiplicación y la función de forma de onda de intensidad temporal después de la transformada de Fourier es menor que la diferencia antes de la multiplicación del coeficiente. Como resultado, puesto que se reduce una diferencia entre la función antes de la sustitución (es decir, la función de forma de onda de intensidad temporal después de la transformada de Fourier) y la función después de la sustitución basándose en la forma de onda deseada, la solución se evita que conduzca a la solución local. Por lo tanto, de acuerdo con el aparato y el método anteriores, puede calcularse de manera precisa el espectro de intensidad o el espectro de fase para proporcionar la forma de onda temporal de la luz cerca de la forma de onda deseada.

Además, un aparato de control de luz de acuerdo con un aspecto de la presente invención incluye el aparato de cálculo de patrón de modulación que tiene la configuración anterior, una fuente de luz para emitir la luz de entrada, un elemento dispersivo para dispersar espectralmente la luz de entrada, un modulador de luz espacial para modular al menos uno de un espectro de intensidad y un espectro de fase de la luz de entrada después de la luz de dispersión y emisión modulada, y un sistema óptico para enfocar la luz modulada. El modulador de luz espacial presenta el patrón de modulación calculado por el aparato de cálculo de patrón de modulación.

De acuerdo con este aparato, se incluye el aparato de cálculo de patrón de modulación que tiene la configuración anterior, de modo que la solución puede evitarse que conduzca a la solución local durante una operación de Fourier iterativa y puede calcularse de manera precisa el espectro de intensidad o el espectro de fase para proporcionar la forma de onda temporal de la luz cerca de la forma de onda deseada.

Efectos ventajosos de la invención

De acuerdo con un aparato de cálculo de patrón de modulación, un aparato de control de luz, un método de cálculo de patrón de modulación, un programa de cálculo de patrón de modulación, y un medio legible por ordenador de acuerdo con un aspecto de la presente invención, una solución puede evitarse que conduzca a una solución local durante una operación de Fourier iterativa, y puede calcularse de manera precisa un espectro de intensidad o un espectro de fase para proporcionar una forma de onda temporal de luz cerca de una forma de onda deseada.

Breve descripción de los dibujos

[FIG. 1] La Figura 1 es un diagrama que ilustra esquemáticamente una configuración de un aparato de control de luz de acuerdo con una realización.

[FIG. 2] La Figura 2 es un diagrama que ilustra un plano de modulación de un SLM.

[FIG. 3] La Figura 3 incluye (a) un gráfico que ilustra un ejemplo de una combinación de un cierto espectro de fase y un cierto espectro de intensidad, y (b) un gráfico que ilustra una forma de onda de intensidad temporal de luz de salida realizada por la combinación del espectro de fase y el espectro de intensidad ilustrado en (a) en la Figura 3.

[FIG. 4] La Figura 4 es un diagrama que ilustra un procedimiento de cálculo de un espectro de fase usando un método de Fourier iterativo normal, como un primer ejemplo comparativo.

[FIG. 5] La Figura 5 es un diagrama que ilustra un procedimiento de cálculo de un espectro de fase usando un método de Fourier iterativo descrito en el Documento no de patente 2, como un segundo ejemplo comparativo.

[FIG. 6] La Figura 6 es un diagrama que ilustra un procedimiento de cálculo de un espectro de fase usando un método de Fourier iterativo mejorado en una realización.

[FIG. 7] La Figura 7 es un diagrama que ilustra un procedimiento de cálculo en una unidad de transformada de Fourier iterativa de una unidad de diseño de espectro de intensidad.

[FIG. 8] La Figura 8 es un diagrama de flujo que ilustra un método de cálculo de patrón de modulación.

[FIG. 9] La Figura 9 es un gráfico que ilustra pérdida de intensidad y precisión de forma de onda con control de forma de onda.

[FIG. 10] La Figura 10 es un diagrama que ilustra una forma de onda temporal de luz de salida y una forma de onda deseada.

[FIG. 11] La Figura 11 es un diagrama que ilustra una forma de onda temporal de luz de salida y una forma de onda deseada.

[FIG. 12] La Figura 12 es un diagrama que ilustra una forma de onda temporal de luz de salida y una forma de onda deseada.

[FIG. 13] La Figura 13 es un diagrama que ilustra una forma de onda temporal de luz de salida y una forma de onda deseada.

[FIG. 14] La Figura 14 es un gráfico que ilustra pérdida de intensidad y precisión de forma de onda con control de forma de onda.

5

Descripción de las realizaciones

En lo sucesivo, se describirán en detalle realizaciones de un aparato de cálculo de patrón de modulación, un aparato de control de luz, un método de cálculo de patrón de modulación, y un programa de cálculo de patrón de modulación de acuerdo con un aspecto de la presente invención con referencia a los dibujos adjuntos. En la descripción de los dibujos, los mismos elementos se indicarán por los mismos signos de referencia, sin descripción redundante.

10

La Figura 1 es un diagrama que ilustra esquemáticamente una configuración de un aparato de control de luz 1A de acuerdo con una realización de la presente invención. El aparato de control de luz 1A de acuerdo con la presente realización genera, de luz de entrada La, luz de salida Ld que tiene una forma de onda de intensidad temporal arbitraria diferente de la de la luz de entrada La. Como se ilustra en la Figura 1, el aparato de control de luz 1A incluye una fuente de luz 2, un sistema óptico 10, y un aparato de cálculo de patrón de modulación 20.

15

La fuente de luz 2 emite la luz de entrada La introducida al sistema óptico 10. La fuente de luz 2 es una fuente de luz de láser tal como una fuente de luz de láser de estado sólido, por ejemplo, y la luz de entrada La es luz de pulso coherente, por ejemplo.

20

El sistema óptico 10 tiene un elemento dispersivo 12, un espejo curvo 14, y un SLM 16. El elemento dispersivo 12 está acoplado ópticamente a la fuente de luz 2, y el SLM 16 está acoplado ópticamente al elemento dispersivo 12 mediante el espejo curvo 14. El elemento dispersivo 12 dispersa espectralmente la luz de entrada La para cada componente de longitud de onda. El elemento dispersivo 12 tiene una rejilla de difracción formada en una superficie de placa, por ejemplo. Además, el elemento dispersivo 12 puede ser un prisma. La luz de entrada La es incidente de manera oblicua en la rejilla de difracción, y se dispersa espectralmente en una pluralidad de componentes de longitud de onda. La luz Lb que incluye la pluralidad de componentes de longitud de onda alcanza el espejo curvo 14. La luz Lb se refleja por el espejo curvo 14 y alcanza el SLM 16.

25

30

El SLM 16 realiza simultáneamente modulación de fase y modulación de intensidad de la luz Lb para generar la luz de salida Ld que tiene una forma de onda de intensidad temporal arbitraria diferente de la forma de onda de la luz de entrada La. El SLM 16 es de un tipo de modulación de fase, por ejemplo. En un ejemplo, el SLM 16 es de un tipo LCOS (cristal líquido en silicio).

35

La Figura 2 es un diagrama que ilustra un plano de modulación 17 del SLM 16. Como se ilustra en la Figura 2, en el plano de modulación 17, está dispuesta una pluralidad de regiones de modulación 17a a lo largo de una cierta dirección A, y cada región de modulación 17a se extiende en una dirección B que intersecta con la dirección A. La dirección A es una dirección de dispersión por el elemento dispersivo 12. Por lo tanto, cada uno de los componentes de longitud de onda espectralmente dispersados es incidente en cada una de la pluralidad de regiones de modulación 17a. El SLM 16 modula una fase y una intensidad de cada componente de longitud de onda incidente en cada región de modulación 17a. Puesto que el SLM 16 en la presente realización es del tipo de modulación de fase, la modulación de intensidad se realiza por un patrón de fase (imagen de fase) presentado en el plano de modulación 17.

40

45

La luz modulada Lc que incluye los respectivos componentes de longitud de onda modulados por el SLM 16 se refleja de nuevo por el espejo curvo 14 y alcanza el elemento dispersivo 12. En este momento, el espejo curvo 14 funciona como un sistema óptico de enfoque para enfocar la luz modulada Lc. Además, el elemento dispersivo 12 funciona como un sistema óptico de combinación y combina los respectivos componentes de longitud de onda después de la modulación. Es decir, por el espejo curvo 14 y el elemento dispersivo 12, la pluralidad de componentes de longitud de onda de la luz modulada Lc se enfocan y combinan entre sí y se vuelven la luz de salida Ld. La luz de salida Ld es luz que tiene una forma de onda de intensidad temporal deseada diferente de la forma de onda de la luz de entrada La.

50

El aparato de cálculo de patrón de modulación 20 es un ordenador que tiene un circuito de operación tal como un procesador. El aparato de cálculo de patrón de modulación 20 está eléctricamente acoplado al SLM 16, calcula un patrón de modulación de fase para proporcionar la forma de onda de intensidad temporal de la luz de salida Ld cerca de una forma de onda deseada, y proporciona una señal de control que incluye el patrón de modulación de fase al SLM 16.

55

El aparato de cálculo de patrón de modulación 20 de la presente realización presenta, en el SLM 16, un patrón de fase que incluye un patrón de fase para modulación de fase que proporciona un espectro de fase para obtener la forma de onda deseada a la luz de salida Ld y un patrón de fase para modulación de intensidad que proporciona un espectro de intensidad para obtener la forma de onda deseada a la luz de salida Ld. Para este fin, el aparato de cálculo de patrón de modulación 20 incluye una unidad de entrada de forma de onda arbitraria 21, una unidad de diseño de espectro de fase 22, una unidad de diseño de espectro de intensidad 23, y una unidad de cálculo de patrón de modulación 24. Es decir, el circuito de operación (por ejemplo, el procesador del ordenador) proporcionado en el

60

65

aparato de cálculo de patrón de modulación 20 realiza una función de la unidad de entrada de forma de onda arbitraria 21, una función de la unidad de diseño de espectro de fase 22, una función de la unidad de diseño de espectro de intensidad 23, y una función de la unidad de cálculo de patrón de modulación 24. Las respectivas funciones pueden realizarse por el mismo circuito de operación o pueden realizarse por diferentes circuitos de operación.

5 El circuito de operación (por ejemplo, el procesador del ordenador) puede realizar las respectivas funciones anteriores por un programa de cálculo de patrón de modulación. Por lo tanto, el programa de cálculo de patrón de modulación opera el circuito de operación (por ejemplo, el procesador del ordenador) como la unidad de entrada de forma de onda arbitraria 21, la unidad de diseño de espectro de fase 22, la unidad de diseño de espectro de intensidad 23, y la unidad de cálculo de patrón de modulación 24 en el aparato de cálculo de patrón de modulación 20. El programa de cálculo de patrón de modulación se almacena en un dispositivo de almacenamiento (medio legible por ordenador no transitorio) dentro o fuera del ordenador.

15 La unidad de entrada de forma de onda arbitraria 21 recibe la forma de onda de intensidad temporal deseada introducida de un operador. El operador introduce información (por ejemplo, una anchura de pulso) en la forma de onda de intensidad temporal deseada a la unidad de entrada de forma de onda arbitraria 21.

20 La información en la forma de onda de intensidad temporal deseada se proporciona a la unidad de diseño de espectro de fase 22 y la unidad de diseño de espectro de intensidad 23. La unidad de diseño de espectro de fase 22 calcula un espectro de fase correspondiente de la luz de salida Ld, basándose en la forma de onda de intensidad temporal. La unidad de diseño de espectro de intensidad 23 calcula un espectro de intensidad correspondiente de la luz de salida Ld, basándose en la forma de onda de intensidad temporal.

25 La unidad de cálculo de patrón de modulación 24 es un ejemplo de una unidad de cálculo de patrón de modulación de acuerdo con un aspecto de la presente invención y calcula un patrón de modulación de fase para proporcionar el espectro de fase obtenido en la unidad de diseño de espectro de fase 22 y el espectro de intensidad obtenido en la unidad de diseño de espectro de intensidad 23 a la luz de salida Ld. Además, se proporciona una señal de control que incluye el patrón de modulación de fase calculado al SLM 16.

30 En este punto, se describe en detalle un método de cálculo de un espectro de fase y un espectro de intensidad que corresponde a una forma de onda de intensidad temporal deseada. (a) en la Figura 3 es un gráfico que ilustra un ejemplo de una combinación de un cierto espectro de fase G11 y un cierto espectro de intensidad G12. Además, (b) en la Figura 3 es un gráfico que ilustra una forma de onda de intensidad temporal de la luz de salida Ld realizada por la combinación del espectro de fase y el espectro de intensidad ilustrados en (a) en la Figura 3. En (a) en la Figura 3, un eje horizontal muestra una longitud de onda (nm), un eje vertical izquierdo muestra un valor de intensidad (unidad arbitraria) del espectro de intensidad, y un eje vertical derecho muestra un valor de fase (rad) del espectro de fase. Además, en (b) en la Figura 3, un eje horizontal muestra un tiempo (femtosegundo) y un eje vertical muestra una intensidad de luz (unidad arbitraria). Los espectros y la forma de onda ilustrados en la Figura 3 son ejemplos, y la forma de onda de intensidad temporal de la luz de salida Ld puede controlarse de diversas formas mediante combinaciones de diversos espectros de fase y espectros de intensidad.

45 La forma de onda de intensidad temporal deseada se representa como una función en un dominio de tiempo, y el espectro de fase y el espectro de intensidad se representan como funciones en un dominio de frecuencia. Por lo tanto, el espectro de fase y el espectro de intensidad que corresponden a la forma de onda de intensidad temporal deseada se obtienen por una transformada de Fourier iterativa basándose en la forma de onda de intensidad temporal deseada. En el método descrito a continuación, el espectro de fase y el espectro de intensidad se calculan usando un método de transformada de Fourier iterativo. Por lo tanto, como se ilustra en la Figura 1, la unidad de diseño de espectro de fase 22 tiene una unidad de transformada de Fourier iterativa 22a. Además, la unidad de diseño de espectro de intensidad 23 tiene una unidad de transformada de Fourier iterativa 23a.

50 Sin embargo, en un método de Fourier iterativo normal, como se ha descrito anteriormente, una solución puede conducir a una solución local y no se obtiene necesariamente una solución óptima. Además, existen problemas en que lleva demasiado tiempo converger el cálculo (es decir, el número de iteraciones aumenta) y la pérdida de intensidad aumenta. La Figura 4 ilustra un procedimiento de cálculo de un espectro de fase usando el método de Fourier iterativo normal, como un primer ejemplo comparativo para la presente realización.

60 En primer lugar, se prepara una función de espectro de intensidad inicial $A_0(\omega)$ y una función de espectro de fase $\psi_{n=0}(\omega)$ para que sean funciones de una frecuencia ω (número de proceso (1) en el dibujo). En un ejemplo, la función de espectro de intensidad $A_0(\omega)$ y la función de espectro de fase $\psi_{n=0}(\omega)$ representan el espectro de intensidad y el espectro de fase de la luz de entrada La, respectivamente. A continuación, se prepara una función de forma de onda (a) en el dominio de la frecuencia que incluye la función de espectro de intensidad $A_0(\omega)$ y la función de espectro de fase $\psi_n(\omega)$ (número de proceso (2) en el dibujo).
[Fórmula 1]

65
$$\sqrt{A_0(\omega)} \exp\{i\Psi_n(\omega)\} \dots (a)$$

En este punto, un subíndice n representa un proceso después de la transformada de Fourier de orden n . Antes de un primer proceso de transformada de Fourier, se usa la función de espectro de fase inicial $\psi_{n=0}(\omega)$ anteriormente descrita como la función de espectro de fase $\psi_n(\omega)$. i es un número imaginario.

5 A continuación, se realiza una transformada de Fourier del dominio de la frecuencia al dominio del tiempo en la función (a) (flecha A1 en el dibujo). Como resultado, se obtiene una función de forma de onda (b) en el dominio de la frecuencia que incluye una función de forma de onda de intensidad temporal $b_n(t)$ (número de proceso (3) en el dibujo).
[Fórmula 2]

10
$$\sqrt{b_n(t)} \exp\{i\theta_n(t)\} \dots (b)$$

A continuación, la función de forma de onda de intensidad temporal $b_n(t)$ incluida en la función (b) se sustituye por $Target_0(t)$ basándose en la forma de onda deseada (números de procesos (4) y (5) en el dibujo).
[Fórmula 3]

15
$$b_n(t) := Target_0(t) \dots (c)$$

[Fórmula 4]

20
$$\sqrt{Target_0(t)} \exp\{i\theta_n(t)\} \dots (d)$$

A continuación, se realiza una transformada de Fourier inversa del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia en la función (d) (flecha A2 en el dibujo). Como resultado, se obtiene una función de forma de onda (e) en el dominio de la frecuencia que incluye una función de espectro de intensidad $B_n(\omega)$ y la función de espectro de fase $\psi_n(\omega)$ (número de proceso (6) en el dibujo).
[Fórmula 5]

25
$$\sqrt{B_n(\omega)} \exp\{i\Psi_n(\omega)\} \dots (e)$$

30 A continuación, para restringir la función de espectro de intensidad $B_n(\omega)$ incluida en la función (e), esta se sustituye por la función de espectro de intensidad inicial $A_0(\omega)$ (número de proceso (7) en el dibujo).
[Fórmula 6]

35
$$B_n(\omega) = A_0(\omega) \dots (f)$$

Posteriormente, los procesos anteriores (1) a (7) se realizan repetidamente una pluralidad de veces, de modo que la forma de espectro de fase representada por la función de espectro de fase $\psi_n(\omega)$ en la función de forma de onda puede llevarse cerca de una forma de espectro de fase que corresponde a la forma de onda de intensidad temporal deseada. Se usa una función de espectro de fase $\psi_{IFTA}(\omega)$ para que se obtenga finalmente para calcular el patrón de modulación.
40

Para el método de Fourier iterativo normal anteriormente descrito, se incluye un proceso para evitar que una solución conduzca a una solución local en un método descrito en el Documento no de patente 2. La Figura 5 ilustra un procedimiento de cálculo de un espectro de fase usando un método de Fourier iterativo (en lo sucesivo, denominado como IFTA-Fienup) descrito en el Documento no de patente 2, como un segundo ejemplo comparativo para la presente realización. En este punto, en la Figura 5, puesto que los procesos (1) a (3), (6) a (7) son los mismos que los procesos en el método anteriormente descrito, se omite la explicación.
45

En IFTA-Fienup, cuando se ejecutan los procesos (4) y (5), es decir, se realiza una sustitución basándose en una forma de onda deseada en la función de forma de onda de intensidad temporal $b_n(t)$ incluida en la función (b) después de que se usa la transformada de Fourier, en lugar de $Target_0(t)$, $Target_n(t)$ calculada por la siguiente fórmula (g) (números de procesos (4) y (5) en el dibujo).
50 [Fórmula 7]

55
$$Target_n(t) = \begin{cases} Target_0(t) + \beta(Target_0(t) - b_n(t)) \\ 0, \text{if } Target_0(t) + \beta(Target_0(t) - b_n(t)) < 0 \end{cases} \dots (g)$$

[Fórmula 8]

60
$$\sqrt{Target_n(t)} \exp\{i\theta_n(t)\} \dots (h)$$

En este punto, en la fórmula anterior (g), una diferencia ($Target_0(t) - b_n(t)$) entre la función $Target_0(t)$ que representa la forma de onda deseada y la función de forma de onda $b_n(t)$ después de la transformada de Fourier se multiplica por un coeficiente predeterminado β , se añade un resultado de multiplicación a la forma de onda deseada $Target_0(t)$, y se calcula $Target_n(t)$. Además, cuando este valor es menor que 0, se establece $Target_n(t) = 0$.

Sin embargo, incluso en IFTA-Fienup, por ejemplo, cuando la función $Target_0(t)$ que representa la forma de onda deseada y la función de forma de onda $b_n(t)$ después de la transformada de Fourier son enormemente diferentes entre sí, una solución puede aún conducir a una solución local.

5 Por lo tanto, en la unidad de transformada de Fourier iterativa 22a de la unidad de diseño de espectro de fase 22 en la presente realización, se mejora adicionalmente el método de Fourier iterativo como se describe a continuación. La Figura 6 ilustra un procedimiento de cálculo de un espectro de fase usando el método de Fourier iterativo mejorado en la presente realización.

10 En primer lugar, la unidad de transformada de Fourier iterativa 22a prepara la función de espectro de intensidad inicial $A_0(\omega)$ y la función de espectro de fase $\psi_{n=0}(\omega)$ para que sean las funciones de la frecuencia ω (número de proceso (1) en el dibujo). En un ejemplo, la función de espectro de intensidad $A_0(\omega)$ y la función de espectro de fase $\psi_{n=0}(\omega)$ representan el espectro de intensidad y el espectro de fase de la luz de entrada L_a , respectivamente.

15 A continuación, la unidad de transformada de Fourier iterativa 22a prepara una función de forma de onda (i) en el dominio de la frecuencia que incluye la función de espectro de intensidad $A_0(\omega)$ y la función de espectro de fase $\psi_n(\omega)$ (número de proceso (2) en el dibujo). [Fórmula 9]

$$20 \quad \sqrt{A_0(\omega)} \exp\{i\Psi_n(\omega)\} \dots (i)$$

En este punto, un subíndice n representa un proceso después de la transformada de Fourier de orden n. Antes de un primer proceso de transformada de Fourier, se usa la función de espectro de fase inicial $\psi_{n=0}(\omega)$ anteriormente descrita como la función de espectro de fase $\psi_n(\omega)$. i es un número imaginario.

25 A continuación, la unidad de transformada de Fourier iterativa 22a realiza la transformada de Fourier del dominio de la frecuencia al dominio del tiempo en la función (i). Como resultado, se obtiene una función de forma de onda (j) en el dominio de la frecuencia que incluye la función de forma de onda de intensidad temporal $b_n(t)$ (número de proceso (3) en el dibujo). [Fórmula 10]

$$30 \quad \sqrt{b_n(t)} \exp\{i\theta_n(t)\} \dots (j)$$

A continuación, la unidad de transformada de Fourier iterativa 22a calcula un coeficiente α en el que una diferencia entre la función de forma de onda $b_n(t)$ después de la transformada de Fourier y un resultado ($\alpha \times Target_0(t)$) de multiplicación de la función $Target_0(t)$ por el coeficiente α se hace menor que una diferencia entre la función de forma de onda $b_n(t)$ y la función $Target_0(t)$ (número de proceso (4) en el dibujo). En un ejemplo, como se muestra por la siguiente fórmula (k), un coeficiente α en el que una desviación típica σ de $\alpha \times Target_0(t)$ con respecto a la función de forma de onda $b_n(t)$ después de la transformada de Fourier se vuelve un mínimo (σ_{min}) se deriva mediante búsqueda.

35 En este punto, en la fórmula (k), D representa el número de puntos de datos y t_s y t_e representan un punto de inicio y un punto final de un eje de tiempo, respectivamente. [Fórmula 11]

$$45 \quad \sigma_{min} = \sqrt{\frac{1}{D} \sum_{t=t_s}^{t=t_e} (\alpha \times Target_{n=0}(t) - b_n(t))^2} \dots (k)$$

A continuación, la unidad de transformada de Fourier iterativa 22a realiza una sustitución basándose en la forma de onda deseada en la función de forma de onda de intensidad temporal $b_n(t)$ incluida en la función (j) después de la transformada de Fourier (primera sustitución). En este momento, la unidad de transformada de Fourier iterativa 22a realiza la sustitución usando el resultado ($\alpha \times Target_0(t)$) de multiplicación de la función $Target_0(t)$ que representa la forma de onda deseada por el coeficiente α . En un ejemplo, la sustitución se realiza por $Target_n(t)$ calculada por la fórmula (m) obtenida sustituyendo $Target_0(t)$ en la fórmula (g) en IFTA-Fienup anteriormente descrito por $\alpha \times Target_0(t)$ (números de procesos (5) y (6) en el dibujo). [Fórmula 12]

$$55 \quad Target_n(t) = \begin{cases} \alpha \times Target_0(t) + \beta(\alpha \times Target_0(t) - b_n(t)) & \dots (m) \\ 0, \text{if } \alpha \times Target_0(t) + \beta(\alpha \times Target_0(t) - b_n(t)) < 0 \end{cases}$$

[Fórmula 13]

$$60 \quad \sqrt{Target_n(t)} \exp[i\theta_n(t)] \dots (n)$$

A continuación, la unidad de transformada de Fourier iterativa 22a realiza la transformada de Fourier inversa del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia en la función (n) (flecha A2 en el dibujo). Como resultado, se obtiene una función de forma de onda (o) en el dominio de la frecuencia que incluye la función de espectro de intensidad $B_n(\omega)$

y la función de espectro de fase $\psi_n(\omega)$ (número de proceso (7) en el dibujo).
[Fórmula 14]

$$\sqrt{B_n(\omega)} \exp\{i\Psi(\omega)\} \dots (o)$$

5 A continuación, la unidad de transformada de Fourier iterativa 22a, para restringir la función de espectro de intensidad $B_n(\omega)$ incluida en la función (o), sustituye la función por la función de espectro de intensidad inicial $A_0(\omega)$ (segunda sustitución, número de proceso (8) en el dibujo).
[Fórmula 15]

$$10 \quad B_n(\omega) = A_0(\omega) \dots (p)$$

Posteriormente, la unidad de transformada de Fourier iterativa 22a realiza repetidamente los procesos anteriores (1) a (8) una pluralidad de veces, de modo que la forma de espectro de fase representada por la función de espectro de fase $\psi_n(\omega)$ en la función de forma de onda puede llevarse cerca de una forma de espectro de fase que corresponde a la forma de onda de intensidad temporal deseada. Una función de espectro de fase $\psi_{IFTA}(\omega)$ para que se obtenga finalmente se proporciona a la unidad de cálculo de patrón de modulación 24.

15 La Figura 7 ilustra un procedimiento de cálculo en la unidad de transformada de Fourier iterativa 23a de la unidad de diseño de espectro de intensidad 23. La unidad de transformada de Fourier iterativa 23a calcula un espectro de intensidad mediante el método similar que el método de cálculo por la unidad de transformada de Fourier iterativa 22a anteriormente descrita.

20 En primer lugar, similar a cuando se calcula el espectro de fase, la unidad de transformada de Fourier iterativa 23a prepara una función de espectro de intensidad inicial $A_{k=0}(\omega)$ y una función de espectro de fase $\psi_0(\omega)$ (número de proceso (1) en el dibujo). A continuación, la unidad de transformada de Fourier iterativa 23a prepara una función de forma de onda (q) en el dominio de la frecuencia que incluye una función de espectro de intensidad $A_k(\omega)$ y la función de espectro de fase $\psi_0(\omega)$ (número de proceso (2) en el dibujo). [Fórmula 16]

$$25 \quad \sqrt{A_k(\omega)} \exp\{i\Psi_0(\omega)\} \dots (q)$$

30 En este punto, un subíndice k representa después de un proceso de transformada de Fourier de orden k. Antes de que se use un primer proceso de transformada de Fourier, la función de espectro de intensidad inicial $A_{k=0}(\omega)$ anteriormente descrita se usa como la función de espectro de intensidad $A_k(\omega)$. l es un número imaginario.

35 A continuación, la unidad de transformada de Fourier iterativa 23a realiza la transformada de Fourier del dominio de la frecuencia al dominio del tiempo en la función (q). Como resultado, se obtiene una función de forma de onda (r) en el dominio de la frecuencia que incluye una función de forma de onda de intensidad temporal $b_k(t)$ (número de proceso (3) en el dibujo).
[Fórmula 17]

$$40 \quad \sqrt{b_k(t)} \exp\{i\theta_k(t)\} \dots (r)$$

45 A continuación, la unidad de transformada de Fourier iterativa 23a calcula un coeficiente α en el que una diferencia entre la función de forma de onda $b_n(t)$ después de la transformada de Fourier y un resultado ($\alpha \times \text{Target}_0(t)$) de multiplicación de la función $\text{Target}_0(t)$ por el coeficiente α se hace menor que una diferencia entre la función de forma de onda $b_k(t)$ y la función $\text{Target}_0(t)$ (número de proceso (4) en el dibujo). En un ejemplo, como se muestra por la siguiente fórmula (s), un coeficiente α en el que una desviación típica σ de $\alpha \times \text{Target}_0(t)$ con respecto a la función de forma de onda $b_k(t)$ después de la transformada de Fourier se vuelve un mínimo (σ_{\min}) se deriva mediante búsqueda.
50 En este punto, en la fórmula (s), D representa el número de puntos de datos y t_s y t_e representan un punto de inicio y un punto final de un eje de tiempo, respectivamente.
[Fórmula 18]

$$55 \quad \alpha_{\min} = \sqrt{\frac{1}{D} \sum_{t=t_s}^{t=t_e} (\alpha \times \text{Target}_{k=0}(t) - b_k(t))^2} \dots (s)$$

60 A continuación, la unidad de transformada de Fourier iterativa 23a realiza una sustitución basándose en la forma de onda deseada en la función de forma de onda de intensidad temporal $b_k(t)$ incluida en la función (r) después de la transformada de Fourier (primera sustitución). En este momento, la unidad de transformada de Fourier iterativa 23a realiza la sustitución usando el resultado ($\alpha \times \text{Target}_0(t)$) de multiplicación de la función $\text{Target}_0(t)$ que representa la forma de onda deseada por el coeficiente α . En un ejemplo, la sustitución se realiza por $\text{Target}_k(t)$ calculada por la fórmula (t) (números de procesos (5) y (6) en el dibujo).
[Fórmula 19]

$$\text{Target}_k(t) = \begin{cases} \alpha \times \text{Target}_0(t) + \beta(\alpha \times \text{Target}_0(t) - b_k(t)) & \dots (t) \\ 0, & \text{if } \alpha \times \text{Target}_0(t) + \beta(\alpha \times \text{Target}_0(t) - b_k(t)) < 0 \end{cases}$$

[Fórmula 20]

$$\sqrt{\text{Target}_k(t)} \exp\{i\theta_k(t)\} \dots (u)$$

A continuación, la unidad de transformada de Fourier iterativa 23a realiza la transformada de Fourier inversa del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia en la función (u). Como resultado, se obtiene una función de forma de onda (v) en el dominio de la frecuencia que incluye una función de espectro de intensidad $C_k(\omega)$ y una función de espectro de fase $\psi_k(\omega)$ (número de proceso (7) en el dibujo).

[Fórmula 21]

$$\sqrt{c_k(\omega)} \exp\{i\Psi_k(\omega)\} \dots (v)$$

A continuación, la unidad de transformada de Fourier iterativa 23a, para restringir la función de espectro de fase $\psi_k(\omega)$ incluida en la función (v), sustituye la función por la función de espectro de fase inicial $\psi_0(\omega)$ (segunda sustitución, número de proceso (8) en el dibujo).

[Fórmula 22]

$$\Psi_k(\omega) = \Psi_0(\omega) \dots (w)$$

Posteriormente, la unidad de transformada de Fourier iterativa 23a realiza repetidamente los procesos anteriores (1) a (8) una pluralidad de veces, de modo que la forma de espectro de fase representada por la función de espectro de intensidad $A_k(\omega)$ en la función de forma de onda puede llevarse cerca de una forma de espectro de intensidad que corresponde a la forma de onda de intensidad temporal deseada. Una función de espectro de intensidad $A_{\text{IFTA}}(\omega)$ para que se obtenga finalmente se proporciona a la unidad de cálculo de patrón de modulación 24.

La Figura 8 es un diagrama de flujo que ilustra un método de cálculo de patrón de modulación realizado por el aparato de cálculo de patrón de modulación 20 anteriormente descrito. Como se ilustra en la Figura 8, en primer lugar, la información en una forma de onda de intensidad temporal deseada se introduce a la unidad de entrada de forma de onda arbitraria 21 por el operador (etapa de entrada S1). A continuación, se calcula un espectro de fase y un espectro de intensidad para proporcionar la forma de onda de intensidad temporal cerca de una forma de onda deseada en la unidad de diseño de espectro de fase 22 y la unidad de diseño de espectro de intensidad 23, respectivamente (etapa de cálculo de espectro de fase S11 y etapa de cálculo de espectro de intensidad S21).

Una etapa de transformada de Fourier iterativa S12 por la unidad de transformada de Fourier iterativa 22a está incluida en la etapa de cálculo de espectro de fase S11.

Es decir, en la etapa de transformada de Fourier iterativa S12, la transformada de Fourier se realiza en la función de forma de onda (fórmula (i)) en el dominio de la frecuencia que incluye la función de espectro de intensidad $A_0(\omega)$ y la función de espectro de fase $\psi_n(\omega)$, la sustitución de la función de forma de onda de intensidad temporal basándose en la forma de onda deseada se realiza en el dominio del tiempo después de la transformada de Fourier (fórmulas (m) y (n)), y la sustitución para restringir la función de espectro de intensidad se realiza en el dominio de la frecuencia después de la transformada de Fourier inversa (fórmula (p)). En la etapa de transformada de Fourier iterativa S12, estos procesos se realizan repetidamente una pluralidad de veces, de modo que la función de espectro de fase $\psi_n(\omega)$ se lleva cerca de una forma de espectro de fase que corresponde a la forma de onda deseada. Una función de espectro de fase $\psi_{\text{IFTA}}(\omega)$ para que se obtenga finalmente se proporciona a una siguiente etapa de cálculo de patrón de modulación S3.

Además, se incluye una etapa de transformada de Fourier iterativa S22 por la unidad de transformada de Fourier iterativa 23a en la etapa de cálculo de espectro de intensidad S21.

Es decir, en la etapa de transformada de Fourier iterativa S22, la transformada de Fourier se realiza en la función de forma de onda (fórmula (q)) en el dominio de la frecuencia que incluye la función de espectro de intensidad $A_k(\omega)$ y la función de espectro de fase $\psi_0(\omega)$, la sustitución de la función de forma de onda de intensidad temporal basándose en la forma de onda deseada se realiza en el dominio del tiempo después de la transformada de Fourier (fórmulas (t) y (u)), y la sustitución para restringir la función de espectro de fase se realiza en el dominio de la frecuencia después de la transformada de Fourier inversa (fórmula (w)). En la etapa de transformada de Fourier iterativa S22, estos procesos se realizan repetidamente una pluralidad de veces, de modo que la función de espectro de intensidad $A_k(\omega)$ se lleva cerca de una forma de espectro de intensidad que corresponde a la forma de onda deseada. Se proporciona una función de espectro de intensidad $A_{\text{IFTA}}(\omega)$ para que se obtenga finalmente a la siguiente etapa de cálculo de patrón de modulación S3.

En la etapa de cálculo de patrón de modulación S3, se calcula un patrón de modulación basándose en la función de

espectro de fase $\psi_{IFTA}(\omega)$ y la función de espectro de intensidad $A_{IFTA}(\omega)$. El patrón de modulación se presenta en el SLM 16.

5 Se describen los efectos obtenidos por el aparato de cálculo de patrón de modulación 20 y el método de cálculo de patrón de modulación de acuerdo con la presente realización anteriormente descrita.

10 En la presente realización, se calculan el espectro de intensidad y el espectro de fase para proporcionar la forma de onda de intensidad temporal de la luz cerca de la forma de onda deseada en las unidades de transformada de Fourier iterativa 22a y 23a (o las etapas de transformada de Fourier iterativa S12 y S22), respectivamente. En ese momento, cuando se realiza la sustitución basándose en la forma de onda deseada en la función de forma de onda de intensidad temporal $b_n(t)$ (o $b_k(t)$) en el dominio del tiempo obtenido por la transformada de Fourier, se usa un resultado de multiplicación de la función $Target_0(t)$ que representa la forma de onda deseada por el coeficiente α . El coeficiente α tiene un valor en el que una diferencia entre la función $\alpha \times Target_0(t)$ después de la multiplicación y la función de forma de onda de intensidad temporal $b_n(t)$ (o $b_k(t)$) después de la transformada de Fourier es menor que una diferencia antes de la multiplicación del coeficiente α . Como resultado, puesto que se reduce una diferencia entre la función antes de la sustitución (es decir, la función de forma de onda de intensidad temporal $b_n(t)$ o $b_k(t)$) después de la transformada de Fourier) y la función $Target_n(t)$ (o $Target_k(t)$) después de la sustitución basándose en la forma de onda deseada, se evita una solución que conduzca a una solución local. Por lo tanto, de acuerdo con la presente realización, pueden calcularse de manera precisa el espectro de intensidad y el espectro de fase para proporcionar la forma de onda temporal de la luz cerca de la forma de onda deseada.

25 En particular, cuando la función de espectro de intensidad $A_{IFTA}(\omega)$ se deriva por el método de Fourier iterativo, el espectro de intensidad después de la transformada de Fourier inversa puede superar el espectro de intensidad de la luz de entrada L_a dependiendo de una región de longitud de onda. En este caso, puesto que es imposible una realización para una parte que supera el espectro de intensidad de la luz de entrada L_a , tiene lugar la pérdida de intensidad con el cálculo interactivo y la intensidad de la forma de onda de intensidad temporal $b_n(t)$ se reduce gradualmente. Por lo tanto, en el método de Fourier iterativo convencional, una diferencia entre la forma de onda $Target_0(t)$ después de la sustitución y la forma de onda de intensidad temporal $b_n(t)$ (o $b_k(t)$) tiende a aumentar y aumenta un riesgo de la solución que conduce a la solución local. Por otra parte, de acuerdo con la presente realización, puesto que puede reducirse una diferencia entre la función de forma de onda $Target_n(t)$ (o $Target_k(t)$) después de la sustitución y la forma de onda de intensidad temporal $b_n(t)$ (o $b_k(t)$), es posible reducir el riesgo de que la solución conduzca a la solución local mientras que se suprime la pérdida de intensidad.

35 Además, como en la presente realización, las unidades de transformada de Fourier iterativa 22a y 23a (en las etapas de transformada de Fourier iterativa S12 y S22) pueden realizar repetidamente la transformada de Fourier, la primera sustitución, la transformada de Fourier inversa, y la segunda sustitución, y la unidad de cálculo de patrón de modulación 24 (en la etapa de cálculo de patrón de modulación S3) pueden calcular el patrón de modulación basándose en la función de espectro de fase $\psi_{IFTA}(\omega)$ y la función de espectro de intensidad $A_{IFTA}(\omega)$ obtenidas después de la repetición. Como tal, la transformada de Fourier iterativa se realiza repetidamente, de modo que el espectro de intensidad $A_{IFTA}(\omega)$ y el espectro de fase $\psi_{IFTA}(\omega)$ para proporcionar la forma de onda de intensidad temporal de la luz cerca de la forma de onda deseada pueden calcularse de manera más precisa.

45 Además, como en la presente realización, el coeficiente α puede tener un valor en el que la desviación típica σ de la función $\alpha \times Target_0(t)$ después de la multiplicación con respecto a la función de forma de onda de intensidad temporal $b_n(t)$ (o $b_k(t)$) después de la transformada de Fourier se vuelve un valor mínimo σ_{min} . Como resultado, puede minimizarse una diferencia entre la función $\alpha \times Target_0(t)$ después de la multiplicación del coeficiente α y la función de forma de onda de intensidad temporal $b_n(t)$ (o $b_k(t)$) después de la transformada de Fourier, y puede evitarse de manera más efectiva que la solución conduzca a la solución local.

50 En este punto, en la realización anterior, tanto la función de espectro de fase $\psi_{IFTA}(\omega)$ como la función de espectro de intensidad $A_{IFTA}(\omega)$ se calculan para proporcionar la forma de onda de intensidad temporal cerca de la forma de onda deseada, y se presenta el patrón de modulación basándose en estas funciones en el SLM 16. Sin embargo, la presente invención no está limitada a una configuración de este tipo, y por ejemplo, únicamente puede calcularse una de la función de espectro de fase $\psi_{IFTA}(\omega)$ y de la función de espectro de intensidad A_{IFTA} para proporcionar la forma de onda de intensidad temporal cerca de la forma de onda deseada. En este caso, un espectro previamente preparado (o seleccionado) puede usarse como el otro espectro, o el otro espectro puede no modularse como la luz de entrada L_a . Incluso en cualquier configuración, los efectos de acuerdo con la presente realización pueden obtenerse de manera segura.

60 La Figura 9 es un gráfico que ilustra pérdida de intensidad y precisión de forma de onda con control de forma de onda. Como un índice de la precisión de forma de onda, una desviación típica con respecto a la forma de onda deseada (en el caso de que introduzca el coeficiente α , se usa una desviación típica con respecto a una forma de onda obtenida multiplicando la forma de onda deseada por el coeficiente finalmente obtenido α).

65 Una representación P1 en el dibujo muestra el caso en el que se realiza la modulación basándose en únicamente la función de espectro de fase $\psi_{IFTA}(\omega)$ obtenida introduciendo el coeficiente α , y una representación P2 muestra el caso

en el que se realiza modulación basándose únicamente en la función de espectro de fase $\psi_{IFTA}(\omega)$ obtenida (es decir, obtenida por IFTA-Fienup) sin introducir el coeficiente α . Además, una representación P3 muestra el caso en el que se realiza la modulación basándose tanto en la función de espectro de fase $\psi_{IFTA}(\omega)$ como en la función de espectro de intensidad A_{IFTA} obtenidas introduciendo el coeficiente α , y una representación P4 muestra el caso en el que se realiza la modulación basándose en la función de espectro de fase $\psi_{IFTA}(\omega)$ y la función de espectro de intensidad A_{IFTA} obtenidas (es decir, obtenida por IFTA-Fienup) sin introducir el coeficiente α .

En este punto, estas representaciones P1 a P4 son resultados de cálculo bajo una condición de que el número de iteraciones en el método de Fourier iterativo sea 200 veces y una forma de onda de pulso de una anchura de tiempo de aproximadamente 135 fs se controla a una forma de onda rectangular de una anchura de tiempo de 2 ps.

En las representaciones P1 y P2, debido a que no se realiza la modulación de intensidad, ambas pérdidas de intensidad son el 0 %. Cuando se comparan desviaciones típicas entre sí, la precisión de forma de onda en el caso (representación P1) de introducción del coeficiente α se mejora en aproximadamente 1,7 veces en comparación con el caso (representación P2) de no introducción del coeficiente α (flecha A3 en el dibujo). Además, la Figura 10 ilustra una forma de onda temporal G21 de la luz de salida L_d que corresponde a la representación P1 y una forma de onda deseada G23 dada como la forma de onda objetivo inicial $Target_0(t)$, y la Figura 11 ilustra una forma de onda temporal G22 de la luz de salida L_d que corresponde a la representación P2 y la forma de onda deseada G23 dada como la forma de onda objetivo inicial $Target_0(t)$. A partir de estos resultados, puede observarse que la suavidad de una porción superior de la forma de onda en particular se mejora enormemente introduciendo el coeficiente α .

Además, cuando se comparan las representaciones P3 y P4 entre sí, puede observarse que es posible reducir la pérdida de intensidad a aproximadamente 1/3 mientras se mantiene sustancialmente la precisión de forma de onda introduciendo el coeficiente α (representación P3), en comparación con el caso (representación P4) de no introducción del coeficiente α (flecha A4 en el dibujo). Además, la Figura 12 ilustra una forma de onda temporal G24 de la luz de salida L_d que corresponde a la representación P3 y la forma de onda deseada G23 dada como la forma de onda objetivo inicial $Target_0(t)$, y la Figura 13 ilustra una forma de onda temporal G25 de la luz de salida L_d que corresponde a la representación P4 y la forma de onda deseada G23 dada como la forma de onda objetivo inicial $Target_0(t)$. Cuando estas formas de onda se comparan entre sí, puede observarse que la suavidad de una porción superior de la forma de onda en particular se mejora enormemente introduciendo el coeficiente α .

La Figura 14 es otro gráfico que ilustra la pérdida de intensidad y la precisión de forma de onda con la forma de onda control.

Una representación P5 en el dibujo muestra el caso en el que se realiza la modulación basándose en la función de espectro de fase $\psi_{IFTA}(\omega)$ obtenida sin introducir el coeficiente α y la función de espectro de intensidad $A_{IFTA}(\omega)$ obtenida introduciendo el coeficiente α . Además, una representación P6 muestra el caso en el que se realiza la modulación basándose tanto en la función de espectro de fase $\psi_{IFTA}(\omega)$ como en la función de espectro de intensidad $A_{IFTA}(\omega)$ obtenida sin introducir el coeficiente α .

Cuando estas se comparan entre sí, en comparación con el caso (representación P6) en el que el coeficiente α no se introduce, la pérdida de intensidad se hace aproximadamente 0,99 veces y se confirma una mejora de pérdida, en el caso (representación P5) en el que se introduce el coeficiente α en únicamente el cálculo de la función de espectro de intensidad $A_{IFTA}(\omega)$ (flecha A5 en el dibujo). Además, la precisión de forma de onda se vuelve aproximadamente 1,02 veces en la representación P5 en comparación con la representación P6 y se confirma una mejora en la precisión de forma de onda.

El aparato de cálculo de patrón de modulación, el aparato de control de luz, el método de cálculo de patrón de modulación, y el programa de cálculo de patrón de modulación de acuerdo con un aspecto de la presente invención no están limitados a las realizaciones y las modificaciones anteriormente descritas, y se posibilitan diversas otras modificaciones.

Por ejemplo, en la realización anterior, se ha ejemplificado el caso en el que se aplica el coeficiente α a IFTA-Fienup (segundo ejemplo comparativo), sin embargo, la presente invención no está limitada a lo mismo, y por ejemplo, el coeficiente α puede aplicarse al método de Fourier iterativo normal de acuerdo con el primer ejemplo comparativo. Además, en la realización anterior, el coeficiente α en el que la diferencia entre la función de forma de onda después de la transformada de Fourier y el resultado de multiplicación de la función que representa la forma de onda deseada por el coeficiente α disminuye se calcula minimizando la desviación típica σ . Sin embargo, el método de cálculo del coeficiente α no está limitado a lo mismo, y por ejemplo, puede minimizarse una suma total (es decir, un valor integral de tiempo) de valores de diferencia entre la función de forma de onda después de la transformada de Fourier y el resultado de multiplicación de la función que representa la forma de onda deseada por el coeficiente α .

El aparato de cálculo de patrón de modulación de acuerdo con la realización anterior es un aparato para calcular un patrón de modulación presentado en un modulador de luz espacial para modular al menos uno de un espectro de intensidad y un espectro de fase de luz de entrada para proporcionar una forma de onda de intensidad temporal de luz cerca de una forma de onda deseada, y el aparato incluye una unidad de transformada de Fourier iterativa para

realizar una transformada de Fourier en una función de forma de onda en un dominio de frecuencia que incluye una función de espectro de intensidad y una función de espectro de fase, realizar una primera sustitución de una función de forma de onda de intensidad temporal basándose en la forma de onda deseada en un dominio de tiempo después de la transformada de Fourier y a continuación realizar una transformada de Fourier inversa, y realizar una segunda sustitución para restringir una función de espectro de la función de espectro de intensidad y la función de espectro de fase en el dominio de la frecuencia después de la transformada de Fourier inversa, y una unidad de cálculo de patrón de modulación para calcular el patrón de modulación basándose en la otra salida de función de espectro de la unidad de transformada de Fourier iterativa. La unidad de transformada de Fourier iterativa realiza la primera sustitución usando un resultado de multiplicación de una función que representa la forma de onda deseada por un coeficiente. El coeficiente tiene un valor en el que una diferencia entre la función después de la multiplicación y la función de forma de onda de intensidad temporal después de la transformada de Fourier es menor que una diferencia antes de la multiplicación del coeficiente.

Además, el método de cálculo de patrón de modulación de acuerdo con la realización anterior es un método para calcular un patrón de modulación presentado en un modulador de luz espacial para modular al menos uno de un espectro de intensidad y un espectro de fase de luz de entrada para proporcionar una forma de onda de intensidad temporal de luz cerca de una forma de onda deseada, y el método incluye una etapa de transformada de Fourier iterativa de realización de una transformada de Fourier en una función de forma de onda en un dominio de frecuencia que incluye una función de espectro de intensidad y una función de espectro de fase, realizar una primera sustitución de una función de forma de onda de intensidad temporal basándose en la forma de onda deseada en un dominio de tiempo después de la transformada de Fourier y a continuación realizar una transformada de Fourier inversa, y realizar una segunda sustitución para restringir una función de espectro de la función de espectro de intensidad y la función de espectro de fase en el dominio de la frecuencia después de la transformada de Fourier inversa, y una etapa de cálculo de patrón de modulación de cálculo del patrón de modulación basándose en la otra salida de función de espectro en la etapa de transformada de Fourier iterativa. En la etapa de transformada de Fourier iterativa, la primera sustitución se realiza usando un resultado de multiplicación de una función que representa la forma de onda deseada por un coeficiente. El coeficiente tiene un valor en el que una diferencia entre la función después de la multiplicación y la función de forma de onda de intensidad temporal después de la transformada de Fourier es menor que una diferencia antes de la multiplicación del coeficiente.

Además, el programa de cálculo de patrón de modulación de acuerdo con la realización anterior opera un ordenador, en un aparato para calcular un patrón de modulación presentado en un modulador de luz espacial para modular al menos uno de un espectro de intensidad y un espectro de fase de luz de entrada para proporcionar una forma de onda de intensidad temporal de luz cerca de una forma de onda deseada, como una unidad de transformada de Fourier iterativa para realizar una transformada de Fourier en una función de forma de onda en un dominio de frecuencia que incluye una función de espectro de intensidad y una función de espectro de fase, realizar una primera sustitución de una función de forma de onda de intensidad temporal basándose en la forma de onda deseada en un dominio de tiempo después de la transformada de Fourier y a continuación realizar una transformada de Fourier inversa, y realizar una segunda sustitución para restringir una función de espectro de la función de espectro de intensidad y la función de espectro de fase en el dominio de la frecuencia después de la transformada de Fourier inversa, y una unidad de cálculo de patrón de modulación para calcular el patrón de modulación basándose en la otra salida de función de espectro de la unidad de transformada de Fourier iterativa. La unidad de transformada de Fourier iterativa opera de manera que la primera sustitución se realiza usando un resultado de multiplicación de una función que representa la forma de onda deseada por un coeficiente. El coeficiente tiene un valor en el que una diferencia entre la función después de la multiplicación y la función de forma de onda de intensidad temporal después de la transformada de Fourier es menor que una diferencia antes de la multiplicación del coeficiente.

En el aparato, el método, y el programa anteriores, en la etapa de transformada de Fourier iterativa, la unidad de transformada de Fourier iterativa puede realizar repetidamente la transformada de Fourier, la primera sustitución, la transformada de Fourier inversa, y la segunda sustitución, y en la etapa de cálculo de patrón de modulación, la unidad de cálculo de patrón de modulación puede calcular el patrón de modulación basándose en la otra función de espectro obtenida después de la repetición. Como tal, la transformada de Fourier iterativa se realiza repetidamente, de modo que puede calcularse de manera más precisa el espectro de intensidad o el espectro de fase para proporcionar la forma de onda de intensidad temporal de la luz cerca de la forma de onda deseada.

En el aparato, el método, y el programa anteriores, el coeficiente puede tener el valor en el que se minimiza una desviación típica de la función después de la multiplicación con respecto a la función de forma de onda de intensidad temporal después de la transformada de Fourier. Como resultado, puede minimizarse una diferencia entre la función después de la multiplicación del coeficiente y la función de forma de onda de intensidad temporal después de la transformada de Fourier, y puede evitarse de manera más eficaz que la solución conduzca a la solución local.

Además, el aparato de control de luz de acuerdo con la realización anterior incluye el aparato de cálculo de patrón de modulación anteriormente descrito, una fuente de luz para emitir la luz de entrada, un elemento dispersivo para dispersar espectralmente la luz de entrada, un modulador de luz espacial para modular al menos uno de un espectro de intensidad y un espectro de fase de la luz de entrada después de la dispersión y emisión de luz modulada, y un sistema óptico para enfocar la luz modulada. El modulador de luz espacial presenta el patrón de modulación calculado

por el aparato de cálculo de patrón de modulación anterior.

- 5 De acuerdo con este aparato, se incluye el aparato de cálculo de patrón de modulación descrito, de modo que la solución puede evitarse que conduzca a la solución local durante una operación de Fourier iterativa y puede calcularse de manera precisa el espectro de intensidad o el espectro de fase para proporcionar la forma de onda temporal de la luz cerca de la forma de onda deseada.

Aplicabilidad industrial

- 10 La presente invención puede usarse como un aparato de cálculo de patrón de modulación, un aparato de control de luz, un método de cálculo de patrón de modulación, un programa de cálculo de patrón de modulación, y un medio legible por ordenador que pueden evitar que una solución conduzca a una solución local durante una operación de Fourier iterativa y calcular de manera precisa un espectro de intensidad o un espectro de fase para proporcionar una forma de onda temporal de luz cerca de una forma de onda deseada.

15

Lista de signos de referencia

- 20 1A - aparato de control de luz, 2 - fuente de luz, 10 - sistema óptico, 12 - elemento dispersivo, 14 - espejo curvado, 16 - modulador de luz espacial (SLM), 17 - plano de modulación, 20 - aparato de cálculo de patrón de modulación, 21 - unidad de entrada de forma de onda arbitraria, 22 - unidad de diseño de espectro de fase, 22a - unidad de transformada de Fourier iterativa, 23 - unidad de diseño de espectro de intensidad, 23a - unidad de transformada de Fourier iterativa, 24 - unidad de cálculo de patrón de modulación, La - luz de entrada, Ld - luz de salida.

REIVINDICACIONES

1. Un aparato de cálculo de patrón de modulación configurado para calcular un patrón de modulación presentado en un modulador de luz espacial (16) para modular al menos uno de un espectro de intensidad y un espectro de fase de luz de entrada para llevar una forma de onda de intensidad temporal de luz cerca de una forma de onda deseada, comprendiendo el aparato:
- una unidad de transformada de Fourier iterativa (22a, 23a), configurada para realizar una transformada de Fourier en una función de forma de onda en un dominio de frecuencia que incluye una función de espectro de intensidad ($A_{0,k}(\omega)$) y una función de espectro de fase ($\psi_{0,n}(\omega)$), realiza una primera sustitución de una función de forma de onda de intensidad temporal basándose en la forma de onda deseada en un dominio de tiempo después de la transformada de Fourier y a continuación realiza una transformada de Fourier inversa, y realiza una segunda sustitución para restringir una función de espectro de la función de espectro de intensidad y la función de espectro de fase en el dominio de la frecuencia después de la transformada de Fourier inversa; y
- una unidad de cálculo de patrón de modulación (24) configurada para calcular el patrón de modulación basándose en la otra salida de función de espectro de la unidad de transformada de Fourier iterativa (22a, 23a), **caracterizado por que** la unidad de transformada de Fourier iterativa (22a, 23a) está configurada para realizar la primera sustitución usando un resultado de multiplicación de una función que representa la forma de onda deseada por un coeficiente (α), y el coeficiente (α) tiene un valor en el que una diferencia entre la función ($\alpha \times \text{Target}_0(t)$) después de la multiplicación y la función de forma de onda de intensidad temporal ($b_{n,k}(t)$) después de la transformada de Fourier es menor que una diferencia antes de la multiplicación del coeficiente (α).
2. El aparato de cálculo de patrón de modulación de acuerdo con la reivindicación 1, en donde la unidad de transformada de Fourier iterativa (22a, 23a) está configurada para realizar repetidamente la transformada de Fourier, la primera sustitución, la transformada de Fourier inversa y la segunda sustitución, y la unidad de cálculo de patrón de modulación (24) está configurada para calcular el patrón de modulación basándose en la otra función de espectro obtenida después de la repetición.
3. El aparato de cálculo de patrón de modulación de acuerdo con las reivindicaciones 1 o 2, en donde el coeficiente tiene el valor en el que se minimiza una desviación típica de la función después de la multiplicación con respecto a la función de forma de onda de intensidad temporal después de la transformada de Fourier.
4. Un aparato de control de luz que comprende:
- el aparato de cálculo de patrón de modulación (20) de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3; una fuente de luz (2) configurada para emitir la luz de entrada; un elemento dispersivo (12) configurado para dispersar espectralmente la luz de entrada; el modulador de luz espacial (16) configurado para modular al menos uno de un espectro de intensidad y un espectro de fase de la luz de entrada después de la dispersión y la emisión de luz modulada; y un sistema óptico (10) configurado para enfocar la luz modulada, en donde el modulador de luz espacial (16) está configurado para presentar el patrón de modulación calculado por el aparato de cálculo de patrón de modulación (20).
5. Un método de cálculo de patrón de modulación para calcular un patrón de modulación presentado en un modulador de luz espacial (16) para modular al menos uno de un espectro de intensidad y un espectro de fase de luz de entrada para llevar una forma de onda de intensidad temporal de luz cerca de una forma de onda deseada, comprendiendo el método:
- una etapa de realización de una transformada de Fourier en una función de forma de onda en un dominio de frecuencia que incluye una función de espectro de intensidad ($A_{0,k}(\omega)$) y una función de espectro de fase ($\psi_{0,n}(\omega)$); una etapa de realización de una primera sustitución de una función de forma de onda de intensidad temporal basándose en la forma de onda deseada en un dominio de tiempo después de la transformada de Fourier y a continuación realizar una transformada de Fourier inversa; una etapa de realización de una segunda sustitución para restringir una función de espectro de la función de espectro de intensidad y la función de espectro de fase en el dominio de la frecuencia después de la transformada de Fourier inversa; y una etapa de cálculo del patrón de modulación basándose en la otra salida de función de espectro en la etapa de realización de la segunda sustitución, **caracterizado por que** en la etapa de realización de la transformada de Fourier inversa, la primera sustitución se realiza usando un resultado de multiplicación de una función que representa la forma de onda deseada por un coeficiente (α), y el coeficiente (α) tiene un valor en el que una diferencia entre la función ($\alpha \times \text{Target}_0(t)$) después de la multiplicación y la función de forma de onda de intensidad temporal ($b_{n,k}(t)$) después de la transformada de Fourier es menor que una diferencia antes de la multiplicación del coeficiente.

6. El método de cálculo de patrón de modulación de acuerdo con la reivindicación 5, en donde la etapa de realización de la transformada de Fourier, la etapa de realización de la transformada de Fourier inversa y la etapa de realización de la segunda sustitución se realizan repetidamente, y
 5 en la etapa de cálculo del patrón de modulación, el patrón de modulación se calcula basándose en la otra función de espectro obtenida después de la repetición.
7. El método de cálculo de patrón de modulación de acuerdo con las reivindicaciones 5 o 6, en donde el coeficiente tiene el valor en el que se minimiza una desviación típica de la función después de la multiplicación con respecto a la
 10 función de forma de onda de intensidad temporal después de la transformada de Fourier.
8. Un programa de cálculo de patrón de modulación para hacer que un ordenador calcule un patrón de modulación presentado en un modulador de luz espacial (16) para modular al menos uno de un espectro de intensidad y un
 15 espectro de fase de luz de entrada para llevar una forma de onda de intensidad temporal de luz cerca de una forma de onda deseada, haciendo el programa que el ordenador ejecute:
- una etapa de realización de una transformada de Fourier en una función de forma de onda en un dominio de
 frecuencia que incluye una función de espectro de intensidad ($A_{0,k}(\omega)$) y una función de espectro de fase ($\psi_{0,n}(\omega)$);
 una etapa de realización de una primera sustitución de una función de forma de onda de intensidad temporal
 20 basándose en la forma de onda deseada en un dominio de tiempo después de la transformada de Fourier y a continuación realizar una transformada de Fourier inversa;
- una etapa de realización de una segunda sustitución para restringir una función de espectro de la función de
 espectro de intensidad y la función de espectro de fase en el dominio de la frecuencia después de la transformada
 de Fourier inversa; y
 una etapa de cálculo del patrón de modulación basándose en la otra salida de función de espectro en la etapa de
 25 realización de la segunda sustitución, **caracterizado por que** en la etapa de realización de la transformada de Fourier inversa, la primera sustitución se realiza usando un resultado de multiplicación de una función que
 representa la forma de onda deseada por un coeficiente (α), y
 el coeficiente (α) tiene un valor en el que una diferencia entre la función ($\alpha \times Target_0(t)$) después de la multiplicación
 y la función de forma de onda de intensidad temporal ($b_{n, k}(t)$) después de la transformada de Fourier es menor
 30 que una diferencia antes de la multiplicación del coeficiente.
9. Un medio legible por ordenador no transitorio que tiene el programa de cálculo de patrón de modulación de acuerdo con la reivindicación 8 almacenado en el mismo.

Fig.1

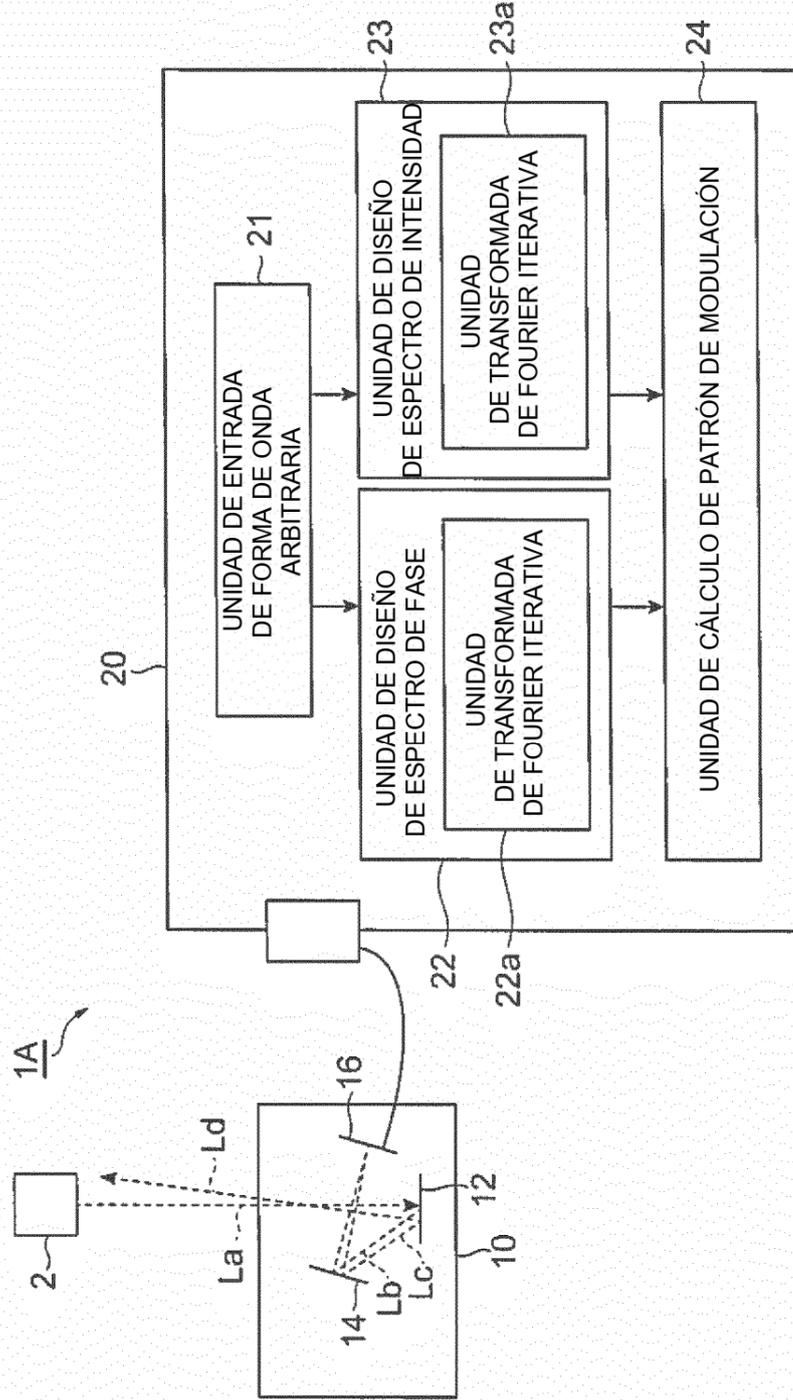


Fig.2

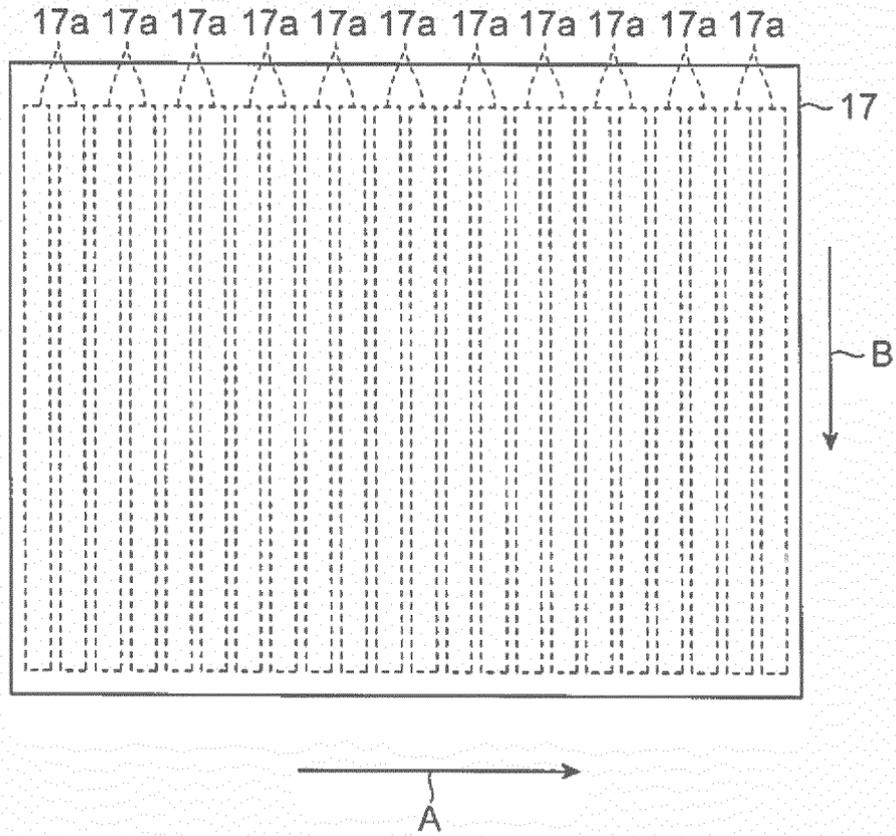
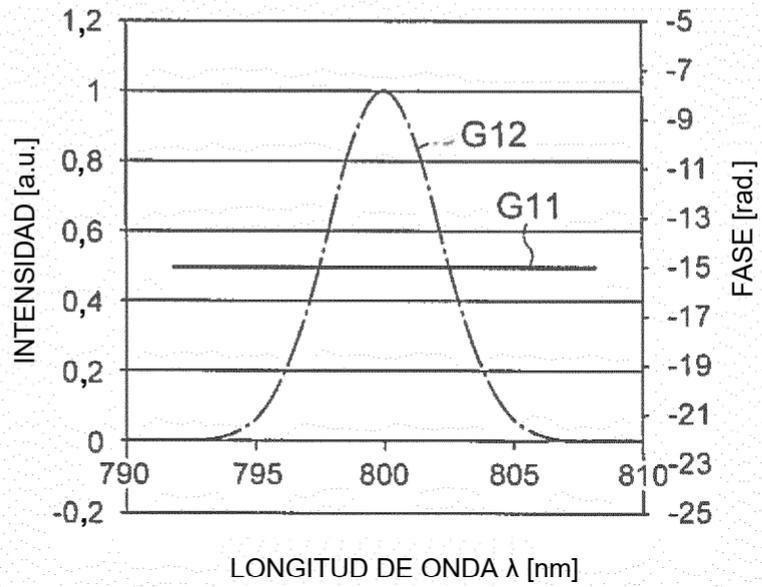


Fig.3

(a)



(b)

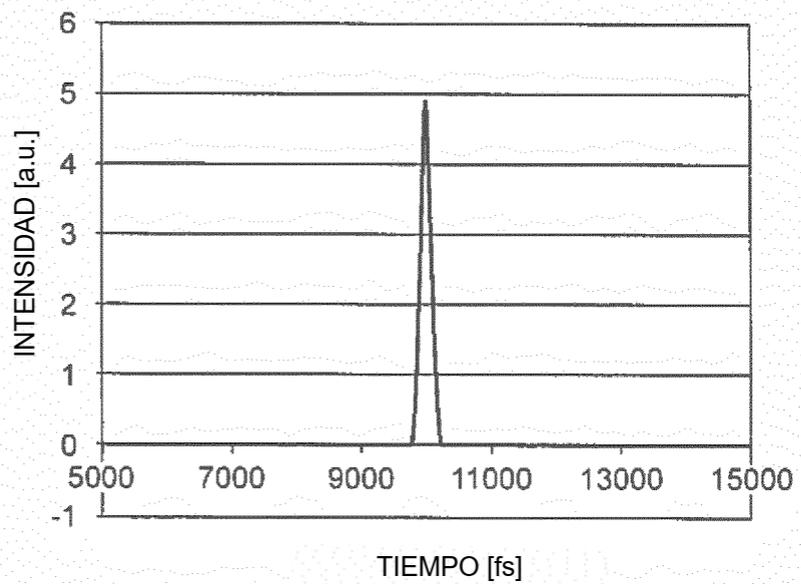


Fig.4

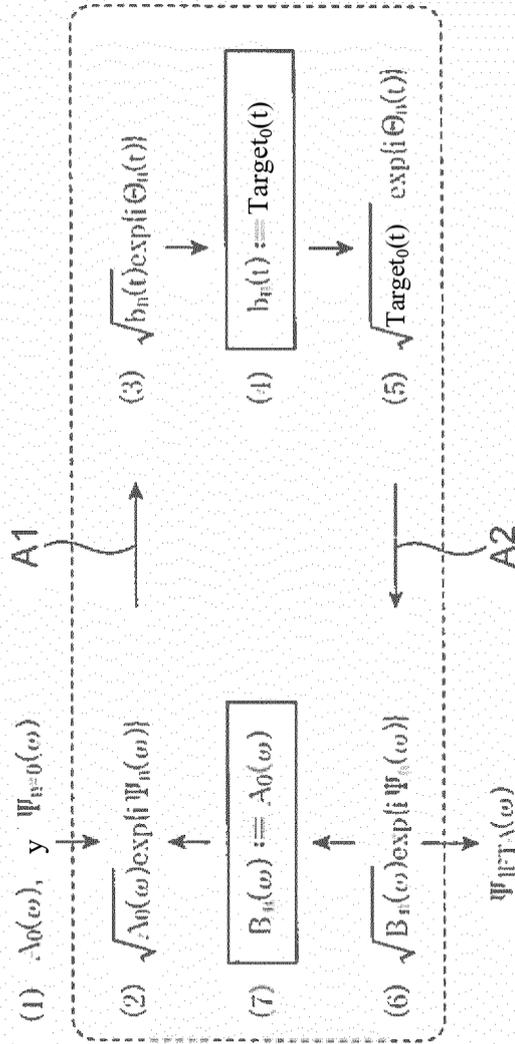


Fig.5

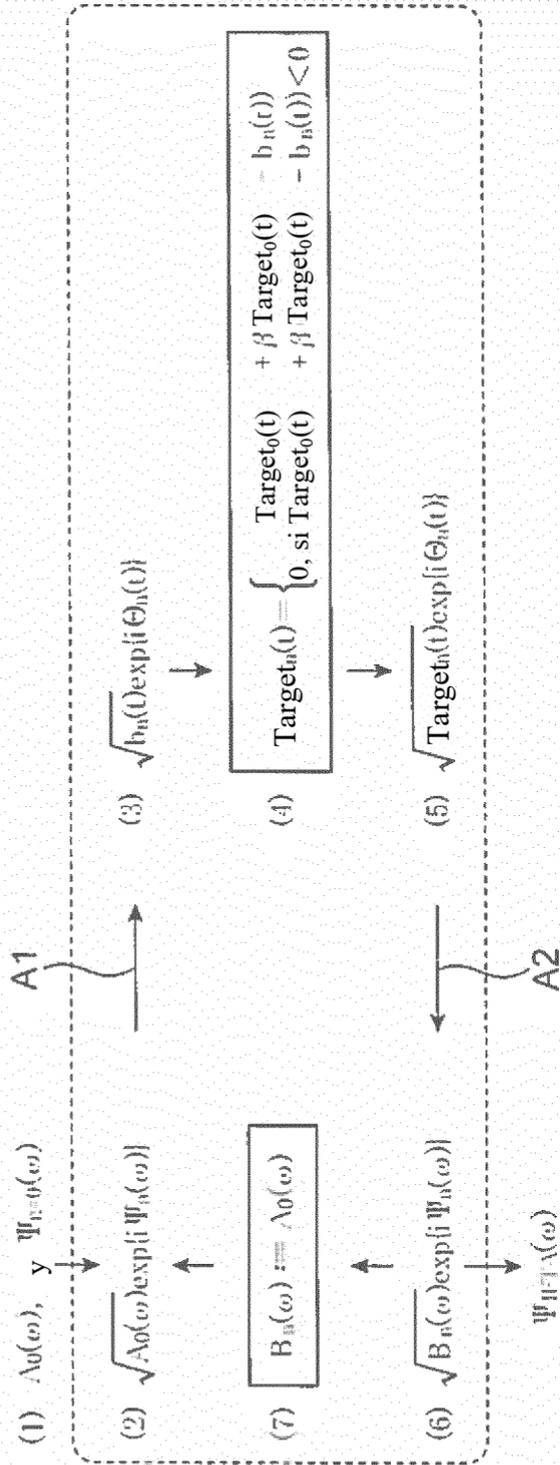


Fig.6

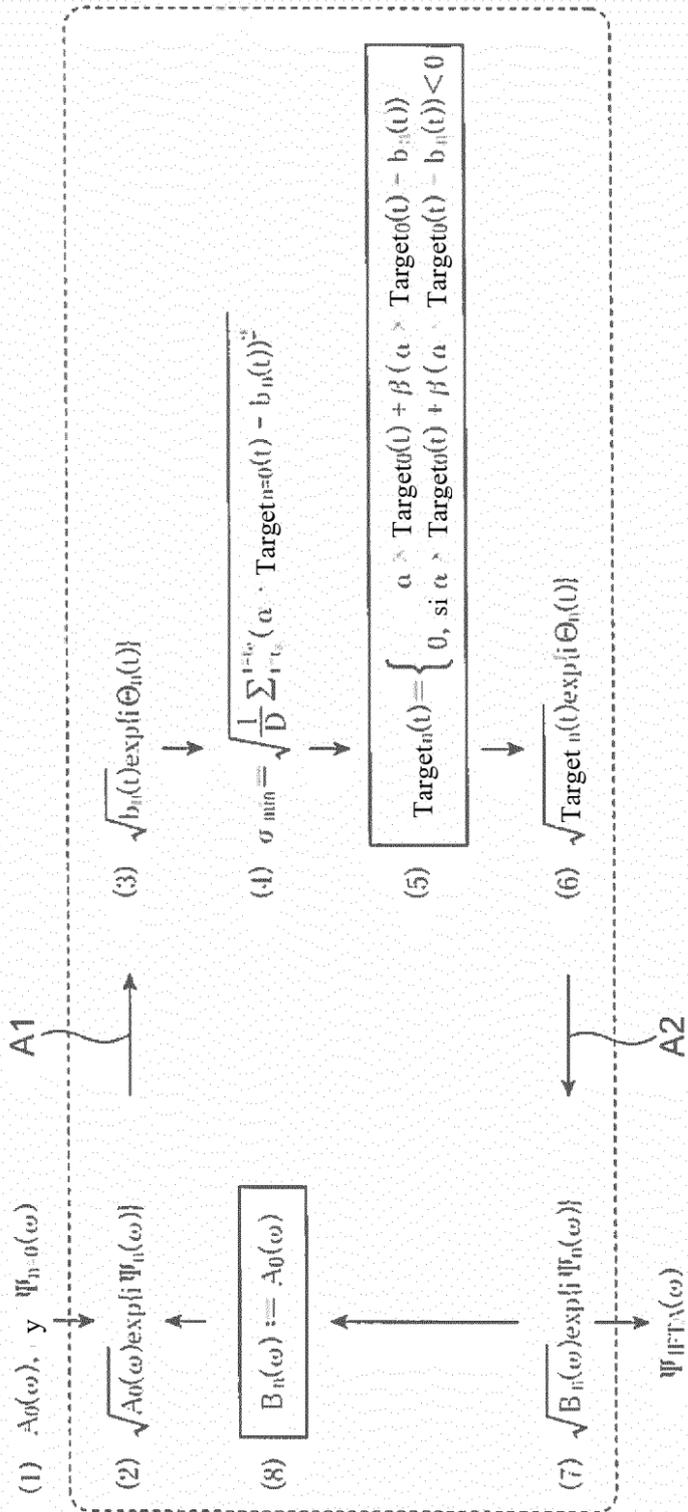


Fig.7

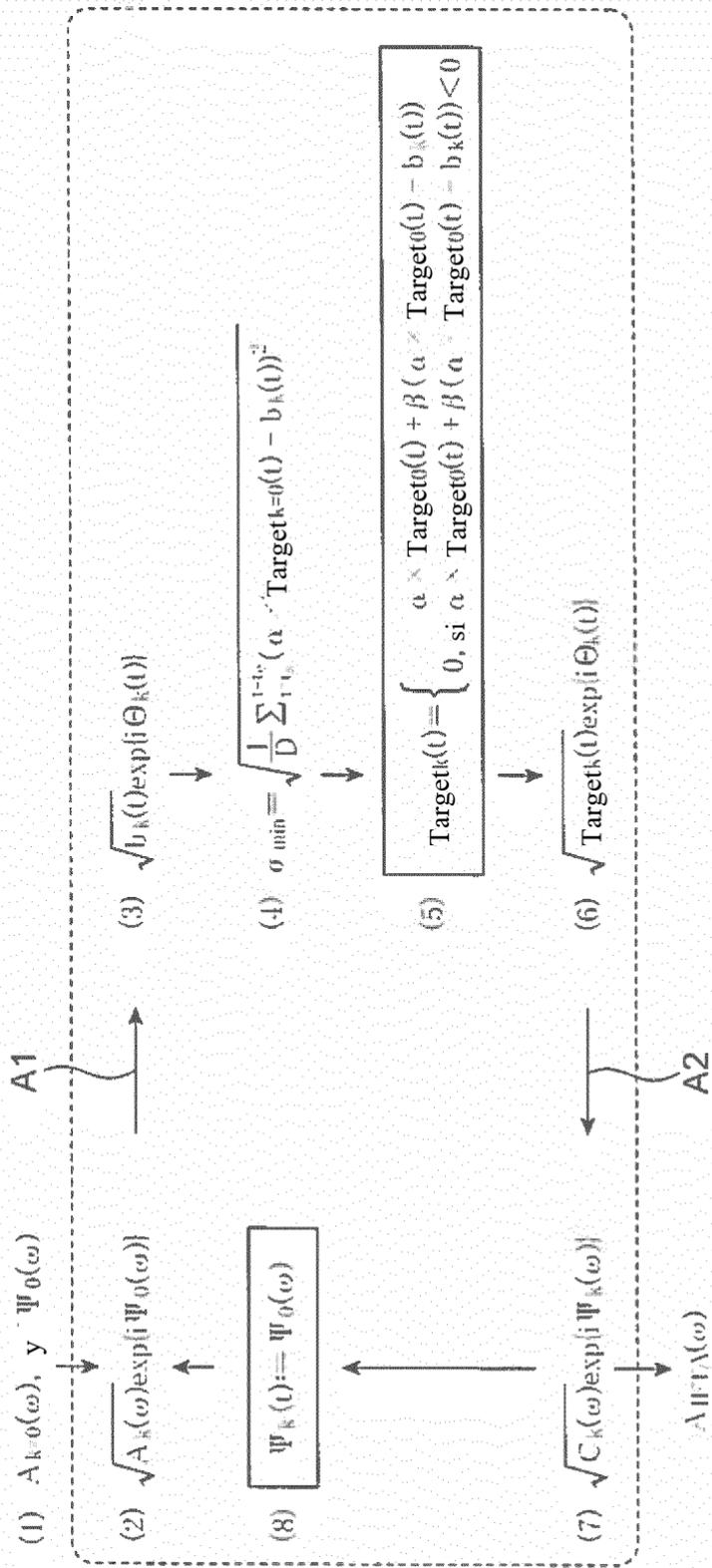


Fig.8

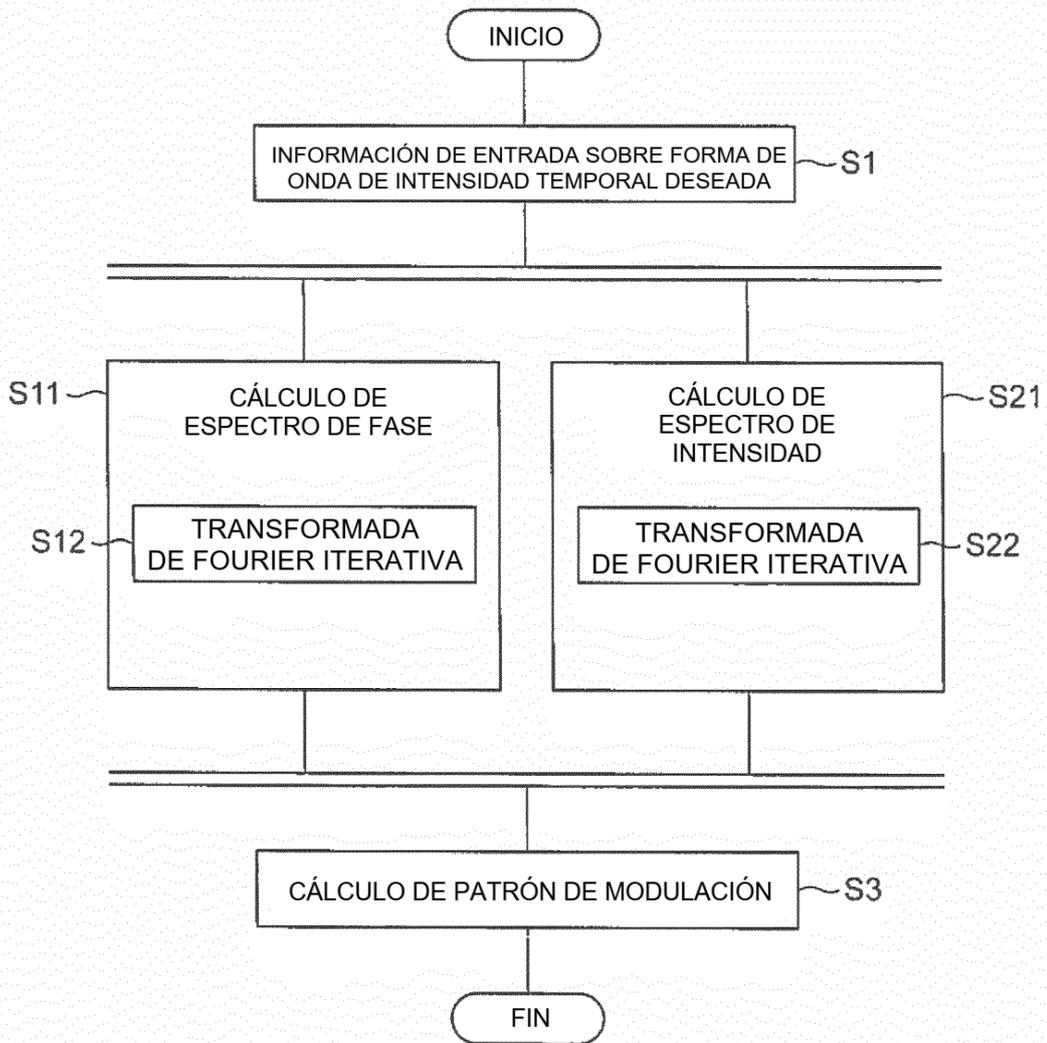


Fig.9

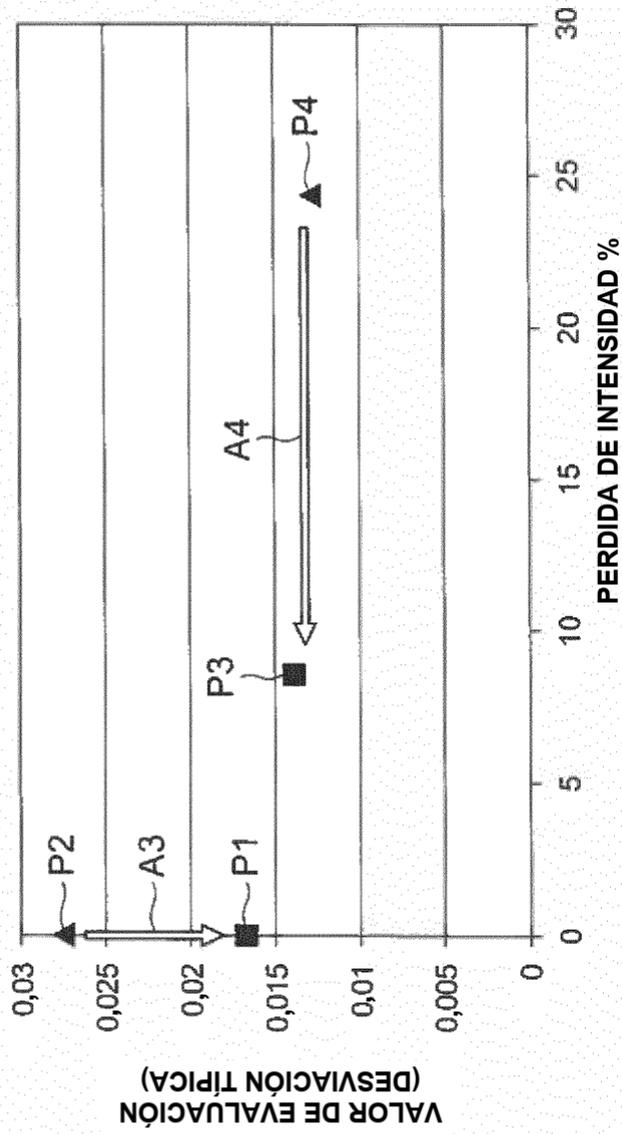


Fig.10

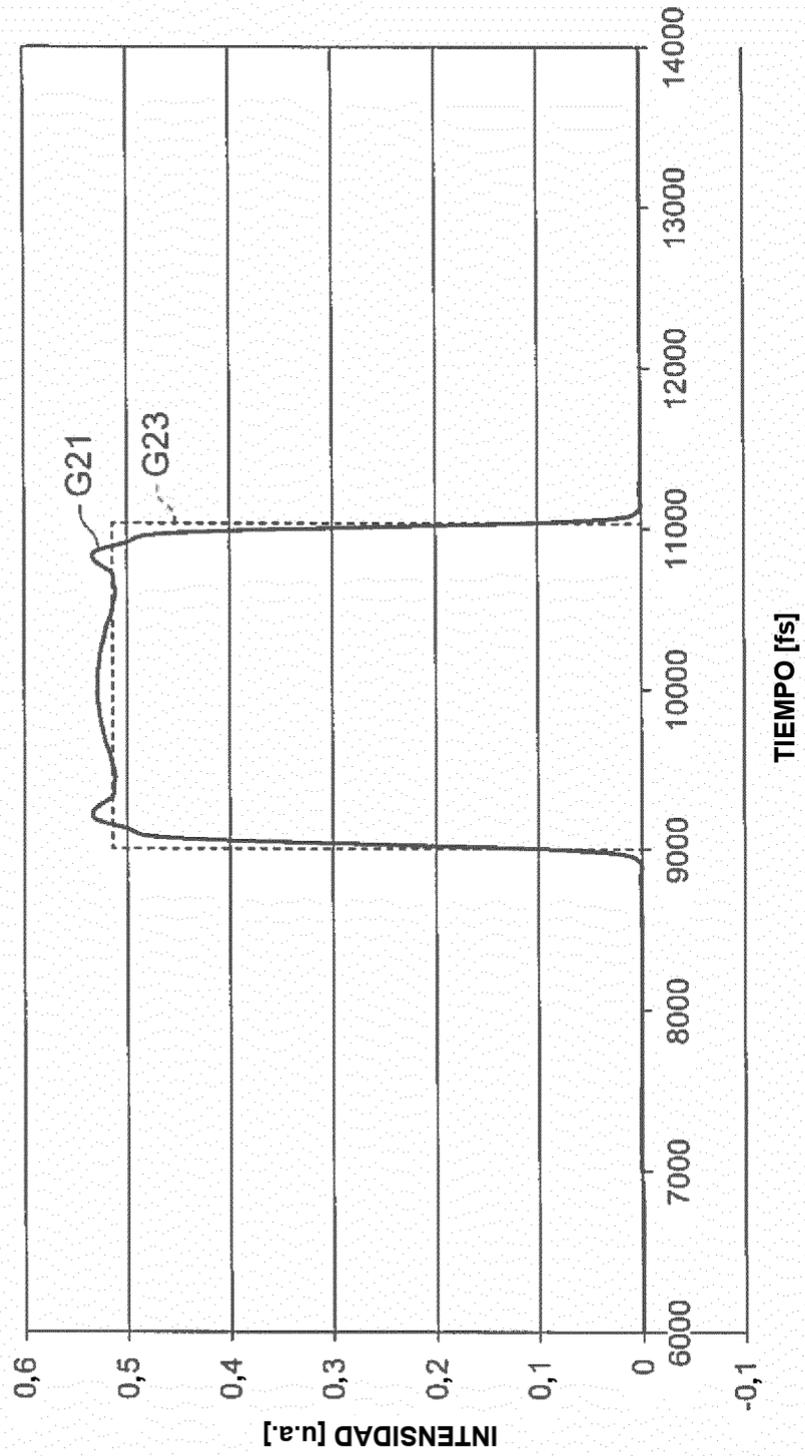


Fig.11

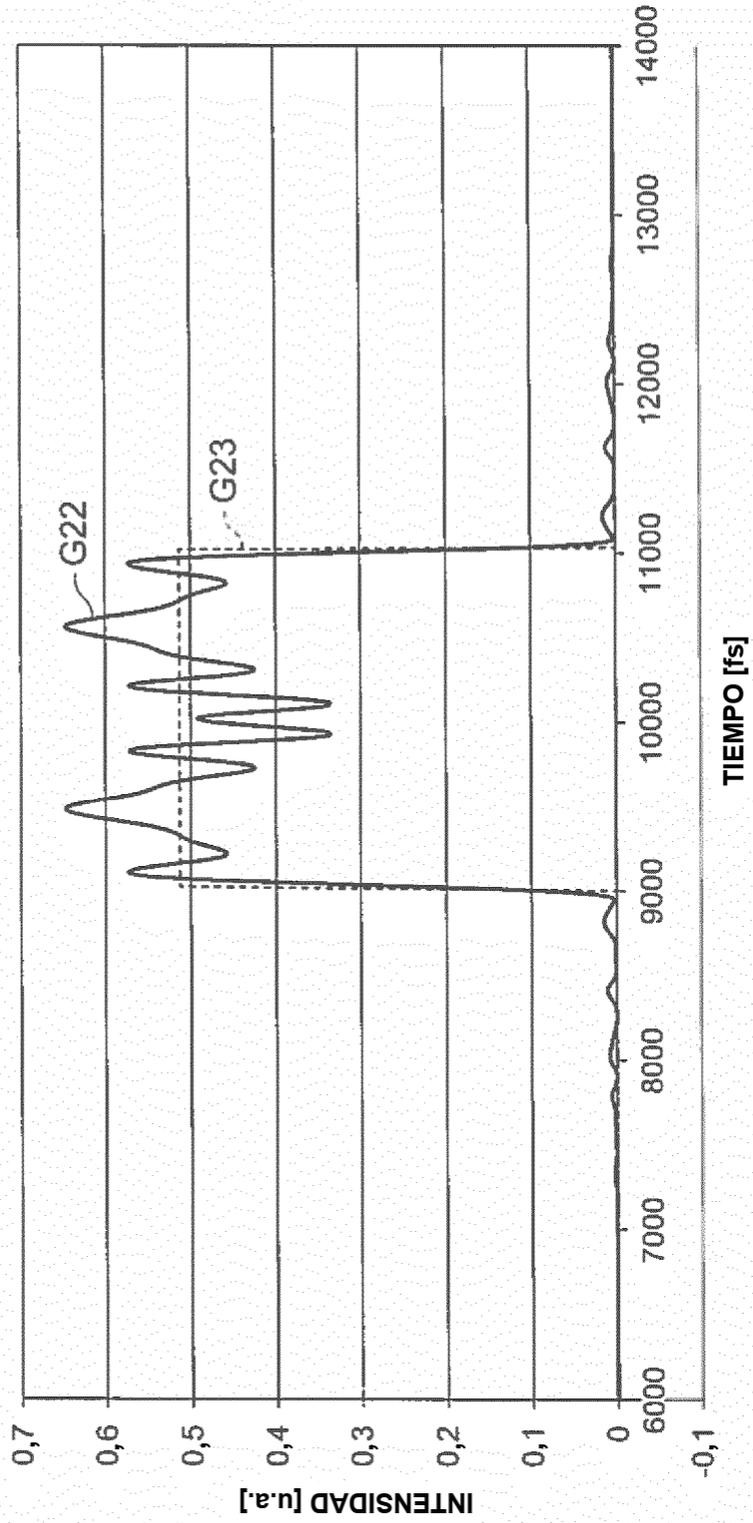


Fig.12

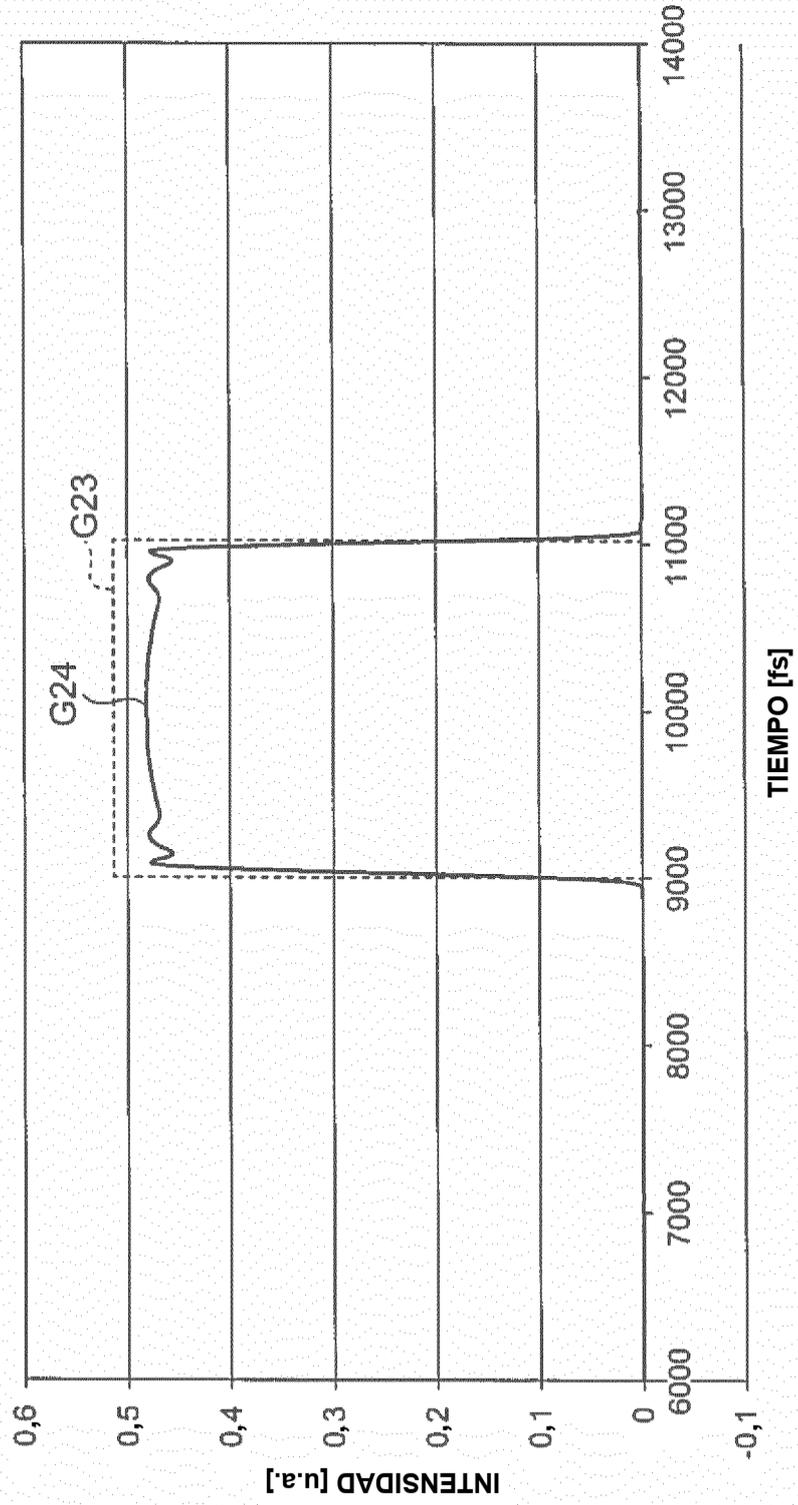


Fig.13

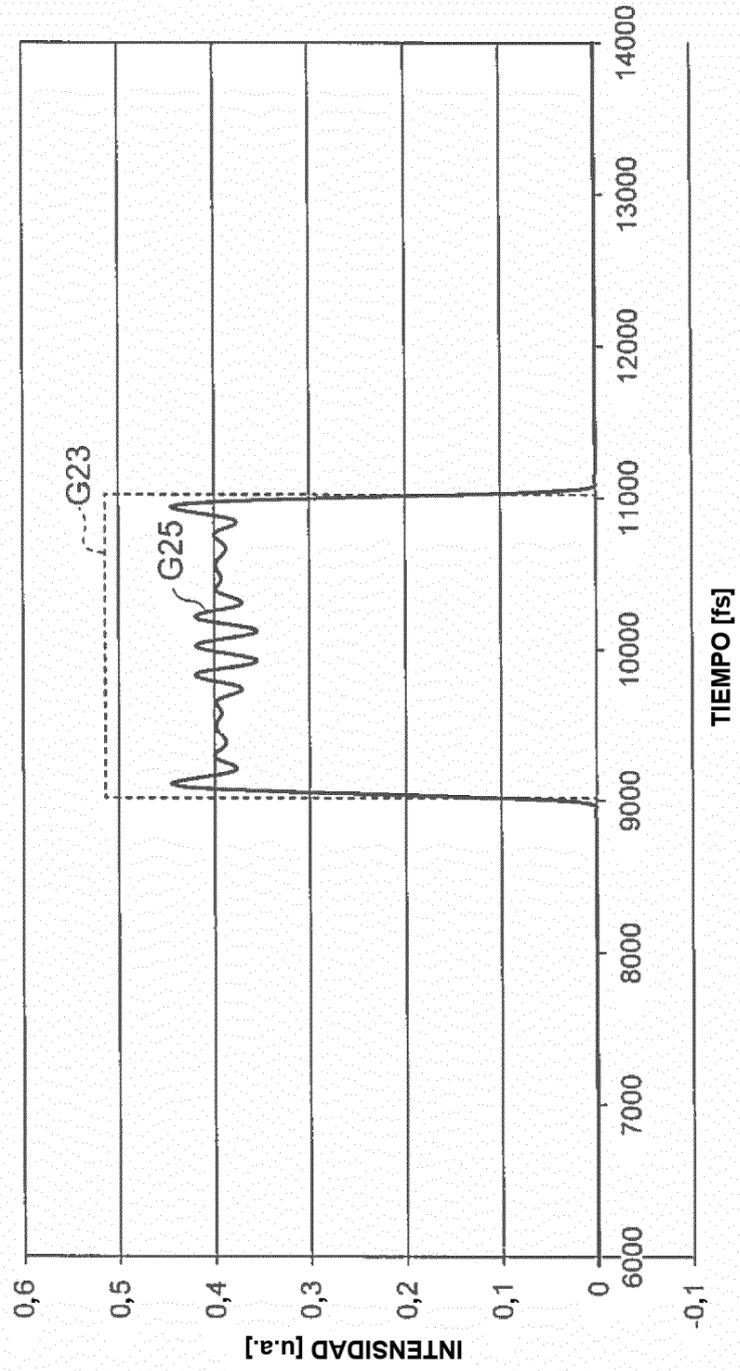


Fig.14

